

BODEMKUNDIG INSTITUUT GRONINGEN.

BIJDRAGEN TOT DE KENNIS VAN EENIGE NATUURKUNDIGE
GROOTHEDEN VAN DEN GROND.4. BEPALING VAN DEN DOORLAATFACTOR (1) VAN DEN GROND MET BEHULP
VAN POMPPROEVEN (Z.G. BOORGATENMETHODE),

DOOR

S. B. HOOGHOUTD.

(Ingezonden 16 Juli 1936.)

HOOFDSTUK I.

INLEIDING.

In een vorig artikel (2) heb ik de methode aangegeven om den doorlaatfactor van gronden van de eerste soort (in een éénkorrelstructuur) exact in het laboratorium te bepalen. Ook werd hierin de juistheid van een door KOZENY afgeleide betrekking bewezen. Deze betrekking moet gebruikt worden om den, in het laboratorium bepaalden, doorlaatfactor om te rekenen op de omstandigheden (poriënvolume, luchtgehalte en de temperatuur van het grondwater), zooals deze in de natuurlijke ligging en omstandigheden van de beschouwde gronden voorkomen. Bovengenoemde methode kan echter vrijwel *alleen* worden toegepast bij zandgronden, daar alleen bij deze gronden kan worden verondersteld, dat ze in den natuurlijke toestand — althans onder den bouwvoor en zeker onder het phreatisch oppervlak — in een éénkorrelstructuur voorkomen. Genoemde methode is dus *niet* geschikt voor gronden van de tweede soort (= gronden met een structuur in de natuurlijke ligging); d. w. z. dus in het algemeen niet voor klei-, leem-, zavel- en dergelijke gronden, daar deze in de natuurlijke ligging vrijwel steeds een structuur bezitten.

Voor gronden van de tweede soort zijn er in elk geval twee methoden aan te wijzen om dezen doorlaatfactor exact te bepalen. Beide methoden moeten uit den aard der zaak op de te onderzoeken gronden ter plaatse en onder de natuurlijke omstandigheden worden toegepast.

De *eerste* methode, die de doorlaattactoren (= k-cijfers) het nauwkeurigste bepaalt, is die, welke gebruik maakt van grondwaterstandsmetingen midden tusschen en boven drains (resp. midden tusschen en in greppels, enz.) en van debietmetingen van deze drains (greppels, enz.). Deze methode — in het vervolg aangeduid als de „eerste methode” — zal echter in een volgend

artikel worden besproken; een voorloopige publicatie hierover is opgenomen in de Transactions of the Third International Congress of Soil Science Oxford, Vol. I, blz. 397, 1935, waarnaar voorloopig mag worden verwezen. Hier kan worden volstaan met mede te deelen, dat deze methode daarom nauwkeuriger cijfers geeft dan de hieronder nog te bespreken tweede methode, omdat voor de meeste gevallen voor dezelfde laag grond direct den gemiddelden doorlaatfactor van een groot gebied (bijv. bij 3 drains op 10 m onderlingen afstand en 200 m lengte reeds van $3 \cdot 10 \cdot 200 = 6000 \text{ m}^2$) kan worden bepaald, terwijl bovendien hier relatief gemakkelijk iedereen dag waarnemingen kunnen worden verricht, waardoor vele waarnemingen voor de berekening van den doorlaatfactor ter beschikking staan.

De tweede methode berust op het meten van de stijgsnelheid van het grondwater in boorgaten, nadat dit water er van te voren gedeeltelijk is uitgepompt. Deze methode—in het vervolg aangeduid als de „tweede methode” of als de „boorgatenmethode”— is, evenals de eerste methode, geschikt om de doorlatendheid van slechts dunne grondlagen (tot eenige meters) te bepalen, zooals voor landbouwkundige doeleinden noodzakelijk is. Als nadeel van deze methode ten opzichte van de eerste methode is reeds het feit genoemd, dat de nauwkeurigheid van de bepaalde doorlaatfactoren geringer is. De reden daarvan ligt in het feit, dat met deze methode slechts den doorlaatfactor van een cylinder grond van relatief bescheiden afmetingen om het boorgat bepaald kan worden. Is de grond in horizontale richting (d. i. van plek tot plek) heterogeen, dan kan dus alleen een *gemiddelde* doorlaatfactor van den grond van een grooter gebied worden verkregen door meerdere bepalingen in een voldoende groot aantal boorgaten te verrichten, die regelmatig over het betreffende terrein verdeeld liggen. Een tweede nadeel is verder nog, dat in ieder boorgat in het algemeen slechts eenmaal of hoogstens slechts enkele malen gemeten kan worden (3). Een voordeel ten opzichte van de eerste methode is echter, dat zij *steeds* kan worden toegepast en met name in het geval, dat de grond niet begreppeld of gedraineerd is en dus de eerste methode niet kan worden toegepast.

Verder kan nog worden opgemerkt, dat beide methoden alleen den doorlaatfactor van den grond *onder* het phreatisch oppervlak kunnen bepalen. Voor vele vraagstukken, die in verband staan met den afvoer of den toevoer van water, is de doorlatendheid van deze lagen ook het belangrijkste. Wel moet men echter deze bepalingen in het algemeen in den herfst, winter of het vroege voorjaar uitvoeren, daar in deze tijden de hoogste grondwaterstanden voorkomen en dus de doorlatendheid van de dikste laag grond bepaald kan worden.

Beide methoden zijn vooral toegepast, en theoretisch gedeeltelijk ook

uitgewerkt, door DISERENS (4). De door hem aangegeven formules zijn, wat de eerste methode betreft, in het algemeen voor de gronden in ons land zonder meer niet te gebruiken, daar voor de gronden in ons land bijv. gerekend moet worden op een verandering van de doorlatendheid in het profiel in verticale richting, enz., hetgeen dus wil zeggen, dat in het algemeen met het aanwezig zijn van heterogene gronden rekening moet worden gehouden resp. moet kunnen worden gehouden; bovendien was het noodzakelijk een methode uit te werken om uit de beschikbare gegevens deze onbekende verandering van de doorlatendheid te berekenen, waarvoor naar de bovengenoemde (Oxford, deel I) en een volgende publicatie kan worden verwezen.

Wat de tweede methode betreft, blijkt de door dezen onderzoeker aangegeven formule te beknopt te zijn, terwijl bovendien ook de heterogeniteit van den grond in verticale richting, evenals het voorkomen van een doorlatenden ondergrond in aanmerking moet kunnen worden genomen.

In de volgende hoofdstukken zal nu deze tweede methode, dus de zgn. boorgatenmethode, nader worden besproken. In hoofdstuk II zal het theoretische gedeelte worden behandeld. In hoofdstuk III zullen de resultaten van de controle-metingen worden medegedeeld, die verricht zijn om de in hoofdstuk II besproken formules voor de berekening van den doorlaatfactor te controleeren, resp. aan te vullen. In hoofdstuk IV zal besproken worden het resultaat van een vergelijkend onderzoek van de bepaling van de doorlatendheid van dezelfde laag grond van een gedraineerd terrein volgens de twee genoemde methoden. In dit hoofdstuk zal verder aangegeven worden op welke wijze de metingen op het land moeten worden uitgevoerd, terwijl tevens nog de resultaten van enkele bepalingen zullen worden besproken.

HOOFDSTUK II.

THEORETISCHE BESCHOUWINGEN.

§ 1. DE VERGELIJKING VAN DISERENS (HOMOGENE GROND).

Zooals reeds is opgemerkt, heeft DISERENS het eerste deze methode toegepast. Door dezen onderzoeker is dan ook het eerst een formule aangegeven om uit de gemeten stijgsnelheid van het water in boorgaten, nadat hier eerst het water voor een gedeelte is uitgepompt, den doorlaatfactor van de wet van DUPUIT-DARCY te berekenen. Deze formule ziet er aldus uit (zie ook figuur 1):

$$A = \frac{1000}{Ht} \log \frac{y_0}{y} \quad (1)$$

(3) B. 71.

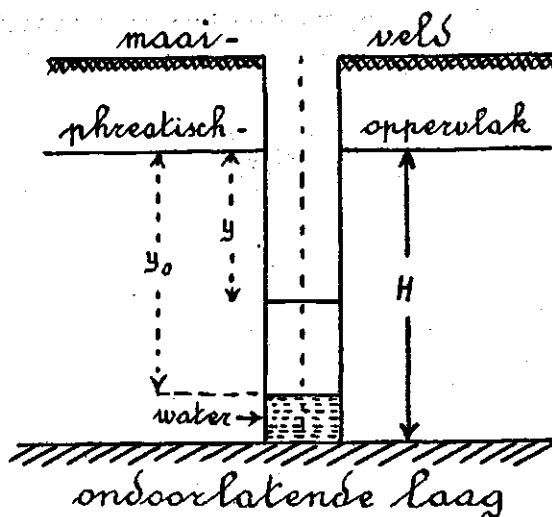


FIGURE I.

Hierin stelt A een factor voor, die evenredig is met den doorlaatfactor van den grond, t den tijd in minuten sedert het leegpompen, H den afstand in meters van het phreatisch oppervlak tot den bodem van het boorgat en y_0 en y de resp. afstanden van het wateroppervlak in het boorgat tot het phreatisch oppervlak op den tijd $t = 0$ en $t = t$ na het leegpompen.

Het verband tusschen A en den doorlaatfactor werd door dezen onderzoeker gevonden door op hetzelfde gedraineerde terrein gelijktijdig deze cijfers met behulp van de eerste en tweede methode (zie hoofdstuk I) te bepalen. Hierbij werd oorspronkelijk gevonden, dat $A = 1$, indien $k = 2,5 \cdot 10^{-6}$ m. p. sec., welk cijfer later (5) werd veranderd tot $2,7 \cdot 10^{-6}$ m. p. sec. of dus 0,233 m. p. 24 uur.

Nu zal het duidelijk zijn, dat formule (1) onvolledig is. Zij brengt immers)noch den invloed van de doorsnede van het boorgat, noch den invloed van een doorlatenden ondergrond onder den bodem van het boorgat, noch den invloed van de eventueel aanwezige heterogeniteit van den grond ten opzichte van de doorlatendheid tot uiting. Bij toepassing van formule (1) op metingen van de stijgsnelheid in boorgaten van ± 20 om doorsnede in gedraineerd land, waarbij dus ook de eerste methode voor de bepaling van den doorlaatfactor kon worden toegepast, bleek dan ook reeds spoedig, dat geen overeenstemming tusschen beide methoden bestond, maar de tweede methode eenige malen hogere waarden gaf. De proefnemingen op het veld zelf werden dan ook voorloopig stopgezet, daar eerst blijkbaar beter uitgewerkte vergelijkingen als vergelijking (1) niet alleen moesten worden opgesteld, maar

vooral ook experimenteel onder nauwkeurig bekende omstandigheden moesten worden getoetst.

Tevens moest dan ten slotte nog worden nagegaan of met de nieuw opgestelde en gecontroleerde vergelijkingen nu wel uit de stijgsnelheid van het water in boorgaten doorlaatfactoren berekend worden, die overeenstemmen met de factoren, zooals deze in hetzelfde land volgens de eerste methode kunnen worden verkregen.

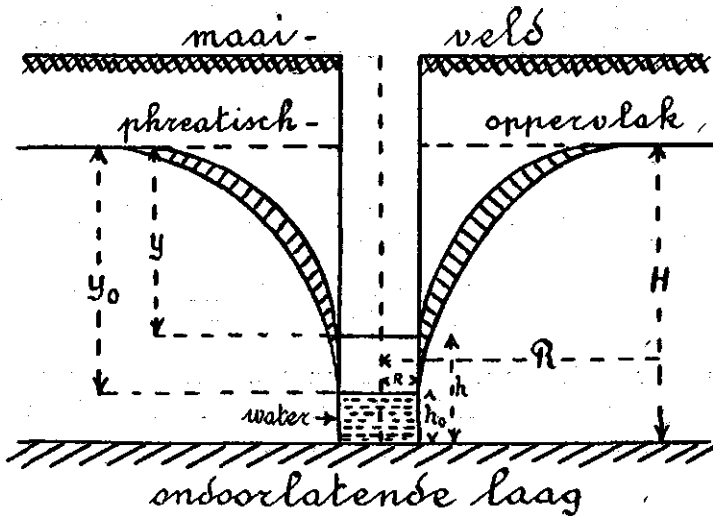
§ 2. VERGELIJKINGEN, AFGELEID ONDER DE VERONDERSTELLING, DAT DE INZINKING VAN HET PHREATISCH OPPERVLAK RONDOM HET BOORGAT ZICH VOLLEDIG HEEFT INGESTELD.

a. De vergelijking van DONAT (homogene grond).

In de tweede plaats zal de formule van DONAT (6) besproken worden. Deze onderzoeker gaat uit van de formule voor de waterbeweging naar een volkomen (tot de ondoorlatende laag reikenden) put, n.l. van de vergelijking:

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r}} \quad (2)$$

waarin Q het debiet, k den doorlaatfactor, H den afstand van het phreatisch oppervlak tot den bodem van het boorgat, h den afstand van den waterspiegel in het boorgat tot den bodem van het boorgat, r den straal van het boorgat en R den straal van het voedingsgebied (zie figuur II) voorstelt.



FIGUUR II.

Stelt men nu $\pi: \ln \frac{R}{r} = a = \text{constant}$, dan ontstaat dus:

$$Q = ak (H^2 - h_0^2) \quad (3)$$

Wordt nu met pompen opgehouden, dan zal het toestroomende water het boorgat vullen en zal de waterspiegel dus daarin gaan stijgen, d. w. z. h_0 verandert. Op den tijd $t = 0$ na het stopzetten van het pompen is dus deze waarde nog h_0 ; op den tijd $t = t$ gelijk aan h . Verloopt deze stijging in den tijd dt over de lengte dh , dan is dus

$$Qdt = Fdh, \quad (4)$$

of ingevuld in vergelijking (3):

$$\frac{Fdh}{dt} = ak (H^2 - h^2), \quad (5)$$

waarin F de doorsnede van het boorgat voorstelt. Na integratie van $t = 0$ en $h = h_0$ tot $t = t$ en $h = h$, ontstaat:

$$\ln \frac{H+h}{H-h} \cdot \frac{H-h_0}{H+h_0} = \frac{2aHkt}{F} \quad (6)$$

In de vergelijkingen voor de berekening van den doorlaatfactor uit de stijgsnelheid van het water in boorgaten rekent men gewoonlijk de afstanden van de waterspiegels in het boorgat tot het phreatisch oppervlak in den grond, voordat met pompen was begonnen (zie figuur II). Doet men dit voor de vergelijking (6), dan gaat deze vergelijking, daar $H - h = y$; $H + h = 2H - y$; $H - h_0 = y_0$ en $H + h_0 = 2H - y_0$, over in:

$$\ln \left(\frac{y_0}{y} \cdot \frac{2H - y}{2H - y_0} \right) = \frac{2aHkt}{F} \quad (7)$$

Gaat men van de natuurlijke in de Briggiaansche logarithmen over, dan ontstaat, na invulling van $F = \pi r^2$ en na een kleine omwerking:

$$k = \frac{1,15 \pi r^2}{aHt} \log \left(\frac{y_0}{y} \cdot \frac{2H - y}{2H - y_0} \right) \quad (8)$$

Volgens DONAT kan men nu den factor a als een constante beschouwen en kan hiervoor volgens de onderzoekingen van PORCHET (7) de waarde 0,33 worden aangenomen, zoodat vergelijking (7) overgaat in:

$$k = 10,9 \frac{r^2}{Ht} \log \left(\frac{y_0}{y} \cdot \frac{2H - y}{2H - y_0} \right) \quad (9)$$

In dezen vorm is de vergelijking bruikbaar om den doorlaatfactor uit de stijgsnelheid te berekenen. Geeft men nu r en H aan in meters en t in etmalen dan wordt k dus uitgedrukt in meters per 24 uur. Handiger is het echter t in seconden aan te geven, waardoor het rechterlid van vergelijking (9) nog met 86 400 moet worden vermenigvuldigd om k in m per 24 uur te kunnen blijven uitdrukken.

Een verdere vereenvoudiging heeft DONAT deze vergelijking (9) nog gegeven door

$$\log \left(\frac{y_0}{y} \cdot \frac{2H - y}{2H - y_0} \right) = m \log \frac{y_0}{y}$$

te stellen. Voor den factor m wordt dan een voor het waarnemingsbereik gekozen gemiddelde genomen. In het geval $y_0 = H$, neemt m voor de waarden van $y = 0,9 H$ tot $0,1 H \pm$ rechthoekig van 1,91 tot 1,28 af. Het gemiddelde is dus 1,6. Voor y_0 kleiner dan H , zooals gewoonlijk bij de metingen het geval is, is het gemiddelde lager, zoodat gemiddeld $m = 1,5$ genomen kan worden, waardoor de vergelijking (9) overgaat in:

$$k = 16,3 \frac{r^2}{Ht} \log \frac{y_0}{y} \quad (10)$$

Zien we nu af van vergelijking (10), die, blijkens zijn afleiding ten minste hoogstens een ruwe benadering van vergelijking (9) kan zijn, dan zijn tegen de juistheid van vergelijking (9) de volgende bezwaren in te brengen:

1. Vergelijking (9) is afgeleid van vergelijking (3). Deze laatste vergelijking geldt echter alleen, wanneer zóo lang gepompt is, totdat bij een zelfde waarde van h (en natuurlijk ook van H) het debiet niet meer verandert. Men kan dit ook uitdrukken door te zeggen, dat de trechtervormige inzinking van het phreatisch oppervlak om het boorgat zich eerst volledig bij een constant debiet moet hebben ingesteld. Bij de toepassing van vergelijking (9) op ondiepe boorgaten van 1 à 2 m, zooals zij voor onze doeleinden worden gebruikt en waarvoor DONAT haar ook wil gebruiken, is dit zeker niet het geval. De uitvoering van de meting van de stijgsnelheid van het water in boorgaten komt immers hierop neer, dat na het boren van de gaten wordt gewacht, totdat de grondwaterstand zich in deze gaten heeft ingesteld. Daarna wordt het water voor het grootste gedeelte uit het boorgat gepompt, waarna *direct* de stijgsnelheid gemeten wordt. Deze laatste metingen duren bovendien gewoonlijk slechts korten tijd. Er is dan ook geen sprake van, dat de trechtervormige inzinking om het boorgat zich al in een dergelijken korten tijd heeft ingesteld. Integendeel kan met grootere benadering worden

gezegd, dat, wanneer vlak na het leegpompen wordt gemeten en de meting van de stijgsnelheid slechts over enkele procenten van y_0 wordt voortgezet, men mag veronderstellen, dat deze trechtervormige inzinking van slechts geringe afmetingen zal zijn, of dus in den tijd, noodig voor het meten van de stijgsnelheid, de stroomingstoestand (vorm en ligging van de stroombanen) practisch constant is.

2. Gaat men de door DONAT aangehaalde onderzoeken van PORCHET (zie noot 7, blz. 16) na, dan blijkt, dat deze onderzoeker voor de waarde van den factor $\frac{R}{r}$ als een gemiddelde van de metingen in 40 verschillende boorputten heeft gevonden 2,02. Dit cijfer varieerde voor de afzonderlijke boorputten nogal sterk; nl. met als uitersten zelfs 3,18 en 1,05 (verhouding = 3,03 : 1). Aan de waarde van den factor $a = \pi: \ln \frac{R}{r} =$ gemiddeld 0,33 kleven dan ook groote fouten. Met evenveel recht kan men bovendien uit deze cijfers van PORCHET afleiden, dat de waarde van de breuk $\log \frac{R}{rH}$ constant blijft. Als uitersten vond ik hiervoor uit de gegevens van PORCHET 2,558 en 0,857, waarvan de verhouding is 2,98 : 1.

3. Verder is bij de integratie van de vergelijking 5 verondersteld, dat de factor $\ln \frac{R}{r}$ onafhankelijk is van h . Dit lijkt mij niet juist; althans niet, wanneer de snelheid over meer dan enkele procenten van y_0 wordt nagegaan. Merkwaardig is, dat blijkens de figuur 1 in de publicatie van DONAT ook hier R afneemt bij een grootere waarde van h of m. a. w., dat volgens de teekening de factor $a = \pi: \ln \frac{R}{r}$ niet constant blijft.

4. Ook is in deze vergelijking 9 niet het feit in rekening gebracht, dat niet alleen het boorgat met water moet worden gevuld, maar dat ook de holtten en poriën in den grond (voor zoover ze onder invloed van capillaire krachten althans niet gevuld blijven) om het boorgat (geharceerd gedeelte) gevuld moeten worden. Ten slotte is in de vergelijking 9 ook niet de invloed van een doorlatenden ondergrond onder den bodem van het boorgat in aanmerking genomen.

Zooals in hoofdstuk III zal blijken, geeft de vergelijking (9) dan ook onjuiste waarden, wanneer zij wordt toegepast op waarnemingen, die onder exact bekende omstandigheden zijn verricht. Toch zal bij de bespreking van

de contrôle-metingen (zie hoofdstuk III) blijken, dat voor homogene gronden, waarbij de ondoorlatende laag bereikt wordt, bijna dezelfde vergelijking wordt gevonden als de vergelijking (10). Men zou nu kunnen denken, dat ondanks mogelijke critiek deze vergelijking toch een juister beeld geeft, als men geneigd is te denken. Het is echter ook mogelijk, dat deze overeenstemming slechts toevallig is. Om dit uit te maken moeten, volgens hetzelfde principe en volgens een verder hieronder nog aan te geven methode, de vergelijkingen voor de stijgsnelheid van het water in boorputten in heterogene gronden worden ontwikkeld. Door nu na te gaan, welke van deze 2 typen het beste met de resultaten van de contrôle-metingen overeenkomen, is dus na te gaan of de veronderstelling, dat de trechtervormige inzinking in het phreatisch oppervlak reeds is ingesteld, juister is dan de veronderstelling, die deze inzinking in het phreatisch oppervlak juist als te verwaarloozen klein beschouwt; dan wel, of het omgekeerde juister is. Gezien het feit, dat vlak na het leegpompen van de boorgaten de metingen van de stijgsnelheid beginnen, lijkt de laatste veronderstelling, zooals reeds is opgemerkt, de juiste. Anderzijds spreekt het vanzelf, dat, wanneer voor metingen voor andere doeleinden langer doorgepompt wordt en de trechtervormige inzinking in het phreatisch oppervlak zich wel heeft ingesteld, de vergelijkingen van het type DONAT juister zullen zijn. In elk geval heb ik daarom gemeend ook de vergelijking voor de strooming van het water naar een volkomen put in heterogene gronden te moeten afleiden en daaruit weer de vergelijking voor de stijgsnelheid van het water na stopzetting van het pompen te moeten opstellen.

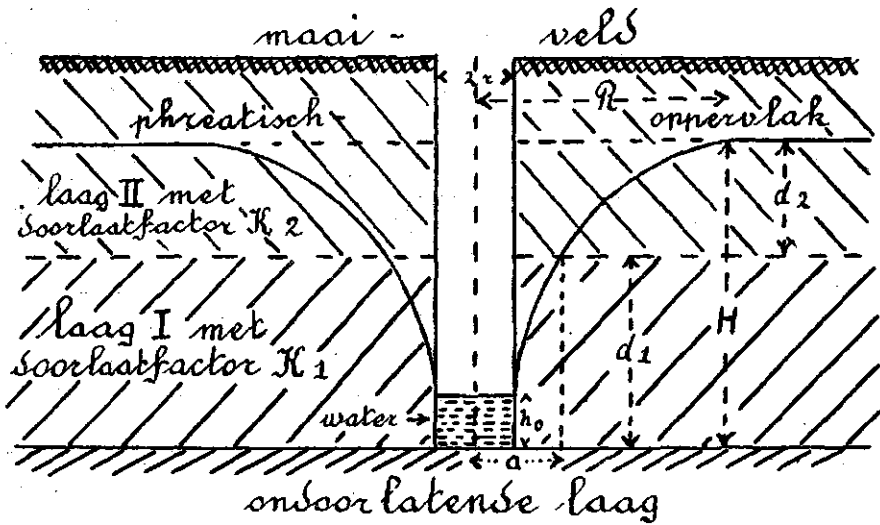
b. Vergelijkingen voor de strooming van het water in een volkomen put in heterogene gronden.

Bij de bovengenoemde bezwaren tegen vergelijking (9) ¹⁾ is niet de heterogeniteit van den grond genoemd. Het is namelijk zeer goed mogelijk de heterogeniteit van den grond in aanmerking te nemen. Dit is mogelijk, zoodra de vergelijkingen bekend zijn voor de toestrooming van het water naar een volkomen put, indien,

of in het betreffende profiel 2 of meer lagen met een verschillende doorlatendheid voorkomen,

of de doorlatendheid continu met de diepte onder het maaiveld, of, wat hetzelfde is, met de hoogte boven den bodem van het boorgat verandert.

¹⁾ Gezien den korten duur van de pompproef behoeft de neerslag niet in aanmerking te worden genomen. Dit is alleen noodig, wanneer de pompproeven langen tijd worden voortgezet, waarop door STEGGEWENTZ (8) is gewezen.



FIGUUR III.

In figuur III is het geval weergegeven, dat 2 lagen met een verschillende doorlatendheid in het watervoerende profiel voorkomen en waarbij h_0 kleiner is genomen dan de dikte van de onderste laag ($= d_1$).

Voor de waarden van x kleiner dan a geldt:

$$Q = 2\pi x h k_1 \frac{dh}{dx} \quad (11)$$

Na integratie van $x = r$ en $h = h_0$ tot $x = x$ en $h = h$ ontstaat:

$$Q \ln \frac{x}{r} = \pi k_1 (h^2 - h_0^2) \quad (12)$$

Voor $x = a$ is $h = d_1$. Ingevuld in de vergelijking (12) ontstaat:

$$Q \ln \frac{a}{r} = \pi k_1 (d_1^2 - h_0^2) \quad (13)$$

Voor de waarden van x groter dan a en h groter dan d_1 geldt:

$$Q = 2\pi x ((d_1 k_1 + (h - d_1) k_2) \frac{dh}{dx} \quad (14)$$

Na integratie van $x = a$ en $h = d_1$ tot $x = x$ en $h = h$ ontstaat:

$$Q \ln \frac{x}{a} = 2\pi d_1 k_1 (h - d_1) + \pi k_2 (h^2 - d_1^2) - 2\pi k_2 d_1 (h - d_1) \quad (15)$$

Na invulling van de waarde van $Qlna$ uit de vergelijking (13) in de vergelijking (15) ontstaat, wanneer $n = \frac{k_2}{k_1}$ wordt gesteld:

$$Qln \frac{x}{r} = \pi (nk_1 h^2 - 2d_1 k_1 h(n-1) + k_1 d_1^2 (n-1) - k_1 h_0^2) \quad (16)$$

Daar verder voor $x = R$ $h = H$ is, gaat dus de vergelijking (16) over in:

$$Qln \frac{R}{r} = \pi (nk_1 H^2 - 2d_1 k_1 H(n-1) + k_1 d_1^2 (n-1) - k_1 h_0^2) \quad (17)$$

Op soortgelijke wijze is ook de vergelijking af te leiden voor het geval er meer dan 2 lagen in het profiel voorkomen. Verder moet men er wel op verdacht zijn, dat de vergelijking verandert naarmate h_0 grooter dan wel kleiner is dan d_1 . Is in het bovenstaande geval h_0 grooter dan d_1 , dan is de ten slotte verkregen eindvergelijking iets anders dan de vergelijking (17), daar voor alle waarden van x en h nu direct de vergelijking (14) geldt. Hierop kan korthedshalve echter niet nader worden ingegaan. Ook kan niet verder worden ingegaan op de afleiding van de vergelijking voor het geval, dat meer dan 2 lagen in het watervoerende profiel voorkomen. Wel zullen we de vergelijking afleiden voor het geval, dat de doorlatendheid continue volgens de een of andere functie met de hoogte boven de ondoorlatende laag verandert, daar dit het tweede typische voorbeeld van heterogeniteit van den grond is.

Verandert dus de doorlatendheid met de hoogte boven de ondoorlatende laag volgens de een of andere functie, — b. v. volgens de functie:

$$k_h = k_0 + bh,$$

waarin k_0 den doorlaatfactor in een uiterst dunne laag vlak boven de ondoorlatende laag en b een constante voorstelt —, dan stroomt dus door de geheele doorsnede op een afstand x van het centrum van het boorgat bij een verval $\frac{dh}{dx}$ in dit geval:

$$Q = 2\pi x \frac{dh}{dx} \int_{h=0}^{h=h} k_h dh = 2\pi x \frac{dh}{dx} \int_{h=0}^{h=h} (k_0 + bh) dh = 2\pi x (k_0 h + 0,5 bh^2) \frac{dh}{dx} \quad (18)$$

Na integratie van $x = r$ tot $x = R$ en van $h = h_0$ tot $h = H$ ontstaat:

$$Qln \frac{R}{r} = \pi k_0 (H^2 - h_0^2) + \frac{1}{3} \pi b (H^3 - h_0^3) \quad (19)$$

c. *Vergelijkingen voor de stijgsnelheid van het water in een volkomen put in heterogene gronden.*

Op soortgelijke wijze als dit door DONAT voor homogene gronden is verricht, kunnen nu, uitgaande van de vergelijkingen (17) en (19), vergelijkingen worden opgesteld, die de stijgsnelheid van het water in boorgaten in heterogene gronden aangeven.

Hier zal worden volstaan met de afleiding van deze vergelijking voor het geval 2 of 3 scherp gescheiden lagen met een verschillende doorlatendheid in het watervoerend profiel voorkomen, daar alleen deze vergelijkingen gecontrôleerd zijn geworden.

I. Er komen 2 lagen in het watervoerende profiel voor:

De vergelijking (17) kan nu voor dit doel eenigszins anders geschreven worden. Noemen we namelijk den afstand van het phreatisch oppervlak tot den bovenkant van de onderste laag d_2 , waarbij dus $d_2 = H - d_1$ (zie figuur 3), dan is vergelijking (17) om te werken tot:

$$Q \ln \frac{R}{r} = \pi k_1 (nd_2^2 + 2d_1d_2 + d_1^2) - h_0^2 \quad (20)$$

Stellen we nu den term $nd_2^2 + 2d_1d_2 + d_1^2 = b^2$ en bedenken we, dat h_0 na het stopzetten van het pompen weer zal stijgen en dus een veranderlijke is en beter voorgesteld kan worden door de letter h (= waterstand boven den bodem van het boorgat op den tijd t) dan gaat de vergelijking (20) over in de vergelijking:

$$Q \ln \frac{R}{r} = \pi k_1 (b^2 - h_0^2) \quad (21)$$

Stellen we ook nu den factor $\pi: \ln \frac{R}{r} = a = \text{constant}$ (uit den aard der zaak is dit even juist als bij de afleiding van deze vergelijking voor homogene gronden; temeer daar de pompproeven van PORCHET waarschijnlijk ook niet steeds in homogene gronden zullen zijn uitgevoerd), dan ontstaat:

$$Q = ak_1 (b^2 - h_0^2) \quad (22)$$

Daar b een factor is, die tijdens het opstijgen van het water in het boorgat constant blijft, gaat de verdere afleiding tot en met de vergelijking (6) op precies dezelfde wijze als dit voor homogene gronden geschiedt (zie aldaar).

In de vergelijking komt echter in de plaats van H de factor b , terwijl voor den factor k de factor k_1 in de plaats komt, zoodat de vergelijking ontstaat:

$$\ln \frac{b+h}{b-h} \cdot \frac{b-h_0}{b+h_0} = \frac{2abk_1 t}{\pi r^2} \quad (23)$$

Gaan we nu van de natuurlijke in de Briggiaansche logaritmen over en bedenken we, dat ook nu $h = H - y$ en $h_0 = H - y_0$, dan is dus de vergelijking (23) om te werken tot de vergelijking:

$$\log \frac{b+H-y}{b-H+y} \cdot \frac{b-H+y_0}{b+H-y_0} = \frac{2abk_1 t}{2,3\pi r^2} \quad (24)$$

Noemen we den term $\log \left(\frac{b+H-y}{b-H+y} \cdot \frac{b-H+y_0}{b+H-y_0} \right) : t = tg\alpha$ en druk-

ken we b, H, y, y_0 en r uit in meters en t in seconden, dan wordt de doorlaatfactor k_1 in m. per 24 uur uitgedrukt, wanneer we den noemer van het rechtsche lid door 86400 deelen. De vergelijking (24) gaat daardoor na eenige omwerking over in:

$$\frac{2,3r^2tg\alpha \cdot 86400}{bk_1} = \frac{2a}{\pi} \quad (25)$$

Opgemerkt dient te worden, dat bovenstaande vergelijking alleen geldt, zoolang y grooter is dan d_2 ; d.w.z. zoolang de waterspiegel in het boorgat blijft in laag I. Op zich zelf is het wel mogelijk deze vergelijking verder te ontwikkelen, zoodat zij voor de geheele opstijging geldt; de afleiding van deze vergelijking kan hier echter achterwege blijven, daar de contrôlemetingen zoo zijn uitgevoerd, dat de vergelijking (25) geldig is. Bovendien zal uit de contrôlemetingen toch blijken, dat dit type vergelijkingen voor de berekening van den doorlaatfactor uit de stijgsnelheid minder juist is.

II. Er komen 3 lagen in het watervoerende profiel voor.

Deze vergelijking voor 3 lagen in het watervoerende profiel kan op analoge wijze worden afgeleid. Korthedshalve zal deze afleiding hier niet verder worden behandeld. Deze vergelijking heeft denzelfden vorm als de vergelijking (25); alleen is hier de factor b door den factor c vervangen. Deze vergelijking luidt:

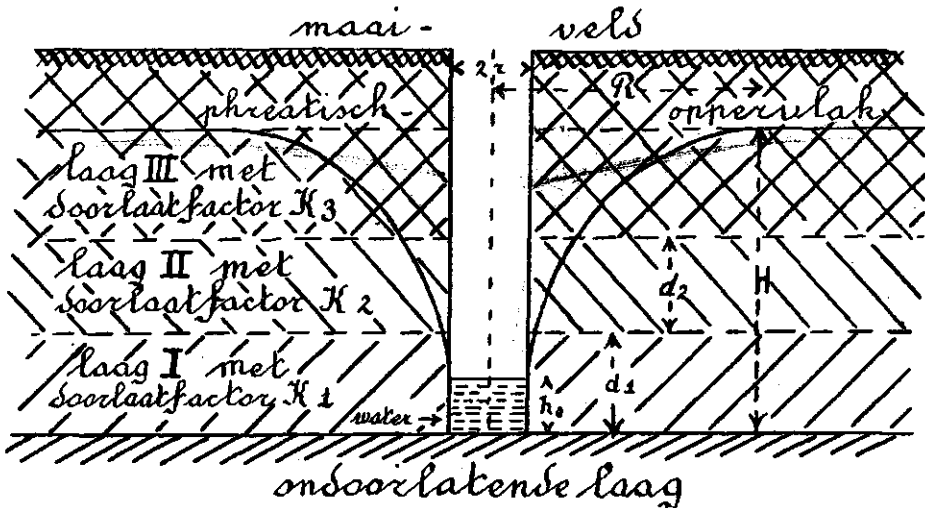
$$\frac{2,3r^2tg\alpha \cdot 86400}{ck_1} = \frac{2a}{\pi}, \quad (26)$$

waarin de factor c gelijk is aan:

$$c^2 = \{n_1 n_2 H^2 - 2d_1 H(n_1 - 1) - 2d_2 n_1 H(n_2 - 1) + d_1^2(n_1 - 1) + d_2^2 n_1(n_2 - 1)\} \quad (27)$$

en waarin $n_1 = \frac{k_2}{k_1}$; $n_2 = \frac{k_3}{k_2}$ en $\operatorname{tg} \alpha = \frac{c + H - y}{c - H + y} \cdot \frac{c - H + y_0}{c + H - y_0} : t$.

Hierin beteekent d_1 de dikte van de onderste laag en k_1 den doorlaatfactor van deze laag; d_2 de dikte van de daarboven gelegen laag met den doorlaatfactor k_2 , terwijl de doorlaatfactor in deze derde laag k_3 is (zie figuur IV).



FIGUUR IV.

Hierbij kan worden opgemerkt, dat de vergelijking (26) alleen geldt zoolang y grooter is dan $d_3 + d_2$ of dus zoolang de waterspiegel in het boorgat zich in de laag I bevindt; zie verder de opmerking in dit verband bij de afleiding van de vergelijking (25) gemaakt.

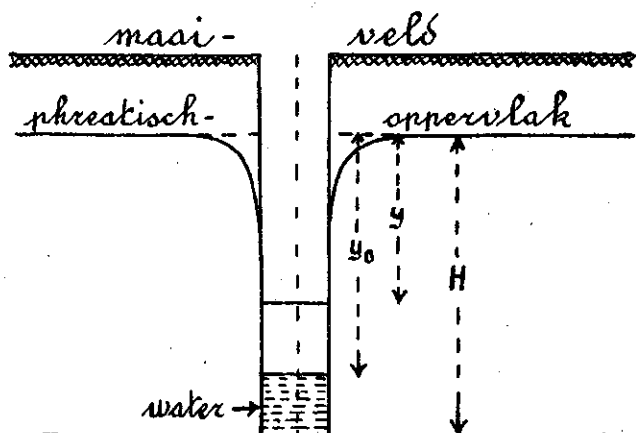
§ 3. VERGELIJKINGEN, AFGELEID ONDER DE VERONDERSTELLING, DAT DE INZINKING VAN HET PHREATISCH OPPERVLAK RONDOM HET BOORGAT TE VERWAARLOOZEN KLEIN IS.

a. De grond is homogeen; het boorgat reikt al dan niet tot de ondoorlatende laag.

Alvorens op de afleiding van deze vergelijkingen in te gaan, waarbij dus juist de inzinking in het phreatisch oppervlak rondom het boorgat is verwaarloosd, moet worden opgemerkt, dat bij de afleiding van deze vergelijking op den voorgrond is gesteld, dat de meting van de stijgsnelheid van het water

dadelijk na het leegpompen van het boorgat geschiedt, zoodat, zooals reeds eerder is opgemerkt, kan worden verondersteld, dat de vorm en de ligging van de stroombanen gedurende deze opstijging constant blijven.

We kunnen deze voorwaarde ook aldus begrijpelijk maken door na te gaan, waar het water vandaan komt, dat het boorgat na het leegpompen weer moet vullen. Dit water is blijkbaar afkomstig uit de laag grond vlak om het boorgat heen en wel in het bijzonder afkomstig uit de trechtervormige inzinking van het phreatisch oppervlak rondom het boorgat (zie figuur V),



FIGUUR V.

die sich dus tijdens het leegpompen reeds begint te vormen. Is nu de doorlatendheid en de hoeveelheid vrij bewegelijk water (factor μ van POBCHET) in verhouding niet te klein en de doorsnede van het boorgat in verhouding niet groot, dan is de hoeveelheid water, die in het boorgat moet stroomen om dit weer met water te vullen — en zeker is dit het geval in den eersten tijd na het leegpompen —, klein ten opzichte van de hoeveelheid beschikbaar water in den grond rondom het boorgat. Dit wil dus zeggen, dat gedurende den eersten tijd na het leegpompen slechts een trechtervormige inzinking in het phreatisch oppervlak zal ontstaan, waarvan de afmetingen — d.i. de afwijking van het oorspronkelijk verloop van het phreatisch oppervlak — te verwaarloozen klein zullen (zal) zijn. Dit wil dus niets anders zeggen, dan dat in genoemd geval kan worden verondersteld, dat de vorm en de ligging van de stroombanen tijdens het opstijgen van het water in het boorgat — en dus zeker in den eersten tijd na het leegpompen — als constant zijn te beschouwen. Dit laatste geldt in nog sterkere mate voor het geval het boorgat niet door stilstaand grondwater (vóór het leegpompen natuurlijk),

maar door grondwater is omringd, waarin een beweging optreedt, bijv. naar een nabij gelegen sloot. In dit geval zal deze trechtervormige inzinking kleiner zijn, dan wanneer dit niet het geval is, daar althans een gedeelte van het water nu van elders wordt aangevoerd.

In het eerste te behandelen geval zal nu verder worden verondersteld, dat de grond volkomen homogeen is ten opzichte van de doorlatendheid en de grond ook onder den bodem van het boorgat dezelfde doorlatendheid bezit, d.w.z. dus, dat de ondoorlatende laag niet wordt bereikt.

In genoemd geval zal er *zijdelings* water door den wand van het boorgat in het boorgat vloeien en tevens *loodrecht* naar boven door den bodem van het boorgat opstijgen.

Zie figuur V op blad. 463.

De hoeveelheid water, die zijdelings in het boorgat stroomt, is recht evenredig met den natten omtrek van het boorgat; de snelheid waarmede het water in het boorgat door deze zijdelingsche toestrooming stijgt, dus eveneens. Deze snelheid is omgekeerd evenredig met de doorsnede van het boorgat. De overdruk in het grondwater wordt aangegeven door y . De snelheid van de stijging van het water in het boorgat op het tijdstip t is dus; alleen veroorzaakt door de horizontale toestrooming:

$$\frac{dy}{dt} = -k \frac{2\pi r H}{\pi r^2} \cdot \frac{y}{a} = -\frac{2kHy}{ra} \quad (28)$$

Behalve de bekende factoren, is r den straal van het boorgat en a een bij dezelfde meting constant blijvenden factor, afhankelijk van den vorm van de stroombanen en met de dimensie (l), waardoor dus k weer de juiste dimensies krijgt. Deze factor a is dus een constante, als de stroomingstoestand tijdens het opstijgen van het water in het boorgat niet verandert.

De stijgsnelheid door de verticale toestrooming is recht evenredig en tegelijkertijd omgekeerd evenredig met de doorsnede van het boorgat, terwijl de overdruk van het water op het moment t ook nu gelijk is aan y . De stijgsnelheid ten gevolge van de verticale opstijging van het water door den bodem van het boorgat is dus:

$$\frac{dy}{dt} = -k \frac{\pi r^2}{\pi r^2} \cdot \frac{y}{a} = -\frac{ky}{a} \quad (29)$$

De totale stijgsnelheid is dus:

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{2kHy}{ra} - \frac{ky}{a} = -k \frac{2H + r}{ar} y \quad (30)$$

Na integratie van $y = y_0$ en van $t = 0$ tot $y = y$ en $t = t$ ontstaat:

$$\ln \frac{y_0}{y} = \frac{k(2H + r)t}{ar}, \quad (31)$$

of na omwerking en overgang van de natuurlijke naar de Briggiaansche logarithmen:

$$k = \frac{2,3ra}{(2H + r)t} \log \frac{y_0}{y} \quad (32)$$

Het zal duidelijk zijn, dat wanneer het boorgat tot de ondoorlatende laag reikt en de verticale toestrooming van het water door den bodem van het boorgat nul is, de vergelijking moet luiden:

$$k = \frac{2,3ra}{2Ht} \log \frac{y_0}{y} \quad (33)$$

Deze vergelijkingen (32) en (33) wijken iets af van de vergelijkingen, die ik voor overeenkomstige gevallen in mijn publicatie in de Transactions of the Third International Congress of Soil Science, Oxford, volume I, blz. 382 e. v. heb aangegeven. Voor den factor H is in de vergelijkingen (32) en (33) $2H$ in de plaats gekomen. Oorspronkelijk heb ik namelijk gemeend, dat de overdruk in het water moest worden aangegeven door $0.5H \cdot \frac{y}{H} = 0.5y$.

Dit brengt voor de ontwikkeling van de vergelijkingen voor heterogene gronden gevolgen mede, waardoor deze vergelijkingen een geheel ander karakter krijgen, dan wanneer de overdruk bij homogene gronden gelijk y wordt gesteld. De resultaten van de contrôlemetingen in heterogene gronden, die verder in hoofdstuk III zullen worden besproken, hebben echter doen zien, dat de oorspronkelijke veronderstelling niet juist was en de overdruk in homogene gronden door y moet worden voorgesteld. De vergelijkingen voor heterogene gronden zijn dan ook anders geworden als in genoemde publicatie is aangegeven.

Zowel de vergelijking (32) als (33) zijn nu in een vorm te brengen, waaruit nog beter blijkt, hoe deze vergelijkingen zijn samengesteld. In beide formules zijn immers bij één en dezelfde meting de factoren k , r , a , y_0 en H constant, terwijl alleen t en y (of dus de breuk $\log \frac{y_0}{y}$) verandert. De vergelijking (32)

— en op soortgelijke wijze ook de vergelijking (33) — is in den volgenden vorm te brengen:

$$\frac{k(2H + r)}{2,3ra} = \frac{\log \frac{y}{y_0}}{t} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (34)$$

Hieruit blijkt dus, dat de breuk $\log \frac{y_0}{y}$: t bij één en dezelfde meting van de stijgsnelheid constant is. Dit wil dus zeggen, dat wanneer men in een diagram op de x -as den tijd t en op de ordinaat de overeenkomstige waarden van de breuk $\log \frac{y_0}{y}$ afzet, men punten verkrijgt, die op een rechte lijn liggen, die door den oorsprong gaat. De tangens van den hoek, die deze lijn

met de x -as maakt en die dus door de breuk $\frac{\log \frac{y_0}{y}}{t}$ wordt voorgesteld, *blijft dus volgens deze berekening constant en onafhankelijk van het feit of de ondoorlatende laag al dan niet wordt bereikt* (zie bijv. figuur IX).

Vergelijkt men nu de vergelijking (33) met de vergelijking van DISERENS (vergelijking 1) dan kan hieruit gemakkelijk worden berekend, dat voor boorgaten van 20 cm doorsnede, voor $a = 1$ en $A = 1$ de factor $k = 3,8 \cdot 10^{-6}$ *m.p.sec.* wordt. DISERENS geeft hiervoor aan een waarde van $2,7 \cdot 10^{-6}$ (oorspronkelijk $2,5 \cdot 10^{-6}$) *m.p.sec.* Blijkens vergelijking (32) zal deze waarde van $3,8 \cdot 10^{-6}$ nog kleiner worden, wanneer de grond ook onder den bodem van het boorgat doorlatend is. Bedenkt men dan ook, dat DISERENS bij zijn bepalingen waarschijnlijk niet steeds de ondoorlatende laag had bereikt, dan zal het geen verwondering geven, wanneer ik oorspronkelijk gemeend heb, dat de constante $a \pm \frac{1}{2}$, of dus in de oorspronkelijke vergelijking (zie blz. 465) ± 1 , zou zijn; zie bijv. de door DISERENS aangehaalde formule in de Transactions of the sixth Commission of the International Society of Soil Science, Groningen, 1933, deel 2, Zeichnung II, blz. 190 en de in noot 4 aangehaalde literatuur, blz. 12. Blijkens gelijktijdige berekening van de doorlatendheid uit de waarnemingen van pompproeven en uit de waarnemingen van het debiet en den grondwaterstand op een gedraineerd veld, bleek mij echter, dat dit onmogelijk geheel juist kon zijn. Uit de contrôle van de vergelijkingen (32) en (33), die daarop plaats vond, bleek dat dan ook reeds spoedig (zie hoofdstuk III).

b. De grond is heterogeen; het boorgat reikt al dan niet tot de ondoorlatende laag.

In het bovenstaande werd er dus de aandacht op gevestigd, dat de vergelijkingen (32) en (33) alleen juist kunnen zijn, wanneer de stroomings-toestand van het water tijdens het opstijgen van het water in het boorgat dezelfde blijft. Ofschoon dit streng genomen nooit het geval is, is boven echter reeds uiteen gezet, wanneer deze veranderingen in den stroomings-toestand tijdens het opstijgen van het water in het boorgat als te verwaarloozen klein te beschouwen zijn; nl., wanneer de afmetingen van de trechtervormige inzinking van het phreatisch oppervlak om het boorgat tijdens het opstijgen van het water te verwaarloozen klein is. Deze inzinking zal des te eerder te verwaarloozen zijn, wanneer:

- a. sneller na het leegpompen van het boorgat gemeten wordt en de metingen slechts op een deel van de geheele opstijging betrekking hebben;
- b. bij denzelfden grond de doorsnede van het boorgat kleiner is en
- c. bij dezelfde doorsnede van het boorgat de grond doorlatender is en de constante μ van PORCHET grooter is.

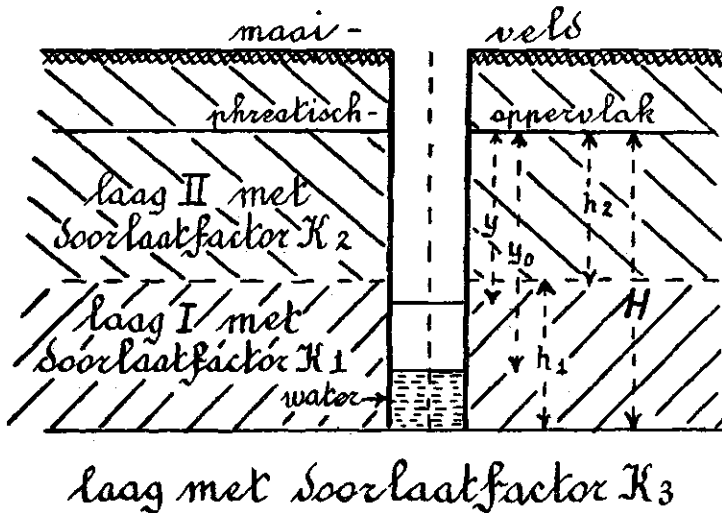
Bij de waarnemingen, die op het veld zelf waren verricht, was reeds waargenomen, dat inderdaad gewoonlijk $tg\alpha$ constant is, hetgeen dus reeds voor de toelaatbaarheid van de gemaakte veronderstellingen inzake het constant blijven van den stroomingstoestand tijdens het opstijgen van het water in het boorgat pleit. Er werden echter ook gevallen waargenomen, waarbij $tg\alpha$ niet constant bleef, maar de lijn in het $\log \frac{y_0}{y} : t$ diagram bij stijgende t -waarden naar de x -as omhoog. Uit de waarnemingen bleek nu, dat de grond hier in elk geval slecht doorlatend was (zie voorwaarde c), terwijl uit waarnemingen van grondwaterstanden in nauwe boorgaten op verschillende afstanden van het boorgat de conclusie getrokken kon worden, dat hier een duidelijke hangkromme (trechtervormige inzinking) van het phreatisch oppervlak in den grond naar den waterspiegel in het boorgat optrad. Ook deze waarnemingen pleiten reeds voor de juistheid van de onder a, b en c genoemde voorwaarden voor de geldigheid van de vergelijkingen (32) en (33).

Men zou echter ook nog een andere oorzaak kunnen aanwijzen voor het feit, dat $tg\alpha$ gedurende het opstijgen van het water in het boorgat niet constant blijft, nl. de heterogeniteit van den grond. Zijn echter de formules (32) en (33) — afgezien van de waarde van de constante a — juist, dan zijn ook juist

de vergelijkingen, die op soortgelijke wijze en onder dezelfde voorwaarden voor heterogene gronden kunnen worden afgeleid.

Ik zal hier volstaan met voor 2 principieel verschillende gevallen van heterogeniteit de vergelijkingen af te leiden, daar de andere gevallen, hetzij variaties, hetzij combinaties daarvan zijn. In het eerste geval zal n.l. verondersteld worden, dat in het grondprofiel scherp begrensde lagen voorkomen (de doorlatendheid verandert *discontinue* met de hoogte boven den bodem van het boorgat) en in het tweede geval, dat de doorlatendheid *continue* volgens de een of andere functie met de hoogte boven den bodem van het boorgat verandert.

Geval I. Komen in het profiel boven den bodem van het boorgat twee scherp begrensde lagen voor, waarvan de eerste laag boven den bodem van het boorgat (Laag I) een dikte h_1 en een doorlaatfactor k_1 heeft; de daarboven gelegen laag (Laag II) een doorlaatfactor k_2 heeft en de afstand van het phreatisch oppervlak tot den bovenkant van de onderste laag h_2 is en ten slotte de grond onder den bodem van het boorgat een doorlaatfactor k_3 heeft, dan is dus de afleiding van de vergelijking (zie ook figuur VI ¹⁾) aldus:



FIGUUR VI.

¹⁾ De trechtervormige inzinking van het phreatisch oppervlak rondom het boorgat is hier, evenals in de volgende figuren, verwaarloosd.

De stijgsnelheid ten gevolge van de strooming van het water uit laag I bedraagt op het moment t :

$$\frac{dy}{dt} = -k_1 \cdot \frac{2\pi r h_1}{\pi r^2} \cdot \frac{y}{a} = -k_1 \cdot \frac{2h_1 y}{ra} \quad (35)$$

De stijgsnelheid ten gevolge van de strooming uit de laag II bedraagt:

$$\frac{dy}{dt} = -k_2 \cdot \frac{2\pi r h_2}{\pi r^2} \cdot \frac{y}{a} = -k_2 \cdot \frac{2h_2 y}{ra} \quad (36)$$

De stijgsnelheid ten gevolge van het opstijgende water door den bodem van het boorgat bedraagt:

$$\frac{dy}{dt} = -k_3 \cdot \frac{\pi r^2}{\pi r^2} \cdot \frac{y}{a} = -k_3 \cdot \frac{y}{a} \quad (37)$$

De totale stijgsnelheid van het water in het boorgat is dus:

$$\frac{dy}{dt} = -k_1 \cdot \frac{2h_1 y}{ra} - k_2 \cdot \frac{2h_2 y}{ra} - k_3 \cdot \frac{y}{a} \quad (38)$$

of, na vereenvoudiging:

$$\frac{dy}{dt} = - \frac{2k_1 h_1 + 2k_2 h_2 + k_3 r}{ar} \cdot y \quad (39)$$

Geïntegreerd van $y = y_0$ tot $y = y$ en van $t = 0$ tot $t = t$ en na omrekening op Briggiaansche logaritmen ontstaat:

$$\log \frac{y_0}{y} = \frac{2k_1 h_1 + 2k_2 h_2 + k_3 r}{2,3ar} \cdot t \quad (40)$$

of

$$\frac{2k_1 h_1 + 2k_2 h_2 + k_3 r}{2,3ar} = \frac{\log \frac{y_0}{y}}{t} = \text{tg} \alpha \quad (41)$$

Daar tijdens het opstijgen van het water in het boorgat het linkerlid een constante is, moet dus ook nu $\text{tg} \alpha$ gedurende de meting constant blijven. Verder blijkt, dat de vergelijking (41) overgaat in de vergelijking (32),

wanneer $k_1 = k_2 = k_3$ of m.a.w., wanneer de grond homogeen is, daar immers $h_1 + h_2 = H$. Hieruit volgt dus tevens, dat de vergelijkingen (32) en (41) ten nauwste met elkaar samenhangen, zoodat de vergelijking (32) als eenvoudigste vergelijking van het type van vergelijking (41) kan worden opgevat.

Wordt verder de ondoorlatende laag bereikt, dan valt natuurlijk de term $k_3 r$ weg, zoodat de vergelijking voor het geval, dat het boorgat de ondoorlatende bereikt, dus wordt:

$$\frac{2k_1 h_1 + 2k_2 h_2}{2,3ar} = \frac{\log \frac{y_0}{y}}{t} = t\alpha \quad (42)$$

Verder spreekt het wel vanzelf, dat op analoge wijze ook vergelijkingen kunnen worden afgeleid voor het geval er meer dan 2 lagen in het profiel voorkomen. De afleiding daarvan zal hier korthedshalve niet meer worden gegeven. Volstaan zal worden deze vergelijking voor 3 lagen hier zonder meer weer te geven. Deze vergelijking luidt voor het geval, dat de onderlatende laag niet wordt bereikt:

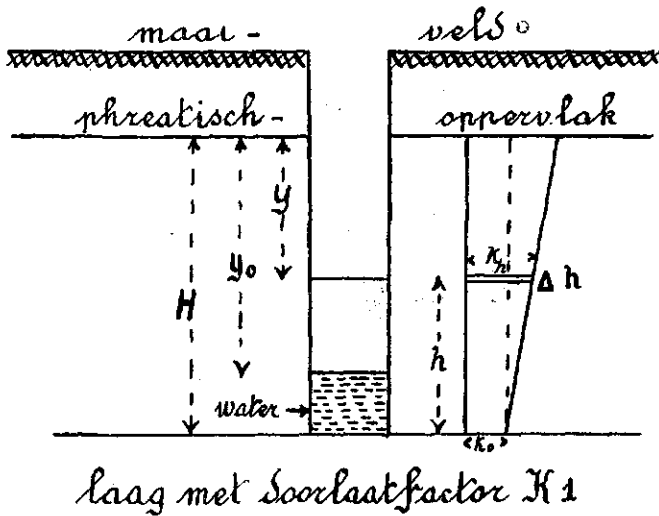
$$\frac{2h_1 k_1 + 2h_2 k_2 + 2h_3 k_3 + k_4 r}{2,3ar} = \frac{\log \frac{y_0}{y}}{t} = t\alpha \quad (43)$$

Hierin stellen k_1 , k_2 en k_3 de doorlaatfactoren en h_1 , h_2 en h_3 de dikten van de respectievelijke lagen vanaf den bodem van het boorgat in het *watervoerend* profiel voor, terwijl k_4 hier den doorlaatfactor van den grond onder den bodem van het boorgat voorstelt (vergelijk figuur VI).

Geval II. In de tweede plaats zal nu de vergelijking worden afgeleid voor het geval de doorlatendheid continue met de diepte onder het maaiveld volgens de een of andere functie verandert. We kiezen hiervoor een eenvoudig voorbeeld, bijv. dat,

$$k_h = k_0 + bh \quad (44)$$

waarin b een constante, k_0 den doorlaatfactor van een zeer dun laagje vlak boven den bodem van het boorgat en k_h dezen factor van een zeer dun laagje op een hoogte h boven den bodem van het boorgat voorstelt. Is verder de doorlaatfactor van den grond onder den bodem van het boorgat k' dan is de afleiding van de vergelijking als volgt (zie figuur VII):



FIGUUR VII.

Bij constante y wordt door een uiterst dun laagje dh per strekkenden meter aangevoerd:

$$(k_0 + bh) \frac{y}{a} dh \quad (45)$$

Voor de geheele hoogte H is dit dus:

$$\int_{h=0}^{h=H} (k_0 + bh) \frac{y}{a} dh = \frac{(k_0 H + \frac{1}{2} b H^2) y}{a} \quad (46)$$

De stijgsnelheid op het moment t ten gevolge van de toestrooming van water uit laag I is dus:

$$\frac{dy}{dt} = - (k_0 H + \frac{1}{2} b H^2) \frac{y}{a} \cdot \frac{2\pi r}{\pi r^2} \quad (47)$$

of, na vereenvoudiging:

$$\frac{dy}{dt} = - \frac{(2k_0 H + b H^2) y}{ar} \quad (48)$$

De stijgsnelheid ten gevolge van de verticale opstijging van water door den bodem van het boorgat is:

$$\frac{dy}{dt} = - \frac{k' \pi r^2 y}{\pi r^2 a} = - k' \frac{y}{a} \quad (49)$$

De totale stijgsnelheid van het water in het boorgat is dus:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{(2k_0H + bH^2 + k'r) y}{ar} \quad (50)$$

Na integratie van $y = y_0$ en $t = 0$ tot $y = y$ en $t = t$ ontstaat na omrekening op Briggiaansche logarithmen:

$$\log \frac{y_0}{y} = \frac{(2k_0H + bH^2 + k'r) t}{2,3ar} \quad (51)$$

of

$$\frac{2k_0H + bH^2 + k'r}{2,3ar} = \frac{\log \frac{y_0}{y}}{t} = tg\alpha \quad (52)$$

De vergelijking (52) gaat ook nu over in vergelijking (32), indien $k_0 = k'$ en $b = 0$, of m.a.w., wanneer de grond homogeen wordt. Ook nu is de vergelijking (32) als den eenvoudigsten vorm van het type van vergelijkingen (52) te beschouwen. Reikt het boorgat tot de ondoorlatende laag dan valt dus de term $k'r$ weg, daar dan $k' = 0$ is.

Uit de vergelijking (52) zien we, dat ook nu tijdens het opstijgen van het water in het boorgat het linkerlid constant moet blijven, hetgeen dus wil zeggen, dat $tg\alpha$ eveneens tijdens de opstijging van het water constant moet blijven. Daar dit laatste ook het geval is bij de andere typen van vergelijkingen, die voor heterogene gronden kunnen worden opgesteld, wil dit dus zeggen, dat $tg\alpha$ tijdens het opstijgen van water in het boorgat steeds constant moet blijven; onafhankelijk van het feit, of de grond homogeen dan wel heterogeen is.

Practische toepassingen van deze boorgatenmethode in kleigronden, waarin als regel kan worden aangenomen, dat de doorlatendheid van den grond met de diepte onder het maaiveld afneemt (afgezien van de ploegzool of de zode), gaven eveneens reeds constante waarden voor den factor $tg\alpha$.

Het spreekt echter vanzelf, dat ook dit punt nog verder experimenteel getoetst zal worden, waarvoor verder naar Hoofdstuk III kan worden verwezen.

c. De geldigheid van de vergelijkingen voor heterogene gronden en hun toepassing. De schijnbare doorlaatfactor.

Voor de vergelijkingen voor homogene gronden zijn — afgezien van den factor a , die dus tijdens de opstijging van het water in het boorgat constant blijft, maar afhankelijk kan zijn van den diameter van het boorgat en de grootheid H — geen andere voorwaarden voor de geldigheid van de afgeleide

vergelijkingen gesteld dan dat de stroomingstoestand van het water tijdens het opstijgen van het water in het boorgat niet verandert. Bij de heterogene gronden dient dat wel te geschieden, hetgeen duidelijk zal worden, wanneer we eens nagaan wat voor invloed de vorm van de stroombanen heeft op den toevoer van het water en dus op de stijgsnelheid van het water in het boorgat. In hoofdzaak kunnen we in dit opzicht 2 gevallen van heterogeniteit onderscheiden, n.l., dat:

I. Bij een laagsgewijzen bouw van het profiel de dieper gelegen lagen steeds kleinere doorlaatfactoren hebben of bij een continue verandering de doorlatendheid naar dieper gelegen lagen steeds afneemt.

II. De doorlatendheid van althans sommige lagen kleiner is dan de doorlatendheid van de daaronder gelegen lagen.

We kunnen nu 2 gevallen onderscheiden, dat de vergelijkingen voor heterogene gronden steeds geldig zijn, d.w.z. even juist zullen zijn als de vergelijkingen voor homogene gronden, n.l.:

I. De vergelijkingen zullen steeds geldig zijn, wanneer de stroombanen horizontaal loopen, onafhankelijk van het feit, op welke wijze de doorlatendheid in het profiel verandert. Dit laatste zal exact gesproken vrijwel nooit voorkomen. Bedenkt men echter, dat het water toch nog op tamelijk grooten afstand naar het boorgat zal stroomen en de boorgaten slechts een geringe diepte hebben dan wordt deze toestand vrij goed benaderd.

II. Zijn de stroombanen niet horizontaal, dan zullen de vergelijkingen voor de heterogene gronden ook steeds juist zijn, wanneer slechts de doorlatendheid met de diepte onder het maaiveld *steeds* afneemt. In dit geval wordt de hoeveelheid water, die uit iedere laag vloeit, bepaald door zijn eigen doorlatendheid. Dit is niet het geval, wanneer onder een minder goed doorlatende laag een laag ligt met een grootere doorlatendheid. In dit geval moet het water, dat uit de onderste laag in het boorgat vloeit, eerst de minder goed doorlatende laag passeeren. ¹⁾ Deze aanvoer is minder snel dan de onderste laag volgens zijn doorlatendheid zou kunnen afvoeren. Dit wil dus zeggen, dat de afvoer door de dieper gelegen, beter doorlatende laag wordt beïnvloed door de kleinere doorlatendheid van de daarboven gelegen laag. De vergelijkingen zijn dus voor dat geval niet geldig. Nu zal in natuurlijke gronden vrijwel steeds de doorlatendheid met de diepte onder het maaiveld afnemen, terwijl bovendien de stroombanen, zij het ook niet volkomen horizontaal, toch hiertoe

¹⁾ In een grond van voldoende uitgestrektheid om het boorgat komt dit aldus tot uiting, dat de stroombanen in de goeddoorlatende laag meer horizontaal worden, dan dat in een homogenen grond het geval zou zijn.

zullen naderen. Ofschoon we dus wel kunnen zeggen, dat in gronden in de natuurlijke ligging de vergelijkingen steeds geldig zullen zijn, is het natuurlijk gewenscht door proefnemingen aan te toonen hoe groot de fout in een zeer ongunstig geval (b.v. bij de vatproeven, waar de stroombanen zeker niet horizontaal zijn) zou kunnen zijn, waarvoor verder naar hoofdstuk III wordt verwezen.

In de tweede plaats moet een opmerking worden gemaakt over de toepassing van de vergelijkingen voor heterogene gronden. Het zal duidelijk zijn, dat daarvoor meer dan 1 meting in het zelfde boorgat noodig is. Dit zal echter slechts een beperkt aantal malen mogelijk zijn. Waarschijnlijk zal dit aantal wel niet meer dan 3 kunnen zijn, daar voor iedere meting telkens weer zoo lang moet worden gewacht, totdat de grondwaterspiegel zich heeft ingesteld. De vergelijkingen voor een continue veranderende doorlatendheid in het watervoerende profiel zullen dan ook wel nooit kunnen worden toegepast.

Voor de vergelijkingen voor heterogene gronden, waarvan het profiel bestaat uit 2 of desnoods 3 lagen, is dit echter iets anders. We kunnen dit het beste met een voorbeeld toelichten.

Stel bijv. eens, dat het phreatisch oppervalk zich 50 cm onder het maaiveld bevindt en dat een boorgat tot 100 cm is geboord. Uit de stijgsnelheid is dus door toepassing van de formule voor homogene gronden de „gemiddelde doorlatendheid” — door mij de schijnbaar doorlaatfactor genoemd; zie blz. 519 — van de laag 50 tot 100 cm onder het maaiveld te berekenen. Wordt daarna het boorgat 50 cm dieper gemaakt en nu nogmaals de stijgsnelheid van het water gemeten dan is nu de vergelijking voor 2 lagen in het profiel toe te passen of met andere woorden is nu de doorlaatfactor van de laag van 100—150 cm onder het maaiveld te berekenen. Maakt men nu het boorgat nog eens 50 cm dieper, dan is nu uit de stijgsnelheid met behulp van de vergelijking voor 3 lagen de doorlaatfactor van de laag van 150 tot 200 cm onder het maaiveld uit te rekenen.

Deze methode om telkens de „gemiddelde doorlatendheid” van een bepaalde laag te bepalen is feitelijk alleen streng geldig, wanneer de ligging van het phreatisch oppervlak tijdens de metingen niet verandert, d.w.z. in het gegeven voorbeeld 50 cm onder maaiveld blijft. In de tweede plaats is het noodig om bij de toepassing van de vergelijking voor homogene gronden (en in het gegeven voorbeeld ook bij de toepassing van de vergelijking voor 2 lagen in het profiel) aan te nemen, dat de grond onder den bodem van het boorgat hetzij ondoorlatend hetzij doorlatend is. Gewoonlijk zal de laatste veronderstelling de beste zijn, waarbij dus de doorlatendheid onder den bodem van het boorgat gelijk genomen wordt aan de doorlatendheid van de eerste te beschouwen laag

daarboven. Dit is natuurlijk niet geheel juist. Hebben we dan ook deze doorlaatfactoren van de beschouwde lagen berekend — dus in het gegeven voorbeeld de lagen van 50 tot 100, 100 tot 150 en 150 tot 200 — dan kan men dezelfde berekeningen nog eens herhalen, waarbij nu voor de laag onder den bodem van het boorgat telkens de reeds berekende doorlatendheid van deze laag wordt ingevuld. In het gegeven voorbeeld wil dat dus zeggen, dat nogmaals met de vergelijking voor homogene gronden de doorlaatfactor van de laag van 50 tot 100 cm onder het maaiveld wordt berekend, waarbij nu echter voor de doorlatendheid van den grond onder den bodem van het boorgat de waarde van de laag van 100—150 wordt ingevuld, zooals deze bij de eerste berekening werd gevonden, enz. Is de stand van den grondwaterspiegel boven den bodem van het boorgat niet te klein dan zal de besproken correctie slechts klein zijn.

Ten slotte komt in alle vergelijkingen de factor a voor. Deze factor is afhankelijk van den stroomingstoestand van het water en tijdens de opstijging van het water in een boorgat een constante. Deze factor a zal echter mogelijk kunnen veranderen, wanneer metingen in boorgaten worden gedaan met een verschillenden diameter of wanneer de grondwaterstand (de factor H) verschillend is. Zuiver theoretisch is het zeker niet gemakkelijk de factoren, waardoor de factor a wordt bepaald, in hun juiste verband aan te geven; dit moet dus uit de contrôle-metingen worden afgeleid.

HOOFDSTUK III.

BESPREKING VAN DE RESULTATEN VAN DE CONTRÔLEMETINGEN.

§ 1. ALGEMEENE OPMERKINGEN.

De in het vorige hoofdstuk behandelde vergelijkingen bevatten alle den factor a , waarvan niet precies kan worden aangegeven, hoe zij met den vorm van de stroombanen samenhangt. Deze factor moet dus experimenteel worden bepaald, waarbij natuurlijk tevens het reeds uitgewerkte gedeelte van de vergelijkingen op voldoende juistheid kan worden getoetst. Deze toetsing en verdere uitbouw van de gegeven vergelijkingen kunnen alleen geschieden, wanneer de omstandigheden, waaronder de proefnemingen verricht worden, *exact* bekend zijn. Dit wil zeggen, dat niet alleen de *ligging van de ondoorlatende laag* nauwkeurig bekend moet zijn, maar dat ook de *doorlaatfactor* van den grond (op een andere wijze bepaald) exact bekend moet zijn. Hieruit volgt dus, dat de proefnemingen op het laboratorium, en met diverse zandgronden moeten

worden uitgevoerd. Alleen van deze gronden kan men immers op een andere, onafhankelijke wijze den doorlaatfactor exact bepalen (zie de onder noot 2 genoemde literatuur) en omrekenen op de omstandigheden (poriënvolume, luchtgehalte en temperatuur van het water), zooals deze tijdens de betreffende proefnemingen aanwezig zijn. Tegen het gebruik van zandgronden bestaat niet het minste bezwaar, daar de afgeleide en te contrôleeren vergelijkingen voor *alle* grondsoorten gelden; d.w.z. zoolang de Wet van DUPUIT—DARCY geldig is, hetgeen zowel voor klei-, leem- als voor zandgronden het geval is.

De proefnemingen moeten uit den aard der zaak onder vaak wisselende omstandigheden worden uitgevoerd; b.v. met boorgaten van verschillenden diameter en met zandgronden met een verschillende doorlatendheid. Dit komt dus hierop neer, dat het vat, waarin de proefnemingen moeten worden uitgevoerd, niet te groot kan zijn, zoodat het leegmaken en weer opnieuw vullen met den vereischten zandgrond, die tusschentijds misschien ook nog weer gedroogd moet worden, niet al te veel tijd in beslag neemt. Anderzijds kunnen de afmetingen ook weer niet te klein zijn, hetgeen duidelijk wordt, wanneer men bedenkt, dat het leeggepompte gedeelte van het boorgat ten slotte weer gevuld moet worden met water uit den grond er omheen. Ook moet de grondwaterstand in het vat zich dieper dan de maximale capillaire stijghoogte onder het oppervlak van het zand bevinden, daar anders moeilijkheden kunnen optreden, waarvoor verwezen mag worden naar de in noot 2 genoemde literatuur blz. 219. Daarom werd ten slotte een cilindrisch ijzeren vat gekozen van 150 cm hoogte en met een diameter van $\pm 62,5$ cm, waardoor voor de vulling ruim 800 kg zand en ruim 140 l. water noodig was.

Later zal blijken, dat de diameter van het vat toch nog te klein is om eenzelfde strooming van het water naar het boorgat te verkrijgen, als naar een boorgat in een grond van oneindige uitgestrektheid om het boorgat het geval is. Hierbij zal echter tevens blijken, dat het verschil alleen tot uiting komt in de grootte van een overigens constanten factor. Om dit te kunnen nagaan zijn ook proefnemingen verricht in een zoo grooten bak, gevuld met grof rivierzand, dat de strooming naar het boorgat hier gelijk is te stellen aan de strooming naar een boorgat in een grond van oneindige uitgestrektheid.

Het spreekt ten slotte wel vanzelf, dat het ook nog gewenscht zou zijn de verkregen vergelijkingen te toetsen door metingen van de stijgsnelheid te verrichten in boorgaten in gedraineerden kleigrond. Nu is immers een vergelijk mogelijk tusschen den met de boorgatenmethode verkregen doorlaatfactor en den factor, verkregen uit grondwaterstand- en debietmetingen (eerste methode), waarbij overeenstemming tusschen de resultaten van beide methoden moet bestaan.

In de eerste plaats zullen nu de proefnemingen in het reeds genoemde vat besproken worden, daar met behulp van deze proefnemingen de betreffende formules zijn uitgebouwd. Hierbij spreekt het vanzelf, dat in de eerste plaats de proefnemingen in homogene gronden besproken zullen worden en daarna de proefnemingen in heterogene gronden.

§ 2. CONTRÔLE-METINGEN IN EEN VAT GEVULD MET VERSCHILLENDE ZANDGRONDEN.

A. Homogene gronden.

a. De gebruikte doorsneden van de boorgaten (geperforeerde buizen) en de gebruikte zandgronden.

De doorsnede van het gebruikte vat bedroeg dus, zooals reeds is opgemerkt, $\pm 62,5$ cm. Deze doorsnede is in elk geval nog zoo gering, dat de doorsneden van de gebruikte boorgaten niet groot kunnen zijn. Het spreekt verder wel vanzelf, dat in zandgronden geen boorgaten zijn te maken, daar deze, onder het phreatisch oppervlak in elk geval, dicht zouden zakken. Daarom werden midden in het vat geperforeerde koperen buizen (gemaakt van geperforeerde koperen plaat met ronde gaatjes van 0,5 mm of met langwerpige openingen van 1 cm bij 0,5 mm) geplaatst, waarvan de doorlatendheid voor water op zichzelf veel grooter is dan van den meest doorlatenden zandgrond, zoodat tegen het gebruik van deze buizen geen bezwaar bestaat. De waarnemingen werden in verband met de doorsnede van het vat verricht met geperforeerde buizen van een diameter van resp. 8, 6, 4 en (enkele waarnemingen) 2 cm.

Verder was het, zooals reeds werd opgemerkt noodzakelijk de proefnemingen met verschillende zandgronden uit te voeren. Hiervoor werden gebruikt een rivierzand, een eemzand en een heidezand, waarvan de k (10 : 35)-factoren resp. bedroegen 34.4; 20.92; en 1.39 m.p. 24 uur (zie voor de wijze van bepaling van deze factoren de onder noot ²) genoemde literatuur). Deze gronden werden in een voldoende hoeveelheid aangeschaft, gedroogd en gedeeltelijk gezeefd door een zeef met openingen van 2 mm (n.l. het heidezand en het eemzand) en gedeeltelijk door een zeef met openingen van 5 mm (het rivierzand). De gezeefde gronden werden ieder afzonderlijk zeer zorgvuldig gemengd, waarna in zeer zorgvuldig genomen monsters de doorlaatfactoren volgens de, in noot ²) genoemde literatuur, besproken methode werden bepaald en op een temperatuur van 10° C en een lucht vrij poriënvolume van 35 volume procenten werden ongerekend.

b. Bespreking van de wijze van vulling van het vat.

In de tweede plaats zal nu beschreven worden op welke wijze het vat met den betreffenden zandgrond werd gevuld en op welke wijze de stijgsnelheid van het water in het boorgat (geperforeerde buis) werd gemeten. Als voorbeeld is daarvoor gekozen de vulling van het vat met eemzand bij gebruik van een geperforeerde buis met een doorsnede van 6 cm. Ook zullen enkele metingen, die met deze vulling van het vat zijn verricht, uitvoerig worden besproken. Het spreekt overigens wel van zelf, dat ook de andere vullingen van het vat met andere zandgronden en bij gebruik van andere geperforeerde buizen op dezelfde wijze geschieden. Ook de meting van de stijgsnelheid van het water, evenals de wijze van berekening hieruit van de verlangde constanten of doorlaatfactoren geschiedt op analoge wijze.

De inhoud van het cilindrische vat was te voren door vulling met uitgewogen hoeveelheden water bepaald en bedroeg, wanneer het vat over een hoogte van 148 cm gevuld was, 468,06 liter.

Het luchtdroge (of vrijwel luchtdroge) eemzand werd telkens bij 30 kg tegelijk in een bak op een bascule (nauwkeurigheid ± 20 gram) afgewogen. Om het vochtgehalte van het zand in rekening te kunnen brengen werd van iedere schep zand, die in den genoemden bak werd gedaan, een klein mengmonstertje in een stopflesch verzameld. Na de vulling van het vat, werd de inhoud van de stopflesschen (gewoonlijk 2 stuks van 2 liter) zorgvuldig gemengd en hierin een vochtbepaling verricht (drogen tot 105° C), zoodat ook van de geheele gebruikte hoeveelheid zand het gemiddelde vochtgehalte bekend was.

Het water werd bij 20 of 10 kg tegelijk in een bak op de bascule afgewogen, waarbij steeds is aangenomen, dat 1 kg water gelijk 1 liter water is.

De vulling van het vat geschiedde nu aldus (zie figuur VIII en de nevenstaande foto I), dat, nadat de buis B (hier 6 cm) in het middel van het vat was geplaatst (op den bodem van het vat waren opstaande pennen aangebracht, waardoor de buis tijdens het vullen van het vat niet kon verschuiven), eerst 30 liter water in het vat werd gebracht en daarna 4×30 kg zand. Met behulp van een stok, waaraan een schijf hout was bevestigd, werd het zand zorgvuldig met het water gemengd, waarna gedurende eenigen tijd met een houten hamer tegen den buitenwand van het vat werd geslagen. Hierdoor werd de lucht vrijwel geheel verdreven en kreeg het zand een zoo klein poriënvolume, dat geen vrees meer bestond, dat dit poriënvolume tijdens de metingen nog zou afnemen ten gevolge van trillingen van het vat. Vervolgens werd opnieuw 30 kg water en 4×30 kg zand in het vat gebracht en dezelfde bewerkingen

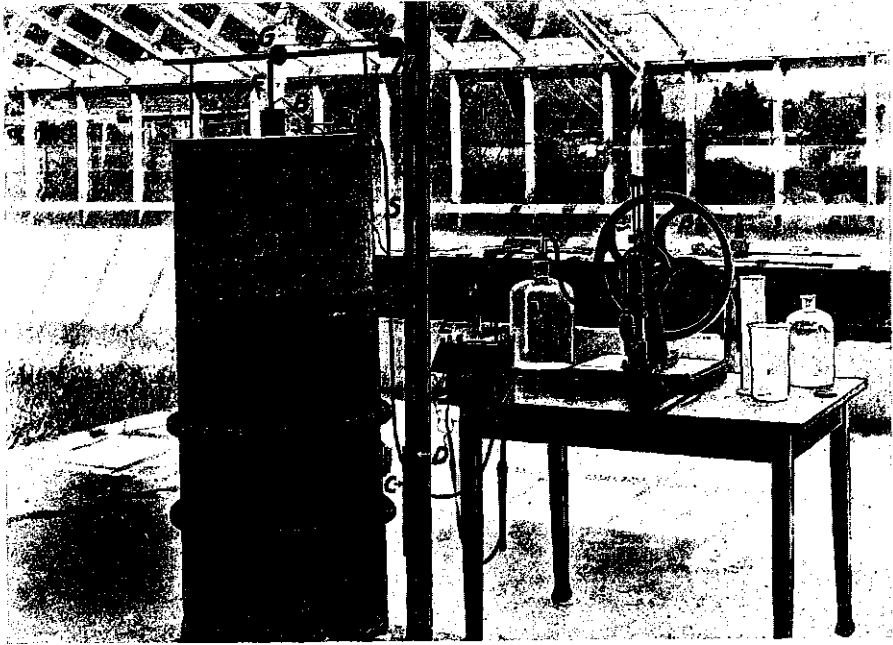
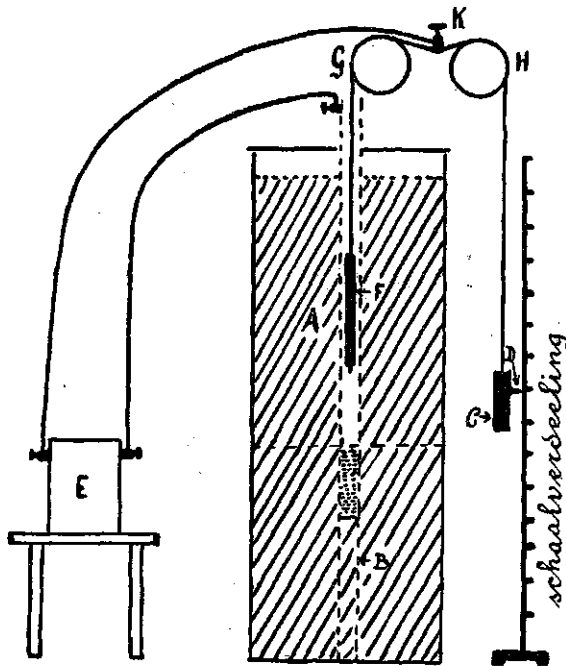


Фото I.



FIGUUR VIII.

herhaald. Werd de waterlaag boven het zandoppervlak te dik (meer dan 5 cm) dan werd meer zand toegevoegd, enz. De waterlaag boven het zand tijdens het vullen moet namelijk niet te groot worden, daar anders ontmenging van den zandgrond en laagvorming kan optreden. Zoo nu en dan werd ook een klein gedeelte van het zand in de geperforeerde buis gebracht, daar slechts weinig zand door de openingen in de buis dringt; uitgezonderd bij het heidezand. Is de geperforeerde buis tot een bepaalde hoogte met zand gevuld, dan blijft dat gedurende de metingen, ook bij een vulling van het vat met heidezand, dezelfde. De geperforeerde buis laat tijdens de metingen dus gemakkelijk het water, echter niet het zand, door.

Behalve het vat werd dus gewoonlijk ook de geperforeerde buis voor een gedeelte met zand gevuld. Dit laatste komt immers overeen met het geval, dat het boorgat de ondoorlatende laag niet bereikt. Is nu het vat bijna gevuld, dan wordt zooveel water toegevoegd, dat juist het zand tot het oppervlak met water gevuld is, evenals ongeveer de gebruikte geperforeerde buis. (Hier 0,7 cm onder het gemiddelde zandoppervlak in het vat.)

De gebruikte hoeveelheid zand bedroeg in dit geval 810 kg met een vochtgehalte van 0,61 %; de gebruikte hoeveelheid water was 142,8 kg. Op 32 plaatsen, regelmatig over het zandoppervlak verdeeld, werd nu de afstand

tot den bovenrand van het vat bepaald. Deze afstand was hier gemiddeld 6,5 cm. De bovenrand van de geperforeerde buis bevond zich verder 8,6 cm boven den bovenrand van het vat, zoodat de bovenrand van de geperforeerde buis zich $8,6 + 6,5 = 15,1$ cm boven het zandoppervlak in het vat bevond. In de geperforeerde buis bevond zich het zandoppervlak 74,9 cm onder den bovenrand van de buis of dus $74,9 - 15,1 = 59,8$ cm onder het gemiddelde zandoppervlak in het vat. Het vat werd nu met een deksel afgesloten om de verdamping van het water zooveel mogelijk te voorkomen. Op de metingen zelf heeft de verdamping overigens geen invloed.

c. *De berekening van den doorlaatfactor van het zand in het vat uit de op andere wijze bepaalde k_{10} : 35 -waarde.*

De berekening van den doorlaatfactor bij 10° C, maar verder onder de omstandigheden, zooals deze tijdens de proefnemingen in het vat aanwezig waren, geschiedde uit de doorlaatfactoren, die bepaalde waren in het laboratorium met behulp van de methode, zooals deze in de in noot 2) genoemde literatuur is beschreven. Het spreekt vanzelf, dat voor deze laatste bepalingen ook het rivierzand werd gebruikt, zooals dit voor de vulling van het vat werd gebruikt.

Om genoemde berekening te kunnen uitvoeren, moet het poriënvolume en het luchtvrĳe poriënvolume (resp. p en p_0) van het zand in het vat bekend zijn. Deze werden op de volgende wijze uit de gegevens berekend:

De totale hoogte van het vat binnenwerks bedraagt 151 cm en dus de lengte van de zandkolom $151 - 6,5 = 144,5$ cm. De inhoud van de geheele kolom zand (geperforeerde buis medegerekend) is dus:

$$\frac{144,5}{148,0} \cdot 468,06 = 457,0 \text{ l.} \quad a$$

De inhoud van de geperforeerde buis (de dikte van den koperen wand is verwaarloosd), die *niet* gevuld is met zand, bedraagt:

$$\pi \cdot 3^2 \cdot 59,8 = \pm 1700 \text{ cm}^3 = 1,7 \text{ l.} \quad b$$

Er is verder gebruikt 810 kg droge zandgrond met een vochtgehalte van 0,61 %. Hierin bevindt zich dus 4,9 kg water en dus 805,1 kg droge stof. Het volumegewicht van den zandgrond is dus:

$$\frac{805,1}{a-b} = \frac{805,1}{455,3} = 1,768$$

Het soortelijk gewicht van den zandgrond (bepaald met pyknometer) bedraagt 2,659, zoodat het poriënvolume is:

$$p = 100 - \frac{1,768}{2,659} \cdot 100 = 33,5 \%$$

Er is verder gebruikt 142,8 liter water + 4,9 l (vocht) = 147,7 l. In den zandgrond is deze hoeveelheid niet geheel opgenomen, daar zich ook nog een hoeveelheid water in de geperforeerde buis boven het zand bevindt. Deze hoeveelheid is:

$$\pi \cdot 3^2 \cdot (59,8 - 0,7) = \pm 1700 \text{ cc} = 1,7 \text{ l.}$$

In den zandgrond is dus opgenomen: $147,7 - 1,7 = 146,0$ l. of in volume procenten:

$$\frac{146}{a - b} = \frac{146}{455,3} = 32,1 \%$$

In den zandgrond is dus nog aanwezig $33,5 - 32,1 = 1,4 \%$ lucht, zoodat p_0 (zie de in noot ²) genoemde literatuur) 32,1 % of 0,321 gedeelte bedraagt. ¹⁾

De ($k_{10 : 35}$)-factor van dezen grond bedraagt 20,92 m. p. 24 uur. Deze factor bij 10°C bij een poriënvolume van 33,5 % (of 0,335 gedeelte) en bij een p_0 -waarde van 32,1 % bedraagt dus, ongerekend met behulp van de volgende vergelijking:

$$k = k_{10 : 35} \cdot \frac{(0,65)^2 \cdot p_0^3}{(1 - p)^2 \cdot (0,35)^3} = 15,42 \text{ m.p. 24 uur.}$$

Er werd nu zooveel zand en water (als suspensie) met behulp van een lucht-pomp p in een voor de pomp geschakelde groote flesch v gezogen (zie foto I), dat bij de eerste serie metingen het zandoppervlak in de geperforeerde koperen buis zich op een bepaalde hoogte (hier b.v. ± 80 cm) onder het gemiddelde zandoppervlak in het vat bevond, zoodat zich dus een kolom zand van bepaalde lengte (hier: $145 - 80 = 65$ cm) in de buis bevond (de ondoorlatende laag bevindt zich dus 65 cm onder den bodem van het boorgat). Tegelijk hiermede was de grondwaterspiegel zoo sterk verlaagd, dat hij zich dieper dan de maximale capillaire stijghoogte (bij het gegeven poriënvolume) onder het gemiddelde zandoppervlak bevond, hetgeen, zooals reeds werd opgemerkt, noodzakelijk is om onjuiste waarnemingen te voorkomen. Bij het rivier-, eems- en heidezand bevond zich dan ook bij het begin van de metingen het wateroppervlak minstens resp. ± 23 , 28 en 72 cm onder het gemiddelde zandoppervlak in het vat.

²⁾ Tijdens de metingen werd geen water toegevoegd. Hierdoor zou immers het luchtgehalte van den grond en daarmee zijn doorlatendheid kunnen veranderen.

d. De uitvoering van de bepaling van de stijgsnelheid; de uitvoering van de berekeningen.

De meting van de stijgsnelheid komt steeds neer op de bepaling van $t\gamma = \log \frac{y_0}{y} : t$. Daar de bepaling daarvan steeds op dezelfde wijze plaats vindt onafhankelijk van het feit of zich al dan geen zand in de buis bevindt, kunnen we met de behandeling van één voorbeeld volstaan.

1. Beschrijving van de gebruikte apparatuur.

Voor deze meting van de stijgsnelheid moeten we de ligging van den grondwaterstand op ieder moment onder het zandoppervlak in het vat kennen. Om de diepte van dezen waterstand onder het gemiddelde zandoppervlak in het vat op ieder moment te kunnen bepalen, werd gebruik gemaakt van de volgende installatie (zie figuur VIII en foto I).

Een koperen staaf F van ± 60 cm lengte en 3 mm doorsnede werd op eenige mm's van het eene uiteinde van een schijfje eboniet voorzien en daarvan af tot het andere uiteinde omkleed met een laag lood, Aan dit andere uiteinde werd een soepele, gevlochten koperdraad bevestigd. Het lood en de aanhechtingsplaats van de koperdraad werden ter isolatie omwoeld met isolatieband en vervolgens nog bedekt met een laag rubberlak. De koperdraad loopt nu over een draaibare ebonieten schijf G, strijkt daarna langs een veerend contact K en loopt vervolgens over een tweede, eveneens draaibare, ebonieten schijf H. Aan het uiteinde van deze draad is een zware cylinder van massief koper C (als contragewicht) bevestigd, waarop een pijlvormig reepje koper D is gesoldeerd. De punt van dit reepje koper loopt over een schaalverdeeling (oorspronkelijk een meetband — zie foto —, later millimeterpapier), die op een houten stander is bevestigd. Op de geperforeerde koperen buis is een klemschroef gesoldeerd, evenals op het veerend contact K. Verbindt men nu deze 2 klemschroeven geleidend met de klemschroeven van den galvanometer en de batterij (beide in doos E ondergebracht), dan zal het duidelijk zijn, dat de stroom gesloten is, zoodra het onderste vlakje van de koperen staaf het wateroppervlak in de geperforeerde buis raakt. Om nu na te gaan hoeveel cm's dit onder het gemiddelde zandoppervlak in het vat bedraagt, moet de schaal na iedere vulling van het vat opnieuw worden geijkt. Dit geschiedde aldus, dat de pijl D op de koperen cylinder C op een daarvoor geschikt punt van de mm-schaal werd gesteld, b.v. op 50,0 cm. Nu werd op de geïsoleerde staaf F een streepje gezet op dezelfde hoogte als den bovenkant van de geperforeerde koperen buis (zie foto). Wordt nu deze koperen staaf uit de geperforeerde buis genomen en de afstand van het daarop aangebracht streepje tot

het vrije uiteinde van deze koperen staaf F bepaald (hier 66,9 cm) en wordt hiervan de hoogte van den bovenkant van de geperforeerde buis boven het zandoppervlak (hier 15,1 cm) afgetrokken, dan is dus daarmede de stand van de pijl op de mm-schaal en de afstand van het vrije uiteinde van de koperen staaf F onder het zandoppervlak in het vat (hier $66,9 - 15,1 = 51,8$ cm) bekend. In het besproken voorbeeld wijst de pijl op de mm-schaal dus 1,8 cm ($51,8 - 50,0$) te laag aan, die dus telkens bij de aflezing op de mm-schaal moeten worden bijgeteld.

2. De meting van de stijgsnelheid.

In het algemeen verliepen de metingen bij een zelfde vulling van het vat in 3 series van telkens van 3 tot 5 metingen en wel ± 5 metingen bij een zandlaag in de geperforeerde buis van ± 65 cm; ± 5 metingen bij een zandlaag van 30 à 25 cm en ± 5 metingen, waarbij zich in het geheel geen zand meer in de geperforeerde koperen buis bevond. De 2 eerste series komen dus overeen met 2 gevallen, waarin het boorgat de ondoorlatende laag nog niet heeft bereikt en de ondoorlatende laag op verschillende diepten onder den bodem van het boorgat ligt, terwijl de laatste serie overeenkomt met het geval, dat wel de ondoorlatende laag wordt bereikt. In sommige gevallen werd ook direct al het zand uit de buis verwijderd. De bepaling van de stijgsnelheid (t_{90}) geschiedt echter steeds op dezelfde wijze.

De meting van de stijgsnelheid komt nu hierop neer, dat — nadat het evenwicht was bereikt — eerst de temperatuur van het water werd bepaald en daarna de stand van het water in de geperforeerde buis (= grondwaterstand) met behulp van het beschreven apparaat werd bepaald. Daarna werd met behulp van de luchtpomp een hoeveelheid water uit de buis gepompt. Gewoonlijk werd zooveel water uit de buis gezogen (geen of vrijwel geen zand werd meegezogen), dat boven het zandoppervlak in deze buis of boven den bodem van het vat, indien zich n.l. geen zand meer in de buis bevond, nog een laag water ter dikte van enkele cm's aanwezig bleef. De koperen staaf F werd nu tegelijkertijd met het leegpompen van de buis zoover in de buis neergelaten, dat het uiteinde zich nog slechts op enkele mm's resp. cm's (afhankelijk van de stijgsnelheid) boven dit wateroppervlak bevond. De gummislang (gebruikt voor het leegpompen van de buis) werd nu vlug uit de buis getrokken en een 4-tal stophorloges in werking gesteld, zoodra de stroomkring (de galvanometernaald slaat uit) weer gesloten werd. De pijl aan den koperen cylinder C werd nu een bepaald aantal cm's (afhankelijk van de stijgsnelheid) op de mm-schaal naar beneden getrokken en het eerste stophorloge stop gezet, zoodra de galvanometer weer een uitslag gaf. De pijl aan den koperen cylinder werd nu weer een bepaald aantal cm's naar beneden getrokken en nu het tweede

stophorloge buiten werking gezet, wanneer de galvanometernaald weer een uitslag gaf, enz. Door nu bij het stopzetten van het vierde stophorloge te gelijkertijd tijd weer het eerste stophorloge in werking te stellen, nadat natuurlijk eerst de tijden genoteerd waren, konden dus zooveel metingen worden verricht als gewenscht bleken te zijn. Gewoonlijk zijn echter 4 metingen meer als voldoende. De meting is hiermede afgelopen. De volgende meting kan pas plaats vinden, wanneer het evenwicht weer is bereikt. Voor het eems- en rivierzand kon $2 \times$ per dag een meting worden verricht. Bij het heidezand moest 1 à 2 dagen worden gewacht, afhankelijk van de doorsnede van de gebruikte buis. Soms werd na iedere meting nog een extra hoeveelheid water uit de buis gepompt, wanneer de bedoeling voorlag den waterstand van meting tot meting snel te doen dalen.

serie p. 110 3. De berekening van $ty\alpha$ uit de gemeten stijgsnelheid.

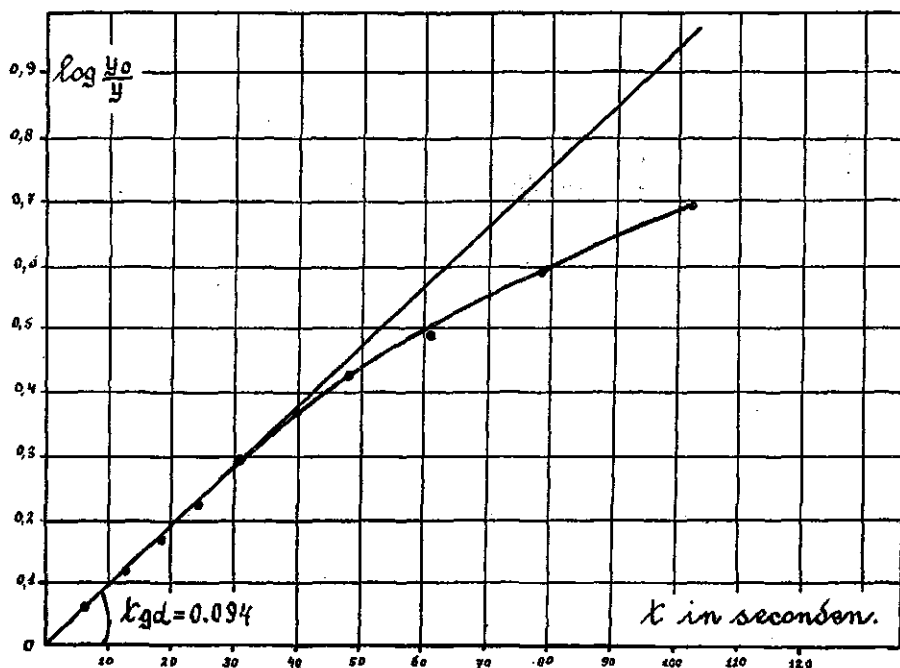
Hieronder zijn nu de resultaten van één meting uitvoerig weergegeven, voor het geval, dat zich geen zand meer in de buis bevindt.

Hierbij was de grondwaterstand 0,842 m onder het zandoppervlak in het vat en bevond zich de bodem van het vat 1,435 m onder het zandoppervlak in het vat. De temperatuur van het water bedroeg $20,6^\circ$ C. De stophorloges werden in werking gezet ($t = 0$) bij een grondwaterstand van 1,318 m onder het maaiveld; y_0 was dus in dit geval $1,318 - 0,842 = 0,476$ m. Het eerste stophorloge werd stop gezet bij een grondwaterstand van 1,258 m ($y_1 = 1,258 - 0,842 = 0,416$ m), enz.. Rekenen we ook de verdere waterstanden in de geperforeerde buis om in m's onder den oorspronkelijken grondwaterstand (0,842 m), dan worden de volgende waarden verkregen (zie tabel I):

TABEL I.

Waarneming.	t (in sec.).	y (in m's).	$\log \frac{y_0}{y}$
0	0	$= y_0 = 0.476$	0
1	6.2	$= y_1 = 0.416$	0.0585
2	12.4	$= y_2 = 0.366$	0.1141
3	18.6	$= y_3 = 0.316$	0.1779
4	25.6	$= y_4 = 0.276$	0.2367
5	32.2	$= y_5 = 0.236$	0.3047
6	39.2	$= y_6 = 0.206$	0.3637
7	48.8	$= y_7 = 0.176$	0.4321
8	62.8	$= y_8 = 0.146$	0.5133
9	78.0	$= y_9 = 0.116$	0.6132
10	103.0	$= y_{10} = 0.096$	0.6953

Zetten we nu in een diagram op de abscis den tijd t in sec. en op de ordinaat de bijbehorende waarden van $\log \frac{y_0}{y}$ uit (zie figuur IX)¹⁾, die op ver-



FIGUUR IX.

schillende tijden na den tijd $t = 0$ verkregen zijn, dan blijkt dus, dat de betreffende punten tot en met de 6de waarneming vrijwel op een rechte lijn liggen; daarna treedt een duidelijke afwijking van deze rechte lijn op. Op deze afwijking zal later worden teruggekomen. Hier kunnen we volstaan met op te merken, dat de tangens van den hoek, die de door de punten getrokken rechte lijn maakt met de abscis, de gevraagde $tg\alpha$ (hier 0,0094) is en hier bij een temperatuur van het water van 20,6 °C is bepaald. Hierbij moet er aan gedacht worden, dat wanneer we de doorlaatfactoren in *m.p.* 24 uur willen uitdrukken, we den tijd in etmalen moeten aangeven. Voor de latere berekeningen moet dan ook $tg\alpha$ ($\log \frac{y_0}{y} : t$ (in sec.)) met 86400 worden vermenigvuldigd.

Met de bepaling van deze $tg\alpha$ is de meting van de stijgsnelheid geëindigd. Zooals echter bekend is, hangt de doorlatendheid van den grond af van de

¹⁾ In figuur IX staat opgegeven, dat $tg\alpha = 0.094$; dit moet zijn 0.0094.

temperatuur van het grondwater (viscositeit van het grondwater). Daar de metingen echter bij zeer verschillende temperaturen zijn uitgevoerd, was het noodzakelijk de resultaten steeds op eenzelfde temperatuur om te rekenen. Ook nu werd hiervoor een temperatuur van 10° C gekozen. Is de viscositeit van het water bij de temperatuur van het water tijdens de meting (t° C) gelijk η_t en bij 10° C η_{10} dan is dus blijkbaar (zie ook de in noot 2 genoemde literatuur)

$$(tg\alpha)_{t=10^{\circ}} = (tg\alpha)_{t=t} \cdot \frac{\eta_t}{\eta_{10}} \quad (53)$$

Voor de waarden van de viscositeit bij de genoemde temperaturen kunnen zonder bezwaar de viscositeiten van zuiver water worden genomen. Alle verkregen waarden van $tg\alpha$ werden op deze wijze op een temperatuur van 10° C omgerekend. Gewoonlijk geschiedde dit te gelijk met de berekening van den factor a of van de doorlaatfactoren (zie de volgende paragrafen van dit hoofdstuk).

e. Contrôle en uitbouw van de vergelijkingen (32) en (33).

De uitbouw en contrôle van de vergelijkingen (32) en (33) moet op deze wijze geschieden, dat we in de eerste plaats moeten nagaan of inderdaad $tg\alpha$ gedurende de opstijging constant blijft. In de tweede plaats moet dan worden nagegaan waardoor de factor a in deze vergelijkingen wordt beïnvloed, waarvoor de factoren H , r en y_0 in verband met de grootte van H in aanmerking komen. Dit laatste (afhankelijkheid van y_0) zal het beste uit die metingen kunnen worden afgeleid, waarbij zich geen zand meer in de geperforeerde buis bevindt (de ondoorlatende laag wordt bereikt). In de derde plaats zal dan moeten worden nagegaan, wat de invloed is van de doorlatende laag onder den bodem van het boorgat (er bevindt zich zand in de geperforeerde buis).

1. De onveranderlijkheid van $tg\alpha$.

In de eerste plaats zal dus worden nagegaan of inderdaad de metingen het resultaat hebben opgeleverd, dat de vorm van de stroombanen constant is of wat hetzelfde is, de trechtvormige inzinking van het phreatisch oppervlak rondom het boorgat te verwaarloozen klein is, zoodat $tg\alpha$ constant blijft.

Het zal duidelijk zijn, dat deze inzinking van het phreatisch oppervlak des te eerder te verwaarloozen is, wanneer:

a. Sneller na het leegpompen van het boorgat (geperforeerde buis) gemeten wordt;

b. bij denzelfden grond de doorsnede van het boorgat (geperforeerde buis) kleiner is;

c. bij dezelfde doorsnede van het boorgat (geperforeerde buis) de grond doorlatender is.

Of het bovenstaande inderdaad het geval is, kan het eenvoudigste worden aangetoond door na te gaan tot welk percentage van y_0 het water in de geperforeerde buis kan opstijgen, voordat $tg\alpha$ verandert, of dus voordat de bindingslijn der opvolgende metingen in het $\log \frac{y_0}{y} : t$ — diagram van een rechte lijn begint af te buigen. In tabel II zijn voor 3 verschillende zandgronden, en bij gebruik van geperforeerde buizen van verschillende doorsneden, de waarden van $tg\alpha$ voor de stijging van het water in procenten van de y_0 -waarden aangegeven.

TABEL II.

Waarnemingen van $tg\alpha$ tijdens de opstijging van het water in afhankelijkheid van de doorsnede van de buis, van de doorlatendheid van den gebruikten zandgrond en van het percentage van y_0 , waarover het water sedert den tijd $t = 0$ reeds weer is gestegen.

Stijging van het water in % van y_0	Heidezand $k(10:35) = 1,39$ m.p. 24 uur.		Emszand $k(10:35) = 20,92$ m.p. 24 uur.			Rivierzand $k(10:35) = 34,4$ m.p. 24 uur.		
	$d=8$ cm	$d=4$ cm	$d=8$ cm	$d=6$ cm	$d=4$ cm	$d=8$ cm	$d=6$ cm	$d=4$ cm
1	0,00033	0,00151	0,0054	0,0095	0,0141	0,0105	0,0170	0,034
2	0,00033	0,00151	0,0054	0,0095	0,0141	0,0105	0,0170	0,034
5	0,00027	0,00151	0,0054	0,0095	0,0141	0,0105	0,0170	0,034
10		0,00149	0,0054	0,0095	0,0141	0,0105	0,0170	0,034
15			0,0054	0,0095	0,0141	0,0105	0,0170	0,034
20			0,0054	0,0095	0,0141	0,0105	0,0170	0,034
25			0,0054	0,0095	0,0141	0,0105	0,0170	0,034
30			0,0054	0,0095	0,0141	0,0105	0,0170	0,034
40			0,0050	0,0095	0,0141	0,0100	0,0170	0,034
50				0,0094	0,0141		0,0170	0,034
60					0,0141		0,0170	0,034

OPMERKING. De waarden van $tg\alpha$ zijn niet gecorrigeerd voor een van 10° C afwijkende temperatuur van het grondwater, daar dit in dit verband niet noodig is.

Uit tabel II blijkt zonder meer de juistheid van hetgeen onder sub a , b en c is aangegeven. Hieruit volgt dan ook, dat inderdaad met voldoende juistheid kan worden verondersteld, dat in elk geval gedurende de stijging van het water over het eerste gedeelte van de y_0 -waarde de vorm van de stroombanen constant blijft. Hieruit volgt echter tevens, dat voor de berekeningen alleen de waarden van $tg\alpha$, berekend uit de eerste waarnemingen van de stijgsnelheid van het water in de buizen na het leegpompen daarvan, in aanmerking komen voor de berekeningen, en voor het contrôleeren en uitbouwen van de opgestelde vergelijkingen.

Hierbij kan nog worden opgemerkt, dat in gronden in de natuurlijke ligging de omstandigheden veel gunstiger voor het constant blijven van $tg\alpha$.

zijn dan voor de zandgronden in het vat van een ten slotte relatief geringe doorsnede. Bij natuurlijk gelegen gronden kan immers uit een wijderen omtrek water naar het vrijwel leeggepompte boorgat vloeien. In overeenstemming hiermede is dan ook, dat bij een veel grootere doorsnede van het boorgat (b.v. 20 cm) en een veel kleinere doorlatendheid van den grond nog volkomen rechte lijnen in een $\log \frac{y_0}{y} : t$ -diagram worden verkregen. Men moet hierbij echter niet vergeten, dat de stijgsnelheid hier gewoonlijk ook slechts over enkele procenten van de y_0 -waarden gemeten wordt (zie ook hoofdstuk IV). Voor zeer slecht doorlatende gronden in de natuurlijke ligging, waar de besproken lijn wel eens niet recht blijft, brengt een boorgat van een kleinere doorsnede (b.v. 10 cm; zie hoofdstuk IV) uitkomst.

2. De afhankelijkheid van den factor a in vergelijking (33) van den factor H .

In de tweede plaats moet dus thans worden nagegaan of de factor a in de vergelijkingen (32) en (33) nog afhankelijk is van de factor H . Om dit na te gaan kiezen we de omstandigheden zoo eenvoudig mogelijk en gaan dus na of de factor a in vergelijking (33) constant blijft, indien *alleen* de factor H verandert. Hierbij moeten we dus de gevallen beschouwen, waarbij zich geen zand meer in de buis bevindt. In de eerste plaats zullen dan ook die proefnemingen besproken worden, waarbij de gebruikte buis (n.l. 4 cm) steeds dezelfde was en waarbij de grootte H van meting tot meting (na iedere meting van de stijgsnelheid werd nog een extra hoeveelheid water uit de buis gepompt; zie sub 4b van deze paragraaf) afnam en waarbij deze H -waarde bij de eerste en laatste meting zoo sterk mogelijk verschillend was. De resultaten van de metingen, die bij een vulling van het vat met eemzand en rivierzand werden uitgevoerd, zijn in tabel III weergegeven.

In de kop van de tabel zijn de doorlaatfactoren aangegeven van het zand bij 10° C, maar overigens onder de omstandigheden (p en p_0 -waarden), zooals deze bij de respectievelijke vullingen van het vat aanwezig waren.

Als voorbeeld zullen we voor één geval den factor a met behulp van de vergelijking (33) (geldig, wanneer de bodem van het boorgat de ondoorlatende laag bereikt) berekenen. Deze vergelijking (33) luidt dus:

$$k = \frac{2,3rtg\alpha}{2H}$$

of

$$a = \frac{2kH}{2,3rtg\alpha}$$

TABEL III.

Eernzand, buis diameter 4 cm of $r = 0,02$ m. Geen zand in de buis, Doorlaatfactor 15,71 m per 24 uur.							Rivierzand, buis diameter 4 cm of $r = 0,02$ m. Geen zand in de buis, Doorlaatfactor 26,9 m per 24 uur.						
Nummer- bepaling.	H.	$tg\alpha$	a	temp.	a omgerekend op 10° C.	$\frac{H}{a} = \alpha$	Nummer- bepaling.	H.	$tg\alpha$	a	temp.	a omgerekend op 10° C.	$\frac{H}{a} = \alpha$
1	0,972	0,0139	0,5528	6,7°	0,502	1,94	1	0,862	0,0311	0,3753	10,1°	0,376	2,29
2	0,907	0,0137	0,5237	6,9°	0,479	1,90	2	0,771	0,0300	0,3480	7,6°	0,325	2,38
3	0,892	0,0140	0,5040	7,5°	0,469	1,90	3	0,755	0,0260	0,3932	5,5°	0,344	2,19
4	0,842	0,0147	0,4531	7,9°	0,426	1,98	4	0,706	0,0260	0,3677	4,0°	0,307	2,30
5	0,774	0,0141	0,4342	7,9°	0,409	1,89	5	0,682	0,0284	0,3251	4,8°	0,278	2,45
6	0,714	0,0149	0,3790	7,6°	0,354	2,02	6	0,659	0,0311	0,2869	6,0°	0,255	2,58
7	0,638	0,0147	0,3433	6,6°	0,311	2,05	7	0,639	0,0340	0,2545	8,0°	0,240	2,66
8	0,588	0,0140	0,3322	6,0°	0,295	1,99	8	0,614	0,0328	0,2534	7,2°	0,234	2,63
9	0,518	0,0170	0,2410	6,5°	0,217	2,39	9	0,546	0,0340	0,2174	10,2°	0,219	2,49
10	0,491	0,0166	0,2340	5,4°	0,204	2,41	10	0,460	0,0335	0,1859	7,3°	0,172	2,68
11	0,446	0,0152	0,2321	5,3°	0,202	2,21	11	0,299	0,0328	0,1234	6,3°	0,111	2,70
12	0,420	0,0177	0,1877	6,0°	0,167	2,52	12	0,221	0,0293	0,1021	8,0°	0,096	2,29
13	0,378	0,0158	0,1892	6,8°	0,172	2,19	13	0,163	0,0303	0,0728	10,1°	0,073	2,23
14	0,355	0,0160	0,1755	6,1°	0,156	2,27							
15	0,323	0,0161	0,1587	3,3°	0,130	2,49							
16	0,281	0,0165	0,1347	3,0°	0,109	2,58							
17	0,265	0,0139	0,1508	2,4°	0,120	2,21							
				Gemiddeld		2,17					Gemiddeld		2,45

Laagste waarde 1,89 afwijking 13 % } v. h.
Hoogste waarde 2,58 afwijking 19 % } gem.

Laagste waarde 2,19 afwijking 11 % } v. h.
Hoogste waarde 2,70 afwijking 10 % } gem.

Gemiddelde van Eernzand en Rivierzand resp. van 2,17 en 2,45 = 2,31 van het gemiddelde.

Laagste waarde 1,89; afwijking 18 % van het gemiddelde.

Hoogste waarde 2,70; afwijking 17 % van het gemiddelde.

Drukken we nu H en r in meters en k in meters per 24 uur uit dan moet dus t in etmalen worden uitgedrukt ¹⁾. Het is echter gemakkelijker t uit te drukken in seconden. Het rechterlid van de tweede vergelijking moet dan echter door 86400 worden gedeeld, zoodat de vergelijking dan wordt:

$$a = \frac{2kH}{2,3rtg\alpha \cdot 86400}$$

¹⁾ Daar de factor a nog de dimensie (l) heeft, verandert ook deze factor, wanneer we k in cm's per seconde en H en r in cm's uitdrukken.

Nemen we nu de eerste meting bij het eemzand als voorbeeld van de berekening van den factor a , dan is dus $k = 15.71$ m. p. 24 uur; $r = 0,02$ m; $H = 0.972$ m (zie tabel III) en $tg\alpha = 0,0139$, zoodat

$$a = \frac{2 \cdot 15,71 \cdot 0,972}{2,3 \cdot 0,02 \cdot 86400 \cdot 0,0139} = 0,5528$$

Nu is echter $tg\alpha$ bepaald bij een temperatuur van het grondwater van $6,7^\circ$ C. Dit wil dus zeggen, dat de factor a bij een temperatuur van 10° C (hiervoor zijn de k -factoren berekend) zou hebben bedragen (zie ook vergelijking (53):

$$a(10^\circ \text{ C}) = a(t^\circ \text{ C}) \cdot \frac{\eta_{10}}{\eta_t}$$

Daar in het gegeven voorbeeld $t = 6,7^\circ$ C bedraagt, is de factor a bij een temperatuur van het grondwater van 10° C dus $0,502$ ¹⁾.

Uit de tabel III blijkt verder, dat de factor a van de vergelijking (33) niet constant blijft. Integendeel blijkt dus deze factor a nog afhankelijk te zijn van H . Noemen we nu den factor $a' = \frac{H}{a}$, dan blijkt, dat, wanneer we dezen factor a' met behulp van de gegevens van tabel III uitrekenen, deze nieuwe factor a' binnen de foutengrenzen constant blijft. Hieruit volgt dan ook, dat, wanneer we voor den factor a in vergelijking (33) den factor $a' = \frac{H}{a}$ invoeren, de factor a' in elk geval niet meer afhankelijk is van den factor H . De vergelijking (33) gaat daarbij dus over in de vergelijking (54):

$$a' = \frac{2,3rtg\alpha \cdot 86400}{2k}, \quad (54)$$

waarbij ook nu — zooals in het vervolg steeds zal geschieden — is verondersteld, dat t in seconden en r in meters is aangegeven. Hierbij moet nog worden opgemerkt, dat de grootste afwijking voor één enkele bepaling van den gemiddelden factor $a \pm 18\%$ bedraagt. Dit lijkt misschien voor diegenen, die niet met bepalingen van de doorlatendheid van den grond vertrouwd zijn, nogal

¹⁾ Een tabel (N°. XIV) van de viscositeiten van zuiver water bij verschillende temperaturen is aan het slot van dit artikel toegevoegd.

groot. Dit is echter niet het geval. De meest nauwkeurige bepalingen van de doorlatendheid zijn soms toch nog belast met een fout van 10 tot 15 % (zie de in noot 2 genoemde publicatie) en het is nog de vraag of een grotere nauwkeurigheid wel (*steeds*) kan worden bereikt. In bepaalde gevallen (b.v. bij veel bepalingen) kunnen misschien wel fouten, kleiner dan 5 %, worden verkregen; als regel zal men er echter bij *enkele* bepalingen ook onder de gunstigste omstandigheden rekening mee moeten houden, dat een fout tot ± 15 % mogelijk is.

Verder blijkt uit tabel III, dat de waarde van den factor a' voor de beide gronden ongeveer dezelfde is. De gemiddelde factor bedraagt $\frac{2,17 + 2,45}{2} = 2,31$. De grootste afwijking van één enkele waarneming

bedraagt voor de laagste waarde van a' (1,89) 18 % en voor de hoogste waarde van a' (2,70) 17 %. Hieruit blijkt dus, dat binnen de foutengrenzen de invloed van de doorlatendheid van den grond op de stijgsnelheid op de juiste wijze in vergelijking (54) en dus ook reeds in de vergelijking (33) in rekening is gebracht.

3. De afhankelijkheid van den factor a' van de doorsnede van de buis.

We zullen nu moeten nagaan of de factor a van de vergelijking (33) nog afhankelijk is van de doorsnede van het boorgat (geperforeerde buis). Daar we nu echter juist gezien hebben, dat de factor a omgekeerd evenredig is met H , kan dus beter worden nagegaan of de nieuwe factor a' nog beïnvloed wordt door den diameter van de gebruikte buis. Om dit na te gaan is dus met behulp van vergelijking (54) nagegaan of de factor a' van deze vergelijking nog door de doorsnede van de gebruikte buis wordt beïnvloed. We zullen daartoe de resultaten beschouwen, die verkregen zijn met vullingen van het vat met eems-, rivier- en heidezand en bij gebruik van buizen van 4,6 en 8 cm doorsnede, waarbij zich geen zand meer in de buis bevindt (het boorgat bereikt dus de ondoorlatende laag). Het spreekt daarbij vanzelf, dat voor iedere buis van een andere doorsnede het vat telkens opnieuw gevuld is geworden. Ook werden bij het gebruik van buizen van dezelfde doorsnede enkele herhalingen verricht, waarbij dus het vat opnieuw was gevuld. Een overzicht van de gemiddelde cijfers ¹⁾, die bij eenzelfde vulling van het vat en bij het gebruik van buizen van dezelfde of van verschillende doorsnede zijn verkregen, is in tabel IV aangegeven. Hierin is ook telkens de doorlaatfactor voor iedere vulling van het vat aangegeven.

¹⁾ Korthedshalve is er van afgezien alle afzonderlijke waarnemingen te vermelden.

TABEL IV.

Gebruikte zandgrond.	Straal ge- bruikte buis in meters.	Door- laat- factor bij 10° C.	Aantal waar- ne- min- gen.	H verandert tijdens de metingen van tot	a' gecorri- geerd op 10° C.	a'' = ar.	Hoogste waarde van a'' (66n meting).	Laagste waarde van a'' (66n meting).
Rivierzand	0,02	26,9	13	0,862—0,163	2,450	0,0490	0,0540	0,0438
"	0,03	26,3	5	0,591—0,401	1,807	0,0542	0,0587	0,0477
"	0,04	23,4	5	0,459—0,294	1,538	0,0615	0,0638	0,0598
					Gemiddeld	0,0549		
Eemzand	0,02	15,71	17	0,972—0,265	2,173	0,0435	0,0516	0,0378
"	0,02	16,05	9	0,765—0,415	1,964	0,0393	0,0432	0,0356
"	0,02	15,20	12	0,828—0,701	2,222	0,0444	0,0492	0,0400
"	0,03	15,42	5	0,595—0,487	1,310	0,0393	0,0413	0,0377
"	0,04	14,64	5	0,594—0,426	1,223	0,0489	0,0530	0,0430
"	0,04	16,30	5	0,570—0,373	0,965	0,0386	0,0427	0,0348
					Gemiddeld	0,0423		
Heidezand	0,02	0,902	10	0,684—0,467	3,081	0,0616	0,0684	0,0544
"	0,04	0,983	3	0,702—0,673	1,023	0,0409	0,0418	0,0400
Totaal aantal waarnemingen			89		Gemiddeld	0,0513		
					Gemiddelde van alle waarnemingen	0,0474		

Uit de tabel IV blijkt, dat de factor a' voor een verschillende doorsnede van de gebruikte geperforeerde buis niet constant blijft. Stellen we echter den factor $a'' = a' \cdot r$ en berekenen we dezen factor a'' uit de gegevens, in tabel IV aangegeven, dan blijkt de nieuwe factor a'' binnen bepaalde foutengrenzen wel constant te zijn, hetgeen het beste tot uiting komt bij de proefnemingen met het eemzand. Voor vullingen van het vat met eemzand blijkt de grootste afwijking van het gemiddelde van ieder van de 6 reeksen waarnemingen met buizen van resp. 4, 6, en 8 cm 15,6 % van het gemiddelde te bedragen, terwijl voor rivierzand de grootste afwijking 12,0 % en voor heidezand 20,1 % van het gemiddelde bedraagt. De gemiddelde factoren a'' van de drie zandgronden, n.l. voor eemzand 0,0423, voor rivierzand 0,0549, en voor heidezand 0,0513 zijn binnen de foutengrenzen gelijk. Ook hieruit blijkt dus nog eens weer, dat de invloed van de doorlatendheid op de stijgsnelheid in vergelijking (54) (en dus ook reeds in vergelijking (33) op de juiste wijze in rekening is gebracht.

Verder blijkt uit deze tabel, dat ook bij alle andere metingen de veranderingen, die in H optreden, geen invloed meer op den factor a'' uitoefenen. Tenslotte zijn in tabel IV ook voor iedere serie metingen de grootste en kleinste waarde van den factor a'' opgegeven, zooals deze in de betreffende serie werden gevonden. De grootste waarde van den factor a'' werd — bij één enkele

meting — gevonden bij het heidezand, n.l. 0,0684. De afwijking van het gemiddelde van alle waarnemingen (0,0474) bedraagt hiervan 44 %. De kleinste waarde van den factor a'' werd gevonden bij het eemzand, n.l. 0,0348. De afwijking van het gemiddelde van alle waarnemingen bedraagt hiervan 28 %. Bij de beoordeeling van deze maximale afwijking voor één enkele waarneming van het gemiddelde van 89 bepalingen moet niet vergeten worden, dat een dergelijke afwijking niet alleen slechts eenmaal is waargenomen, maar dat bovendien deze afwijking de som is van zeer veel fouten, die met de geldigheid van de te contrôleeren vergelijkingen op zich zelf niets uit te staan hebben. Zoo kan b.v. genoemd worden de fout bij de bepaling van den (k 10 : 35)-factor, de fout bij de bepaling van de p - en p_0 -waarden voor de vulling van het vat en de fout van de omrekening van de (k 10 : 35)-waarden en de k 10-waarden onder de omstandigheden voor de vulling van het vat; o.a. in verband met de mogelijk niet volkomen homogene vulling van het vat. Zou men deze fouten van de werkelijke afwijking van den factor a'' kunnen aftrekken, die dus alleen in verband staat met de geldigheid der te contrôleeren vergelijkingen, zoo zou ook de maximale afwijking van één enkele meting van het gemiddelde voor alle waarnemingen zeker belangrijk kleiner zijn en de maximale afwijking van de waarnemingen van 1 serie metingen (dus bij dezelfde vulling van het vat) niet overtreffen; d.w.z. kleiner zijn dan ± 20 %.

Vullen we nu in de vergelijking (54) voor den factor a' den nieuwen factor $a'' = ra'$, dan ontstaat:

$$a'' = \frac{2,3r^2tg\alpha \cdot 86400}{2K}, \quad (55)$$

waarin dus weer t in sec., r in meters en k in meters per 24 uur zijn aangegeven. In deze vergelijking (55) is dus de factor a'' onafhankelijk van de doorsnede van de geperforeerde buis (doorsnede boorgat), van den factor H en van de doorlatendheid van den grond, waarin het boorgat geboord is of dus hier van den zandgrond, waarmede het vat is gevuld. We zullen dus nu nog moeten nagaan of deze factor a'' van de vergelijking (55) ook nog afhangt van de waarde van y_0 in verband met de grootte van den factor H .

4. De afhankelijkheid van den factor a'' van y_0 in verband met de grootte van H .

Ten slotte is nog te onderzoeken of de factor a'' in de vergelijking (55) nog afhankelijk is van de waarde van y_0 in verband met de waarde van H . Denkt men zich b.v. eens het geval, dat het boorgat reikt tot de ondoorlatende laag en de grondwaterspiegel zich daar 1 m boven bevindt. We kunnen nu het boorgat b.v. leegpompen tot zich nog een laagje water van 5 cm daarin bevindt

en dan direct na het leegpompen op de gebruikelijke methode den factor $tg\alpha$ bepalen. We zouden echter ook uit het boorgat slechts weinig water kunnen pompen — b.v. slechts een laag van 20 cm, zoodat nog een laag water van 80 cm in het boorgat achter blijft — en ook nu direct na het leegpompen den factor $tg\alpha$ bepalen. Het spreekt vanzelf, dat de tijd, noodig om na het uitpompen van het water den waterspiegel weer 1 cm te doen stijgen, in het eerste geval veel kleiner is dan in het tweede geval; in het laatste geval is echter ook y_0 veel kleiner. Volgens de vergelijking (55) moet in beide gevallen — onder overigens gelijke omstandigheden — dezelfde factor a'' worden bepaald.

Om dit nu te contrôleeren zijn tusschen de gewone proeven, waarbij met het oog op den tijd het boorgat tot op enkele cm's is leeggepompt, ook enkele bepalingen gedaan, waarbij dit niet het geval was en waarbij dus y_0 meer of minder sterk van H afwijkt. Dit is b.v. geschied bij een vulling van het vat met eemszand en bij het gebruik van een geperforeerde buis van 4 cm doorsnede, waarbij zich geen zand meer in het vat bevond. Hierbij werden bepalingen gedaan, waarbij $y_0 \pm 15$ cm, ± 45 cm en ± 65 tot 78 cm bedroeg. Uit tabel V blijkt, dat de factor a'' , berekend met behulp van de vergelijking (55), daarvan binnen de foutengrenzen onafhankelijk is.

TABEL V.

*Eemszand; buis 4 cm diameter; geen zand in de buis;
Doorlaatfactor $k_{10} = 15,2$ m.p. 24 uur.*

Meting.	H	y_0	a''	Gemiddelde a'' bij zelfde y_0
1	0,828	0,777	0,040	0,040
2	0,827	0,146	0,045	
3	0,798	0,147	0,049	
4	0,794	0,143	0,041	
5	0,800	0,449	0,044	0,045
6	0,784	0,443	0,048	
7	0,773	0,422	0,045	
8	0,767	0,416	0,044	
9	0,766	0,715	0,046	0,0445
10	0,762	0,711	0,041	
11	0,741	0,663	0,044	
12	0,701	0,650	0,047	
		Gemiddeld	0,0445	

Uit tabel V volgt dus, dat in dit opzicht dus de vergelijking (55) juist is.

Samengevat kunnen we dus zeggen, dat de vergelijking (55) met voldoende juistheid geldig is, wanneer de geperforeerde buis geen zand bevat. Dit geval

is dus te vergelijken met het geval, dat het boorgat de ondoorlatende laag bereikt. We dienen dus nu de vergelijking te contrôleeren, die afgeleid is onder de veronderstelling, dat het boorgat de ondoorlatende laag niet bereikt, hetgeen dus overeenkomt met het geval, dat de geperforeerde buis een laag zand bevat.

5. Contrôle van de vergelijking voor het geval het boorgat de ondoorlatende laag niet bereikt.

In het voorgaande hebben we gezien hoe de vergelijking (33) is uitgebouwd tot de vergelijking (55). Het ligt voor de hand aan te nemen, dat ook, wanneer de ondoorlatende laag niet bereikt wordt en dus de grond onder het boorgat doorlatend is, in de vergelijking (32) voor den factor a moet worden ingevuld

$a = \frac{rH}{a''}$ De vergelijking (32) gaat daardoor over in de vergelijking (56):

$$a'' = \frac{2,3r^2tg\alpha \cdot 86400}{k} \cdot \frac{H}{2H + r}, \quad (56)$$

waarin ook nu dus weer de tijd in seconden, H en r in meters, en k in m. p. 24 uur is aangegeven.

Het verschil met de vergelijking (55) bestaat dus alleen in den factor $\frac{H}{2H + r}$, waarin dus feitelijk de correctie ligt besloten, die aan $tg\alpha$ moet worden moet worden aangebracht, wanneer de grond onder den bodem van het boorgat dezelfde doorlatendheid heeft, als de grond daar boven.

Om dit nu te onderzoeken en om tevens na te gaan of het nog van invloed is, waar de ondoorlatende laag zich onder den bodem van het boorgat bevindt, zijn ook proefnemingen verricht, waarbij zich nog zand in de geperforeerde buizen bevond, en waarbij deze zandlagen in de geperforeerde buizen bij iedere vulling van het vat verschillende dikten hadden. Dit geschiedde aldus (zie ook sub b van deze §), dat eerst een 5-tal metingen werden verricht, waarbij zich nog een zandlaag van bepaalde dikte (b.v. 60 cm) in de buis bevond. Daarna werd een gedeelte van het zand uit de buis gezogen (b.v. tot een dikte van 30 cm) en vervolgens nogmaals 5 metingen verricht. Ten slotte werd al het zand uit de buis gezogen en nogmaals metingen verricht, waarvan de resultaten dus reeds zijn medegedeeld. Ook nu werden metingen verricht bij vullingen van het vat met rivier-, eems- en heidezand. Bij dit laatste zand werden ook nog enkele waarnemingen verricht in een geperforeerde buis van 2 cm doorsnede.

TABEL VI.

Gebruikte zandgrond.	Straal gebruikte buis in meters.	Doorlaatfactor bij 10° C.	Aantal waarnemingen.	Factor α'' gecorrigeerd op 10° C.	Hoogste waarde van α'' (één meting).	Laagste waarde van α'' (één meting).	Dikte zandlaag in de geperforeerde buis in meters.
Rivierzand	0,02	26,9	5	0,0446	0,0461	0,0423	0,585—0,243
"	0,03	26,3	10	0,0554	0,0621	0,0476	0,429—0,188
"	0,04	23,4	8	0,0614	0,0677	0,0587	0,583—0,293
			Gemiddeld	0,0538			
			Gemiddelde zandlaag = 0	0,0549			0
Eemzand	0,02	15,20	9	0,436	0,0487	0,0393	0,516—0,132
"	0,02	16,05	10	0,362	0,0383	0,0321	0,557—0,204
"	0,03	15,42	10	0,400	0,0451	0,0320	0,646—0,223
"	0,04	16,30	8	0,360	0,0391	0,0333	0,634—0,353
"	0,04	14,64	11	0,469	0,0504	0,0415	0,576—0,267
			Gemiddeld	0,0405			
			Gemiddelde zandlaag = 0	0,0423			0
Heidezand	0,01	0,902	2	0,0482	0,0546	0,0417	0,591—0,366
"	0,02	0,902	7	0,0568	0,0640	0,0495	0,254
"	0,04	0,983	4	0,0326	0,0350	0,0313 ¹⁾	0,393
			Gemiddeld	0,0459			
			Gemiddelde zandlaag = 0	0,0513			0

Algemeen gemiddelde (zandlaag niet 0) 0,0456 } Gemiddelde alle } $\alpha'' = 0,0465$.
 Algemeen gemiddelde (zandlaag = 0) 0,0474 } waarnemingen }

In tabel VI is een overzicht van de resultaten van de metingen gegeven. Voor iedere serie metingen is de gemiddelde en de hoogste en laagste waarde van den factor α'' vermeld. Tevens zijn voor iedere serie de variaties in de dikte van de laag zand in de geperforeerde buis aangegeven. Ten slotte is voor iederen zandgrond de gemiddelde factor α'' aangegeven, voor het geval er zich geen zand in de buis bevindt en voor het geval dit wel het geval is.

Uit tabel VI blijkt dus, dat de factor α'' binnen de foutengrezen constant is, hetgeen vooral fraai tot uiting komt in de gemiddelde waarden van den

¹⁾ In verband met de geringe waarde van H, de kleine waarde van k en de in verhouding groote waarde van r is voor deze metingen vermoedelijk tgx iets te klein gemeten, daar na de eerste aflezing de lijn in het $\log \frac{y_0}{y}$: t-diagram zich reeds naar de x-as ombuigt.

factor a'' voor iederen zandgrond en voor alle zandgronden. Hieruit volgt dus, dat de vergelijking (56) met voldoende benadering juist is voor het geval het boorgat de ondoorlatende laag niet bereikt.

De grootste waarde van factor a'' , die in één enkele meting van de verrichte 84 metingen is bepaald, bedroeg 0,0677 en de afwijking van de gemiddelde waarde (0,0456) 48 %. De kleinste waarde van den factor a'' was 0,0313 en de afwijking van de gemiddelde waarde 31 %. Zooals echter ook reeds, bij de bespreking van de resultaten van de metingen voor het geval zich geen zand in de buis bevindt, is opgemerkt, bevat deze, bij één enkele waarneming verkregen maximale, afwijking ook vele fouten, die met de geldigheid der onderzochte vergelijking (56) niets hebben uit te staan. De foutengrens van deze vergelijking voor één bepaling is dan ook zonder de genoemde fouten zeker veel kleiner en alleen met deze foutengrens hebben we te rekenen, wanneer de vergelijking wordt toegepast voor de berekening van den doorlaatfactor uit de stijgsnelheid van het water in boorgaten in gronden in de natuurlijke ligging.

B. Heterogene gronden.

Controle van de vergelijkingen (41)—(43).

Zooals reeds in hoofdstuk II is medegedeeld zullen de vergelijkingen (41), (42), (43), enz. geldig zijn, wanneer of de stroombanen voldoende horizontaal loopen (het is dan onverschillig op welke wijze de doorlatendheid in het profiel met de diepte onder maaiveld verandert), of de doorlatendheid naar dieper gelegen lagen steeds afneemt. Om dit nader te contrôleeren werden de volgende proefnemingen gedaan:

I. Het vat werd bij gebruik van een geperforeerde buis met een doorsnede van 4 cm gevuld met 3 lagen van verschillende zandgronden, n.l. resp. met het heide-, het eems- en het rivierzand. Het heidezand vormde de onderste laag, n.l. tot 37,8 cm boven den bodem van het vat ($k_{10} = 1,21$ m. p. 24 uur); van 37,8 tot 73 cm boven den bodem van het vat bevindt zich een laag eemzand ($k_{10} = 14,1$ m. p. 24 uur) en van 73—148,5 cm boven den bodem van het vat een laag rivierzand ($k_{10} = 26,4$). Tijdens de vulling van het vat was er voor zorg gedragen, dat geen menging van deze lagen is opgetreden. De doorlaatfactoren werden uit de $k_{10;35}$ -cijfers en met behulp van de p - en p_0 -cijfers berekend. Deze p - en p_0 -cijfers waren voor iedere laag op dezelfde wijze bepaald, als dit ook voor de vulling van het vat met één zandgrond was geschied, waarnaar mag worden verwezen.

Beginnen we nu de metingen, wanneer de grondwaterspiegel zich nog een flink eind boven het scheidingsvlak van de bovenste en middenste laag bevindt (zich dus nog in het rivierzand bevindt), dan kan dus de vergelijking worden gecontrôleerd voor het geval, dat er zich 3 lagen boven den bodem van het boorgat bevinden en dit boorgat tot de ondoorlatende laag reikt, daar eenvoudigheidshalve al het zand uit de geperforeerde buis was gezogen. Dit wil dus zeggen, dat we vergelijking (43) kunnen contrôleeren, waarin de term $k_4 r$ is vervallen, daar het boorgat immers reikt tot de ondoorlatende laag. Het spreekt daarbij natuurlijk vanzelf, dat in deze vergelijking (43), evenals in de andere vergelijkingen, de factor a vervangen moet worden door $a = \frac{Hr}{a''}$, waardoor dus vergelijking (43) ongevormd wordt tot (de ondoorlatende laag wordt bereikt; t is uitgedrukt in seconden);

$$a'' = \frac{2,3r^2H}{2h_1k_1 + 2h_2k_2 + 2h_3k_3} \cdot 86400 \cdot tg\alpha \quad (57)$$

Daar van meting tot meting telkens water uit de geperforeerde buis werd gepompt, kwam dus het phreatisch oppervlak steeds dieper onder het zandoppervlak te staan en kwam dus ten slotte onder het scheidingsvlak van het eems-zand en het rivierzand. Bij de nu volgende metingen bevonden zich dus nog slechts 2 lagen in het watervoerend profiel. Door invulling voor den factor $a = \frac{rH}{a''}$, gaat dus de vergelijking (42) (de ondoorlatende laag werd bereikt; t is uitgedrukt in seconden) over in:

$$a'' = \frac{2,3r^2H}{2h_1k_1 + 2h_2k_2} \cdot 86400 \cdot tg\alpha \quad (58)$$

Rekent men a'' bovendien op een temperatuur van het water van 10°C om (de k -waarden zijn immers bij 10°C aangegeven, terwijl de temperatuur van het water tijdens de metingen hiervan afwijkt) — waarvoor de rechteleden van de vergelijkingen (57) en (58) bovendien nog met $\frac{\eta_t}{\eta_{10}}$ moeten worden vermenigvuldigd — dan worden de volgende resultaten verkregen (zie tabel VII):

(50) B. 118.

TABEL VII.

Heterogene gronden; de doorlatendheid neemt steeds met de diepte af.

H	$tg\alpha$	Tempe- ratuur water.	h_1	k_1	h_2	k_2	h_3	k_3	a'' gecorrigeerd op 10° C.
0,920	0,0142	17,8	0,378	1,21	0,352	14,1	26,4	0,190	0,0404
0,857	0,0163	20,5							0,0481
0,888	0,0168	19,3							0,0484
0,888	0,0134	17,4							0,0404
0,888	0,0157	17,7							0,0470
0,878	0,0159	16,6							0,0498
0,851	0,0177	18,1							0,0560
									Gemiddeld
2 lagen.									
0,699	0,0131	16,5	0,378	1,21	0,321	14,1	—	—	0,0613
0,684	0,0106	17,0							0,0500
0,658	0,0105	17,4							0,0511
0,678	0,0131	15,8							0,0644
0,656	0,0124	17,2							0,0608
0,650	0,0099	15,6							0,0512
0,650	0,0078	13,0							0,0432
0,587	0,0091	13,8							0,0562
0,576	0,0084	14,8							0,0520
0,569	0,0079	14,6							0,0501
0,561	0,0084	15,8							0,0527
									Gemiddeld

Uit de tabel VII blijkt dus, dat de factor a'' , zowel voor 3 als voor 2 lagen in het watervoerend profiel constant is. Deze factoren zijn binnen de foutengrenzen aan elkaar gelijk en bovendien binnen de foutengrenzen gelijk aan den factor a'' , zooals deze bij de metingen in homogene zandgronden is verkregen. *Hieruit volgt dus, dat onder de gegeven omstandigheden (de stroombanen wijken sterk van de horizontale richting af; de doorlatendheid neemt naar dieper gelegen lagen echter steeds af) de vergelijkingen voor heterogene gronden met even groote nauwkeurigheid juist zijn, als de vergelijkingen voor de homogene gronden.*

II. In de tweede plaats zullen de proefnemingen besproken worden, waarbij het vat eveneens gevuld was met 3 lagen van de bovengenoemde zandgronden en waarbij ook nu weer een geperforeerde buis van 4 cm doorsnede werd gebruikt. De dikte van de afzonderlijke lagen is zooveel mogelijk gelijk gemaakt aan die van geval I; alleen bevindt zich nu het eemzand

onder in het vat. Daarboven bevindt zich een laag heidezand en daarboven weer een laag rivierzand. Het eemzand bevond zich van 0 tot 0,374 m boven den bodem van het vat (k_{10} -waarde 14,5); het heidezand van 0,374 tot 0,741 m (k_{10} -waarde 0,81) en het eemzand van 0,741 tot 1,50 m (k_{10} -waarde 25,7). Ook nu bevond het phreatisch oppervlak zich bij den aanvang van de metingen in het rivierzand, zoodat door middel van de eerste metingen de vergelijking (57) (voor 3 lagen) kon worden gecontrôleerd. Bij latere metingen bevond het phreatisch oppervlak zich (zie in dit verband ook geval I) in het heidezand, waarbij dus de vergelijking (58) voor 2 lagen in het watervoerend profiel kon worden getoetst. De resultaten van de metingen zijn in tabel VIII weergegeven.

TABEL VIII.

Heterogene gronden; de doorlatendheid neemt soms af soms toe met de diepte.

H	$tg\alpha$	Temperatuur water.	h_1	k_1	h_2	k_2	h_3	k_3	a'' gecorrigeerd op 10° C.	
0,934	0,0050	4,5	0,374	14,5	0,367	0,81	25,7	0,193	0,0205	
0,911	0,0043	5,5							0,170	0,0176
0,862	0,0040	5,1							0,121	0,0180
0,828	0,0032	5,4							0,087	0,0155
0,843	0,0034	6,9							0,102	0,0149
0,812	0,0034	7,9							0,071	0,0155
0,797	0,0036	7,1							0,056	0,0173
2 lagen.										
0,706	0,0036	7,4	0,374	14,5	0,332	0,81	—	—	0,0210	
0,667	0,0040	6,1							0,293	0,0210
0,646	0,0042	4,4							0,272	0,0226
0,639	0,0036	5,5							0,265	0,0185
0,596	0,0029	4,5							0,222	0,0145
0,588	0,0036	5,2							0,214	0,0174
0,563	0,0043	4,8							0,189	0,0202
0,543	0,0032	5,0							0,169	0,0146
0,526	0,0036	4,8							0,152	0,0159
0,517	0,0032	6,3							0,143	0,0132
0,501	0,0034	9,1							0,127	0,0126

Uit de tabel VIII blijkt, dat in de eerste plaats voor den factor a'' een andere waarde is gevonden als tot nu toe bij de vatproeven steeds is waargenomen, terwijl bovendien de factor a'' duidelijk afneemt, naarmate de grondwaterspiegel zich hooger in de laag rivierzand (3 lagen) resp. in de laag heidezand (2 lagen) bevindt. De oorzaak ligt in het feit, dat de stroombanen

hier sterk van de horizontale richting afwijken en de doorlatendheid in de laag eemszand daardoor niet onafhankelijk is van de doorlatendheid van de daarboven gelegen laag. Het water, dat uit de laag eemszand in de buis stroomt, moet immers uit de laag heidezand worden aangevuld en dit heeft tot gevolg, dat het water in de laag eemszand door de laag heidezand minder snel wordt aangevoerd, als zij volgens den doorlaatfactor van het eemszand in de buis zou kunnen afstromen. Dit maakt dus, dat het eemszand schijnbaar een geringere doorlatendheid bezit, $tg\alpha$ wordt daardoor verkleind, waardoor de factor a'' in de vergelijkingen (57) en (58) wordt verkleind.

Zou zich ook een dergelijk gelaagde grond op het veld voordoen, dan zouden daar toch veel kleinere fouten verkregen zijn dan bij de vatproeven. Onder de ongunstige omstandigheden, zooals deze bij deze vatproef optreden, is de fout ruw 150 %, daar de gemiddelde waarde van $a'' \pm$ tweevijfde gedeelte is van a'' zooals deze factor bij alle andere vullingen van het vat is verkregen. In werkelijkheid zouden echter, bij een dergelijk geval op het veld, veel kleinere fouten zijn verkregen, daar de stroombanen hier een veel horizontaler richting hebben en de straal voor het voedingsgebied veel grooter is. Verder kan nog worden opgemerkt, dat bovendien een dergelijke opeenvolging in een natuurlijk profiel slechts zelden zal voorkomen. Gewoonlijk neemt namelijk de doorlatendheid met de diepte onder het maaiveld af. Zou een dergelijk geval toch bij metingen voorkomen, dan kan gerust worden aangenomen, dat ook nu de fouten nauwelijks grooter zullen zijn, dan in homogene gronden of in gronden, waarin de doorlatendheid met de diepte onder het maaiveld afneemt.

Wat verder nog de constantheid van $tg\alpha$ tijdens de opstijging van het water in de geperforeerde buizen betreft, kan nog worden opgemerkt, dat $tg\alpha$ in beide gevallen ook nu weer den eersten tijd na het leegpompen van de buis constant blijft. In geval II heeft $tg\alpha$ de neiging iets af te nemen, hetgeen ook bij de homogene gronden steeds het geval is. In geval I heeft $tg\alpha$ eerder de neiging iets toe te nemen. Vermoedelijk wordt dit verschijnsel veroorzaakt door de relatief geringe doorsnede van het vat.

Bij metingen in boorgaten op het veld (zie hoofdstuk IV) blijft $tg\alpha$ overigens ook vrijwel steeds constant. In een enkel geval neemt $tg\alpha$ gedurende den tijd, waarover de stijgsnelheid gemeten wordt, iets af. De grootte van $tg\alpha$ bij den tijd $t = 0$ is ook hier echter steeds zeer goed uit de waarnemingen af te leiden. Tot heden werd nog geen geval waargenomen waar $tg\alpha$ de neiging had tijdens de metingen toe te nemen.

Ten slotte kan nog gemakkelijk worden aangetoond, dat de vergelijkingen (25) en (26), die door mij voor heterogene (gelaagde) gronden zijn afgeleid onder de veronderstelling, dat de inzinking van het phreatisch oppervlak

om het boorgat zich reeds volledig tijdens het leegpompen van het vat heeft ingesteld, voor het beoogde doel minder juist zijn. We kunnen hierbij volstaan met voor 2 gevallen uit de medegedeelde vatproeven, waarbij het vat dus met 3 verschillende zandgronden was gevuld, de constante a van één van deze vergelijkingen te berekenen. We kiezen daarvoor 2 gevallen, waarbij de grondwaterstand ongeveer gelijk is en zich bevindt in de 2de laag boven den bodem van het vat (dus 2 lagen in het watervoerende profiel). In het ééne geval vormt daarbij het heidezand de onderste laag en in het tweede geval het eemzand. Berekenen we nu in beide gevallen de waarde van den factor a in de vergelijking (25) dan vinden we resp.:

Geval I: $d_1 = 0,378$ m en $k_1 = 1,21$; $d_2 = 0,321$ m en $k_2 = 14,1$; $H = 0,699$ m. Uit de metingen van de stijgsnelheid is dan te berekenen, dat $a = 0,359$ (gecorrigeerd op 10° C; berekend voor $y_0 = 0,606$; $y = 0,506$; $t = 6,0$ sec. en temp. $16,5^\circ$ C).

Geval II: $d_1 = 0,374$ m en $k_1 = 14,5$; $d_2 = 0,332$ m en $k_2 = 0,81$; $H = 0,706$ m. Uit de metingen van de stijgsnelheid is dan te berekenen, dat $a = 0,049$ (gecorrigeerd op 10° C; berekend voor $y_0 = 0,661$; $y = 0,611$; $t = 9,4$ sec. en temp. $7,4^\circ$ C).

We zien dus, dat het verschil van de factoren a in de 2 gevallen veel grooter is dan bij de vergelijking (58) voor den factor a'' het geval is. De factor a'' in de vergelijking (58) is voor de 2 gevallen resp.: 0,0613 en 0,0210. De oorzaak van het grooter verschil bij gebruik van de vergelijking (58) ligt hierin, dat het niet juist is uit te gaan van de veronderstelling, dat vlak na het leegpompen — als dus de metingen van de stijgsnelheid beginnen — zich reeds een volledige inzinking rondom de geperforeerde buis heeft ingesteld. De vergelijking (25) en natuurlijk ook de overeenkomstige vergelijking (26) voor 3 lagen in het watervoerend profiel mag (en moet dan trouwens ook) alleen worden toegepast in die gevallen, waarbij eerst zolang water uit de boorput is onttrokken, totdat zich de volledige trechtervormige inzinking van het phreatisch oppervlak rondom het boorgat heeft ingesteld. Dit laatste is — zooals reeds vaker is medegedeeld — hier niet het geval.

Bij de bespreking van de proefnemingen in een grooten bak zal verder worden aangetoond, dat ook de vergelijking (9), zooals deze door DONAT voor homogene gronden is opgesteld, minder juist is.

§ 3. CONTRÔLEMETINGEN IN EEN GROOTEN BAK, GEVULD MET RIVIERZAND.

Bij de besproken proefnemingen in het vat hebben we alle omstandigheden laten variëren, die van invloed zijn of zouden kunnen zijn, zooals de doorlatendheid van den gebruikten grond, de doorsnede van de gebruikte buis, de factor H , de grootte van y_0 in verband met de grootte van den factor H ,

de ligging van de ondoorlatende laag, terwijl ten slotte ook nog heterogene gronden zijn beschouwd. Eén factor, die mogelijk van invloed zou kunnen zijn, hebben we echter in al deze proefnemingen ongewijzigd gelaten, namelijk de dikte van de laag grond rondom het boorgat, daar immers steeds hetzelfde vat voor alle proefnemingen werd gebruikt. Het lag dan ook voor de hand deze dikte van de laag grond rondom de buizen in een geval zoo groot te kiezen, dat practisch dezelfde resultaten zouden worden bereikt als in een geval, waarbij zich een laag grond van oneindige uitgestrektheid rondom het boorgat bevond.

Gezien de geringe doorsnede van de gebruikte buizen bij de vatproeven leek het mij eerst onwaarschijnlijk, dat deze factor nog van invloed zou kunnen zijn. Uit de genomen contrôleproeven bleek echter dat dit niet juist was ingezien. Zooals we zullen zien blijven echter de vergelijkingen (55) en (56) (de ondoorlatende laag wordt resp. al dan niet bereikt) voor homogene gronden (en natuurlijk ook voor heterogene gronden) geldig; alleen de factor a'' moet worden veranderd.

Bedoelde proefnemingen werden uitgevoerd in een grooten bak van 10 m lang, 2 m breed en 2 m diep. Deze bak was gevuld met rivierzand en daar de daartoe benodigde hoeveelheid zand gewogen was, kon dus daaruit het volumegewicht en met behulp van het soortelijk gewicht het poriënvolume van dat zand worden berekend.

In dezen bak is o.a. een serie grondwaterstandsbuizen op een rij midden tusschen de lange zijden van den bak geplaatst. Deze grondwaterstandsbuizen zijn gemaakt van geperforeerde koperplaat en hadden een diameter van 4 cm. Deze bak dient voor de contrôle van de vergelijkingen met behulp waarvan de doorlaatfactor uit den grondwaterstand midden tusschen de drains (ook in dezen bak geplaatst) en het debiet van deze drains kan worden berekend. Over deze laatste proefnemingen zal in een volgende publicatie worden bericht. Volstaan kan worden met hier mede te deelen, dat — door met behulp van een watermeter de hoeveelheid water te meten, die gebruikt wordt om in den bak den grondwaterstand over een bepaalde hoogte te laten stijgen —, het luchtgehalte en dus p_0 te berekenen is. Door nu verder tijdens de hieronder nog te beschrijven metingen ook de temperatuur te meten, kon dus de doorlaatfactor van het zand onder de gegeven omstandigheden worden berekend (of wat op hetzelfde neerkomt de factor a'' op een temperatuur van het grondwater van 10° C worden gecorrigeerd) op een soortgelijke wijze als dat bij de vatproeven is aangegeven en waarop hier kortheidshalve niet zal worden ingegaan.

In de eerste plaats werd nu één van de grondwaterstandsbuizen (diameter 4 cm), die in het midden van de bak was geplaatst, voor de contrôlemetingen

gebruikt. Er bevond zich geen zand in de buis, zoodat bij de proefnemingen de ondoorlatende laag (= bodem van den bak) werd bereikt. Op soortgelijke wijze als bij de vatproeven werd de stijgsnelheid van het water gemeten, nadat de grondwaterstandsbuis eerst voor een gedeelte was leeggepompt. Voor een beschrijving van deze methode kan daarnaar dus worden verwezen.

De stijgsnelheid van het water in deze buis — tot uiting komend in de grootte van $tg\alpha$ — was echter nog al groot, waardoor de metingen iets minder betrouwbaar waren, als dit bij de vatproeven en bij de nog te behandelen proeven in dezen bak het geval was. Zij werden dan ook niet gebruikt voor de nieuwe opstelling van den factor a'' voor het geval de cylinder rondom het boorgat (hier dus geperforeerde buis) van voldoende dikte is om geen invloed meer op het resultaat van de metingen te kunnen hebben. Anderzijds zijn deze metingen echter nauwkeurig genoeg om tezamen met de nog te bespreken proefnemingen te doen uitkomen, dat alleen de grootte van den factor a'' van de vergelijkingen voor homogene gronden (en dus natuurlijk ook voor de vergelijkingen voor heterogene gronden) moet worden veranderd.

De proefnemingen in de grondwaterstandsbuis met een diameter van 4 cm werden uitgevoerd bij 2 verschillende waarden van de grootte H (dus bij 2 grondwaterstanden). De tabel IX doet zien, dat de factor a'' binnen de foutengrenzen constant blijft en dus onafhankelijk is van H.

TABEL IX.

r in meters.	k_{10}	$tg\alpha$	tempe- ratuur.	y_0 in meters.	H in meters.	a''
0,02	25,0	0,152	23,0	0,128	0,85	0,173
0,02	25,0	0,131	23,0	0,126	0,85	0,149
0,02	25,0	0,134	22,5	0,191	0,87	0,154
0,02	25,0	0,142	22,5	0,184	0,86	0,163
0,02	25,0	0,152	22,5	0,186	0,85	0,175
0,02	25,0	0,145	22,0	0,205	0,54	0,169
0,02	25,0	0,129	21,2	0,208	0,54	0,153
0,02	25,0	0,133	21,2	0,204	0,54	0,158
					Gemiddelde aller metingen	0,162

De tweede reeks proefnemingen werd uitgevoerd in een boorgat van 11 cm middellijn, die in het midden van den bak op ruim 60 cm uit de eene lange zijde in den grond was geboord. Dit boorgat was beschermd door een geperforeerde buis van dezelfde doorsnede, waardoor voorkomen werd, dat de diepte van het boorgat tijdens de metingen veranderde. De diepte van het boorgat

was ± 1 m onder het zandoppervlak in den bak. De metingen van de stijgsnelheid na het pompen van het water uit dit boorgat, werden hier verricht met hetzelfde toestel, dat ook bij de metingen van de stijgsnelheid in boorgaten in gronden in hun natuurlijke ligging werd gebruikt; alleen was de gebruikte pomp dezelfde als bij de waarnemingen in het vat. Dit toestel kan echter beter bij de bespreking van de metingen in gronden in hun natuurlijke ligging op het veld in hoofdstuk IV worden besproken, waarnaar verwezen kan worden.

Bij deze metingen was de doorsnede van de kolom grond om dit boorgat in den bak (evenals bij de vorige proeven in den bak) verder zoo groot (kortste afstand tot den wand van den bak ± 60 cm, naar den tegenovergelegen wand 140 cm en loodrecht hierop ± 500 cm), dat veilig kan worden aangenomen, dat de strooming van het water naar dit boorgat practisch gesproken precies zoo was, als in natuurlijk gelegen gronden.

Hier hebben we dus het geval, dat de ondoorlatende laag niet wordt bereikt, zoodat met de proefnemingen in dit boorgat de vergelijking (56) kan worden gecontrôleerd.

De proefnemingen werden uitgevoerd bij 4 verschillende grondwaterstanden, d.w.z. dus bij 4 waarden van den factor H. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in tabel X, waarbij de factor a'' ook nu weer gecorrigeerd is op een temperatuur van het grondwater van 10° C.

Uit de tabel X blijkt, dat de factor a'' onafhankelijk is van den factor H en wel gemiddeld (afgerond) 0,19 bedraagt. De factor a'' , die bij de metingen in de buis van 4 cm diameter in dezen bak werd bepaald, is binnen de foutengrenzen gelijk aan den factor, verkregen met het boorgat van 11 cm diameter. Daar we bij deze 2 proefnemingen nogmaals weer alle factoren hebben laten varieeren (r , H, y_0 in verband met H, al of geen zand in de buis), die van invloed zouden kunnen zijn en ook nu gebleken is, dat de factor a'' een constante is, volgt hier dus uit, dat de vergelijkingen (55) en (56), evenals de vergelijkingen voor heterogene gronden (57) en (58) enz. op zich zelf ook geldig zijn, indien de cylinder grond om het boorgat van voldoende dikte is om de strooming van het water naar het boorgat na het leegpompen niet meer te beïnvloeden; alleen voor den factor a'' moet 0,19 worden ingevuld. De aldus veranderde vergelijkingen zijn dus met een nog te bespreken grens van juistheid toe te passen om de doorlatendheid van gronden op het veld uit de stijgsnelheid van het water in boorgaten te berekenen. Hierbij kan nog worden opgemerkt, dat bij de proefnemingen in het boorgat van 11 cm de omstandigheden ongeveer zoo zijn geweest, als zij bij de proefnemingen op het veld worden aangetroffen.

Een enkele opmerking moet worden gemaakt over de foutengrenzen van deze bepaling. Bij de metingen in den bak is gebleken, dat de laagste waarden

TABEL X.

Metingen in den bak; middellijn boorgat = 11 cm; $k_{10} = 23,6$ m.p. 24 uur.

H in meters.	y_0 in meters.	$tg\alpha$	Temperatuur.	a'' gecorrigeerd op 10° C.	a'' gemiddeld.
0,330	0,156	0,0105	5,2	0,142	
0,320	0,1505	0,0104	5,2	0,141	
0,322	0,1525	0,0104	5,2	0,141	
0,320	0,1605	0,0102	5,2	0,138	
0,3145	0,155	0,0118	5,2	0,159	
0,3235	0,1485	0,0108	5,2	0,146	
0,320	0,155	0,0113	5,2	0,153	
0,325	0,154	Gemiddeld			0,146
0,556	0,135	0,0140	5,6	0,194	
0,555	0,134	0,0134	5,6	0,185	
0,555	0,134	0,0143	5,6	0,198	
0,558	0,137	0,0150	6,0	0,205	
0,555	0,134	0,0140	6,0	0,191	
0,555	0,134	0,0140	5,8	0,192	
0,556	0,135	Gemiddeld			0,194
0,6598	0,1728	0,0147	4,6	0,211	
0,652	0,175	0,0146	4,6	0,210	
0,6605	0,1935	0,0144	4,6	0,207	
0,6515	0,1845	0,0141	4,6	0,203	
0,647	0,180	0,0163	4,6	0,234	
0,6435	0,1765	0,0167	4,6	0,240	
0,627	0,179	0,0146	4,3	0,211	
0,649	0,179	Gemiddeld			0,217
0,2505	0,1705	0,0171	4,7	0,230	
0,247	0,167	0,0172	4,7	0,231	
0,246	0,156	0,0130	4,7	0,174	
0,243	0,153	0,0146	4,7	0,196	
0,2375	0,1675	0,0147	5,0	0,195	
0,2355	0,1755	0,0158	5,0	0,209	
0,243	0,165	Gemiddeld			0,206
		Gemiddelde aller waarnemingen			0,191

van den factor a'' , die bij één enkele bepaling verkregen werd 0,138 is; de hoogste waarde 0,240 bedraagt en de gemiddelde waarde 0,19 is. De grootste afwijking van één waarneming is dus ± 27 %. Dezelfde fout van één enkele waarneming van een serie metingen bij dezelfde vulling van het vat werd ook bij de vatproeven verkregen. Daar we nu echter in het veld zelf, altijd bepalingen in meerdere boorgaten verrichten (zie hoofdstuk IV), zal — op

welke wijze we ten slotte van de verkregen k -factoren ook een gemiddelde berekenen — de gemiddelde fout zeker kleiner zijn. Uit het bovenstaande volgt dan ook, dat met de boorgatenmethode de doorlaatfactor met voldoende nauwkeurigheid kan worden bepaald. Overigens zou men een maximale fout van 27 % nog redelijk genoemd kunnen worden, hetgeen duidelijk wordt, wanneer men bedenkt, dat de doorlaatfactor van klei-gronden in de natuurlijke ligging kan variceren van kleiner dan 0,001 tot meer dan 10 m per 24 uur.

Ten slotte moet in dit verband nog een opmerking worden gemaakt over de vergelijking (9), zooals deze door DONAT is opgesteld. Gezien den vorm van de vergelijking, zooals deze na de zorgvuldige controlemetingen is opgesteld, zal het geen verwondering geven, wanneer blijkt, dat deze vergelijking (9) onjuiste cijfers geeft. We kunnen dit heel gemakkelijk demonstreeren door deze vergelijking toe te passen voor de waarnemingen in den bak met de geperforeerde buizen van 4 en 11 cm diameter. We kunnen volstaan met één meting in elke buis.

Eerste voorbeeld: Doorsnede buis 4 cm; $H = 0,85$ m; $y_0 = 0,186$ m; $y_1 = 0,086$ m; $t_0 = 2,2$ sec. en de temperatuur van het water $22,5^\circ$ C. Uit vergelijking (9) volgt (rechterlid met 86400 vermenigvuldigen), dat $k_{10} = 53,0$. Zij bedraagt echter in werkelijkheid 25,0.

Tweede voorbeeld: Doorsnede buis 11 cm; $H = 0,652$ m; $y_0 = 0,175$ m; $y = 0,135$ m; $t = 7,7$ sec. en de temperatuur van het water $4,6^\circ$ C. Uit vergelijking (9) volgt, dat $k_{10} = 85,2$. Zij bedraagt echter in werkelijkheid 23,6.

De oorzaak van het feit, dat deze vergelijking een minder juist resultaat geeft, ligt, zooals reeds eerder is medegedeeld, aan het feit, dat er geen sprake van is, dat na het leegpompen van de betreffende geperforeerde buizen zich reeds een volledige trechtervormige inzinking in het phreatisch oppervlak om deze buizen heeft ingesteld, waarop ten slotte de vergelijking (9) berust. Om dezelfde reden geven, zooals we reeds hebben gezien, ook de vergelijkingen (25) en (26), die ik op grond van een soortgelijke veronderstelling voor heterogene gronden heb opgesteld, minder juiste resultaten. Deze vergelijkingen zullen alleen goede resultaten geven, indien zoolang water aan de boorputten wordt onttrokken, totdat feitelijk bij een constant debiet de trechtervormige inzinking in het phreatisch oppervlak zich volledig heeft ingesteld en nu na het stopzetten van de wateronttrekking de stijgsnelheid van het water wordt gemeten.

Verder kan nog worden opgemerkt, dat zich in alle door mij opgestelde, en op grond van de contrôlemetingen uitgebouwde, vergelijkingen (zoowel voor homogene als voor heterogene gronden) de constante a'' nog de dimensie van lengte moet hebben. Zooals reeds in het vorige hoofdstuk is opgemerkt, kan uit de publicatie van PORCHET worden afgeleid, dat uit de door dezen onderzoeker beschreven pompproeven met evenveel recht kan worden afgeleid, dat de term $\log \frac{R}{rH}$ (binnen bepaalde grenzen) constant is in plaats van den term $\log \frac{R}{r}$, zooals dit door dezen onderzoeker uit de verkregen cijfers was afgeleid. Nu is reeds uiteengezet, dat dit pompproeven zijn, waarbij de inzinking van het phreatisch oppervlak rondom het boorgat zich tijdens het pompen reeds volledig had ingesteld.

Onwillekeurig vraagt men zich af, of bij de pompproeven, zooals deze door mij worden uitgevoerd en waarbij dus direct na het leegpompen van het boorgat de stijgsnelheid van het water wordt gemeten, niet de term $Hf\left(\frac{r}{R}\right)$ constant kan zijn, waarbij de $f\left(\frac{r}{R}\right)$ b.v. voorgesteld kan zijn door $\log\left(\frac{r}{R}\right)$. Zou dit het geval zijn — het theoretisch te bewijzen is mij niet mogen gelukken — dan zou daarmee het feit, dat de constante a'' in mijn vergelijkingen nog de dimensie van lengte heeft, worden verklaard. Dat iets dergelijks het geval zou kunnen zijn, lijkt mij zelfs waarschijnlijk.

§ 4. SAMENVATTING.

Vatten we de resultaten van de contrôlemetingen tezamen, dan blijkt dus, dat de vergelijkingen voor de verschillende gevallen moeten luiden:

I. *Homogene gronden.*

a. De ondoorlatende laag wordt bereikt:

$$k = \frac{2,3r^2 \cdot 86400 \cdot tg\alpha}{2 \cdot 0,19} = 523000r^2tg\alpha$$

b. De ondoorlatende laag wordt niet bereikt:

$$k = \frac{2,3r^2 \cdot 86400 \cdot tg\alpha}{0,19} \cdot \frac{H}{2H + r} = 523000r^2tg\alpha \cdot \frac{H}{H + 0,5r}$$

Hierin is k de doorlaatfactor in meters per 24 uur, r de doorsnede van het boorgat in meters, H is de afstand in meters van den bodem van het boorgat tot den waterspiegel in het boorgat vóór het leegpompen. Ten slotte is $t\alpha = \log \frac{y_0}{y} : t$, waarin t is uitgedrukt in seconden; y_0 is de afstand in meters van den waterspiegel in het boorgat vóór het leegpompen tot den waterspiegel in het boorgat vlak na het leegpompen op den tijd $t = 0$ en y de afstand in meters van den waterspiegel in het boorgat vóór het leegpompen tot den waterspiegel in het boorgat op den tijd t seconden na den tijd $t = 0$.

II. Heterogene gronden :

Practisch kunnen alleen de vergelijkingen voor gelaagde gronden of voor als zoodanig veronderstelde gronden worden toegepast (zie sub c van § 3 van hoofdstuk II en § 1 sub d van hoofdstuk IV).

I. Het profiel boven den bodem van het boorgat bevat 2 lagen met een verschillende doorlatendheid. De dikte van de eerste laag boven den bodem van het boorgat is h_1 (in meters) en de doorlaatfactor k_1 ; de dikte van de tweede laag in het *watervoerende* profiel is h_2 en is gelijk aan den afstand in meters van den bovenkant van de eerste laag tot den waterspiegel in het boorgat vóór het leegpompen, terwijl de doorlaatfactor in deze laag k_2 bedraagt. Is de grond onder het boorgat ook doorlatend en heeft deze den doorlaatfactor k_3 (bij de praktische toepassingen zal men steeds $k_3 = k_1$ stellen), dan luidt de vergelijking:

$$2h_1k_1 + 2h_2k_2 + k_3r = \frac{2,3r^2H \cdot 86400 \cdot t\alpha}{0,19}$$

of

$$h_1k_1 + h_2k_2 + 0,5k_3r = 523000r^2H \cdot t\alpha.$$

II. Het profiel boven den bodem van het boorgat bevat 3 lagen met een verschillende doorlatendheid. De dikte van de eerste laag boven den bodem van het boorgat is h_1 (in meters) en de doorlaatfactor van deze laag k_1 ; de dikte van de tweede laag is h_2 en is gelijk aan den afstand in meters van den bovenkant van de eerste laag tot den bovenkant van de tweede laag, terwijl de doorlaatfactor van deze laag k_2 is. Verder is h_3 de afstand in meters van den bovenkant van de tweede laag in het *watervoerende* profiel tot den waterspiegel in het boorgat vóór het leegpompen en k_3 de doorlaatfactor van deze laag. Is de grond onder het boorgat ook doorlatend en heeft deze den doorlaat-

fator k_4 (bij de practische toepassing zal men steeds $k_4 = k_1$ stellen) dan luidt de vergelijking:

$$2h_1k_1 + 2h_2k_2 + 2h_3k_3 + k_4r = \frac{2,3r^2H \cdot 86400 \cdot \operatorname{tg}\alpha}{0,19}$$

of

$$h_1k_1 + h_2k_2 + h_3k_3 + 0,5k_4r = 523000r^2H \cdot \operatorname{tg}\alpha.$$

In deze vergelijkingen voor heterogene gronden stellen r , H en $\operatorname{tg}\alpha$ dezelfde factoren voor als in de vergelijkingen voor homogene gronden. Is de grond onder den bodem van het boorgat ondoorlatend dan vervalt in de vergelijking voor 2 lagen de term k_3r resp. $0,5 k_3r$ ($k_3 = 0$) en in de vergelijking voor 3 lagen de term k_4r resp. $0,5k_4r$ ($k_4 = 0$).

In dit verband kan verder nog worden opgemerkt, dat het gewoonlijk niet noodig zal zijn de(n) verkregen doorlaatfactor(en) op een temperatuur van het grondwater van 10°C om te rekenen. Mocht men dat om de een of andere reden toch willen doen, dan moeten *alle rechterleden* van de in deze samenvatting gegeven vergelijkingen worden vermenigvuldigd met $\frac{\eta_t}{\eta_{10}}$, waarin η_t de viscositeit van water bij $t^\circ \text{C}$ (= temperatuur tijdens de waarnemingen) en η_{10} de viscositeit van water bij een temperatuur van 10°C is. In tabel XIV zijn de viscositeiten van water bij verschillende temperaturen weergegeven.

HOOFDSTUK IV.

TOEPASSING VAN DE BOORGATENMETHODE VOOR DE BEPALING VAN DEN DOORLAATFACTOR VAN GRONDEN MET EEN STUCTUUR IN HET VELD.

§ 1. UITVOERING VAN DE METHODE OP HET VELD.

a. *Het boren van de boorgaten en wat daarmee samenhangt.*

Voor de uitvoering van de metingen op het vrije veld moet begonnen worden met het boren van de boorgaten. Ik heb daarvoor gebruikt een tweetal boren van een zeer stevige constructie en wel één boor voor het boren van boorgaten met een doorsnede van ± 20 cm en één voor het boren van boorgaten van ± 10 cm doorsnede.

De boor, waarmede boorgaten van 20 cm diameter geboord kunnen worden was ons door bemiddeling van Prof. DISERENS te Zürich in 1931 geleverd door de firma JACOB DES COMBES, Bienne, Zwitserland voor den prijs van $\pm f 25,-$. Hiermede kunnen gaten tot 5 m diepte worden geboord. Een tweede boor, die naar het model van de eerste boor was gemaakt, werd ons geleverd

door Gebr. KLEINBERGEN te Groningen voor den prijs (in 1932) van f 28,—. Hiermede kunnen boorgaten van 10 cm diameter en tot 5 m diepte worden geboord. Beide boren zijn van uitstekende kwaliteit en zijn ons tot heden zeer goed bevallen. De eigenlijke boorkop van deze boren is gemaakt uit 2 stalen bladen, die op bepaalde wijze gebogen zijn en die aan den top aan elkaar geklonken zijn (zie de foto II). (9)

Welke *doorsnede* van de boorgaten men in ieder bijzonder geval gebruiken moet, hangt af van de doorlatendheid van het te onderzoeken terrein. Gewoonlijk zal men met een doorsnede van de boorgaten van 20 cm het beste uitkomen; de metingen zijn in boorgaten van deze doorsnede ook het gemakkelijkste uit te voeren. Alleen, wanneer het terrein zeer slecht doorlatend is ($k = \pm 0,01$) of bij reeds verrichte metingen in boorgaten van 20 cm zeer slecht doorlatend blijkt te zijn, doet men beter boorgaten van 10 cm doorsnede te gebruiken resp. de metingen te herhalen in nieuw geboorde boorgaten van 10 cm doorsnede. De boorgaten moeten dan echter zeer zuiver vertikaal geboord worden, daar anders moeilijkheden bij de metingen kunnen optreden.

De *diepte* van de boorgaten hangt uit den aard der zaak van het te onderzoeken object af. Is het land b.v. gedraineerd dan zal men vaak de diepte der boorgaten tot het vlak van de drains kiezen. Moet een drainageplan op grond van de resultaten van de metingen worden opgesteld dan zal men de diepte der boorgaten ook vaak gelijk nemen aan de diepte van de drains, enz. Een altijd geldende aanwijzing is in dit opzicht niet te geven.

De boorgaten dienen uit den aard der zaak *loodrecht* geboord te worden. Zij blijven in klei, leem, lichte en zware zavel, lichte leem, enz. uitstekend staan. Wil men deze methode echter ook in zandgronden toepassen, dan moet het boorgat voor inzakken worden behoed door een geperforeerde buis van dezelfde doorsnede in het boorgat te brengen. Voor deze laatste gronden heeft deze methode echter meestal geen beteekenis, daar men gewoonlijk de doorlatendheid daarvan gemakkelijk een andere wijze op het laboratorium kan bepalen (zie de in noot (2) genoemde literatuur). Overigens kan men in twijfelgevallen door een aantal gaten in het te onderzoeken terrein te boren gemakkelijk uitmaken of de boorgaten blijven staan.

Het *aantal* te boren gaten in een bepaald terrein hangt af van de heterogeniteit van dit terrein en van de grootte van dit terrein. Eén boorgat per ha zal meestal voldoende zijn. Verder kan er op gerekend worden, dat door 2 personen (voor de uitvoering van de feitelijke metingen) en 2 werklieden (voor hulpwerkzaamheden) in ± 30 boorgaten per dag de stijgsnelheid kan worden bepaald.

Zijn de boorgaten geboord dan moet in het algemeen minstens 3 dagen gewacht worden om den waterstand in de boorgaten gelegenheid te geven

zich in te stellen. De boorgaten zijn daarbij bedekt door stevige vierkante plankjes. Dit boren van de boorgaten kan na eenige aanwijzingen zeer goed door 2 werklieden worden uitgevoerd. Afhankelijk van de diepte van de boorgaten kan een verschillend aantal boorgaten door deze 2 werklieden per dag worden geboord. Gemiddeld kan men zeker rekenen op ± 30 boorgaten per dag.

Na afloop van de genoemde 3 dagen kan blijken, dat de waterstand in sommige boorgaten zich nog niet heeft ingesteld. Dit blijkt hieruit, dat de waterstand in deze boorgaten verhoudingsgewijze te diep is. Ook in deze boorgaten — waar omheen de grond in den regel slecht doorlatend zal blijken te zijn — kan men de metingen wel uitvoeren; men moet er echter op rekenen, dat hier uit de stijgsnelheid een iets te groote doorlaatfactor berekend wordt. Kan daarmede geen genoegen worden genomen worden (b.v. het aantal van deze boorgaten is in verhouding van het totale aantal te groot) dan moeten de metingen in nieuw te boren boorgaten van 10 cm diameter worden herhaald. De ervaring zal spoedig genoeg leeren, wanneer dit noodig is en wanneer men ook wel de reeds verrichte metingen in de boorgaten van 20 cm doorsnede kan volstaan. Meestal zal een herhaling van de bepaling niet noodig blijken te zijn. (10)

b. Het meten van de stijgsnelheid.

I. De gebruikte apparatuur.

Alvorens de gebruikte apparatuur te beschrijven, lijkt het mij gewenscht nog even te herhalen, waar de metingen op neerkomen. In de eerste plaats moet de diepte van het boorgat en de temperatuur van het water in het boorgat gemeten worden. Daarna moet de stand van den waterspiegel in het boorgat onder een vast punt bepaald worden en vervolgens zooveel water uit het boorgat gepompt worden, totdat zich daarin nog een laagje water van 5 tot 10 cm dikte bevindt. Vlak daarna wordt weer de stand van den waterspiegel van het boorgat onder hetzelfde vaste punt bepaald ($t = 0$). Telkens na een zekeren tijd wordt opnieuw de stand van dezen waterspiegel ten opzichte van hetzelfde punt bepaald, waarbij de tijd, die na den tijd $t = 0$ verlopen is, wordt genoteerd. De metingen zijn hiermede afgelopen.

De meting van de *diepte* van het boorgat geschiedt het beste met behulp van een stevigen duimstok, waarom aan het einde een niet te lang koperen buisje is geschoven (zie foto II; *d*). Aan het andere eind van dat koperen buisje is een stevig rond koperen plaatje gesoldeerd van ± 5 cm middellijn. Het koperen buisje is daarbij zoover om den duimstok geschoven, dat b.v. de afstand van den onderkant van het koperen plaatje tot de deelstreep 10 cm

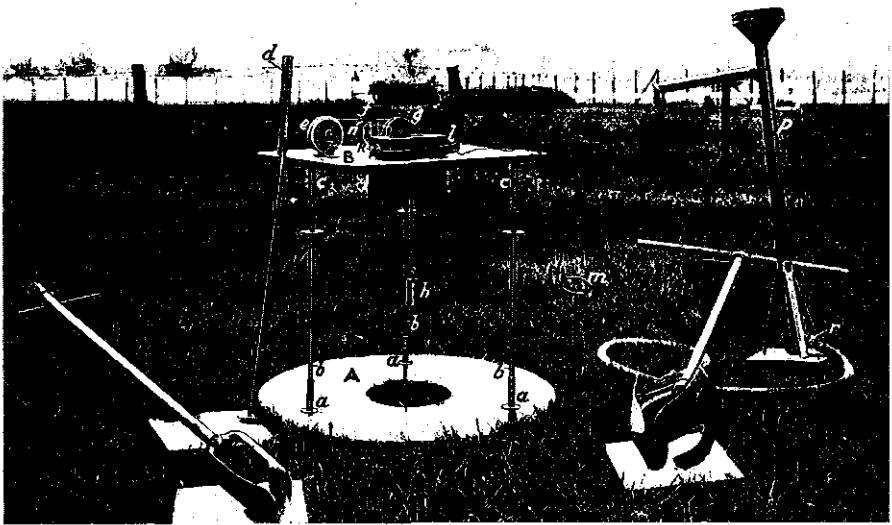


Фото II.

op den duimstok b.v. precies 70 cm bedraagt. Bij de latere metingen van de diepte van het boorgat behoeft men dan slechts 60 cm bij de afgelezen diepte te tellen om de diepte van het betreffende boorgat te krijgen. Het koperen plaatje zorgt er verder wel voor, dat men den duimstok niet in den bodem van het boorgat wegduwt.

De *stijgsnelheid* wordt gemeten met behulp van het volgende apparaat (zie foto II). (11)

Dit apparaat bestaat uit een stevige ronde koperen plaat van 80 cm doorsnede (A), waarin in het midden een rond gat van 20 cm is aangebracht. Dit ronde gat komt natuurlijk juist boven het boorgat. Op deze koperen plaat zijn op 3 plaatsen (a) stevige koperen buisjes bevestigd, waarin 3, van onderen vlak afgedraaide koperen stangen van ± 1 cm doorsnede juist passen. Deze koperen stangen (b) zijn van den bovenkant voorzien van een schroefdraad, die zich ook bevindt in 3 stevige koperen buisjes (c), die op hun beurt bevestigd zijn aan den onderkant van een stevig houten bord B van 60 bij 40 cm. Op den bovenkant van dit bord B bevindt zich een kleine libel (op de foto niet te zien). Met behulp van deze libel en met behulp van de 3 genoemde koperen stangen kan de bovenkant van dit bord waterpas worden gemaakt.

Op het bord B bevindt zich verder een draaibaar opgestelde houten schijf (e), waar omheen een metalen meetband is gewonden. Op dezen meetband is een indeeling tot in mm's aangebracht. Het eene eind van dezen meetband is op dit houten wiel (e), waarop ook een rem is aangebracht, vast gemaakt. Het andere einde gaat door een sleuf (f) in een koperen beugel, waarop tevens een nonius (n) is aangebracht, zoodat de stand van den meetband tot op 0,1 mm's is af te lezen. Vervolgens loopt de meetband nog over een tweede draaibaar opgestelde houten schijf (g). Aan dit einde van den meetband is verder een ring bevestigd, waaraan een voldoende zwaar koperen cylindertje (h) kan worden opgehangen. In het midden van dit cylindertje is aan den onderkant nog een in een scherpe punt uitlopend stukje koper gesoldeerd.

Op het bord B is verder aangebracht een houten kistje, waarin zich een droge batterij (8 V) en een eenvoudig wijzergalvanometertje bevinden. In dit kistje is de eene pool van dit batterijtje reeds verbonden met den éenen toeleidingsdraad van den galvanometer; de andere pool van dit batterijtje is verder verbonden met een knop (k) aan den buitenkant van het houten kistje en den tweeden toeleidingsdraad van den galvanometer met een anderen knop aan den buitenkant van het kistje (l). Aan één van de beide knoppen wordt nu een ± 1 meter lange geleidingsdraad bevestigd, die aan het andere einde is gesoldeerd aan een stevige ijzeren pen (m) van ± 50 cm lengte. Deze pen wordt naast het boorgat in den grond gestoken. De andere knop is door een draad

geleidend verbonden met den koperen houder, waarin zich ook de sleuf met den nonius (n) bevindt.

Het zal nu verder duidelijk zijn, dat, zoodra de koperen punt van het koperen cylindertje (h) het wateroppervlak in het boorgat raakt de stroomkring, gesloten wordt en de wijzer van den galvanometer uitslaat. De meetband maakt in de sleuf namelijk een voldoende contact met den koperen houder (n). De stand van den grondwaterspiegel in het boorgat onder de 0-streep van den nonius kan dus met behulp van den nonius tot op tienden van mm's worden afgelezen.

De *pomp* (zie foto 2), waarmede het water uit het boorgat werd gepompt, was op het laboratorium gemaakt en was van een zeer eenvoudige constructie. Aan de zuigstang is een klein koperen busje bevestigd, waarin op den bodem een naar boven opengaande klep is aangebracht. Dit busje past precies in de koperen buis (p), waaraan aan het ondereind een zijbuisje (r) is gesoldeerd. Voor dit busje bevindt zich een klepje dat naar binnen opengaat. Om het zijbuisje (r) is een stevige gummislang van ± 2 cm doorsnede en 2,5 m lengte bevestigd. Om het andere einde van deze slang bevindt zich verder nog een stukje fijn kopergaas om het binnendringen van grovere gronddeeltjes te verhinderen. Ten slotte is de buis (p) nog op een stevig voetstuk bevestigd.

De beschreven pomp is voor de metingen van de stijgsnelheid in boorgaten tot 2 à 2,5 m diepte voldoende. Daar zij verder tevens zeer goedkoop is, leek het mij gewenscht er een korte beschrijving aan te wijden.

2. De uitvoering van de metingen.

Het beschreven toestel voor de bepaling van de stijgsnelheid van het water wordt nu zoo boven het boorgat geplaatst, dat de ronde opening in de koperen plaat zich juist boven dit boorgat bevindt en het koperen cylindertje den wand van het boorgat niet raakt of raken kan, wanneer het door den wind aan den meetband mogelijk iets begint te slingeren. In de eerste plaats wordt nu de temperatuur van het water in het boorgat gemeten en daarna de diepte van het boorgat onder den bovenkant van de koperen plaat (d.w.z. dus onder het maaiveld), waartoe men een platte dunne ijzeren staaf van bekende dikte over de opening in de koperen plaat legt. Vervolgens laat men het koperen cylindertje zoover zakken, totdat zij juist den bovenkant van de genoemde platte ijzeren staaf raakt en leest op den nonius den stand tot in mm's af. Telt men hierbij de dikte van de ijzeren staaf, dan kent men dus den afstand van de nulstreep van den nonius tot den bovenkant van de koperen plaat, d.w.z. dus tot het maaiveld. Men laat nu het koperen cylindertje in het boorgat zakken, totdat de galvanometernaald uitslaat. Door eenige malen het koperen

cylindertje op te trekken en te laten zakken is dit punt scherp vast te stellen. Ook nu wordt de stand van den meetband bij de nulstreep van den nonius afgelezen.

Men brengt nu de slang van de pomp in het boorgat en pompt hieruit zooveel water, dat als regel nog een laag water van 5-10 cm hierin achterblijft ¹⁾. Men haalt nu de slang van de pomp uit het boorgat, waarbij men blijft doorpompen om te zorgen, dat het water, dat zich in de slang en in de pompbuis bevindt, niet in het boorgat terugvloeit. Vervolgens laat men het koperen cylindertje zoover in het boorgat zakken, totdat de galvanometernaald uitslaat. Men haalt nu — afhankelijk van de doorlatendheid van den grond — het cylindertje door een geringe draaiing van het houten wiel b.v. 2 mm op, waarna men dit wiel met de rem vastzet en den stand van den meetband bij de nulstreep van den nonius afleest. Zoodra de galvanometernaald weer uitslaat (als regel moet dit binnen 1 à 2 minuten plaats vinden) worden 4 stophorloges in werking gesteld ($t = 0$ en $y = y_0$). Daarna wordt het koperen cylindertje b.v. weer 2 mm (afhankelijk van de doorlatendheid) omhaag getrokken en wordt het eerste stophorloge buiten werking gesteld, zoodra de galvanometernaald uitslaat ($t = t_1$ en $y = y_1$). Het koperen cylindertje wordt nu weer 2 mm omhaaggetrokken en het tweede stophorloge buiten werking gesteld, zoodra de galvanometernaald weer uitslaat ($t = t_2$ en $y = y_2$), enz. Na afloop noteert men de standen van den meetband ten opzichte van de nulstreep van den nonius en de daarbij behorende tijden van de stophorloges, waarna de metingen in dit boorgat zijn afgelopen.

Bij deze metingen kan nog worden opgemerkt, dat het koperen cylindertje minimaal telkens 0,2 mm omhoog gehaald kan worden. Stelt men den tijd, waarin de metingen in één boorgat afgelopen moet zijn, op ± 15 minuten en neemt men in dergelijke boorgaten, waarbij we dus telkens het cylindertje maar 0,2 mm omhooghaalt, met 2 metingen genoegen, dan mag de tijd gemiddeld voor iedere meting ± 6 minuten bedragen. De doorlatendheid van een dergelijk terrein zal bij normale grondwaterstanden $\pm 0,01$ m .p. 24 uur bedragen, indien tenminste boorgaten van 20 cm doorsnede werden gebruikt. Verwacht man dat een terrein nog slechter doorlatend zal zijn, zoo moeten boorgaten van 10 cm doorsnede worden gebruikt daar anders de metingen in één boorgat te langen tijd in beslag zullen nemen. (Zie noot (10) op blz. 537).

¹⁾ Pompt men minder water uit het boorgat, dan blijft daardoor het resultaat van de metingen, d.w.z. $tg\alpha$, hetzelfde. De benodigde tijd om den waterstand over een bepaalde hoogte te laten stijgen, is echter grooter, naarmate minder water uit het boorgat is gepompt en daar het voor de metingen voordeelig is deze snelheid zoo groot mogelijk te maken, verdient het aanbeveling zooveel mogelijk water uit het boorgat te pompen. Anderzijds kan men het boorgat ook niet geheel leegpompen, daar de bodem van het boorgat door den vorm van de gebruikte boor iets rond is.

c. Berekening van den doorlaatfactor uit de waargenomen stijgsnelheid.

Als voorbeeld van de berekening van den doorlaatfactor zullen wij de resultaten van de metingen gebruiken, zooals deze in boorgat 1 in de Rietwijkerpolder nabij Amsterdam (zie § 4 van dit hoofdstuk) zijn verkregen.

Op het veld heb ik van de metingen in dit boorgat het volgende genoteerd:
Temperatuur van het grondwater 6,9° C.

Diepte van het boorgat onder het maaiveld 1,57 m.

Afstand nulstreep nonius tot bovenkant koperen plaat 0,636 m.

Ligging waterspiegel onder nulstreep nonius 1,267 m of 1,267 — 0,636 = 0,631 m onder maaiveld.

$t = 0$ Ligging waterspiegel onder nulstreep nonius 1,8640 m.

$t = 14,4$ sec. waterspiegel onder nulstreep nonius 1,8620 m.

$t = 29,4$ „ „ „ „ „ 1,8600 „

$t = 45,4$ „ „ „ „ „ 1,8580 „

$t = 60,6$ „ „ „ „ „ 1,8560 „

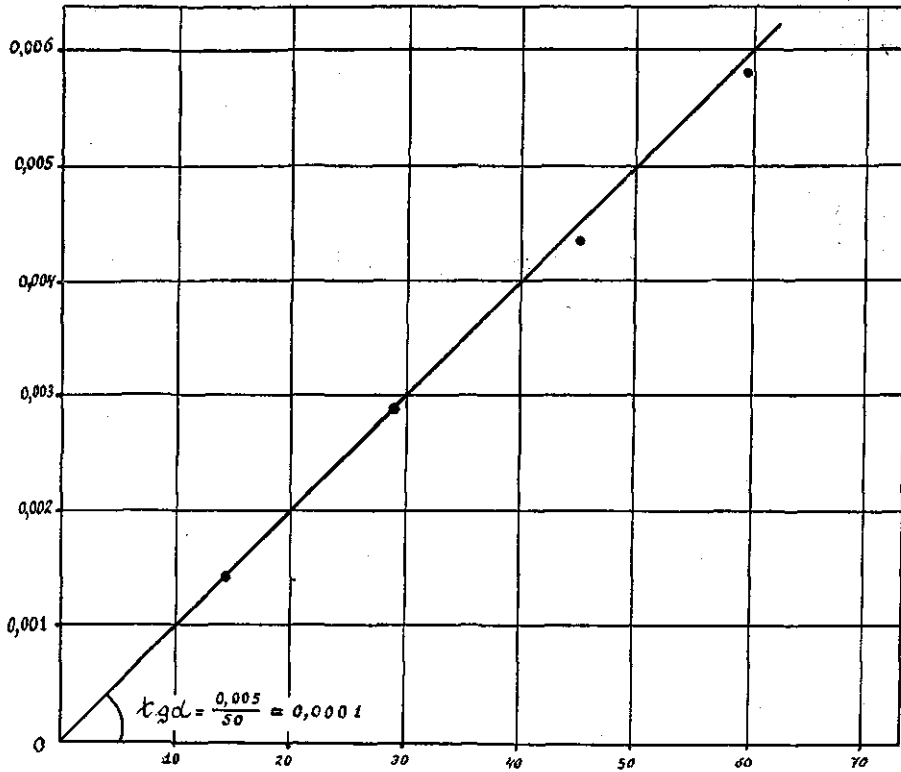
Uit bovenstaande gegevens moet dus de grootte van den term $t\gamma\alpha = \log \frac{y_0}{y} : t$ worden bepaald. Dit is in het onderstaande tabelletje geschied:

t (in sec.).	y (in meters).	$\log \frac{y_0}{y}$
0	= $y_0 = 0,597$	0
14,4	= $y_1 = 0,595$	0,00145
29,4	= $y_2 = 0,593$	0,00292
45,4	= $y_3 = 0,591$	0,00438
60,6	= $y_4 = 0,589$	0,00585

$$y_0 = 1,864 - 1,267 = 0,597 \text{ m.}$$

$$H = 1,57 - 0,631 = 0,939 \text{ m.}$$

De waarden van $\log \frac{y_0}{y}$ en de bijbehorende t -waarden in seconden worden in een diagram uitgezet (zie figuur X), waarna door de aldus verkregen punten een rechte lijn getrokken wordt. De tangens van den hoek, die deze rechte lijn maakt met de abscis, is de gevraagde $t\gamma\alpha$ en deze is hier dus juist gelijk aan 0,0001.



FIGUUR X.

Nu is de grond onder den bodem van het boorgat hier niet als ondoorlatend te veronderstellen. De grond wordt namelijk naar diepere lagen lichter van samenstelling; maakt ondanks een groote weekheid toch nog den indruk een structuur te bezitten en bevat bovendien een hoog percentage aan koolzure kalk. De vergelijking, die we dan ook in dit geval gebruiken moeten, luidt. (zie samenvatting).

$$k = 523000r^2tg\alpha \cdot \frac{H}{H + 0,5r}$$

De waarde van $tg\alpha$ (= 0,0001), r (0,1075 m) en H (= 0,939 m) hierin ingevuld, geeft $k = 0,57$ m. p. 24 uur bij een temperatuur van het grondwater van 6,9° C.

Bij deze berekening moeten nog de volgende opmerkingen worden gemaakt. Het kan soms voorkomen, dat 1 punt in het beschouwde diagram niet op de rechte lijn ligt, die men door de overige punten (met een zekere benadering

natuurlijk) kan trekken. Is dat punt niet het eerste punt, dan kan dit punt verwaarloosd worden, daar men bij de meting van dat punt de een of andere fout heeft gemaakt. Is dit van de rechte lijn afwijkende punt echter het eerste punt, waarbij de 3 overige punten op een rechte lijn liggen, die niet door den oorsprong van het diagram gaat, zoo rekent men den tijd $t = 0$ van af de eerste meting, evenals de bij de 3 laatste punten behorende tijden. Waren de tijden van de 5 punten b.v. eerst 0, 3, 8, 11, 5 en 15 seconden, zoo zijn de tijden voor de resteerende punten in het nieuwe diagram 0; 5 (8 — 3); 8,5 (11,5 — 3) en 12 (15 — 3) seconden. De met deze nieuwe tijden verkregen punten zullen nu wel op een rechte lijn liggen, die door den oorsprong gaat. De oorzaak van het feit, dat het eerste punt in het oorspronkelijke diagram zoo sterk afwijkt, ligt waarschijnlijk hierin, dat nog iets water langs den wand van het boorgat naar beneden is gevloeid, dat niet uit den grond afkomstig is. Dit water kan b.v. nog afkomstig zijn uit de slang en de pompbuis van de pomp en bij het halen van de slang uit het boorgat langs den wand van het boorgat naar beneden zijn gestroomd.

Ten slotte kan het voorkomen, dat de punten duidelijk op een gebogen lijn liggen. Is dat het geval, zoo trekt men van uit den oorsprong de raaklijn aan deze gebogen lijn. De tangens van den hoek, die deze raaklijn met de abseis maakt is de gevraagde tangens α . Gewoonlijk zullen in een dergelijk geval de eerste 2 punten nog wel practisch op een rechte lijn liggen. Een dergelijke uitgesproken gebogen lijn komt overigens slechts sporadisch voor.

k. Eenige algemeene opmerkingen in verband met de onder sub c uitgevoerde berekening van den doorlaatfactor.

In de eerste plaats moet de kwestie besproken worden, wanneer de grond onder het boorgat als doorlatend moet worden beschouwd en wanneer deze grond als ondoorlatend kan worden aangenomen. In de eerste plaats blijkt, dat de factor $\frac{H}{H + 0,5r}$ slechts zeer weinig verschillend van 1 is, zoodra H niet te klein is. Is H b.v. slechts 0,3 m en r 0,1075 m (= straal van het grootste boorgat) dan is deze factor $\frac{0,3}{0,3 + 0,0538} = 0,85$. De fout, die gemaakt zou zijn, wanneer de grond onder den bodem van het boorgat als ondoorlatend zou worden beschouwd, terwijl hij in werkelijkheid dezelfde doorlatendheid heeft als de grond boven den bodem van het boorgat, zou in dat geval dus $\pm 15\%$ bedragen. Is H grooter dan 0,3 m dan is de fout nog kleiner.

In de tweede plaats zal de doorlatendheid vaak met de diepte onder het maaiveld afnemen, waardoor bovengenoemde fout nog wordt verkleind.

Ofschoon dus uit het bovenstaande blijkt, dat de fout, die gemaakt zou

worden, wanneer de grond onder den bodem van het boorgat als ondoorlatend zou worden beschouwd, gewoonlijk klein zou zijn; zoo is het toch correcter de juiste vergelijking in het juiste geval toe te passen. In het algemeen nu kan men zeggen, dat men in gedraineerde zwaardere gronden den grond onder het vlak van de drains als ondoorlatend mag beschouwen. Vaak maakt de grond hier een gelachtigen, slikachtigen indruk. Ook indien de grond, hetzij knikkig, hetzij taai (dus niet brokkelbaar), is, kan de grond als ondoorlatend worden opgevat. Ook het ontbreken van koolzure kalk is gewoonlijk — niet steeds — een begeleidend verschijnsel van slechte doorlatendheid. Indien echter de grond brokkelbaar blijft of nog een zekere korrelige structuur heeft, heeft de grond ook nog een zekere doorlatendheid.

Voor de lichte tot zeer lichte gronden (tot 20 % klei) is het voorkomen van koolzure kalk meestal voldoende om deze gronden nog als in zekere mate doorlatend te moeten opvatten, daar in deze gronden een microstructuur wel de hoofdrol zal spelen. Grootere scheuren enz. komen in deze gronden — en zeker niet in de beschouwde dieper gelegen lagen — niet voor; vooral ook niet, omdat deze gronden bij indrogen weinig zullen inkrimpen.

In de tweede plaats moet nog een opmerking worden gemaakt over het gebruik van de vergelijkingen voor homogene- en heterogene gronden.

De opstelling van de vergelijkingen voor homogene gronden moet namelijk niet zoo worden opgevat, dat deze vergelijkingen alléén voor homogene gronden mogen worden toegepast. Integendeel kunnen deze vergelijkingen in elken grond worden toegepast. Past men de genoemde vergelijkingen in een heterogenen grond toe, zoo heeft de berekende doorlaatafactor *niet* meer de beteekenis, dat de geheele laag in het profiel tusschen den bodem van het boorgat en het phreatisch oppervlak *overal* denzelfden doorlaatafactor = gemeten doorlaatafactor heeft. De berekende factor heeft dan de beteekenis, dat in een volkomen homogenen grond met een doorlaatafactor gelijk aan den gemeten doorlaatafactor onder overigens dezelfde omstandigheden dezelfde stijgsnelheid van het water in het boorgat zou worden gemeten. De berekende factor is dus op te vatten als een soort gemiddelde doorlaatafactor. Dergelijke gemiddelde doorlaatafactoren heb ik den naam gegeven van „schijnbare doorlaatafactoren”. Daar b.v. in kleigronden de grond slechts zelden in dien zin homogeen is, dat de doorlatendheid in alle lagen onder het maaiveld dezelfde is, — gewoonlijk neemt hier de doorlatendheid in het profiel met de diepte onder het maaiveld af — zoo zullen gewoonlijk in deze gronden de *gemeten* doorlaatafactoren dus *schijnbare* doorlaatafactoren zijn. Dit wil dus zeggen, dat wanneer men in denzelfden grond de doorlaatafactoren nog eens bepaalt bij een dieperen stand van het phreatisch oppervlak onder het maaiveld men

b.v. een kleineren doorlaatfactor zal vinden, wanneer in werkelijkheid de doorlatendheid van den grond met de diepte onder het maaiveld afneemt, enz. De bepaalde factor geldt dan ook — exact uitgedrukt — alleen voor dien eenen bepaalden stand van het phreatisch oppervlak en voor de *geheele* laag tusschen dezen stand van het phreatisch oppervlak en den bodem van het boorgat (12), waaruit tevens dus volgt, dat men de diepte van het boorgat niet willekeurig kan kiezen, maar rekening moet houden met het doel waarvoor de gemeten doorlaatfactoren later moeten worden aangewend. Zoo mogen feitelijk de gemeten doorlaatfactoren alleen worden toegepast voor (b.v.) de berekening van den waterafvoer naar drains, wanneer de grondwaterstand midden tusschen de drains op dezelfde hoogte wordt genomen als hij tijdens de metingen in de boorgaten was. Bovendien moeten de drains in dit geval zich op een diepte, gelijk aan de diepte van den bodem van het boorgat, onder het maaiveld bevinden of althans op deze diepte in den bodem voor deze berekeningen gedacht worden (13). Doet men dit niet en beschouwt men den bepaalden factor niet als een schijnbaren factor, maar als een reëelen doorlaatfactor — d.w.z. beschouwt men den grond als werkelijk homogeen — dan heeft men dus kans fouten te maken. Deze fouten zullen dus des te grooter zijn, naarmate de doorlatendheid sneller met de diepte onder het maaiveld verandert en naarmate men de dikte van de laag bij andere berekeningen van hetzelfde type meer laat afwijken van de dikte van de laag, waarvoor deze doorlaatfactoren werkelijk zijn bepaald. Is het dan ook noodzakelijk, dat deze veranderingen in de doorlatendheid met de diepte onder het maaiveld eenigszins bekend moeten zijn, zoo moeten de vergelijkingen voor gelaagde gronden worden toegepast. De metingen moeten dan als volgt worden uitgevoerd:

Stel b.v. dat bij een toekomstig drainageplan de drains op b.v. 150 cm diepte zullen worden gelegd en dat het verder noodzakelijk is te weten hoe hoog de grondwaterstand bij een bepaalden overtolligen neerslag en bij een bepaalden onderlingen afstand van de drains zal oploopen, dan kan het soms van groot nut zijn te weten hoe groot de doorlatendheid van den grond onder het vlak van de drains is en hoe de doorlatendheid met de hoogte boven dit vlak van de drains verandert.

Men gaat dan als volgt te werk:

Stel b.v. eens, dat de ligging van het phreatisch oppervlak 50 cm onder het maaiveld is. Men boort dan b.v. eerst boorgaten tot 1 m diepte en meet hierin de stijgsnelheid. Men berekent nu hieruit met behulp van de vergelijking voor homogene gronden den schijnbaren doorlaatfactor van de laag van 50—100 cm, waarbij de grond onder den bodem van het boorgat als doorlatend is te beschouwen. Zijn deze metingen verricht, dan boort men dezelfde boorgaten dieper uit tot b.v. 150 cm en meet in deze boorgaten

weer de stijgsnelheid. Met behulp van de vergelijking voor 2 lagen in het profiel waarbij $k_1 = k_3$ wordt gesteld, wordt nu de schijnbare doorlaatfactor van de laag van 100—150 cm onder het maaiveld berekend. Dit is mogelijk, doordat h_2 (= 0,5 m) en k_2 (= gemeten doorlaatfactor in de laag van 50—100 cm onder het maaiveld) bekend zijn. Vervolgens kan men dezelfde boorgaten nog eens dieper uitboren tot b.v. 2 m diepte en hierin nog eens de stijgsnelheid bepalen. Met behulp van de vergelijking voor 3 lagen in het profiel berekent men nu den schijnbaren doorlaatfactor van de laag van 150—200 cm onder het maaiveld, enz. Uit deze doorlaatfactoren van de genoemde lagen krijgt men dan een goeden indruk van de verandering van den doorlaatfactor met de diepte onder het maaiveld (zie ook § 3c hoofdstuk II). Hierbij kan het natuurlijk voorkomen, dat $k_1 = k_2 = k_3$ of m.a.w., het kan blijken, dat de onderzochte grond werkelijk homogeen is ten opzichte van de doorlatendheid. Voor de toepassing van de vergelijkingen voor gelaagde gronden heeft dat geen beteekenis, daar men een grond altijd gelaagd mag denken en bij een homogenen grond dan uit den aard der zaak tot resultaat krijgt, dat de doorlatendheid van alle lagen dezelfde is.

Verder spreekt het vanzelf, dat men het boorgat ook b.v. telkens slechts 30 cm kan uitboren, enz. Men dient echter wel te bedenken, dat iedere meting zeker 3 dagen in beslag neemt, daar de waterstand zich natuurlijk telkens weer moet instellen. Meet men dus 3 maal in hetzelfde boorgat, dan dient men den duur van deze metingen dus reeds op $3 \times 3 = 9$ dagen te stellen.

Al naar het doel, waarvoor de gemeten doorlaatfactoren moeten dienen, heeft men het dus in de hand de metingen uitvoeriger te verrichten. Gewoonlijk zal men echter wel met één of hoogstens twee metingen in één boorgat kunnen volstaan.

Ten slotte spreekt het wel van zelf, dat men de boorgatenmethode moet toepassen in tijden van hooge grondwaterstanden, d.w.z. dus in het algemeen in den herfst, winter of vroege voorjaar. Met behulp van deze boorgatenmethode kan men immers alleen de doorlatendheid van den grond *onder* het phreatisch oppervlak bepalen.

§ 2. VERGELIJKEND ONDERZOEK BETREFFENDE DE BEPALING VAN DE DOORLATENDHEID VAN DEN GROND DOOR MIDDEL VAN DE BOORGATEN-METHODE EN VAN DE GRONDWATERSTAND-DEBIETMETHODE OP EEN GEDRAINEERD PERCEEL KLEIGBOND IN DEN WIERINGERMEERPOLDER.

De doorlaatfactoren, dien men met behulp van de boorgatenmethode bepaalt, zal men vaak toepassen om met behulp van de vergelijkingen, — die

men voor het verband tusschen den grondwaterstand tusschen de drains en boven de drains, den drainaafstand, den doorlaatfactor van den grond en het debiet van deze drains kan opstellen —, b.v. te berekenen tot hoe hoog de grondwaterstand midden tusschen de drains zal oploopen, wanneer men in het betreffende terrein deze drains op een bepaalden onderlingen afstand en diepte aanbrengt en wanneer voor het debiet (= overtollige neerslag) van deze drains een bepaald bedrag wordt aangenomen.

In verband met het bovenstaande spreekt het dan ook wel van zelf, dat het van groot belang is eens te bewijzen, dat de beide methoden absolute cijfers geven, d.w.z., dat volgens de boorgatenmethode en volgens de grondwaterstand-debietmethode dezelfde doorlaatfactoren worden verkregen. Met andere woorden was het van groot belang eens op een gedraineerd perceel volgens beide methoden dezen doorlaatfactor te bepalen en de overeenstemming tusschen beide methoden na te gaan.

Voor de uitvoering van deze vergelijking heeft men echter een gedraineerd perceel grond nodig, waarop dagelijks gedurende een zekeren tijd voor en na de metingen in de boorgaten, het debiet van de drains (iedere drain afzonderlijk) evenals de grondwaterstand midden tusschen de drains en boven de drains is gemeten. Dergelijke perceelen, waar deze metingen dagelijks plaats vinden, zijn niet talrijk en worden in ons land in hoofdzaak alleen in den Wieringermeerpolder aangetroffen. Op ons verzoek was de Directeur van den Wieringermeerpolder, de Heer Ir. SMEDING, gaarne bereid bij dit vergelijkend onderzoek zijn medewerking te verleenen. Gaarne zeg ik, mede namens den Directeur van het Bodemkundig Instituut, den Heer Ir. SMEDING dank voor zijn medewerking. Dit zelfde geldt ook den Heeren Ir. VAN STEEN en Ir. BOSMA, resp. Inspecteur van den Wieringermeerpolder en landbouwkundig Ingenieur bij de Wieringermeerdirectie. Hun belangstelling in en medewerking voor dit vergelijkend onderzoek is door mij ten zeerste op prijs gesteld.

In gezamenlijk overleg werd besloten dit onderzoek te doen plaats vinden op Kavel K 7 en wel op een 3-tal strooken tusschen de handgelegde drains n^o. 7, 8, 9 en 10 op dezen kavel. De grond bestaat hier uit klei tot zware klei met hier en daar iets lichtere plekken in den ondergrond. De drains liggen hier op 11 m onderlingen afstand en loopen van kavelsloot tot kavelsloot, waarbij zij van het midden van den kavel naar de sloot afhellen. De breedte van den kavel van drainuitmonding tot drainuitmonding bedraagt 248 m. Iedere drain voert dus den nuttigen neerslag af van een strook van 124 lengte en van 11 m breedte; n.l. ter weerszijden van de drain een strook van 5,5 m breedte.

Midden op de strooken tusschen de drains werden nu boorgaten van ± 20 cm doorsnede en van een diepte onder het maaiveld gelijk aan de diepte van de

drains ter weerszijden van dit boorgat ter plaatse geboord. De diepte van de boorgaten is dus des te grooter naarmate ze dichter bij de sloot zijn geboord. Dit werd gedaan, omdat wij bij latere berekeningen alleen te maken hebben met waterstanden boven het vlak van de drains (de grond onder de drains is ondoorlatend) en de helling van de drains niet van invloed is. De eerste boorgaten op iedere strook tusschen de genoemde drains werden telkens, zoowel vanuit de westelijke als van uit de oostelijke kavelsloot, op 22 m uit de sloot geboord; de volgende boorgaten werden geboord op afstanden van 32, 42, 52, 62, 72, 82, 92, 102, en 112 m uit de sloot. De laatste boorgaten bevinden zich dus op 12 m uit het midden van den kavel.

In deze boorgaten werd op 3 en 4 Maart 1936 de stijgsnelheid bepaald. De doorlaatfactoren, die uit deze stijgsnelheden berekend zijn, zijn aangegeven op het Kaartje I, waarop tevens de drains zijn aangegeven en de boorgaten van 1 tot 60 zijn genummerd.

Kavel K 7 — Wieringermeer.

10	9	West	8	7
21. 0.063		20. 0.017		1. 0.032
22. 0.657		19. 0.010		2. 0.029
23. 0.556		18. 0.025		3. 0.015
24. 0.332		17. 0.235		4. 0.212
25. 0.085		16. 0.019		5. 0.167
26. 0.008		15. 0.052		6. 0.423
27. 0.123		14. 0.097		7. 0.151
28. 0.027		13. 0.008		8. 0.027
29. 0.047		12. 0.017		9. 0.208
30. 0.490		11. 0.713		10. 0.064
31. 0.008		50. 0.079		51. 0.045
32. 0.014		49. 0.774		52. 0.231
33. 0.080		48. 0.017		53. 0.035
34. 0.351		47. 0.019		54. 0.030
35. 0.035		46. 0.075		55. 0.035
36. 0.501		45. 0.046		56. 0.032
37. 0.314		44. 0.372		57. 0.020
38. 0.441		43. 0.099		58. 0.012
39. 0.174		42. 0.007		59. 0.020
40. 0.257		41. 0.212		60. 0.059

Oost

Uit de gevonden doorlaatfactoren blijkt, dat het terrein jammer genoeg van plek tot plek nog al heterogeen is. De kleinste doorlaatfactor bedraagt 0,008 en de grootste 0,774; dit is dus in een verhouding van 1 op 97. Bovendien blijken de plekken, waar grootere en waar kleinere doorlaatfactoren bepaald zijn door elkaar heen te liggen; zij het dan ook, dat gedeeltelijk wel grootere plekken zijn aan te wijzen met een grootere, resp. kleinere doorlatendheid.

Voor dit vergelijkend onderzoek is deze heterogeniteit helaas minder gunstig. Men heeft nu namelijk geen zekerheid meer, dat in de strookjes loodrecht de drains en ter breedte van gewoonlijk (zie verder onder) 5 m ter weerszijden van de boorgaten de grond overal dezelfde doorlatendheid bezit, als in het betreffende boorgat is bepaald. Bij de beoordeeling van de verkregen resultaten moet hiernede dan ook rekening worden gehouden.

Op de genoemde strooken tusschen de drains waren midden tusschen deze drains op 85 m uit de sloot grondwaterstandsbuizen geplaatst. Eenige weken voor de uitvoering van de metingen werden bovendien nog grondwaterstandsbuizen geplaatst op 85 m uit de sloot boven de drains en op 45 en 115 m uit de sloot midden tusschen de drains en boven de drains. In de reeds vroeger aanwezige en in de nieuwe buizen werd iederen dag de grondwaterstand gemeten, evenals het debiet van iedere drainreeks.

De metingen in de boorgaten werden op 3 en 4 Maart uitgevoerd. Daar ongeveer een week voor deze dagen vrijwel geen regen was gevallen, evenals op deze dagen zelf, zijn de gemeten debietwaarden op 3 en 4 Maart dus juist. Het debiet is in de genoemde week van dag tot dag regelmatig gedaald, zoodat het debiet op 3 en 4 Maart dus volledig in evenwicht was met den op deze dagen *in den grond* aanwezigen grondwaterstand. Deze grondwaterstand wordt nu gemeten met behulp van de genoemde grondwaterstandsbuizen. Denkt men zich nu de waterstanden in deze grondwaterstandsbuizen midden tusschen de drains op 45, 85 en 115 m uit de sloot door lijnen verbonden, dan zou men dus verwachten, dat de waterstanden in de boorgaten zich ongeveer juist op de hoogte van deze lijnen onder het maaiveld zouden bevinden. Dit bleek gedeeltelijk ook zoo het geval te zijn; gedeeltelijk bevonden zich deze waterstanden in de boorgaten ook beneden deze lijnen. Een gedeelte van deze lage standen is te verklaren door het feit, dat de waterstanden in deze boorgaten zich tijdens de metingen op 3 en 4 Maart nog niet ingesteld hadden. Dit is namelijk daar het geval, waar de grond om het boorgat zeer slecht doorlatend is (zie in dit verband ook de in noot 2 genoemde publicatie blz. 221—223). Gedeeltelijk was dit echter ook het geval in boorgaten, waaromheen de doorlatendheid volgens de metingen toch te groot was om de waterstanden in deze boorgaten door een trage instelling te kunnen verklaren. Integendeel lijkt het mij waarschijnlijker, dat deze waterstanden de juiste ligging van het

phreatisch oppervlak ter plaatse aangeven. Is dit juist, dan moeten enkele grondwaterstandsbuizen iets te hooge standen aanwijzen, d.w.z. deze buizen moeten in de betreffende week de daling van het phreatisch oppervlak in den grond iets te traag hebben gevolgd. Deze laatste grondwaterstandsbuizen bleken nu juist vele van diegenen te zijn, die op 85 m uit de sloot midden tusschen de drains waren geplaatst en reeds langer in dit terrein aanwezig waren geweest. Het is op zichzelf niet onmogelijk, dat deze buizen eenigszins verstopt zijn. Behalve deze buizen zouden ook nog 2 van de nieuwe buizen te hooge standen aangeven. Hoe het ook moge zijn, het leek mij het beste eenzijdig deze laatste, te hooge, standen niet verder in aanmerking te nemen bij de vaststelling van de meest waarschijnlijke ligging van het phreatisch oppervlak, evenals anderzijds de te diepe standen in de boorgaten, waarin een trage instelling door een slechte doorlatendheid van den grond om dit boorgat te verwachten was. Overigens kan worden opgemerkt, dat deze relatieve minder goede overeenkomst tusschen de waterstanden in de boorgaten en in de grondwaterstandsbuizen slechts uitzonderingsgewijze voorkomen en op het betreffende terrein veroorzaakt worden door de slikkige structuur van den grond in de diepere lagen.

Verder bleek uit de waarnemingen, dat boven de drains steeds een laag water voorkwam. Soms was de laag boven de drains slechts gering (± 1 dm), soms echter ook tamelijk hoog, ofschoon natuurlijk de grondwaterstand hier steeds lager was dan midden tusschen de drains ter plaatse.

Om nu te kunnen nagaan, in hoeverre de met de boorgatenmethode bepaalde doorlaatfactoren met die uit de grondwaterstanden en de debietcijfers berekende factoren overeenkomen, zullen met behulp van de grondwaterstanden boven de drains en de meest waarschijnlijke ligging van het phreatisch oppervlak midden tusschen de drains en met behulp van de met de boorgatenmethode bepaalde doorlaatfactoren het debiet van de drains berekend worden, welk debiet we dus met het rechtstreeks op 3 en 4 Maart bepaalde debiet kunnen vergelijken. Daar verder de drains vanuit het midden der kavel naar weerszijden naar de kavelsloten afhellen, moeten we dus het debiet van de drains 8 west, 8 oost, 9 west en 9 oost berekenen.

Het debiet van de genoemde drainreeksen is dus afkomstig van een strook van 124 m lengte en van 5,5 m breedte ter weerszijden van de beschouwde drain. Daar verder de metingen van de doorlatendheid in de boorgaten ter weerszijden van drain 8 west en 9 west op 3 Maart en van de drain 8 oost en 9 oost op 4 Maart hebben plaats gevonden, moeten we dus de berekende debietwaarden van de eerste 2 drains vergelijken met het bepaalde debiet op 3 Maart en van de beide andere drains met het bepaalde debiet op 4 Maart.

In verband nu met het feit, dat de metingen in de boorgaten geleerd hebben,

dat het terrein nog al heterogeen was, was één van de beste methoden om dit te doen om de strooken van 124 m lengte en 5,5 m breedte ter weerszijden van de drains te verdeelen in een groot aantal smalle strookjes loodrecht de drains. Daar de boorgaten meestal 10 m uit elkaar liggen, zijn deze strookjes dus meestal 10 m breed; n.l. 5 m ter weerszijden van het boorgat. De strookjes in het midden van den kavel moesten echter 17 m breed worden genomen, daar de, het dichtst bij het midden van den kavel liggende, boorgaten 12 m van dit midden waren verwijderd. Om soortgelijke reden moesten de strookjes grenzende aan de kavelsloten 27 m breed worden genomen, daar het het dichtst bij de sloot gelegen boorgat hier nog 22 m van verwijderd was.

Voor alle bovengenoemde strookjes werd nu verder aangenomen, dat zij dezelfde doorlatendheid hebben als de grond om het betreffende boorgat. Uit de meest waarschijnlijke ligging van het phreatisch oppervlak midden tusschen de drains en uit de waargenomen waterstanden boven de drains, werd nu voor ieder strookje de daar aanwezige gemiddelde grondwaterstand midden tusschen en boven de drains afgeleid. Het strookje van 27 m grenzende aan de kavelsloten werd nog in een strookje van 7 m en een van 20 m breedte verdeeld in verband met het feit, dat de grondwaterstand bij de sloot natuurlijk gelijk is aan het slootpeil of, wat deze berekeningen betreft, gelijk kan worden genomen aan het vlak van de drains. Hierbij is dus verondersteld, dat de hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot op 20 m uit de sloot begint, hetgeen in elk geval voor deze berekeningen als voldoende juist kan worden beschouwd.

Van alle bovengenoemde strookjes kunnen we nu het debiet naar de drain berekenen. Door het debiet van alle strookjes op te tellen krijgen we dus het debiet van de geheele drainreeks.

De berekening van dit debiet kan geschieden met behulp van de vergelijking:

$$Q = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)l}{e}, \quad (59)$$

waarin Q het debiet in m^3 per 24 uur voorstelt, dat afkomstig is van een strookje van l m breedte van één zijde van de drain. k is de doorlaatfactor in m per 24 uur; e de halve drainafstand in m's en H_0 en h_0 de grondwaterstanden in m's midden tusschen en boven de drains, gerekend van af het vlak van de drains. Deze vergelijking is één van de grondvergelijkingen, die het verband tusschen het debiet van de drains, de doorlatendheid van den grond, den onderlingen afstand van de drains en den waterstand tusschen en boven de drains tot uiting brengt. Deze vergelijking geldt voor homogene gronden of homegeen gedachte gronden en voor het geval, dat de grond onder de drains ondoorlatend

is, of ten opzichte van de doorlatendheid van den grond boven de drains, als ondoorlatend kan worden beschouwd. In dit geval is de grond onder de drains ondoorlatend, omdat op dit terrein de doorlatendheid snel met de diepte onder het maaiveld afneemt.

TABEL XI.

Beschouwde drain n°.	Beschouwde strook tusschen de drains n°.	Afstand begin- en eindpunt van de beschouwde strook tot sloot in m.	Breedte beschouwde strook in m.	Doorlaatafactor k .	Hoogte water-spiegel tusschen de drains en boven de drains = H_0 in m.	Hoogte water-spiegel boven de drains en gemeten vanaf de drains = h_0 in m.	Debiet van de beschouwde strook in m ³ per 24 uur = Q .
8 West	7 en 8	0—20	20	0,032	0,30	0,10	0,0094
8 "	7 en 8	20—27	7	0,032	0,61	0,24	0,0130
8 "	7 en 8	27—37	10	0,029	0,625	0,24	0,0173
8 "	7 en 8	37—47	10	0,015	0,625	0,235	0,0090
8 "	7 en 8	47—57	10	0,212	0,63	0,205	0,1367
8 "	7 en 8	57—67	10	0,167	0,62	0,175	0,1073
8 "	7 en 8	67—77	10	0,423	0,49	0,15	0,1674
8 "	7 en 8	77—87	10	0,151	0,43	0,13	0,0462
8 "	7 en 8	87—97	10	0,027	0,43	0,17	0,0075
8 "	7 en 8	97—107	10	0,208	0,445	0,26	0,0496
8 "	7 en 8	107—124	17	0,064	0,49	0,325	0,0263
8 "	8 en 9	0—20	20	0,017	0,15	0,10	0,0007
8 "	8 en 9	20—27	7	0,017	0,34	0,24	0,0012
8 "	8 en 9	27—37	10	0,010	0,45	0,24	0,0027
8 "	8 en 9	37—47	10	0,025	0,54	0,235	0,0107
8 "	8 en 9	47—57	10	0,235	0,54	0,205	0,1067
8 "	8 en 9	57—67	10	0,019	0,47	0,175	0,0067
8 "	8 en 9	67—77	10	0,052	0,39	0,15	0,0123
8 "	8 en 9	77—87	10	0,097	0,365	0,13	0,0204
8 "	8 en 9	87—97	10	0,008	0,42	0,17	0,0022
8 "	8 en 9	97—107	10	0,017	0,485	0,26	0,0051
8 "	8 en 9	107—124	17	0,713	0,515	0,325	0,3512
							1,1096

Het debiet in liters per uur per 100 m drain bedraagt dus:

$$\frac{1,1096 \cdot 1000}{1,24 \cdot 24} = 37 \text{ l.}$$

Als voorbeeld is nu in tabel XI het debiet van drain 8 west berekend, waarnaar verder mag worden verwezen. Het debiet van drain 8 west is daarna nog eens omgerekend in liters per uur per 100 m drain. Op dezelfde wijze is

ook het debiet van de drains 8 oost en 9 west en oost berekend. De berekening van deze laatste debietwaarden is korthedshalve weggelaten.

TABEL XII.

Afstroomings- gebied van de drains n°.	Debiet in L. p. uur per 100 m drain.		Gemiddelde doorlaatfactor in meters per 24 uur.	
	Berekend.	Bepaald.	Berekend uit de waarnemingen in de boorgaten (tweede methode)	Berekend uit debiet en grond waterstanden (eerste methode).
drain 8 west	37	28 (3 Maart)	0,13	0,10
„ 8 oost	29	30 (4 Maart)	0,11	0,12
„ 9 west	68	36 (3 Maart)	0,18	0,10
„ 9 oost	52	30 (4 Maart)	0,19	0,11
Gemiddeld	47	31	0,15	0,11

In tabel XII zijn nu de berekende en de bepaalde debietcijfers in liters per uur per 100 m drain aangegeven. Verder is hierin aangegeven de gemiddelde doorlaatfactor van het afstroomingsgebied van iedere drain, zooals zij uit de, met de boorgatenmethode verkregen, doorlaatfactoren kan worden verkregen. Hiervoor zijn deze doorlaatfactoren vermenigvuldigd met de breedte van de strookjes, waarvoor zij gelden en gedeeld door 2×124 (het afstroomingsgebied ligt ter weerszijden van de drain). Verder is ook de gemiddelde doorlaatfactor van dit afstroomingsgebied aangegeven, zooals ze uit de *waargenomen* debietcijfers en uit de grondwaterstanden midden tusschen en boven de drains kunnen worden berekend. Deze berekening is in dit geval zeer eenvoudig. Volgens vergelijking (59) is immers het debiet recht evenredig met den doorlaatfactor. Het berekende debiet van het afstroomingsgebied van drain 8 west is b.v. 37 l, terwijl het rechtstreeks bepaalde debiet 28 l bedraagt. Daar verder alles hetzelfde blijft, is dus de gemiddelde doorlaatfactor, zooals deze uit het *waargenomen* debiet en de verdere gegevens dus kan worden berekend, eenvoudig $\frac{28}{37} \cdot 0,13 = 0,10$ m per 24 uur, enz.

Vergelijken we nu de berekende en de bepaalde debietcijfers resp. de gemiddelde doorlaatfactoren met elkaar, dan blijkt de overeenstemming van de afstroomingsgebieden van drain 8 west en oost zelfs zeer fraai en voor de drains 9 west en oost redelijk te zijn. In verband met de heterogeniteit van het terrein en de niet geheel vaststaande ligging van het phreatisch opper-

vlak kon geen betere overeenstemming worden verwacht. Dat de berekende debietwaarden in het algemeen hooger zijn dan de bepaalde debietwaarden ligt in het feit, dat in de eerste plaats de doorlatendheid van dit terrein snel met de diepte onder het maaiveld afneemt (zie in dit verband ook noot 13) en mogelijk in de tweede plaats, dat gemiddeld genomen de strookjes met de boorgaten, waarin de hoogste doorlaatfactoren bepaald werden, een iets kleineren doorlaatfactor zullen hebben dan in het betreffende boorgat is bepaald geworden.

Ofschoon dus uit het bovenstaande is gebleken, dat een streng bewijs van de overeenstemming van de volgens beide methoden bepaalde doorlaatfactoren nog niet is geleverd, zoo is anderzijds de verkregen overeenstemming van dien aard, dat — in aanmerking genomen de onzekerheden, die op dit terrein bestaan — met de verkregen overeenstemming genoeg kan worden genomen. Bij de bespreking van de verkregen doorlaatfactoren in den Rietwijkeroorderpolder (zie § 4 van dit hoofdstuk) zal overigens ook nog blijken, dat met behulp van deze cijfers de waargenomen grondwaterstanden in een nabij gelegen polderproefveld uitstekend kunnen worden verklaard.

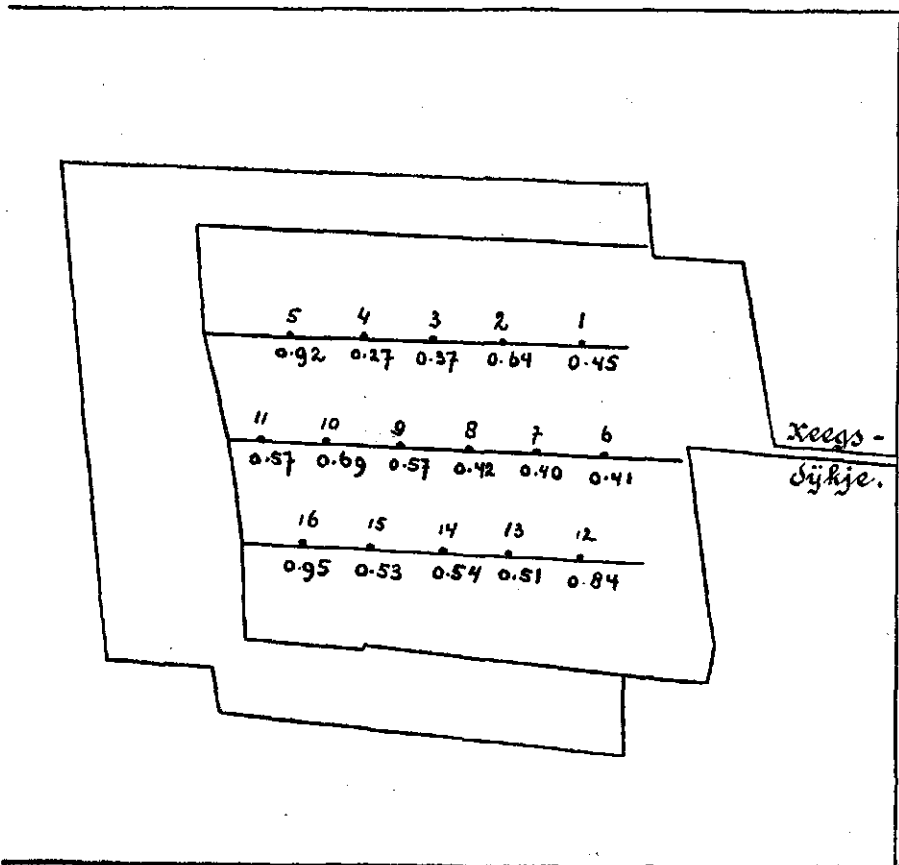
§ 3. BESPREKING VAN DE VERKREGEN RESULTATEN OP HET TOEKOMSTIG VLIEGTERREIN VAN DE GEMEENTE LEEUWARDEN.

In het begin van 1936 werden ook een aantal bepalingen van de doorlatendheid verricht op het toekomstig vliegterrein van de Gemeente Leeuwarden (aan den Stiensersstraatweg gelegen), in verband met het advies, dat aan het Bodemkundig Instituut was gevraagd over de drainage van dit toekomstig vliegterrein.

Het betrof hier een terrein grasland van ± 60 ha. Een bemonstering in een 5-tal kuilen had reeds geleerd, dat het terrein overal een vrijwel dezelfde samenstelling had, en dat ook tot de onderzochte diepte (1 m) deze samenstelling vrijwel dezelfde bleef. Het kleigehalte varieerde van 39 tot 60 % (gemiddeld ± 50 %); het humusgehalte was in de laag onder 30 cm onder het maaiveld ± 2 % en het koolzure kalk gehalte in deze laag gewoonlijk ± 10 %.

Op dit terrein werden nu een 16-tal boorgaten van ± 1 m diepte geboord. Deze boorgaten waren daarbij zoo regelmatig mogelijk over het terrein verdeeld. In het kaartje N^o. 11 zijn deze boorgaten aangegeven en genummerd van 1 tot 16. Naast het nummer van het boorgat zijn op dit kaartje tevens de in deze boorgaten bepaalde doorlaatfactoren opgegeven. Deze doorlaatfactoren zijn, gemiddeld genomen, bepaald voor de laag van ± 25 tot 100 cm onder het maaiveld.

Luchtvaartterrein Leeuwarden.



Uit deze doorlaatfactoren blijkt, dat het terrein ook van plek tot plek vrijwel homogeen is ten opzichte van de doorlatendheid. Deze varieerde in de 16 boorgaten slechts van $\pm 0,3$ tot $\pm 1,0$ m per 24 uur. Van dit terrein is het dan ook heel goed mogelijk den gemiddelden doorlaatfactor ($\pm 0,6$) te berekenen. Hierbij kan nog worden opgemerkt, dat hier de grond op meer dan 1 m diepte als ondoorlatend is op te vatten ten opzichte van de gemiddelde doorlatendheid van de onderzochte laag van 25 tot 100 cm.

Belangrijk zijn deze metingen verder in dit opzicht, dat op een groot gebied slechts geringe variaties in den doorlaatfactor voorgekomen zijn. Ook hadden de waterstanden zich in alle boorgaten ingesteld. Hetzelfde is, zooals we zullen zien, het geval op het onderzochte terrein in den Rietwijkeroorder-

polder, terwijl dit ook steeds bij andere onderzoeken (b.v. in de Dollardpolders) die hier verder niet besproken zullen worden, het geval was. Het komt mij dan ook als zeer waarschijnlijk voor, dat de resultaten, zooals deze op de 3 strooken tusschen de drains 7, 8, 9 en 10 op K7 in den Wieringermeerpolder in dit opzicht zijn verkregen, uitzonderingen zijn en een gevolg zijn resp. van de groote heterogeniteit en van de slikkige structuur — althans voor de dieper gelegen lagen — van den grond in laatst genoemden polder. Een betere structuur moet zich in deze gronden — in elk geval in de dieper gelegen lagen — nog vormen, waarbij voorloopig groote plaatselijke verschillen voorkomen, die waarschijnlijk na verloop van tijd zullen verdwijnen of althans veel minder groot zullen worden.

§ 4. BESPREKING VAN DE VERKREGEN RESULTATEN IN DEN RIETWIJKEROORDERPOLDER NABIJ AMSTERDAM.

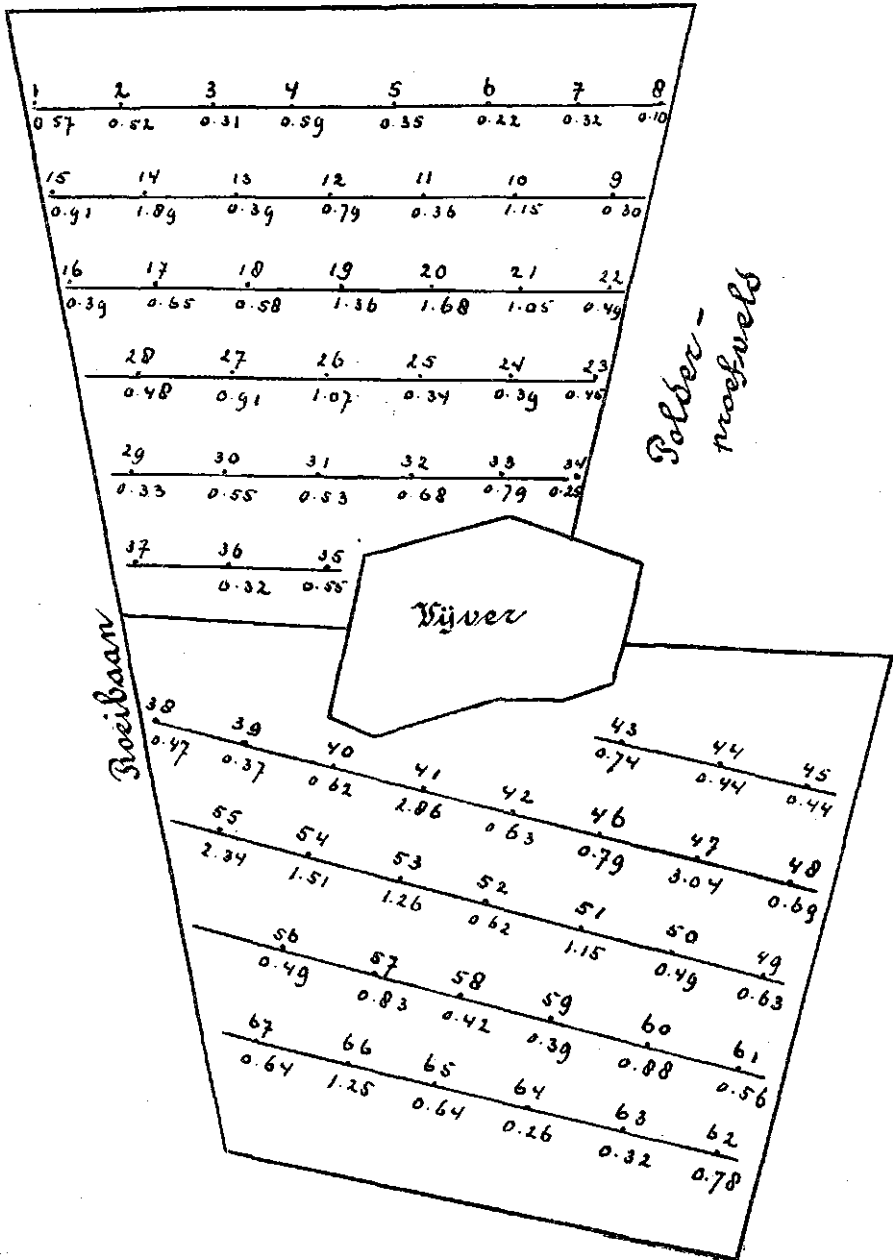
In den allerlaatsten tijd zijn ook nog een reeks waarnemingen verricht in den Rietwijkeroorderpolder nabij Amsterdam. Op dit terrein ± 70 ha (gedeeltelijk grasland gedeeltelijk bouwland) werd een 67-tal boorgaten van $\pm 1,5$ m diepte geboord, die regelmatig over het terrein verdeeld lagen. In het kaartje N° III is een overzicht van het betreffende terrein gegeven; tevens zijn hier de boorgaten, genummerd van 1 tot 67 aangegeven.

Uit bemonsteringen op een 6-tal plekken kwam vast te staan, dat ook hier het profiel van plek tot plek weinig veranderde. De laag van 0 — ± 40 cm onder het maaiveld bestaat uit venige klei. Daaronder treedt, op sommigen plekken zavel tot lichte zavel, op andere plekken zwaardere grond op. De dieper gelegen lagen bestaan echter uit lichte zavel tot zavel met een kleigehalte van 15 tot 22 %. Voor zoover de grond dus in de hooger gelegen lagen zwaarder is, gaat deze op grootere diepte ook in de genoemde lichtere gronden over. In alle lagen onder de venige klei treedt een hoog koolzure kalk gehalte op van ± 6 tot gewoonlijk meer dan 10 %. Het humusgehalte in deze lagen is zeer gering (± 1 tot 2 %).

In de genoemde boorgaten zijn op de aangegeven wijze weer de doorfactoren bepaald en in het kaartje N° III naast de nummers van de boorgaten aangegeven. Alleen in boorgat N° 37 zijn geen waarnemingen verricht kunnen worden, daar dit boorgat per abuis door den gebruiker van den grond was dicht geëgd.

Rietwijkeroorderpolder bij Amsterdam.

Bleekers kade



Uit de verkregen resultaten zien we, dat ook nu de doorlaatfactoren in het algemeen weinig uiteenloopen. Tevens kan hierbij nog worden opgemerkt, dat ook nu de waterstanden zich in alle boorgaten hadden ingesteld. Verder kan ook voor dit terrein zeer goed een gemiddelde doorlaatfactor voor de onderzochte laag (± 70 tot 150 cm onder het maaiveld) worden berekend. Deze gemiddelde doorlaatfactor bedraagt hier 0,74 m per 24 uur.

De grond op een diepte groter dan 150 cm onder het maaiveld kan hier niet als ondoorlatend worden opgevat ten opzichte van de onderzochte laag van ± 70 — 150 cm. Waar de ondoorlatende laag zich hier bevindt, is niet te zeggen. Misschien ligt deze op 2 m diepte, misschien ook nog dieper. Nemen we nu eens aan, dat deze laag zich op ± 2 m onder het maaiveld bevindt, en de gemiddelde doorlatendheid van de geheele laag tot ± 70 cm onder het maaiveld 0,74 m. p. 24 uur bedraagt, dan zijn we in staat met den verkregen gemiddelden doorlaatfactor op waarlijk fraaie wijze de resultaten te verklaren, die op het nabij gelegen polderproefveld (zie kaartje N°. III) zijn verkregen.

In het genoemde polderproefveld zijn nu o.a. drains op gemiddeld 102 cm diepte en op onderlinge afstanden van 10, 15 en 20 m gelegd. Sedert de herfst van 1935 zijn hier geregeld de grondwaterstanden midden tusschen de drains waargenomen. Het resultaat van deze metingen was, dat de waterstanden slechts zeer weinig in den winter van 1935 op 1936 gevarieerd zijn. Bij de 10 m drainage waren de hoogste standen nauwelijks meer dan 10 cm boven het vlak van de drains, terwijl deze bij de drainage op 15 en 20 m onderlingen afstand telkens wel iets hooger waren, maar toch ook nog relatief laag waren; n.l. bij de 20 m drainage hoogstens ± 30 cm boven het vlak van de drains (of dus steeds ruim 70 cm onder het maaiveld). De drainage heeft hier dus zeer gunstige resultaten gegeven. Is nu de doorlaatfactor even groot als van het terrein in den Rietwijkeroorderpolder, — hetgeen zeer waarschijnlijk is —, dan kunnen de bovengenoemde resultaten *niet* verklaard worden, doordat de gemiddelde doorlaatfactor op zich zelf erg groot is. Integendeel kan de doorlatendheid hoogstens slechts matig tot vrij goed genoemd worden. De goede resultaten van de drainage moeten verklaard worden, doordat de grond hier onder het vlak van de drains tot op relatief groote diepte doorlatend blijft. Het watervoerende profiel van het afstromingsgebied naar de drains is daardoor groot en bij een op zich zelf slechts tamelijke doorlatendheid kunnen toch vrij hooge tot hooge overtollige neerslagen (afhankelijk van den drainafstand) worden afgevoerd, zonder dat de grondwaterstand midden tusschen de drains daardoor merkbaar oploopt.

We kunnen dit nu gemakkelijk door een berekening aantonen, waarbij we dus zullen veronderstellen, dat de ondoorlatende laag zich op 2 m onder het maaiveld bevindt en de doorlaatfactor 0,74 m per 24 uur bedraagt. Onder

overtolligen neerslag zullen we verstaan de neerslag, die door den grond naar de drains afvloeit. De berekening voeren we in dit geval uit met behulp van de vergelijking:

$$S = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{e^2}, \quad (60)$$

waarin S nu de nuttige neerslag in meters per 24 uur voorstelt; k is de doorlaatfactor; e de halve drainafstand en H_0 en h_0 de hoogte van den grondwaterstand resp. midden tusschen en boven de drains en gerekend van af de ondoorlatende laag. Daar hier uit den aard der zaak geen water boven de drains voor komt; de drains op een gemiddelde diepte van 1,02 m liggen en de ondoorlatende laag op 2 m diepte is verondersteld, is dus h_0 steeds dezelfde en gelijk aan $2 - 1,02 = 0,98$ m. Beschouwen we de drainage op 10 m en nemen we voor de nuttige neerslag 5 mm, dan is dus:

$$0,005 = \frac{0,74(H_0^2 - 0,98^2)}{25},$$

of $H_0 = 1,06$ dit is dus $1,06 - 0,98 = 0,08$ m of 8 cm boven het vlak van de drains. In de onderstaande tabel XIII zijn nu voor de drainage op 10, 15 en 20 m onderlingen afstand bij overtollige neerslagen van 5 en 10 mm de grondwaterstanden midden tusschen de drains en *boven* het vlak van de drains berekend en uitgedrukt in cm's.

TABEL XIII.

Drainafstand.	Q = 5 mm grondwaterstanden boven de drains.	Q = 10 mm grondwaterstanden boven de drains.
10 m	8 cm	16 cm
15 m	18 cm	33 cm
20 m	30 cm	54 cm

Bedenken we nu, dat een nuttige neerslag van 5 mm reeds hoog is (waarschijnlijk is ± 5 mm de hoogste waarde, die in de beschouwde periode is voorgekomen, daar het hoogste waargenomen debiet van de drains ± 5 mm is geweest) en een nuttige neerslag van 10 mm slechts zelden voorkomt, dan blijkt dus uit de gegeven cijfers in tabel XIII, dat de grondwaterstand tusschen de drains op 10 m onderlingen afstand volgens de berekening slechts weinig op toch een groot verschil in nuttige neerslag zal reageeren. Bij een

verandering van de nuttige neerslag van 0 tot 10 mm verandert de grondwaterstand hoogstens van 0 tot 16 cm boven het vlak van de drains. Bij de 15 en 20 m drainage zijn deze veranderingen natuurlijk grooter.

Vergelijken we dit nu eens met de experimenteel verkregen cijfers, dan blijkt het volgende:

In de beschouwde periode waren de hoogste waargenomen grondwaterstanden boven het vlak van de drains slechts \pm resp. ruim 10, 20 en 30 cm. Slechts in den allerlaatsten tijd was ook het debiet van de drains opgenomen. In deze korte periode liep de grondwaterstand echter ook tot \pm de hoogste waargenomen waarden op. Het debiet bedroeg toen \pm 5 mm en de gemeten grondwaterstand boven het vlak van de drains resp. 12, 20 en 27 cm, terwijl voor dezelfde nuttigen neerslag berekend werd resp. 8, 18 en 30 cm. Niet alleen is de overeenstemming tusschen de berekende en de bepaalde grondwaterstanden goed, maar bovendien volgt hieruit dus, dat het verloop van deze grondwaterstanden in de beschouwde periode zeer goed door den waargenomen doorlaatfactor en door het feit, dat de grond onder de drains tot tot relatief groote diepte doorlatend moet zijn, kan worden verklaard.

Tevens volgt uit het bovenstaande, hoe met betrekkelijk eenvoudige en relatief weinig kostbare metingen belangrijke gegevens vooruit kunnen worden voorspeld, die, zooals in den Rietwijkerorderpolder, op een proefveld alleen ten koste van veel geld en moeite kunnen worden verkregen. Het is zeker niet mijn bedoeling daarmede te zeggen, dat dergelijke proefvelden nu wel steeds gemist kunnen worden. Alleen meen ik wel te mogen zeggen, dat in vele gevallen deze gegevens met een dergelijke waarschijnlijkheid met behulp van de metingen in boorgaten kunnen worden voorspeld, dat inderdaad in *die* gevallen deze proefvelden wel kunnen worden gemist.

TABEL XIV.

Viscositeit η . 100 van gedestilleerd H_2O bij verschillende temperaturen.

C°.	0.	0,1.	0,2.	0,3.	0,4.	0,5.	0,6.	0,7.	0,8.	0,9.
0	1,789	1,783	1,777	1,771	1,765	1,758	1,752	1,746	1,740	1,734
1	1,728	1,722	1,714	1,711	1,705	1,699	1,693	1,687	1,682	1,676
2	1,670	1,665	1,659	1,654	1,648	1,643	1,638	1,632	1,627	1,621
3	1,616	1,611	1,606	1,600	1,595	1,590	1,585	1,580	1,574	1,569
4	1,564	1,559	1,554	1,550	1,545	1,540	1,535	1,530	1,526	1,520
5	1,516	1,511	1,507	1,502	1,497	1,492	1,488	1,483	1,478	1,474
6	1,489	1,485	1,480	1,476	1,471	1,467	1,463	1,458	1,454	1,449
7	1,425	1,421	1,417	1,413	1,409	1,404	1,400	1,396	1,392	1,388
8	1,384	1,380	1,376	1,372	1,368	1,364	1,360	1,356	1,352	1,348
9	1,344	1,340	1,336	1,333	1,329	1,325	1,321	1,317	1,314	1,309
10	1,306	1,302	1,299	1,295	1,299	1,288	1,284	1,281	1,277	1,274
11	1,270	1,266	1,263	1,259	1,256	1,252	1,249	1,245	1,242	1,238
12	1,235	1,232	1,228	1,225	1,222	1,218	1,215	1,212	1,209	1,205
13	1,202	1,199	1,196	1,193	1,190	1,186	1,183	1,180	1,177	1,174
14	1,171	1,168	1,165	1,162	1,159	1,156	1,153	1,150	1,147	1,144
15	1,141	1,138	1,135	1,132	1,129	1,126	1,123	1,120	1,117	1,114
16	1,112	1,109	1,106	1,103	1,100	1,097	1,094	1,091	1,088	1,085
17	1,082	1,079	1,076	1,074	1,071	1,068	1,066	1,063	1,060	1,058
18	1,055	1,052	1,050	1,047	1,045	1,042	1,039	1,037	1,034	1,032
19	1,029	1,027	1,024	1,022	1,019	1,017	1,014	1,012	1,010	1,007
20	1,005	1,002	1,000	0,997	0,995	0,993	0,990	0,988	0,985	0,983
21	0,981	0,978	0,976	0,974	0,972	0,969	0,967	0,965	0,962	0,960
22	0,958	0,956	0,953	0,951	0,949	0,947	0,945	0,942	0,940	0,938
23	0,936	0,934	0,932	0,930	0,928	0,926	0,924	0,922	0,920	0,917
24	0,915	0,913	0,911	0,909	0,907	0,905	0,903	0,900	0,898	0,896
25	0,894									

NOTEN.

- (1) In vroegere publicaties werd steeds gesproken van „doorlatendheidscoëfficiënt”. De naam „doorlaatfactor” is echter korter en beter en zal dan ook in het vervolg gebruikt worden.
- (2) HOOGHOUTD S. B.: Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, n^o. 2; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen 1934*, n^o. 40 B, blz. 215 e.v.
- (3) Zie in dit verband Hoofdstuk II § 3 c en Hoofdstuk IV § 1 d.
- (4) Zie o.a. DISERENS E.: Beitrag zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens in natürlicher Bodenlagerung; *Schweizerische Landwirtschaftliche Monatshefte* XII, 1934, blz. 1 e.v.
- (5) Zie de in noot 4 genoemde publicatie.
- (6) DONAT J.: Die Saugstrangentfernung bei Dränungen in Mineralböden; *Wasserwirtschaft und Technik*, 1935, blz. 207 e.v.
- (7) PORCHET M.: Hydrodynamique der Puits; *Ministère de l'Agriculture, Direction Générale des Eaux et des Forêts*, 2e Partie, *Eaux et Génie Rural*, 1931.
- (8) STEGGEWENTZ J. H.: Wateronttrekking aan phreatisch grondwater door middel van een volkomen put; *De Ingenieur*, n^o. 17, 24, 1935; *Bouw en Waterbouwkunde* 5, 10.
- (9) Een nog beter boor werd ons in den laatsten tijd geleverd door de Firma Heybroek, Bilthoven. Deze boren zijn bovendien verstelbaar van 12—20 cm. De prijs bedraagt f 16 zonder verlengstukken. Het voordeel van deze boor is, behalve zijn verstelbaarheid, dat de grond hieruit veel gemakkelijker is te verwijderen, terwijl ook het boren zelf veel gemakkelijker gaat.
- (10) Hierbij kan worden opgemerkt, dat in de laatsten tijd steeds boorgaten van 12,5 cm. doorsnede zijn gebruikt. Deze bevallen, mits goed vertikaal geboord, uitstekend en geven veel snellere metingen dan in boorgaten van 20 cm. doorsnede.
- (11) In den laatsten tijd werd door een bekwaam instrumentmaker volgens onze aanwijzingen een nieuw apparaat gemaakt, waarvan de stevigheid en de nauwkeurigheid van de waarnemingen groter zijn dan van het hier beschreven apparaat. Inlichtingen hierover worden gaarne verstrekt.
- (12) Uit de metingen in een boorgat van één bepaalde diepte kan men nooit met zekerheid afleiden, of de grond onder den bodem van het boorgat dezelfde doorlaatfactor heeft als den gemeten doorlaatfactor. De invloed van het water, dat door den bodem van het boorgat in het boorgat stroomt, is immers, zoals we gezien hebben, gewoonlijk van zeer geringen invloed op de stijgsnelheid. Wil men dan ook zekerheid hebben over de grootte van de doorlatendheid onder den bodem van het eerste boorgat, dan moeten de metingen in de dieper uitgeboorde boorgaten worden herhaald.
- (13) Feitelijk is zelfs dat nog niet geheel juist, daar het phreatisch oppervlak tusschen de drains geen horizontaal vlak is. Boven de drains staat de grondwaterstand immers in elk geval dieper onder het maaiveld dan midden tusschen de drains. De fout, die men op deze wijze kan krijgen, zal echter gewoonlijk zeer klein zijn, tenzij de doorlatendheid zeer snel met de diepte onder het maaiveld mocht afnemen en de grond onder de drains als ondoorlatend moet worden beschouwd. Hierop kan echter niet nader worden ingegaan, maar moet naar een volgende publicatie worden verwezen.

INHOUD.

Bladz.

HOOFDSTUK I.

Inleiding	449
---------------------	-----

HOOFDSTUK II.

Theoretische beschouwingen	451
§ 1. De vergelijking van <i>DISEBENS</i> (homogene gronden)	451
§ 2. Vergelijkingen afgeleid onder de veronderstelling, dat de inzinking van het phreatisch oppervlak rondom het boorgat zich volledig heeft ingesteld	453
<i>a.</i> De vergelijking van <i>DONAT</i> (homogene gronden)	453
<i>b.</i> De vergelijkingen voor de strooming van het water in den grond naar een volkomen put in heterogene gronden.	457
<i>c.</i> De vergelijkingen voor de stijgsnelheid van het water in een volkomen put in heterogene gronden	460
§ 3. De vergelijkingen, afgeleid onder de veronderstelling, dat de inzinking van het phreatisch oppervlak rondom het boorgat te verwaarloozen klein is	462
<i>a.</i> De grond is homogeen; het boorgat reikt al dan niet tot de ondoorlatende laag	462
<i>b.</i> De grond is heterogeen; het boorgat reikt al dan niet tot de ondoorlatende laag	467
<i>c.</i> De geldigheid van de vergelijkingen voor heterogene gronden en hun toepassing. De schijnbare doorlaatfactor.	472

HOOFDSTUK III.

Bespreking van de resultaten van de contrôlemetingen	475
§ 1. Algemeene opmerkingen	475
§ 2. Contrôlemetingen in een vat gevuld met verschillende zandgronden	477
<i>A.</i> Homogene gronden	477
<i>a.</i> De gebruikte doorsneden van de boorgaten (geperforeerde buizen) en de gebruikte zandgronden	477

	Bladz.
b. Bespreking van de wijze van vulling van het vat.	478
c. De berekening van den doorlaatfactor van het zand in het vat uit de op andere wijze bepaalde k_{10-85} -waarde	480
d. De uitvoering van de bepaling van de stijgsnelheid; de uitvoering van de berekeningen.	482
1. De beschrijving van de gebruikte apparatuur	482
2. De meting van de stijgsnelheid	483
3. De berekening van $tg\alpha$ uit de gemeten stijgsnelheid	484
e. Contrôle en uitbouw van de opgestelde vergelijkingen.	486
1. De onveranderlijkheid van $tg\alpha$	486
2. De afhankelijkheid van den factor a in de vergelijking (33) van den factor H	488
3. De afhankelijkheid van den factor a' van de doorsnede van de buis.	491
4. De afhankelijkheid van den factor a'' van y_0 in verband met de grootte van H	493
5. Contrôle van de vergelijking voor het geval het boorgat de ondoorlatende laag niet bereikt	495
B. Heterogene gronden	497
Contrôle van de vergelijkingen (41)—(43)	497
§ 3. Contrôlemetingen in een grooten bak gevuld met rivierzand.	502
§ 4. Samenvatting	508

HOOFDSTUK IV.

Toepassing van de boorgatenmethode voor de bepaling van den doorlaatfactor van gronden met een structuur op het veld	510
§ 1. Uitvoering van de methode op het veld.	510
a. Het boren van de boorgaten en wat daarmee samenhangt	510
b. Het meten van de stijgsnelheid.	512
1. De gebruikte apparatuur.	512
2. Het uitvoeren van de metingen.	514

c.	Berekening van den doorlaatfactor uit de waargenomen stijgsnelheid.	516
d.	Eenige algemeene opmerkingen in verband met de onder sub c uitgevoerde berekening van den doorlaatfactor. . . .	518
§ 2.	Vergelijkend onderzoek betreffende de bepaling van de doorlatendheid van den grond door middel van de boorgatenmethode en van de grondwaterstand-debietmethode op een gedraineerd perceel kleigrond in den Wieringermeerpolder.	521
§ 3.	Bespreking van de verkregen resultaten op het toekomstig vliegterrein van de gemeente Leeuwarden	529
§ 4.	Bespreking van de verkregen resultaten in den Rietwijkeroorderpolder nabij Amsterdam	531