BIJDRAGE TOT DE KENNIS VAN CAPILLAIRE VERSCHIJNSELEN IN VERBAND MET DE HETEROGENITEIT VAN DEN GROND

PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN DOKTOR IN DE LANDBOUWKUNDE AAN DE LANDBOUWHOOGESCHOOL TE WAGENINGEN, OP GEZAG VAN DEN RECTOR-MAGNIFICUS DR. IR. N. L. SÖHNGEN, HOOGLEERAAR IN DE MICROBIOLOGIE VOOR EENE — OVEREENKOMSTIG ART. 46, LID 3 VAN DE WET VAN 29 JUNI 1925 (STAATSBL. No. 283) — DAARTOE BENOEMDE COMMISSIE UIT DEN SENAAT, TE VERDEDIGEN OP VRIJDAG 28 SEPTEMBER 1928, DES NAMIDDAGS TE 3 UUR, DOOR

JAN HENDRIK ENGELHARDT
GEBOREN TE OUDE-PEKELA

BIJ J. B. WOLTERS' U. M. — GRONINGEN, DEN HAAG, 1928.

STELLINGEN.

I.

Onder de vele mogelijke oorzaken van de vermeerdering van de lichaamslengte der mannelijke bevolking in Nederland moet ook de toeneming van het gebruik van minerale plantenvoedende stoffen in den land- en tuinbouw gerekend worden.

II.

Zoowel uit een landbouwkundig als uit een waterstaatkundig oogpunt is het gewenscht, dat worde uitgemaakt wie eigenaren zijn van de kwelders en slikken in Groningen.

III.

Het verdient overweging land- en tuinbouwcursussen te laten geven door Wageningsche ingenieurs.

IV.

De voorstelling van capillaire werking, gegeven in „Ramann, Bodenkunde", 3e Aufl., 1911, blz. 341—342, is onjuist.

V.

De waarde van de bepaling der absolute watercapaciteit wordt doorgaans te hoog aangeslagen.

VI.

Het is te verwachten, dat begreppeling der Zuiderzeepolders niet zal kunnen vervallen.

—

VII.

De waterberging van den grond is van grooten invloed op de capaciteit van bemaling.

VIII.

Door het gebruik van dekmateriaal bij drainreeksen wordt de beteekenis van het geven van helling geringer.

IX.

Een toenemend gebruik van den vorenpakker, vooral op hooge zandgronden, is wenschelijk.

X.

Voor zandgronden, welke hoog boven het phreatisch oppervlak zijn gelegen, heeft wateronttrekking beneden het phreatisch oppervlak geen invloed op de watervoorziening der cultuurgewassen.

INHOUD.

Blz.

Inleiding . . . . . 1—2

HOOFDSTUK I.

Het water in den grond in verband met capillaire werkingen. Onderzoekingen van anderen omtrent capillaire stijghoogten en conclusies daaruit getrokken . . . . . 3—10

HOOFDSTUK II.

De gebruikte capillarimeters en hun werking . . . . . 11—22

HOOFDSTUK III.

Uitkomsten van het onderzoek. Invloed van de dikte van het grondlaagje. Minimum- en maximum negatieve capillariteitsdruk 23—34

HOOFDSTUK IV.

Het watergehalte in en boven de capillaire zône. Sejunctiewater. Funiculaire werking . . . . . 35—45

HOOFDSTUK V.

Het verband tusschen de afmetingen der gronddeeltjes en den negatieven capillariteitsdruk . . . . . 46—59

HOOFDSTUK VI.

Slotbeschouwingen over capillaire werking in verband met de heterogeniteit van den grond en de aanwezigheid van gangen en holten . . . . . 60—69

Samenvatting . . . . . 70—72

Literatuur . . . . . 73—74

INLEIDING.

De groei der cultuurgewassen staat ten zeerste onder den invloed van de verhouding, waarin water en lucht in den grond voorkomen.

Het watergehalte is afhankelijk van den toestand, waarin het water voorkomt en deze toestand hangt samen met de grootte en den vorm van de poriënruimten.

Deze ruimten zijn te verdeelen in capillaire en niet-capillaire. Een ruwe scheiding in dezen geeft een verdeeling van den grond in deeltjes > 2 m.M. en < 2 m.M. WOLLNY (1) vond bij een korrelgrootte van 1—2 m.M. een capillaire stijghoogte van 5—9 m.M. VON KLENZE (2) nam waar, dat bij een korrelgrootte van 2.5 m.M. capillaire opstijging niet meer plaats vond.

De gronden, geschikt voor cultuur, bestaan grootendeels uit deeltjes < 2 m.M. en zoo zij al een betrekkelijk hoog gehalte aan grootere deeltjes mogen bevatten en toch hun geschiktheid voor cultuur hebben behouden, dan zal dit moeten worden toegeschreven aan de omstandigheid, dat de grootere deeltjes zoodanig tusschen de kleinere verspreid zijn, dat zij den toestand, waarin het water kan voorkomen, niet ongunstig beïnvloeden.

De capillaire ruimten kunnen als een celwerk van kleine kanaaltjes, waarin niet-capillaire ruimten ontbreken, den grond doorkruisen. Beneden een zekere diepte, waar weersinvloeden en physiologische processen geen rol meer spelen, zal van een dergelijken toestand sprake zijn; hier heerscht de korrelstructuur. Dichter bij de oppervlakte wordt het celwerk van capillairen dan ook onderbroken door niet-capillaire ruimten. In de allerbovenste laag is gedurende een groot gedeelte van het jaar deze onderbreking zoo menigvuldig, dat niet één capillair celwerk meer voorkomt, maar in de plaats daarvan een groot aantal kleine; hier heerscht dan een kruimelstructuur en eventueel een structuur van kluiten. De laag, gelegen tusschen de diepten met volkomen korrelstructuur en met kruimel-

structuur, vertoont allerlei overgangen. De niet-capillaire ruimten, welke hier voorkomen, beletten in het algemeen niet, dat het onderlinge verband van het capillaire celwerk blijft bestaan.

Schr. verdeelt de niet-capillaire ruimten in *holten* en *gangen*. De holten staan slechts door capillaire ruimten in verbinding met de atmosfeer, terwijl bij de gangen deze verbinding zoowel rechtstreeks als door capillaire ruimten geschiedt.

Bij aanwezigheid van water in den grond treden in de capillaire ruimten holle vloeistofspiegels op, die een negatieven capillariteitsdruk veroorzaken. De watermassa in het capillaire celwerk, die onder invloed staat van dezen negatieven capillariteitsdruk, wordt bepaald door de grootte van dezen druk.

Daar de gronddeeltjes zeer verschillend groot zijn, is dit ook het geval met de capillaire ruimten. Deze heterogene samenstelling of *heterogeniteit* van den grond roept verschijnselen te voorschijn, welke den toestand en de hoeveelheid van het water in den grond geheel anders doen zijn dan in geval de gronddeeltjes alle even groot waren. Het is de bedoeling van dit geschrift een bijdrage te leveren tot de kennis van voornoemde verschijnselen.

HOOFDSTUK I.

Het water in den grond in verband met capillaire werkingen. Onderzoekingen van anderen omtrent capillaire stijghoogten en conclusies daaruit getrokken.

De negatieve capillariteitsdruk.

Het water in den grond is eensdeels in aanraking met de lucht, anderdeels met de gronddeeltjes. Het vlak van aanraking met de lucht wordt het vrije oppervlak genoemd en dat met de vaste stof het aanrakingsoppervlak.

Op het vrije oppervlak heerscht, behalve de dampkringsdruk, de cohesiedruk, waarvan de grootte afhangt van den vorm van het oppervlak. Bij een hol oppervlak is de cohesiedruk kleiner en bij een bol oppervlak grooter dan bij een plat oppervlak. Deze vermindering, resp. vermeerdering, van den cohesiedruk wordt de capillariteitsdruk genoemd en is aldus voor te stellen:

$$D_{cap.} = \frac{H}{2} \cos \delta \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

H is een constante en beteekent de oppervlaktespanning per eenheid van oppervlak van een bol met een straal één. $\frac{H}{2} = \sigma$ is de capillariteitsconstante of cohesieconstante (volgens Quincke). De capillariteitsdruk kan daarom ook aldus worden voorgesteld:

$$D_{cap.} = \sigma \cos \delta \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

R_1 en R_2 zijn de kleinste en de grootste kromtestraal van het gebogen oppervlak, δ is de randhoek en $\cos \delta = \frac{\beta}{\sigma}$, waarin β is de adhesieconstante (3).

Bij holle vloeistofspiegels, zooals die tusschen gronddeeltjes voorkomen, liggen de middelpunten van de krommingen buiten de vloeistof en er is sprake van een negatieven capillariteitsdruk.

Wordt het capillaire celwerk in den grond opgevat als een aaneenschakeling van zeer korte cylindrische, capillaire buisjes, dan is de straal R van de buisjes tevens de kromtestraal en kan ook worden geschreven

$$D_{cap.} = \frac{2\sigma \cos\delta}{R}.$$

β kan nooit grooter zijn dan σ, hoogstens er aan gelijk. In het laatste geval is $\cos\delta = 1$, hetgeen het geval is bij volkomen bevochtiging. Dan

$$D_{cap.} = \frac{2\sigma}{R}.$$

Bij niet volkomen bevochtiging, bijv. bij drogen grond, is de kromtestraal R′ grooter dan de straal van de capillaire ruimte en

$$R' = \frac{R}{\cos\delta}.$$

Bij drogen grond zal $D_{cap.}$ dus kleiner zijn.

Door den negatieven capillariteitsdruk wordt beweging veroorzaakt. Zoo het evenwicht is bereikt, is de zwaartekracht gelijk aan de capillariteitsdruk. Vindt capillaire opstijging plaats, dan is de opvoerhoogte $h = D_{cap.}$ (uitgedrukt in c.M. waterdruk).

Is de lengte van een grondkolom, waarin de capillaire opstijging plaats vindt, geringer dan de capillaire opstijghoogte, dan zullen de menisci aan de oppervlakte van den grond worden afgeplat en de kromtestralen grooter zijn dan de straal van de capillairen.

Het watergehalte in de capillaire zône.

Het vlak in den grond, waar de hydrostatische druk gelijk is aan die van de atmosfeer, wordt door VERSLUYS het phreatisch oppervlak genoemd (4).

Tot op zekere hoogte boven het phreatisch oppervlak is de grond nog met water verzadigd, zoodat — zooals VERSLUYS zegt — „het watergehalte van zand in de capillaire zône overeenkomt met

het cijfer der poreusiteit" (5). De bijzondere structuur echter van de bovenste laag van den grond, die — zooals in de Inleiding reeds is gezegd — het gevolg is van biologische processen en weersinvloeden, zal oorzaak zijn, dat het watergehalte in de capillaire zône aldaar lager is dan VERSLUYS aangeeft. †) De aanwezigheid van gangen in de bovenste laag van den grond waarborgt tevens, dat de wortels van de cultuurgewassen voldoende lucht voor hun ontwikkeling ter beschikking hebben. Het is met VERSLUYS aan te nemen, dat „de meeste landplanten met hunne wortels blijven in dat gedeelte, waar nog lucht is", maar niet, dat dit „dus boven het capillaire niveau" moet zijn (6).

Funiculaire werking.

Boven het capillair oppervlak zijn de ruimten slechts gedeeltelijk gevuld met water, dat ook door capillaire krachten wordt vastgehouden. Volgens VERSLUYS (7) gaat het capillair water eerst over in funiculair water en dit weer in pendulair water. In de funiculaire zône zal, volgens dien schrijver, na wateronttrekking van alle zijden aanvulling plaats vinden, dus ook van de capillaire zône uit. Een dergelijke aanvulling moet op grond van een proef van VERSLUYS (8) wel worden aangenomen. Schr. meent echter door eigen proef (Hoofdstuk IV) te hebben aangetoond, dat de funiculaire beweging zóó langzaam is en er zóó weinig water door wordt aangevoerd, dat zij bij de watervoorziening der planten geen rol speelt.

Capillaire opstijging in de capillaire zône.

Capillaire opstijging vindt alleen plaats, indien het daarvoor benoodigde drukverschil aanwezig is. Zoo zal in een buis met grond, die in water wordt geplaatst, een capillaire opstijging worden waargenomen, omdat op het vrije wateroppervlak buiten de buis werkt de atmosferische druk vermeerderd met den cohesiedruk en op de holle vloeistofspiegels te zelfder hoogte in de buis een druk, die het bedrag van den capilairiteitsdruk kleiner is.

---

†) Zie Hoofdstuk VI.

Wordt in een groote uitgestrektheid gronds van gelijkmatige samenstelling overal aan de capillaire zône evenveel water onttrokken, dan zal capillaire opstijging niet plaats vinden, indien niet tegelijkertijd het benoodigde drukverschil optreedt. Dit drukverschil zal o.a. optreden, indien de doorsneden van gangen deel uitmaken van het phreatisch oppervlak; vanuit de *vrije* vloeistofspiegels in deze gangen kan, na wateronttrekking aan de capillaire zône, water capillair opstijgen.

In dit verband is het uit een landbouwkundig oogpunt gewenscht een onderscheiding te maken in een *vrij phreatisch oppervlak* en een *ingesloten phreatisch oppervlak*. Van een vrij phreatisch oppervlak uit zal capillaire opstijging geschieden, indien water aan de capillaire zône wordt onttrokken. Is het phreatisch oppervlak daarentegen geheel ingesloten, dan zal een daling van het capillair oppervlak tot direct gevolg een even groote van het phreatisch oppervlak hebben.

In de natuur zijn het gangen en scheuren in den grond, waarin een vrij phreatisch oppervlak kan voorkomen, terwijl voorts het wateroppervlak in slooten, kanalen en rivieren ook als zoodanig functioneert.

Het is duidelijk, dat van een hooger liggend phreatisch oppervlak uit, ook al is dit ingesloten, water naar een lager liggend zal kunnen stroomen; een stijging van dit laatste brengt een stijging van het capillair oppervlak mede en ook dan is er sprake van capillaire stijging.

VAN MAANEN (9) beredeneert, dat, na onttrekking van water aan één van meerdere capillaire buisjes, een „opstijging in dat ééne buisje plaats vindt, maar daling van den waterstand over het geheel". Hij zegt verder: „Het spreekt vanzelf, dat van een opstijging van water, laten we zeggen uit den ondergrond, geen sprake kan zijn. Waar zou dat vandaan moeten komen, tenzij er beneden een luchtledig ontstaat of water van terzijde wordt aangevoerd. Wij kunnen dus zeggen, dat capillaire opstijging niet plaats vindt".

In dit betoog ligt een tegenstrijdigheid, waar eerst gezegd wordt, dat opstijging wel en later, dat deze niet plaats heeft. Ook is de conclusie, dat capillaire opstijging niet plaats heeft, te absoluut. VAN MAANEN vervalt hier in een uiterste, juist tegengesteld aan de meening van anderen, waarover de volgende alinea handelt.

Capillaire opstijging in drogen en vochtigen grond.

De waarneming van de capillaire opstijging in het laboratorium is zeker mede een oorzaak, dat de voorstelling is gewekt als zoude capillaire opstijging in de natuur als regel plaats vinden en voor de watervoorziening der planten van het grootste belang zijn (10, 11, 12, 13, 14, 15).

Gewoonlijk wordt de capillaire opstijging nagegaan door buizen, die onder voortdurend zacht kloppen met drogen grond zijn gevuld, met het van een lapje voorziene uiteinde in water te plaatsen of te hangen. Er wordt waargenomen in welke tijdsverloopen het water tot bepaalde hoogten is gestegen of hoe hoog het water na bepaalde tijdsverloopen is gekomen. Evenals bij de bepaling van het volumegewicht van den grond moet dit kloppen zóó lang duren, dat geen afname van volume meer plaats vindt. Volgens WAHNSCHAFFE en SCHUCHT (16) is deze tijdsduur ½ tot 1 uur, volgens HEINRICH (17) geeft deze wijze van vulling bij gronden met een laag humusgehalte nagenoeg dezelfde resultaten als het inslibben.

De grootste waargenomen opstijghoogten, die in de literatuur worden aangetroffen, wettigen het vermoeden, dat de wijze, waarop ze zijn bepaald, oorzaak is van te lage uitkomsten. Zoo heeft MITSCHERLICH (18) in drie maanden tijds geen grootere stijghoogte dan 0.8 M. in buizen met drogen grond kunnen vinden. TULAIKOW (19) vond in 513 dagen bij fijnkorrelige gronden een maximale stijghoogte van 1.35 M. De grootste stijghoogte door WOLLNY (20) gevonden bedraagt ca. 1 M. (voor gekorreld leem, 0—0.25 m.M.); bij de proeven van WOLLNY werd voor fijnere grondsoorten de maximale stijghoogte niet gevonden, daarvoor waren de waarnemingen van te korten duur. LOUGHRIDGE (21) nam in 200 dagen nooit (zelfs niet bij zware gronden) grootere stijghoogten dan 1.27 M. waar. Bij drogen grond is de cosinus van den randhoek kleiner dan 1 en de negatieve capillariteitsdruk zal kleiner zijn. Is daarentegen een dun laagje water op de gronddeeltjes aanwezig, dan kan dit een belangrijke toename van den negatieven capillariteitsdruk en daardoor van de stijghoogte teweegbrengen.

Indien de proef echter langen tijd duurt, dan zal, tengevolge van de condensatie van waterdamp op de droge gronddeeltjes, de capillaire opstijging dezelfde hoogte kunnen bereiken als in van te voren

bevochtigden grond. HILGARD (22), die deze meening is toegedaan, zegt: „Capillary movement takes place in moist soils more rapidly than in dry ones, although when sufficient time is given the final adjustment will be the same".

Bij droge gronden met een zeer hoog gehalte aan fijne deeltjes wordt echter na zeer langen tijd een opstijghoogte gevonden, die belangrijk kleiner is dan de werkelijke. De steeds afnemende en aanvankelijk reeds geringe snelheid van opstijging, waardoor de capillaire aanvulling ten slotte even groot wordt als de verdamping, zal hier een rol spelen. Ook zal het groote specifieke oppervlak meer water vereischen voor volkomen bevochtiging.

Met vrij groote zekerheid mag worden aangenomen, dat in droge, grofkorrelige gronden de na een zeer lang tijdsverloop waargenomen opstijghoogte weinig verschilt van de juiste. Schr. vond bij een buis, gevuld met droog zeezand, na 150 dagen een capillaire stijghoogte van 61 c.M. Door den negatieven capillariteitsdruk te bepalen op de wijze, zooals in Hoofdstuk II is beschreven, werd 63 c.M. gevonden.

In Hoofdstuk IV, blz. 36 wordt een oorzaak van een minder hooge opstijging aangegeven.

Eigenaardig doet het aan een geval te zien vermeld, dat de totale stijghoogte (en ook de snelheid van opstijging) bij vochtigen grond geringer is dan bij drogen grond. KRAWKOW (23) vermeldt, dat in droog zand het water tot 84.2 c.M. opsteeg en in hetzelfde zand met watergehalten van 0.51 tot 2.39 % ongeveer 40 c.M.

KRAWKOW vermeldt niet, of de stijghoogten in den vochtigen grond wel duidelijk waarneembaar waren. Verder kan de distributie van het water in den vochtigen grond wel zoodanig zijn geweest, dat geen luchtverplaatsing meer mogelijk was en zoodoende het water werd verhinderd hooger op te stijgen.

Beteekenis van de snelheid van capillaire opstijging.

Aan de snelheid van capillaire opstijging wordt veelal een groote beteekenis gehecht. Zoo zegt WOLLNY (24), dat hij bij zijn proeven hieraan vooral aandacht heeft geschonken, omdat „dieselbe

für die Durchfeuchtung des Bodens hauptsächlich van Belang ist."

Naarmate de stijghoogte toeneemt, neemt de snelheid af, ten gevolge van het steeds grooter wordende wrijvingsoppervlak en het toenemende gewicht van de opstijgende waterkolom. Om dezelfde reden zal in een fijnkorreligen grond het water aanvankelijk langzamer opstijgen dan in een grofkorreligen .De snelheidsafname in den fijnkorreligen grond is echter relatief minder groot en daardoor zal op een bepaalde hoogte de snelheid in den fijnkorreligen grond grooter kunnen zijn dan in den grofkorreligen. Beneden deze hoogte zal het water in den grofkorreligen grond sneller opstijgen.

Het bovenstaande dient dan ook wel in acht te worden genomen, indien in de literatuur gronden worden aangeduid, waarin het water het snelst capillair opstijgt. BRIGGS en LAPHAM vestigden hierop ook de aandacht in deze zinsnede (25): „It is therefore important to know the rate at which water can be furnished through capillary action for a soil column of any length up to the limiting value; for, while a soil may be capable of maintaining capillary action through a long column, the rate of translocation may be so small as to be of little practical value".

WOLLNY (26) spreekt van een voor de waterbeweging belangrijke wet: „Die Boden-Kapillarräume von einer bestimmten Grösse (wahrscheinlich die van 0.05 und 0.10 m.M.) leiten das Wasser am schnellsten". ATTERBERG (27) vond voor de fractie 0.05 — 1 m.M. een maximale stijghoogte van 1.055 M.

De hier geciteerde wet van Wollny kan slechts beteekenis erlangen, indien capillaire aanvulling mogelijk is en deze mogelijkheid wordt in de natuur alleen dan werkelijkheid, indien een vrij phreatisch oppervlak van een behoorlijke uitgestrektheid voorkomt op een dusdanige diepte, dat de planten van een capillaire aanvulling kunnen profiteeren.

Hier zij ook nog een uitlating van ATTERBERG (28) aangehaald, waaruit moge blijken, dat hij groote beteekenis hecht aan capillaire opstijging, zonder dat wordt vermeld, of de mogelijkheid daarvan bestaat: „Die Steighöhe in 24 resp. 48 Stunden hat für die Pflanzen grosse Bedeutung. In trockenen Perioden ist es der Untergrund, welche die Pflanzen mit Wasser versorgen soll. Die Verdunstung von der Bodenoberfläche und von den Pflanzen ist in den

Tagesstunden am stärksten. Während der Nacht muss der Untergrund neue Wassermengen aus der Tiefe der Bodenoberfläche zuführen".

Bepaling van de capillaire stijghoogte op andere wijze.

Op geheel andere wijze dan gewoonlijk geschiedt, bepaalt VERSLUYS (29) de capillaire stijghoogte. Met een capillarimeter, waarin de te onderzoeken grond op een onderlaag van grof zand is gebracht, wordt waargenomen hoe hoog kwik in een nauw buisje door den negatieven capillariteitsdruk wordt opgetrokken en hij vindt dan

$$s = 12.6 + a,$$

waarin s is de capillaire stijghoogte, h de hoogte, waarover het kwik is gestegen en a de totale dikte van den grond in den capillarimeter.

Ook bepaalt VERSLUYS de capillaire stijghoogte door den capillarimeter aan verdamping bloot te stellen. Zoodra het kwik begint te dalen, wordt uit de stijging h_1 van het kwik de stijghoogte s berekend:

$$s = 12.6h_1 + b,$$

waarin b de dikte is van het grondlaagje, waarop de te onderzoeken grond is gebracht.

VERSLUYS bepaalt de capillaire stijghoogte dus op twee manieren en vindt klaarblijkelijk dezelfde uitkomsten. Hierop wordt in Hoofdstuk III nader teruggekomen.

Op soortgelijke wijze is na Versluys door GARDNER de stijghoogte gemeten (30). De inrichting van den „capillary potentiometer" van Gardner is eenigszins afwijkend van den capillarimeter van Versluys, maar de werking berust op hetzelfde beginsel.

BRIGGS en LAPHAM (31) bepaalden de capillaire stijghoogte door na te gaan bij welke hoogte een grondkolom, waar het water aan de oppervlakte aan een gelijkmatige verdamping was blootgesteld nog in staat was door capillaire werking het verdampende water aan te vullen.

HOOFDSTUK II.

De gebruikte capillarimeters en hun werking.

De negatieve capillariteitsdruk werd door schr. op verschillende manieren bepaald met capillarimeters als weergegeven in de figuren 1, 1a, 2, 2a, 3, 3a, 4, 4a; de fig. 1 en 1a stellen denzelfden capillarimeter voor, hetzelfde geldt voor de fig, 2 en 2a, enz. Bij de proeven met de toestellen in de fig. 2, 2a, 3, 3a, 4 en 4a wordt met onderdruk gewerkt; deze capillarimeters zijn speciaal gebruikt, wanneer een groote negatieve capillariteitsdruk was te verwachten.

De capillarimeter in fig. 1 bestaat uit 2 cylindrische glazen buizen. Een linnen lapje wordt om het einde van een der buizen geslagen en daarna met een draadje vastgemaakt, waarbij gezorgd wordt, dat het lapje flink gespannen is. De andere buis wordt hier opgezet en de verbinding van beide buizen tot stand gebracht door omwinding met rubberband, die van te voren met een plakmiddel is behandeld. Om zeker te zijn van een luchtdichte afsluiting wordt het rubber bestreken met gesmolten lak, waaraan een scheutje spiritus was toegevoegd. Een doorboorde caoutchouc-stop sluit de aldus verbonden buizen onder af. Aan een buisje, door de stop gestoken, hangt een caoutchouc-slang in een met water gevulden bak.

Het toestel wordt zoover met water gevuld, dat dit even boven het linnen lapje staat; er wordt voor gezorgd, dat zich onder het lapje geen lucht bevindt. De grond, waarvoor de capillaire stijghoogte zal worden bepaald, wordt met water gemengd tot een brijachtige massa, opdat de gronddeeltjes, na op het lapje te zijn gebracht, in een zoo dun mogelijke waterlaag bezinken. Nadat de grond is opgebracht, wordt het toestel een weinig naar boven getrokken en de glazen buis met haar onderste gedeelte in een klem

geplaatst; de afstand van het linnen lapje in het wateroppervlak in den bak is door verschuiving van de klem te veranderen.

Beginnende met een kleinen afstand wordt deze met tusschenpoozen vergroot. Ten slotte verschijnt lucht onder het lapje, terwijl het water daalt. De nu in c.M. gemeten afstand is de negatieve capillariteitsdruk in c.M. waterdruk, †)

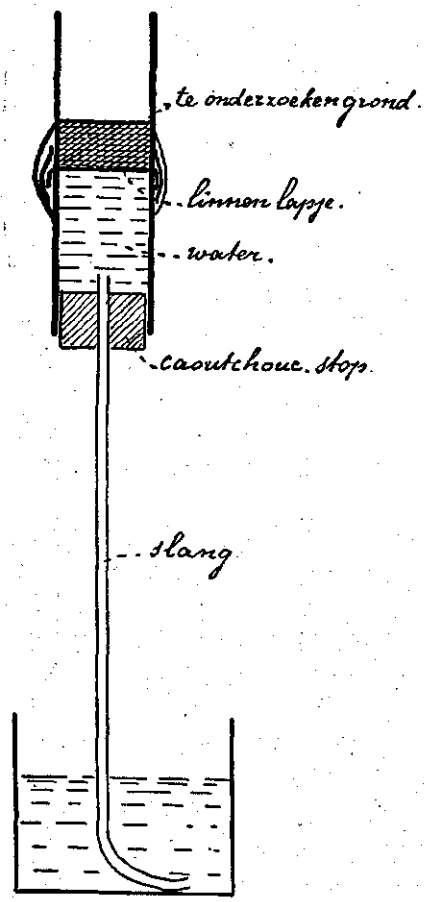


Fig. 1.

Als het water niet meer boven het grondlaagje staat en de oppervlakte van den grond droog is geworden, maakt de negatieve capillariteitsdruk van de holle menisci evenwicht met het gewicht van een waterkolom, gerekend van het oppervlak van den grond tot aan den waterspiegel in den bak; de menisci hebben kromtestralen, welke in overeenstemming zijn met de naar beneden werkende kracht. Wordt de waterkolom door optrekken langer gemaakt, dan worden de kromtestralen kleiner en, nadat deze de kleinste afmetingen hebben aangenomen, verschijnt lucht.

De negatieve capillariteitsdruk van het linnen lapje moet kleiner zijn dan van den grond; alvorens dan ook het linnen lapje op de beschreven wijze wordt aangebracht, is hiervan eerst de negatieve capillariteitsdruk bepaald. *).

†) De negatieve capillariteitsdruk wordt in het vervolg steeds uitgedrukt in c.M., waarmee dan wordt bedoeld c.M. waterdruk, welke in het grondlaagje heerscht.

*) Van de gebruikte lapjes liep de neg. cap. dr. uiteen van 16 tot 23 c.M.

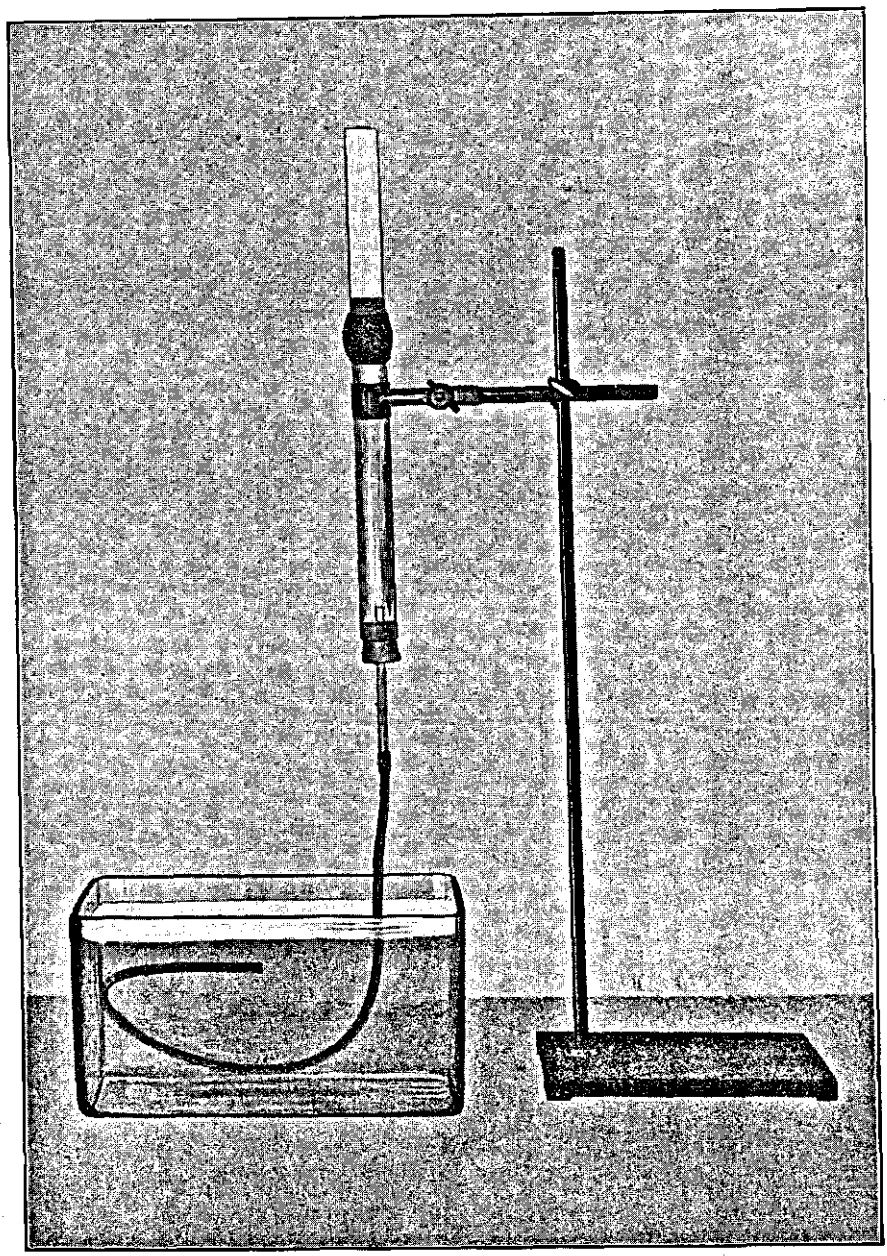


Fig. 1a.

Bij sommige gronden bleek de negatieve capilariteitsdruk zoo groot te zijn, dat het ondoenlijk was dezen te bepalen met den capillarimeter in fig. 1. Er werden dan toestellen gebruikt als door de fig, 2, 3 en 4 weergegeven.

De capillarimeter in fig. 2 is, wat zijn bovenste gedeelte aangaat,

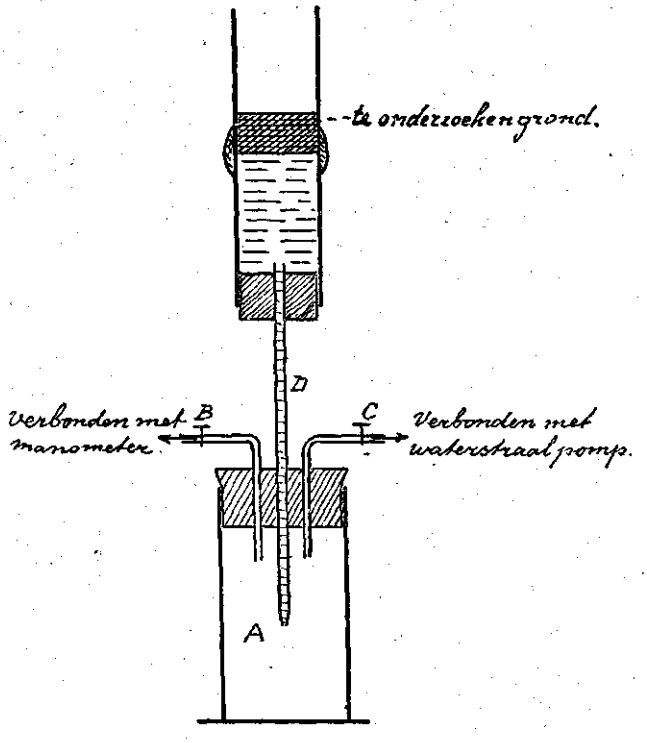


Fig. 2.

dezelfde als die in fig. 1. Het glazen buisje D is tot een punt uitgetrokken en steekt door een caoutchouc-stop, welke een fleschje A afsluit. Tevens gaan door de stop een buisje, dat met een manometer en een buisje, dat met een waterstraalpomp kan worden verbonden.

Nadat de capillarimeter met water is gevuld en de te onderzoeken grond op het lapje is gebracht, wordt gewacht, totdat het

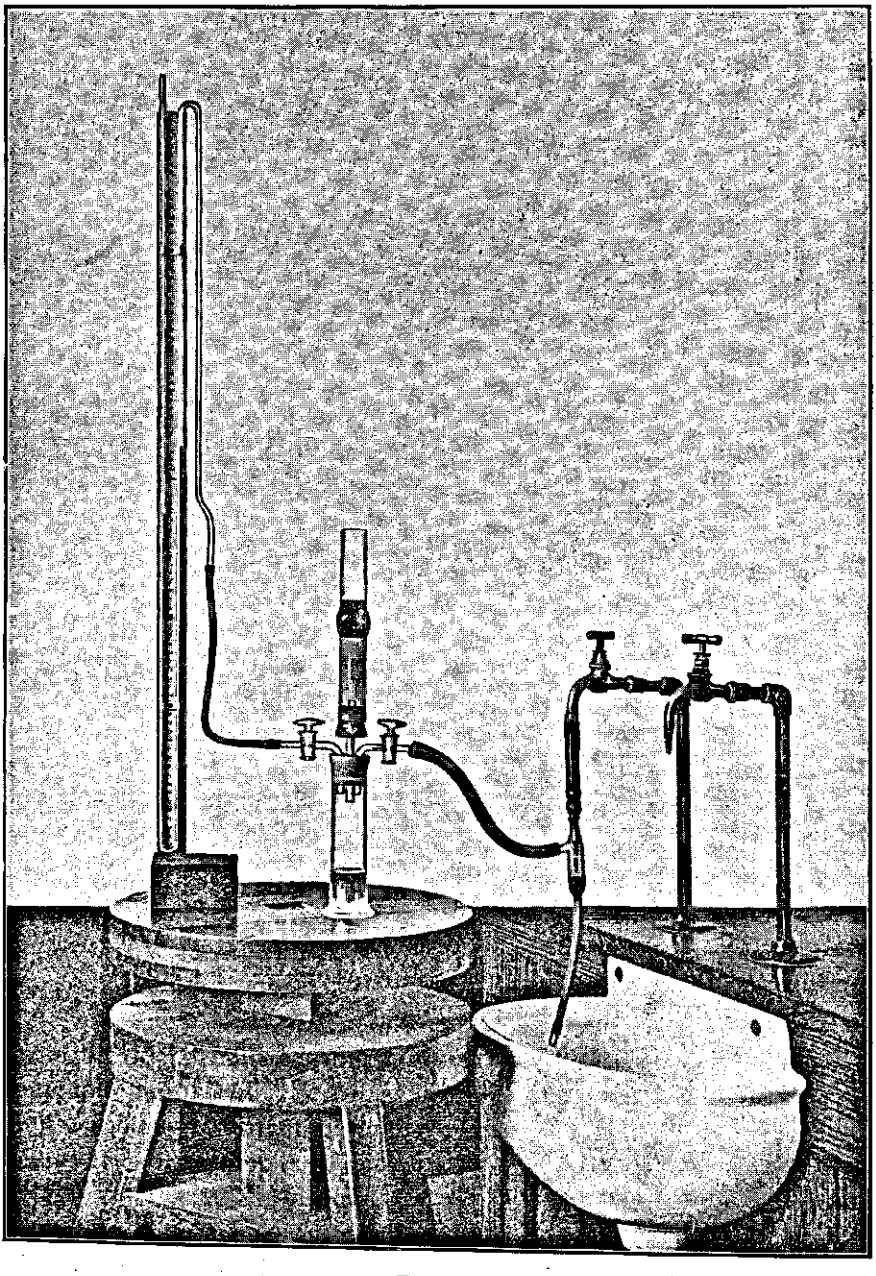


Fig. 2a.

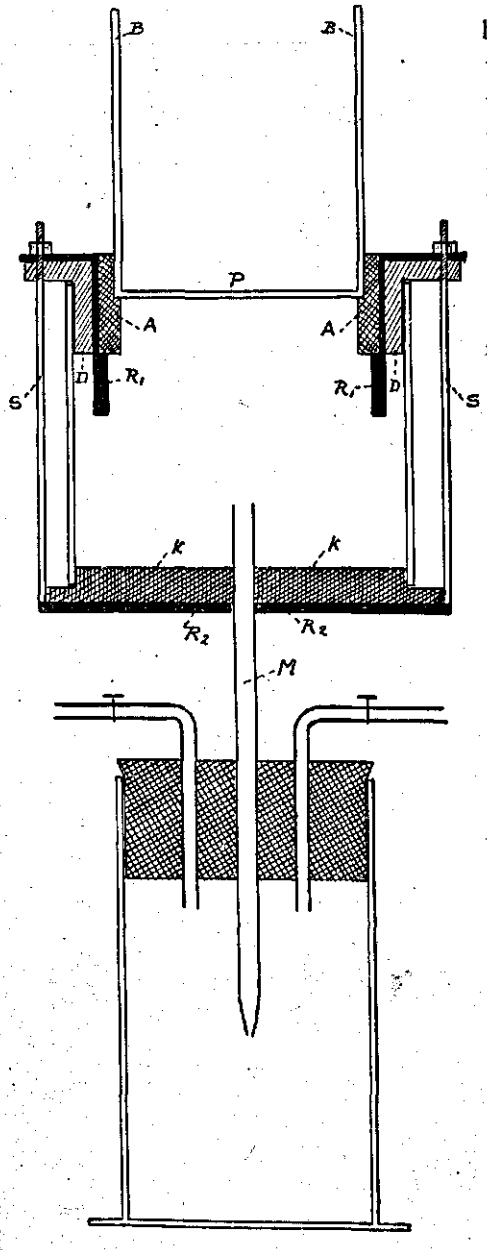


Fig. 3.

boven den grond staande water is doorgezakt. Het toestel wordt met manometer en waterstraalpomp verbonden. Het kraantje B in de verbindingsbuis met den manometer is open en het kraantje C in de verbindingsbuis met de waterstraalpomp aanvankelijk gesloten. De pomp wordt aangezet en door een kraantje C voorzichtig open te draaien kan in het fleschje A een langzaam toenemende onderdruk worden verkregen, hetgeen op den kwikmanometer is af te lezen. Ondertusschen druppelt water uit D in het fleschje A. Af en toe wordt C weer gesloten en gewacht, totdat de druppeling ophoudt; er is dan evenwicht ingetreden. Ten slotte verschijnt onder het lapje lucht, meteen neemt de druppeling snel toe of spuit het water uit het glazen buisje; verder daalt het kwik in het eene en stijgt het in het andere been van den manometer; bovendien is op dat oogenblik een zuiging van lucht door den grond hoorbaar. Bij het verschijnen van lucht onder het lapje wordt

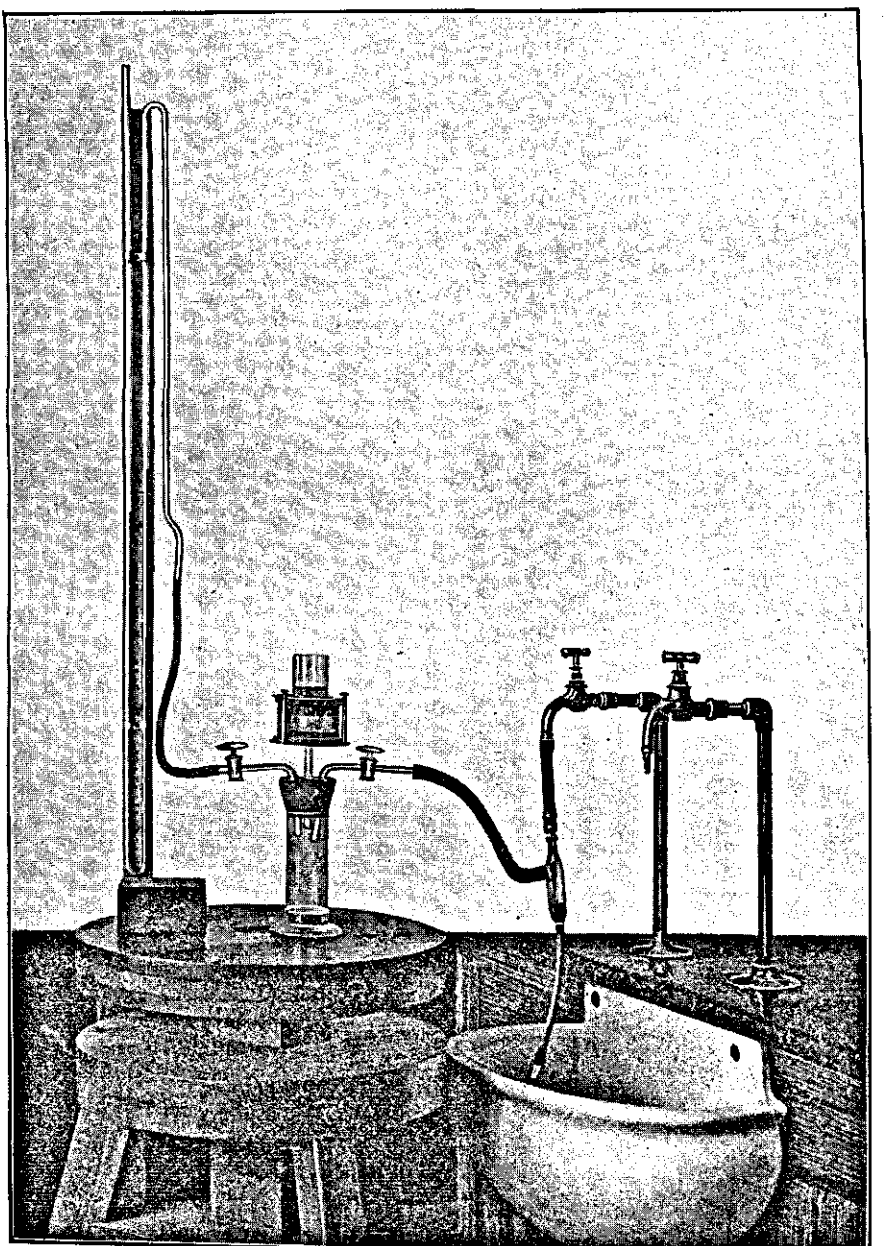


Fig. 3a.

onmiddellijk de afstand tusschen de kwikspiegels afgelezen.

Indien de afstand van het linnen lapje tot de punt van het glazen buisje h c.M. is en de afgelezen onderdruk n c.M. kwik is, is de negatieve capillariteitsdruk

$(h + 13.6n)$ c.M.

Wat hier geschiedt, is het volgende: Vóór onderdruk wordt gegeven, is het capillair oppervlak aan de oppervlakte van den grond gelegen en zijn spanning maakt evenwicht met het gewicht van een waterkolom h. Door onderdruk te geven worden de kromtestralen kleiner, het capillair oppervlak gaat ten slotte dalen en, zoodra het linnen lapje is bereikt, verschijnt lucht.

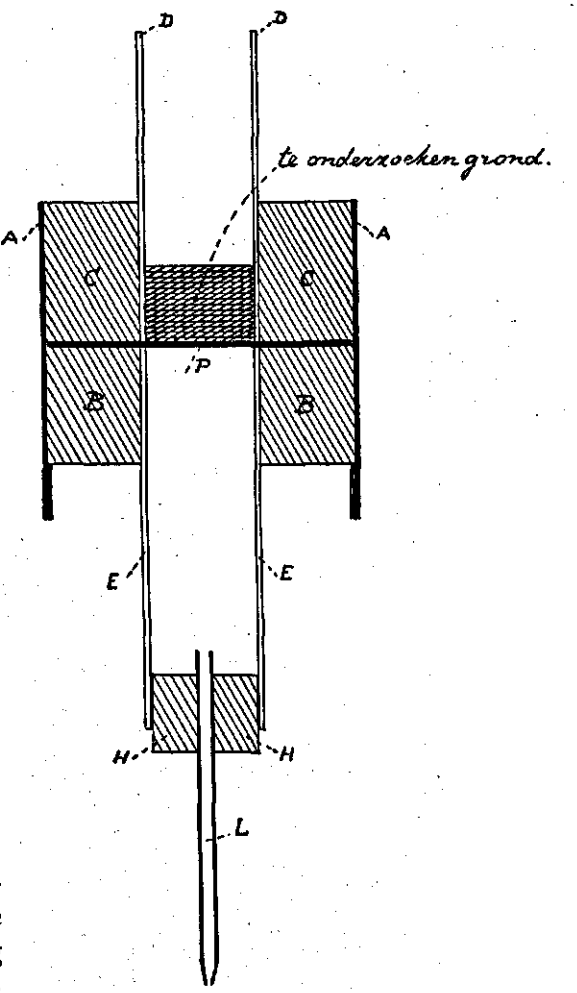


Fig. 4.

Omdat door veelvuldig gebruik de luchtdichte verbinding van de beide cylindrische buizen verloren kan gaan en het gewenscht is het linnen lapje zoo nu en dan door een nieuw te vervangen, werd een capillarimeter vervaardigd als in fig. 3. †)

†) Deze capillarimeter en die in fig. 4 werden op mijn aanwijzing vervaardigd door den heer Th. Kazemier, amanuensis van de Psychiatrisch-neurologische kliniek te Groningen.

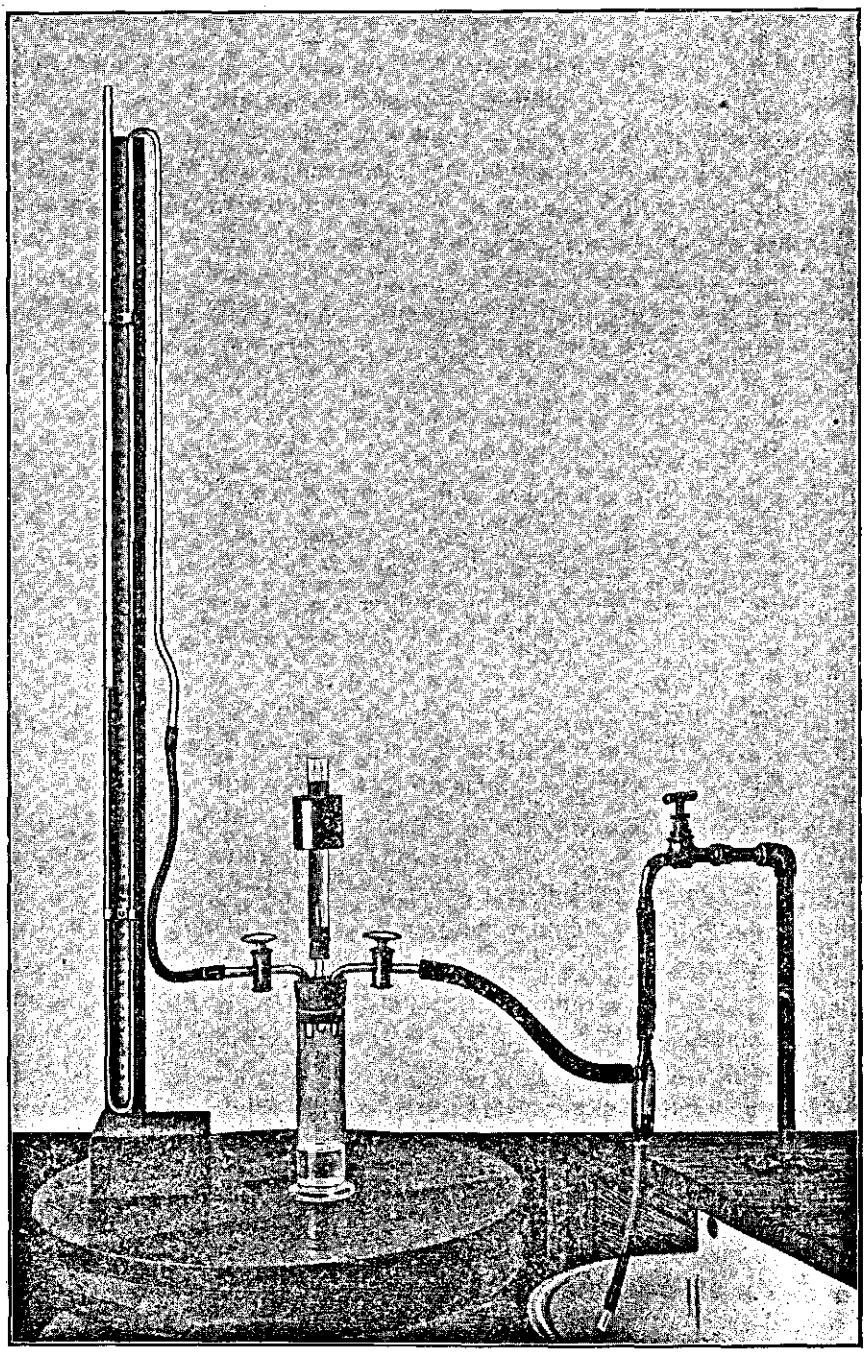


Fig. 4a.

In een koperen ring R met vlakken rand, sluit een caoutchouc-ring A. Op een rand in A ligt een koperen plaatje P, waarop een linnen lapje is aangebracht. Om den koperen ring R, sluit een caoutchouc-ring D en om den laatsten een glazen cylinder C. De cylinder C is onder afgesloten door een caoutchouc-stop K en hier doorheen steekt het glazen buisje M. Een koperen plaat R_2, voorzien van eenige koperen stangetjes S, boven van een schroefdraad voorzien, wordt met schroeven vastgeklemd. Door het aandraaien der schroeven wordt de luchtdichte sluiting verkregen.

Overigens wordt met dezen capillarimeter op dezelfde wijze geëxperimenteerd als met die van fig. 2.

Het toestel kan vlug uit elkaar worden genomen om schoon te maken en eventueel onderdeelen te vervangen.

Ook de capillarimeter in fig. 4 werd bij het onderzoek gebruikt. Wanneer slechts een kleine hoeveelheid grond voor het onderzoek ter beschikking staat en hiermede spaarzaam moet worden omgegaan, biedt dit toestel bepaalde voordeelen.

In een koperen huls A wordt een doorboorde caoutchouc-stop B gestoken en hierop een geperforeerd koperen plaatje P gelegd, waarop een linnen lapje is aangebracht. Dan wordt de caoutchouc-stop C in de huls geschoven. Twee glazen cylinders D en E worden boven en onder ingestoken. In E past een caoutchouc-stopje H, waar een glazen buisje L door heen steekt.

De onderdeelen kunnen vlug in elkaar worden gezet en uit-elkaar genomen.

Er wordt met dit toestel geëxperimenteerd als bij de twee voornoemde capillarimeters.

De tijdsduur van een proef varieerde uiteraard met de grootte van den negatieven capillariteitsdruk. Was te verwachten, dat de laatste groot zou zijn, dan werd de onderdruk per minuut met 4 m.M. (kwik) opgevoerd, in de andere gevallen met 2 m.M. (kwik); de ervaring leerde zulks. Bovendien werd af en toe het kraantje C (fig. 2) gesloten, waarna de druppeling ophield en evenwicht optrad.

Met deze toestellen kan in betrekkelijk korten tijd de negatieve capillariteitsdruk, resp. de capillaire stijghoogte, worden bepaald. De langste duur van een proef bij mijn onderzoek was 2½ uur. Met de capillariteitsmeters van VERSLUYS en GARDNER neemt iedere proef ettelijke dagen in beslag. Bovendien kunnen stijghoogten worden bepaald, die grooter zijn dan de hoogte van een laboratorium.

Aan de bepaling van de capillaire stijghoogte in buizen met drogen grond kleven, zooals in Hoofdstuk I is uiteengezet, te vele bezwaren, waardoor de verkregen uitkomsten doorgaans sterk afwijken van de werkelijkheid. Daarenboven zouden de proeven, gesteld dat de maximale stijghoogten inderdaad werden bereikt, praktisch onuitvoerbaar worden.

Bij het werken met de capillarimeters in de fig. 2, 3 en 4 werd gevonden, dat het verschijnen van lucht zeer duidelijk kon worden waargenomen, indien de toestellen omgekeerd in klemmen werden geplaatst. Alvorens een toestel om te keeren wordt dan eerst in den gewonen stand een geringe onderdruk gegeven. De uitdrukking voor den neg. cap. druk wordt dan

$$13.6n - h.$$

Volgens sommige onderzoekers zou de doorsnede van de buizen van invloed zijn op de stijghoogte. Zoo vindt ROTMISTROV (32) bij een geringere doorsnede een grootere stijging. WADSWORTH en SMITH (33) vinden juist het tegengestelde. Laatstgenoemde onderzoekers vinden bijv. van eenzelfden grond 85.6 c.M. bij een doorsnede van 1 inch² en 141.8 c.M. bij een doorsnede van 25 inch². Een verklaring van het verschijnsel wordt niet gegeven. Schr. oppert de volgende: Naarmate de opstijging in den drogen grond grooter wordt, neemt de inwendige drukverlaging toe en dientengevolge neemt het volume van de reeds vochtig geworden massa af. Zakt de daarboven liggende grond niet, zoo ontstaat een scheurtje, waardoor verder opstijgen wordt verhinderd. Buizen van geringere doorsnede hebben per eenheid van doorsnede een relatief grootere wandoppervlakte, zoodat de scheurtjes grootere kans hebben te blijven bestaan.

Een afname van volume met toenemenden onderdruk was bij mijn proeven herhaaldelijk te constateeren.

De inwendige diameter van de cylindrische buizen met grond varieerde van 1 tot 6 c.M. en, ofschoon hierop speciaal werd gelet, kon geen invloed daarvan op de verkregen uitkomsten worden waargenomen.

HOOFDSTUK III.

Uitkomsten van het onderzoek. Invloed van de dikte van het grondlaagje. *Minimum- en maximum negatieve capillariteitsdruk.*

Twee grondsoorten werden onderzocht en tevens fracties van verschillende grootte. †)

De mechanische samenstelling *) van de beide grondsoorten volgt hier:

	Humus	Fractie I (< 2 μ)	Fractie II (2—16 μ)	Klei	Fractie IIIa (16—76 μ)}	Fractie IIIb (76—152 μ)	Fractie IV (152—2000 μ)	Zand	Ca CO_3
Zeezand	0 %	0.96 %	0.73 %	1.69 %	0.84 %	73.61 %	20.51 %	94.96 %	3.35 %
Grond B. 504	0.11 %	3.42 %	2.58 %	6.00 %	42.45 %	48.77 %	2.21 %	93 43 %	0.11 %

Meerdere malen werd nagegaan, of door aanstampen met een houten stampertje ook andere uitkomsten werden verkregen dan door den grond in een dun waterlaagje te laten bezinken. Dit bleek niet het geval te zijn.

Bij ieder onderzoek van een fractie of van een grondsoort werd begonnen met bepaling van den negatieven capillariteitsdruk van een uiterst dun grondlaagje (in de tabellen aangeduid met 0 + m.M.) Het laagje werd vervolgens steeds dikker genomen. De uitkomsten, verkregen met zeezand, grond B. 504 en de fracties III en II van grond B. 29, komen voor in tabel 1. De negatieve capillariteitsdruk is in alle tabellen uitgedrukt in c.M. waterdruk.

Uit tabel 1 blijkt, dat de negatieve capillariteitsdruk met de dikte

†) Deze werden mij welwillend verstrekt door Dr. D. J. Hissink, Directeur van het Bodemkundig Instituut, te Groningen.

*) Ontleend aan Dr. D. J. Hissink.

TABEL 1. Negatieve capillariteitsdruk van zeezan

Zeezand			B. 504		
Dikte van het grondlaagje in m.M.	Negatieve capillariteits-druk in c.M.	Aantal bepalingen	Dikte van het grondlaagje in m M.	Negatieve capillariteits-druk in c.M.	Aantal bepalingen
0 +	37	20	0 +	70	25
5	55	12	10	104	12
10	59	8	15	120	10
20	63	7	20	122	8
30	63	8	30	125	10
40	62	5	55	124	9
50	64	6	60	123	6
55	65	6	70	123	8
60	64	7	80	121	7
70	63	5	130	125	6
85	64	6	140	124	5

van het laagje toeneemt en dat hij bij een dikte van ca. 20 m.M. bij de onderzochte gronden en fracties een maximum bereikt.

In het vervolg wordt de negatieve capillariteitsdruk, gevonden bij een uiterst dun laagje grond, de *minimum-negatieve capillariteitsdruk* (D_{mi}) genoemd en die bij een laagje van 20 m.M. of meer de *maximum-negatieve capillariteitsdruk* (D_{ma}).

Het verband tusschen de dikte van het grondlaagje en den negatieven capillariteitsdruk is graphisch weergegeven in de fig. 5 t/m 8. De dikten der laagjes zijn als abscissen uitgezet en de negatieve capillariteitsdruk als ordinaat. Uit deze *capillariteitscurven* blijkt het reeds eerder geconstateerde verband duidelijk.

Zooals te verwachten is, nemen zoowel D_{mi} als D_{ma} toe, als het gehalte aan fijne deeltjes grooter wordt. Een overzicht hiervan geeft tabel 2.

Tevens zij hier nog opgemerkt, dat de invloed van de dikte van het grondlaagje het onwaarschijnlijk maakt, dat VERSLUYS bij de twee manieren, waarop hij de capillaire stijghoogte bepaalt, dezelfde uitkomsten vindt (zie blz. 10).

De volgende beschouwingen beoogen een verklaring van het verschijnsel te geven:

grond B 504, een fractie III en een fractie II.

Fractie III (B. 29)			Fractie II (B. 29)		
Dikte van het grondlaagje in m.M.	Negatieve capillariteits-druk in c.M.	Aantal bepalingen	Dikte van het grondlaagje in m.M.	Negatieve capillariteits-druk in c.M.	Aantal bepalingen
0+	93	21	0+	260	10
1	126	5	1	400	8
2	146	6	3	490	7
5	164	7	6	650	5
10	170	4	7	735	4
18	176	5	8	750	4
20	180	4	18	748	5
30	179	5	26	750	4

In een uiterst dun laagje, n.l. waarvan de dikte niet grooter is dan de afmetingen der korrels, zullen capillairen van verschillende

Tabel 2. Waarden voor D_{mi} en D_{ma} (in c.M.).

	D_{mi}	D_{ma}
Zeezand	37	63
B. 504	70	123
Fractie III (B. 29) . .	93	180
„ II (B. 29) . .	260 †)	750 †)

†) Aanvankelijk werden bij de proeven met fractie II (B. 29) uitkomsten gevonden, die weinig verschilden van de uitkomsten met fractie III (B. 29). Daarom werd de grond, alvorens hij in den capillarimeter werd gedaan, gekookt met water, waaraan eenige druppels ammonia werden toegevoegd. Het bleek, dat de uitkomsten, voor D_{mi} en D_{ma} gevonden, toen werden als in tabel 2 is vermeld. Hieruit volgde, dat er, vóór de behandeling met ammonia, grondkorrels tot complexen waren vereenigd; tusschen deze complexen kwamen grootere openingen voor, die de negatieve capillariteitsdrukken kleiner deden worden.

Het bleek bij de proeven, dat de hoeveelheid toegevoegde ammonia niet nauwkeurig behoefde te worden afgemeten.

Ook het zeezand, grond B. 504 en fractie III (B. 29) werden met ammonia behandeld, maar hier bleven de uitkomsten dezelfde.

wijdte voorkomen. Stellen wij dit voor, zooals in fig. 9a met een 4-tal zeer korte capillaire buisjes is weergegeven, welke van links naar rechts in wijdte toenemen en resp. worden genoemd capillairen van de 1e, 2e, 3e en 4e orde. De menisci zijn op het midden der hoogte eenvoudigsheidshalve door rechte lijntjes aangegeven.

Het zal duidelijk zijn, dat in een zoodanig laagje de wijdste capillair den negatieven capillariteitsdruk van het geheele laagje bepaalt. Immers er zal bij de proef lucht verschijnen, zoodra de naar beneden werkende kracht (= gew. waterkolom, of = gew. waterkolom + onderdruk, of = onderdruk — gew. waterkolom)

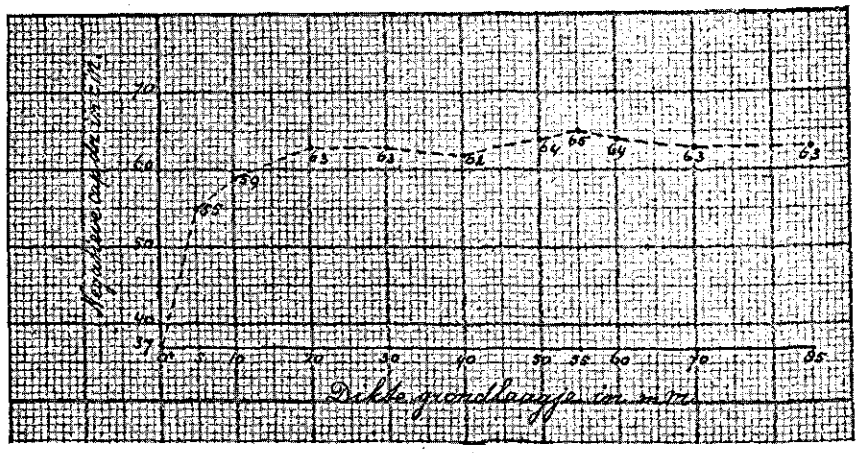


Fig. 5. Capillariteitscurve van zeezand.

grooter wordt dan de negatieve capillariteitsdruk van den meniscus van de 4e orde. Voor een uiterst dun grondlaagje wordt derhalve de minimum-neg. cap. dr. (D_{mi}) bepaald.

In een iets dikker laagje grond kunnen 2 laagjes capillairen boven elkaar voorkomen en wel zoo, dat een capillair van een bepaalde orde met een van een andere orde afwisselt, zooals in fig. 9b is weergegeven. Op gelijke wijze is in fig. 9c en 9d voorgesteld hoe de capillairen afwisselend in resp. 3 en 4 laagjes kunnen voorkomen.

Bij een proef, ingericht als in fig. 9b, zal lucht verschijnen, zoodra de neg.cap.dr. van den meniscus van de 3e orde wordt over-

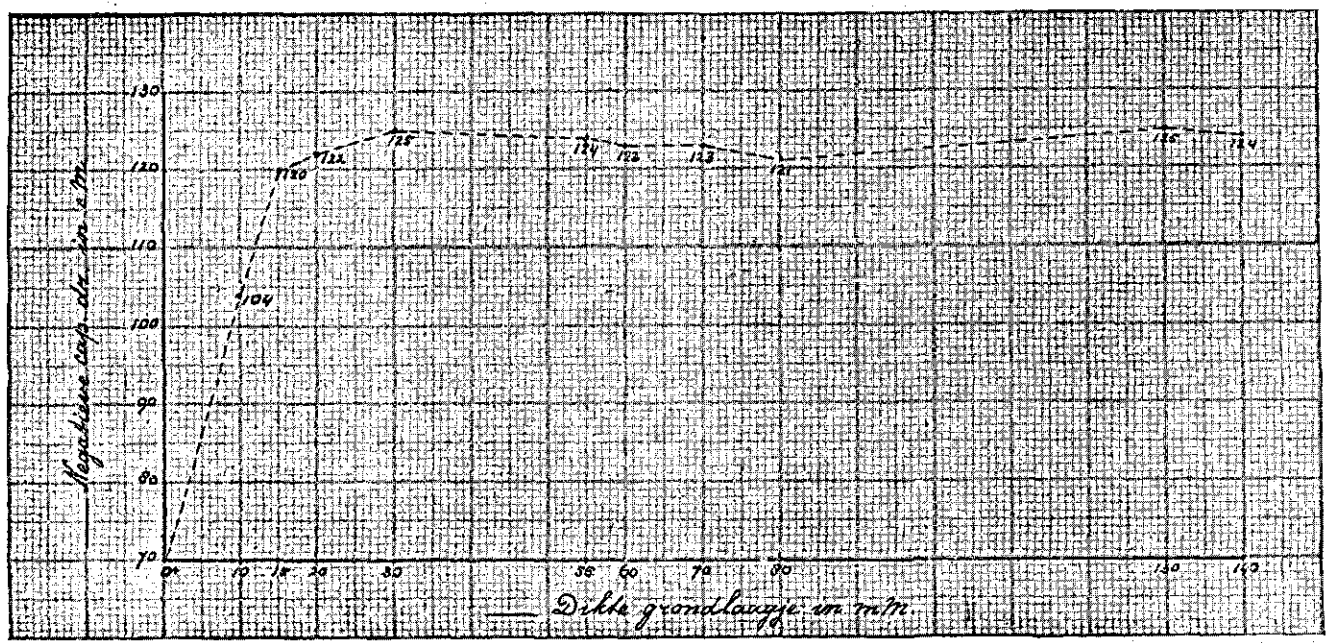


Fig. 6. Capillariteitscurve van grond B. 504.

schreden; in fig. 9c geldt hetzelfde voor een meniscus van de 2e

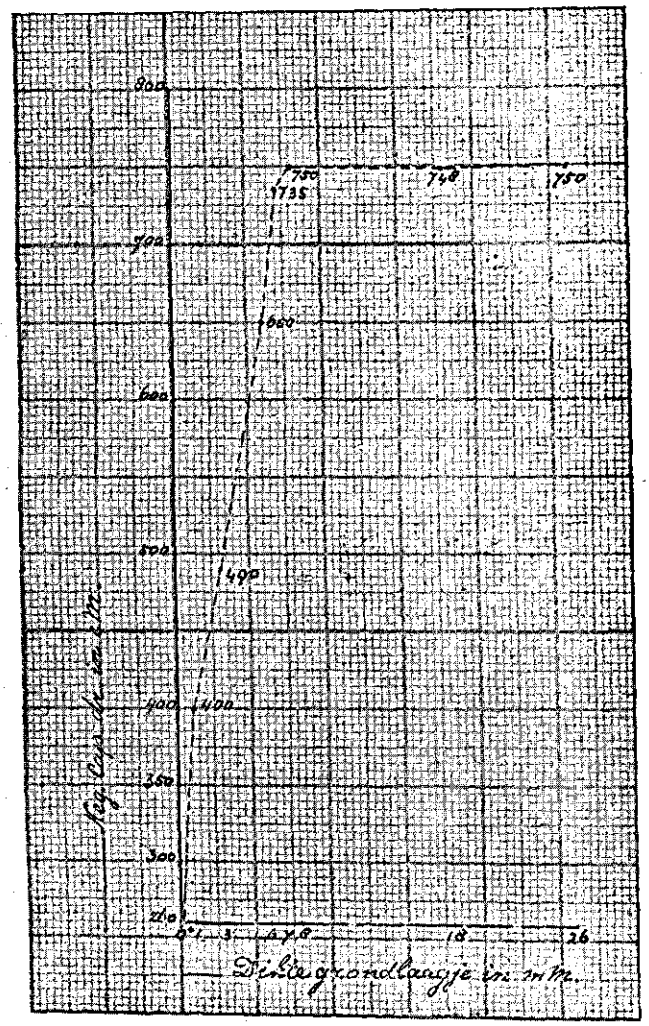


Fig. 7. Capillariteitscurve van fractie II (B. 29).

orde en in fig. 9d voor een meniscus van de 1e orde. In het laatste geval zal men derhalve de maximum-neg. cap. dr. (D_{ma}) vinden.

Vindt een rangschikking der laagjes plaats, zooals in fig. 9 is

aangegeven, dan is een toename van de dikte van één laagje tot 4 laagjes reeds voldoende om van D_{mi} tot D_{ma} te komen. Uit de gegeven voorstelling blijkt tevens waarom het capillair oppervlak in een heterogenen grond een oneffen oppervlak moet zijn. Ook

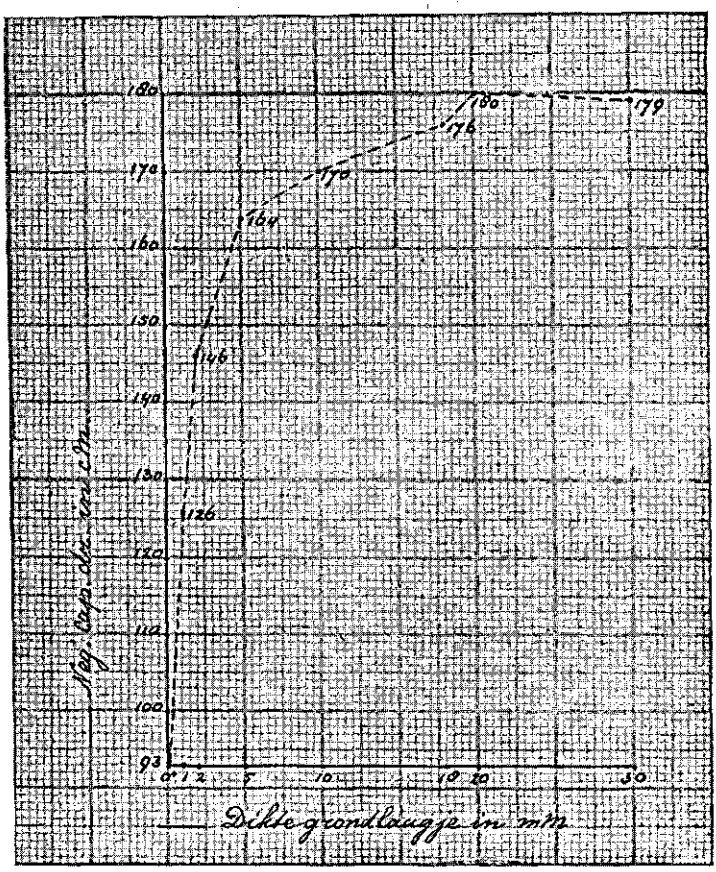


Fig. 8. Capillariteitscurve van fractie III (B. 29).

bij een andere rangschikking van de capillairen, zooals b.v. in fig. 9d', komt dit voor den dag.

Ten einde de juistheid van de gegeven voorstelling te kunnen bevestigen, zijn koperen schijven gemaakt, van 40 m.M. diameter

en 1 m.M. dik, waarin in 4 rechthoekige sectoren gaatjes zijn geboord van 1, ½, ¼ en ⅛ m.M. op de wijze als in fig. 10 is aangegeven. Het midden en een randstrook van 5 m.M. zijn niet geperforeerd. De plaatjes worden in een caoutchouc-ring gelegd, die nauwsluitend past in een glazen buis.

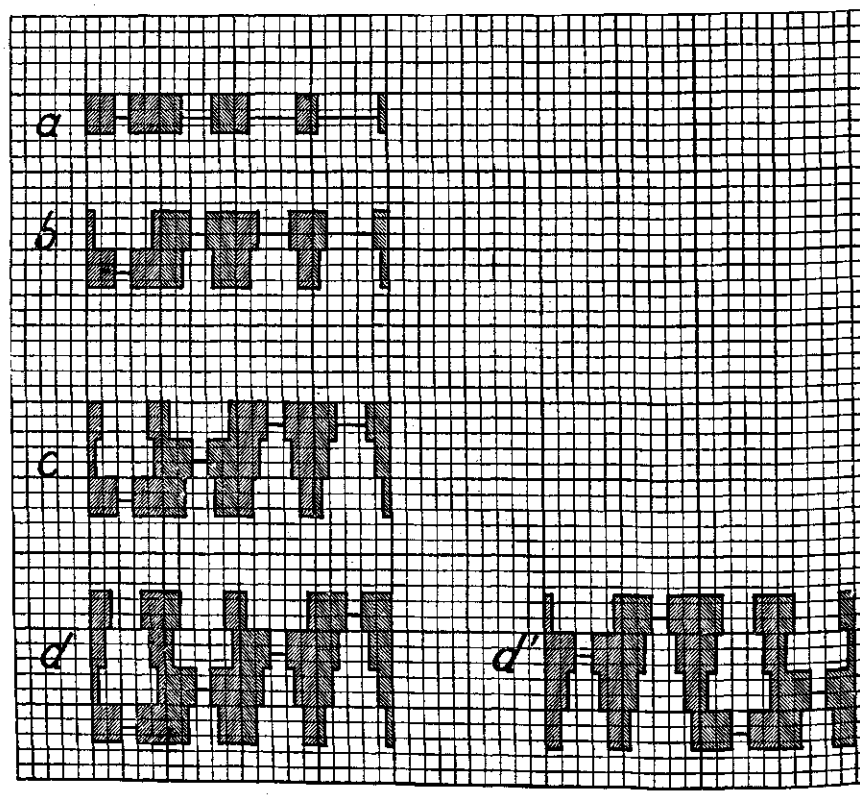
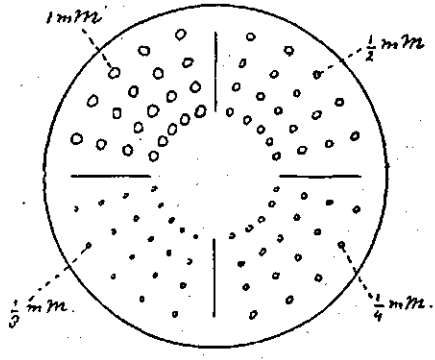


Fig. 9.

Bij een proef met één schijfje (fig. 11, I) moet worden gevonden D_{m1}, behoorende bij de 1 m.M. gaatjes in sector 4. Wordt een 2e plaatje, na 90° draaiïng, op het eerste gelegd (II op I), dan wordt een neg. cap. dr. D_2 gevonden, behoorende bij de ½ m.M. gaatjes in sector 3. Bij gebruik van een 3e plaatje (III op II + I) zal een

D_3 ontstaan, behoorende bij de ¼ m.M. gaatjes in sector 2 en bij gebruik van een 4e plaatje (IV op III + II + I) wordt D_{ma} gevonden, behoorende bij de ⅛ m.M. gaatjes.



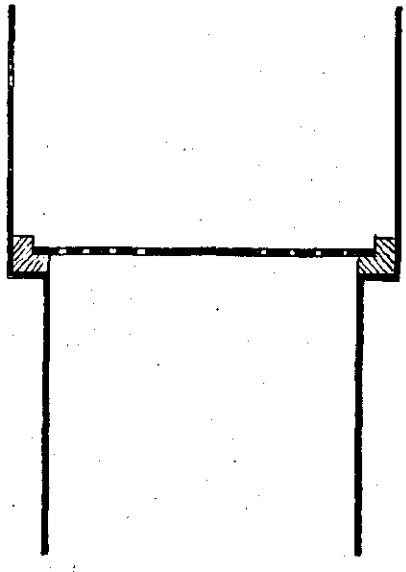


Fig. 10.

Inderdaad bleken de uitkomsten in overeenstemming met de theorie, ofschoon de absolute waarden, gevonden voor den neg. cap. druk, niet volkomen beantwoordden aan de capillariteitsconstante voor zuiver water, die 7.5 bedraagt. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk, dat de gaatjes in de sectoren 1, 2, 3 en 4 iets verschilden van de aangegeven diameters.

Voor D_{mi}, D_2, D_3 en D_{ma} werd resp. gevonden 23.5, 11.5, 6.2 en 2.9 c.M., terwijl resp. had moeten zijn gevonden 24, 12, 6 en 3 c.M., indien de gaatjes precies de aangegeven afmetingen hadden gehad.

Worden de plaatjes echter niet boven elkaar gelegd, zooals hierboven is voorgesteld, maar toch telkens zóó, dat geheele quadranten over elkaar vallen, dan zal het aantal plaatjes grooter moeten zijn om D_{ma} te bereiken.

Er is $\frac{3}{4}$ kans, dat met 2 plaatjes D_2 wordt verkregen.
" " $\frac{3}{4}\times\frac{2}{4}$ " , " " 3 " D_3 " "
" " $\frac{3}{4}\times\frac{2}{4}\times\frac{1}{4}=\frac{6}{64}$, " " 4 " D_{ma} " "
Worden dus $^{64}/_{6} \times 4$ plaatjes op elkaar gelegd, dan zal D_{ma}

worden verkregen. Komen n verschillende soorten gaatjes in n even groote sectoren voor, dan is er

$$\frac{(n-1)(n-2)(n-3)\ .\ .\ .\ .\ 3\ .\ 2\ .\ 1}{n^{n-1}}$$

kans, dat met n plaatjes D_{ma} wordt verkregen en er zullen

$$\frac{n^{n-1}}{(n-1)(n-2)(n-3)\ .\ .\ .\ .\ 3\ .\ 2\ .\ 1}\ .\ n = \frac{n^{n}}{(n-1)(n-2)(n-3)\ .\ .\ .\ .\ 3\ .\ 2\ .\ 1}$$

plaatjes op elkaar gelegd moeten worden om D_{ma} te verkrijgen.

Gesteld, dat een bepaalde grond een mengsel is van 4 homogene fracties en wel van

een fractie a_1 met een neg.cap.dr. = 80 c.M.,
" " a_2 " " " " = 60 " ,
" " a_3 " " " " = 40 " en
" " a_4 " " " " = 20 " ,

voorts, dat in ieder dun laagje evenveel ruimte wordt ingenomen

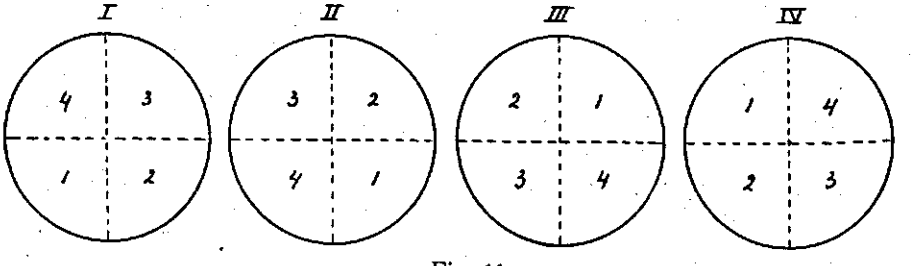


Fig. 11.

door de capillairen van ieder dier fracties, dan zal bij een proef met één zeer dun laagje gevonden worden een neg.cap.dr. = 20 c.M. Bij toename van de dikte zullen achtereenvolgens de waarden 40 c.M., 60 c.M. en 80 c.M. worden bereikt. Het capillaire oppervlak heeft dan een oneffen beloop. Neemt de dikte van het laagje nog meer toe, dan zal de neg. cap.druk daardoor geen verandering meer ondergaan.

Een minimum- en een maximum-negatieve capillariteitsdruk zouden niet worden gevonden, indien de gronddeeltjes onderling

even groot waren. De verschillen in afmetingen der deeltjes, d.i. de *heterogeniteit* van den grond is oorzaak van het verschijnsel.

Bij de proeven is gebleken, dat het capillair oppervlak volgens D_{ma} bij alle onderzochte gronden reeds in een laagje van ten hoogste 2 c.M. optreedt en wij hebben gezien, dat dit uit de heterogeniteit van den grond te verklaren is.

Een nadere beschouwing van de uitkomsten, verkregen bijv. met zeezand (zie tabel 1), kan wellicht tot verduidelijking bijdragen van hetgeen met behulp van de schematische voorstelling in de figuren 9a—d aangaande den invloed van de dikte van een grondlaagje reeds in 't licht werd gesteld.

Die uitkomsten nu zijn, dat bij een uiterst dun grondlaagje met den capillarimeter een neg. cap. druk van 37 c.M. werd gevonden, bij een laagje van 5 m.M. een neg. cap. druk van 55 c.M., bij een laagje van 10 m.M. 59 c.M. en bij een laagje van 20 m.M. 63 c.M. Dit komt dus hierop neer, dat, zoolang het laagje een dikte van nagenoeg 0 m.M. heeft, het capillair oppervlak gevormd wordt door in eenzelfde horizontaal vlak gelegen menisci, waarvan de neg. cap. druk bepaald wordt door den cap. druk der wijdste capillairen.

Zoodra het grondlaagje 5 m.M. dik is genomen, blijkt het phreatisch oppervlak tot 55 c.M. te kunnen dalen, alvorens in den capillarimeter lucht verschijnt. Voordat dit oogenblik intreedt, zullen de menisci dalen in alle capillairen, waarvan de neg. cap. druk kleiner is dan 55 c.M. Alleen in de kleinste capillairen handhaaft zich het capillair oppervlak op de aanvankelijke hoogte, d.i. ongeveer aan de oppervlakte van het grondlaagje. Het capillair oppervlak is nu het omhullende oppervlak geworden van menisci, welke op verschillende hoogte binnen het grondlaagje van 5 m.M. gelegen zijn. Het capillair oppervlak is nu dus een onregelmatig gebogen oppervlak, waarbij in de dalen een cap. druk van 55 c.M. heerscht.

Neemt men het grondlaagje weer dikker, n.l. 10 m.M., dan blijkt de evenwichtstoestand in het toestel bij een stijghoogte van 59 c.M. op te houden. Even van te voren moet zich dus een capillair oppervlak hebben gevormd met een neg. cap. druk van 59 c.M. in de

laagste punten; de oneffenheid in dit oppervlak is toegenomen.

Eindelijk zullen bij de proef met een grondlaagje van 20 m.M. aan de vorming van het capillair oppervlak menisci deelnemen, waarvan $D_{cap.}$ 63 c.M. bedraagt. Neemt echter de dikte van het grondlaagje nog meer toe, bijv. tot 30, 40, 50 of 60 m.M., dan blijkt $D_{cap.}$ geen wijziging meer te ondergaan, doch blijft zijn waarde 63 c.M. behouden. Hieruit volgt, dat de gedaante van het capillair oppervlak in het onderwerpelijke monster zeezand door capillairen met een stijghoogte van 63 c.M. werd bepaald. Dit wil dus zeggen, dat bij voldoende dikte van een laag de kleinere deeltjes tot een bepaald volume — waarover in Hoofdstuk V nader — de maximale stijghoogte bepalen.

HOOFDSTUK IV.

Het watergehalte in en boven de capillaire zône. Sejunctiewater. Funiculaire werking.

Met behulp van de heterogeniteit van den grond en de daardoor veroorzaakte D_{mi} en D_{ma} is na te gaan, dat er *verband* bestaat *tusschen het watergehalte in en de dikte van de capillaire zône en de wijze van beweging van het capillair niveau.*

Bij dé proeven met capillarimeters wordt, zooals we gezien hebben, een *daling van het capillair oppervlak* kunstmatig teweeggebracht. In de natuur geschiedt deze daling, doordat water aan de capillaire zône wordt onttrokken tengevolge van verdamping door de planten en rechtstreeks, of doordat grondwater wordt afgevoerd (o.a. door drainage).

Indien vóór een intredende daling van het capillair oppervlak alle capillaire ruimten en holten daar beneden gevuld waren met water, dan zal, nadat de daling heeft plaats gehad en een evenwichtstoestand is ingetreden, het watergehalte in een laag, waarvan de dikte bepaald wordt door D_{ma} (d.i. de capillaire zône) zoo hoog mogelijk zijn, omdat alle cap. ruimten en holten in die zône met water gevuld blijven. Het watergehalte op alle plaatsen in de capillaire zône komt dan overeen met de absolute watercapaciteit (31, 32, 33), waaronder te verstaan is het poriënvolume verminderd met het volume der gangen.

Vindt daarentegen een *stijging van het capillair oppervlak* plaats door aanvulling van beneden, dan is het watergehalte in de capillaire zône geheel anders dan bij daling. Dit moge blijken uit het volgende: Wordt een kolom grond van 80 c.M., bestaande uit een mengsel van 4 homogene fracties met stijghoogten van 20, 40, 60

en 80 c.M., op een watervlak gezet (fig. 12), dan zullen tot een hoogte van 20 c.M. alle holten met water worden gevuld. †) Bij een proef met dezen grond ter bepaling van D_{mi} en D_{ma} zou hiervoor resp. 20 en 80 c.M. gevonden moeten worden. Van 20 tot 40 c.M. worden de capillairen van de 4e orde *) niet gevuld, van 40 tot 60 c.M. worden de capillairen van de 4e en van de 3e orde niet gevuld en van 60 tot 80 c.M. worden die van de 4e, 3e en 2e orde niet gevuld.

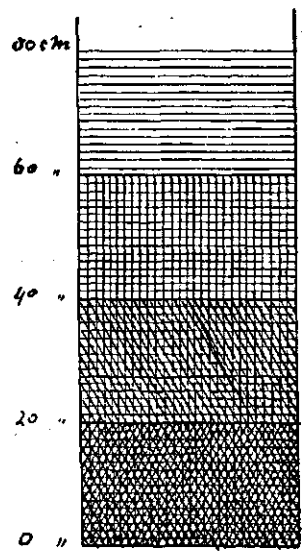


Fig. 12.

In het gegeven geval worden daarenboven slechts enkele capillairen van de 1e orde der bovenste laag gevuld. Dit blijkt bij beschouwing van de schematische voorstelling van de capillairen van de 4e orde in fig. 13. Elke laag in deze figuur is in werkelijkheid uit verschillende combinaties van de 4 veronderstelde, in grootte verschillende capillairen opgebouwd. De capillaire ruimten staan ook zijdelings met elkaar in verbinding. Ten einde de voorstelling van de onderwerpelijke beschouwing niet te gecompliceerd te maken, zijn deze verbindingscapillairen even wijd gedacht. Uiteraard zal een waterverplaatsing zijdelings steeds van een wijdere naar een nauwere capillair plaats vinden. Bij de in fig. 13 voorgestelde verdeeling der capillaire ruimten zullen nu de in een grijze tint aangegeven capillairen met water gevuld raken. In de laag van 60 tot 80 c.M. zullen zoodoende slechts enkele capillairen van de 1e orde gevuld zijn.

Verder is te zien, dat het watergehalte van beneden naar boven toe afneemt. Ook het onregelmatig beloop van het capillair oppervlak komt in de figuur uit. De kromtestralen van de menisci

---

†) Zie de beperking op blz. 62.

*) Capillairen van de 1e orde correspondeeren met een stijghoogte van 80 c.M., die van de 2e orde met een stijghoogte van 60 c.M., enz.

in A en G (d. z. de hoogste punten van het cap. opp.) zijn nog niet zoo klein mogelijk, anders gezegd: de negatieve capillariteitsdruk is nog niet maximaal.

In de natuur zal een dergelijke vulling van de capillaire ruimten

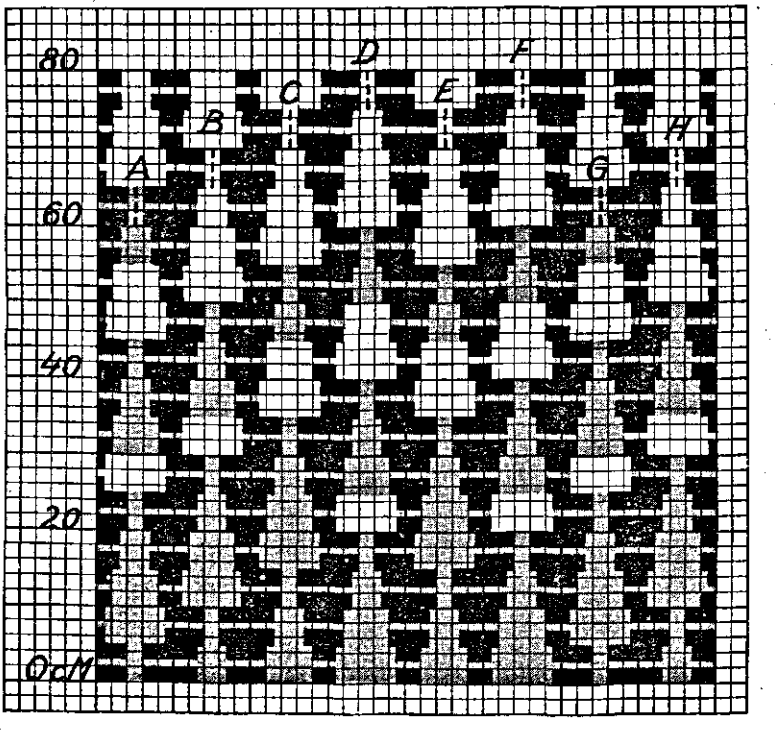


Fig. 13.

o.a. geschieden, wanneer water in slooten wordt ingelaten. Bij de sloot zal dan het cap. opp. op de aangeduide manier stijgen, maar ook verder van de sloot af — waar het phreatisch oppervlak door het inlaten van water later stijgt — zal een dergelijke capillaire opstijging plaats vinden. Ook bij ondergrondsche irrigatie, zooals door het opstuwen van water in drainreeksen door middel van „Stauventielen" geschiedt hetzelfde.

Wordt de beschouwde grondkolom eenigen tijd in water geplaatst, zóó, dat de oppervlakte van het water even hoog staat

als of hooger dan de oppervlakte van den grond, dan zullen alle capillairen met water worden gevuld, indien althans geen capillairen, gevuld met lucht, worden ingesloten. Wordt de kolom nu 80 c.M. uit het water opgetrokken, dan zal het capillair oppervlak zich vormen in de capillairen A, B, C, D, E, F, G en H (fig. 13), en het komt ten naaste bij aan de oppervlakte van den grond te liggen. De negatieve capillariteitsdruk van het cap. opp. is dan nagenoeg maximaal, dus gelijk aan D_{ma}.

Met de bovenstaande verklaring voor het optreden van een minimum- en een maximum-negatieven capillariteitsdruk, als gevolg van de heterogeniteit van den grond, is tevens de oorzaak aangegeven, ten gevolge waarvan de capillaire zône in denzelfden grond verschillend dik kan zijn en het watergehalte op verschillende hoogten in die zône nu eens gelijk en dan weer verschillend is.

Uit het navolgende zal blijken, dat de heterogeniteit van den grond voorts oorzaak is, dat boven de capillaire zône water kan voorkomen in een evenwichtstoestand, waarbij capillairen geheel gevuld zijn.

Indien voor de wijdste van 2 capillaire buisjes, die met elkaar in verbinding staan (fig. 14), bijv. $D_{cap.} = 65$ en voor de nauwste $D_{cap.} = 120$ c.M. en bevindt zich het phreatisch oppervlak op 65 c.M. beneden de bovenkant, dan ontstaat in beide buisjes boven een meniscus, die een waterkolom van 65 c.M. kan dragen. Daalt het phreatisch oppervlak 30 c.M. (= lengte van de wijde capillair), dus tot 95 c.M., dan zal de meniscus in de wijde capillair 30 c.M. dalen, terwijl die in de nauwe capillair op dezelfde hoogte blijft, alleen wordt de kromtestraal van dezen meniscus kleiner. Zoodra echter in het linker buisje het water 30 c.M. is gedaald, wordt een gedeelte van het water in het rechter buisje afgsnoerd van de rest. Er is een *sejunctie* ontstaan, waarin het water is besloten tusschen de menisci M_1 en M_2, van welke de negatieve capillariteitsdruk resp. 120 en 90 c.M. bedraagt. Van den meniscus M_3 is de neg. cap.dr. 65 en eerst, nadat het phreatisch oppervlak nog 120 — 65 = 55 c.M. is gedaald, zal ook M_3 dalen.

Het is duidelijk, dat zulk een daling niet van invloed is op de sejunctie; deze blijft bestaan, waar zij is ontstaan.

Hoe sejuncties in een netwerk van capillairen kunnen ontstaan, is in fig. 15 voorgesteld. De in de capillairen geplaatste getallen geven den grootsten negatieven capillariteitsdruk aan, die daar bestaanbaar is. Neemt men aan, dat aanvankelijk alle capillairen met water zijn gevuld, dan zal, zoodra het phreatisch oppervlak

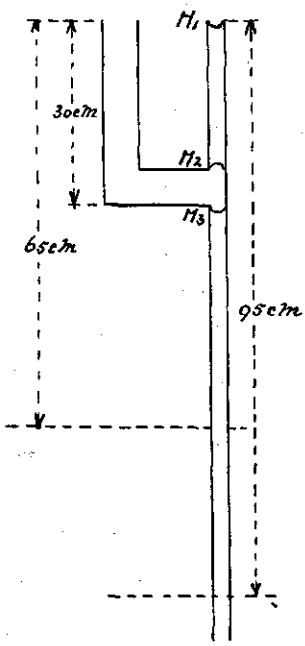


Fig. 14.

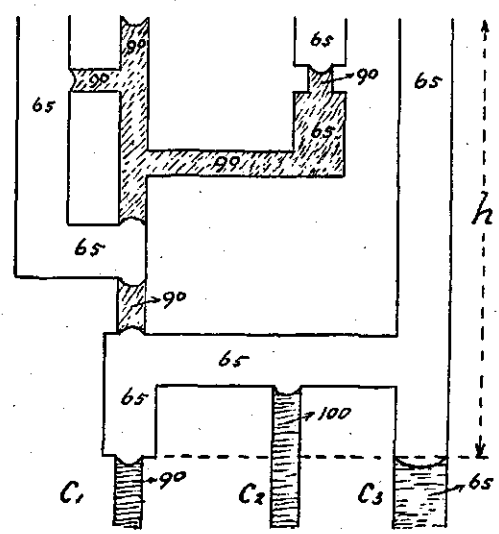


Fig. 15

tot een diepte $= 65 + h$ is gedaald, het water over een h c.M. dikke laag verdwenen zijn uit alle capillairen, waarin het getal 65 is geplaatst, behalve in die, welke de verbinding vormt tusschen de beide capillairen, waarin het getal 90 is geplaatst. Er zijn in het veronderstelde geval *twee sejuncties ontstaan.* Het water in de sejuncties is schuin gearceerd aangegeven. De hoogten, waarop het water in de capillairen C_1, C_2 en C_3 blijft staan, zijn in de figuur aangegeven.

Op gelijke wijze kan men zich voorstellen, dat in een natuurlijken grond bij voortgaande daling van een phreatisch oppervlak sejuncties ontstaan uit de verhevenheden van de capillaire zône, zooals wij ons die voorgesteld hebben als te zijn ontstaan bij de op blz. 33 en 34 gegeven beschouwing omtrent den invloed van de heterogeniteit op den neg. cap. druk. Immers, om den samenhang van het water in die verhevenheden met de geheele capillaire watermassa te doen voortbestaan, zou in het capillair niveau, dat de verhevenheden begrenst, de neg. cap.dr. steeds moeten blijven toenemen. Daar dit niet kan, zullen uit de verhevenheden sejuncties ontstaan.

Het bestaan van sejuncties is een gereede verklaring voor het verschijnsel, dat boven het capillair niveau nog een behoorlijk hoog watergehalte in den toestand van evenwicht aanwezig kan zijn. Men denke hierbij bijv. aan hooge zandgronden, waar het phreatisch opp .en het capp. opp. ver beneden de oppervlakte van den grond voorkomen en waar de gewassen bij langdurige perioden van droogte of geringen neerslag tijdens de groeiperiode toch nog een stand hebben, waarover men zich verbaast.

Naarmate in een grond het gehalte aan fijnere deeltjes toeneemt, zullen bij daling van het cap. opp. daarboven meer sejuncties ontstaan. Het is dan ook denkbaar, dat alleen hierdoor reeds bij een toenemend gehalte aan fijnere deeltjes het watergehalte boven de capillaire zône hooger kan worden.

Een stijging van het phreatisch oppervlak en een daarmede gepaard gaande stijging van het capillair oppervlak zal uiteraard geen sejuncties doen ontstaan.

Volgens de opvatting van VERSLUYS zou de aanwezigheid van water boven het capillair oppervlak alleen moeten worden toegeschreven aan het voorkomen van funiculair en eventueel van pendulair water.

Op grond van de uitkomsten, welke VERSLUYS (37) vermeldt bij zijn onderzoek naar den funiculairen toestand, moet worden besloten, dat een dergelijke toestand van het water, die theoretisch verklaarbaar is, zich in werkelijkheid in den grond kan voordoen.

De funiculaire werking is op de volgende wijze door schr. zelf onderzocht:

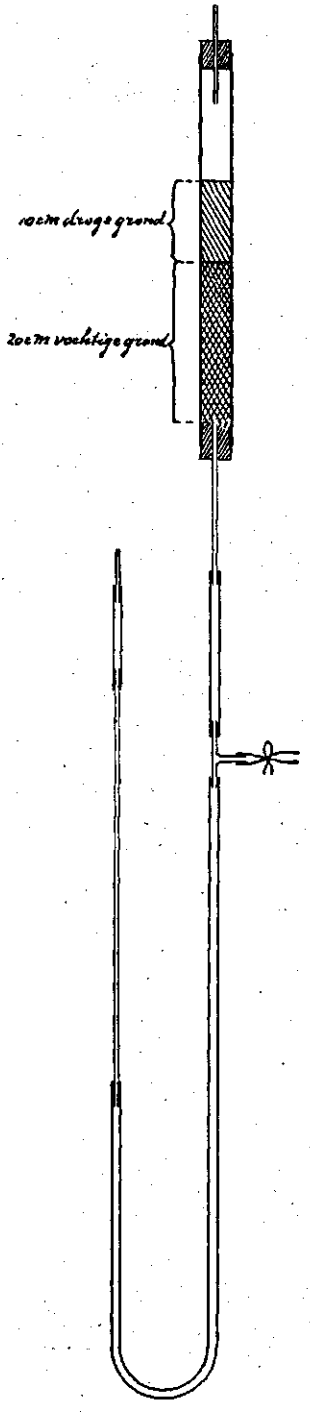


Fig. 16.

Een glazen buis (fig. 16) met een binnenwijdte van 28.5 m.M. is van onderen afgesloten door een doorboorde caoutchouc-stop, waarin een glazen buisje is gestoken. Te voren was er eerst een linnen lapje omheen geslagen, zoodat dit lapje de opening in de stop bedekt. Een caoutchouc-slang vormt de verbinding tusschen het glazen buisje en een ander vertikaal opgesteld buisje met een binnenwijdte van 4 m.M. In de slang is een ⊥-stuk ingelascht, voorzien van een slangetje en knijper.

In de buis ter linker zijde wordt water gegoten en deze buis wordt opgetrokken, totdat het water eenige c.M. in de wijde buis is gestegen. Er wordt daarbij zorg gedragen, dat de lucht volkomen wordt verwijderd. Vervolgens wordt een weinig droge grond in de wijde buis gebracht. Daarna wordt een weinig water toegevoegd, dan weer droge grond, enz., totdat in deze buis een grondlaag van 20 c.M. is ontstaan. Teneinde verdamping zooveel mogelijk te voorkomen wordt boven in de buis een doorboorde caoutchouc-stop met een nauw uitgetrokken glazen buisje gestoken. Om dezelfde reden wordt om de 4 m.M. buis een slangetje met een nauw buisje geschoven. De gebruikte grond was zeezand (D_{ml} = 37 c.M. en D_{ma} = 63 c.M.).

De linkerbuis werd omlaag gehaald en tevens door openen van den knijper water verwijderd, totdat de afstand van de oppervlakte van den grond tot de oppervlakte van het water in het linkerbeen

37 c.M. bedroeg. Een verlaging van den waterstand in het linkerbeen tot zoover had niet tengevolge, dat het water daarin ook weer ging stijgen. Dit was een bewijs, dat de gevonden waarde voor D_{mi} van zeezand juist is.

Vervolgens werd de afstand vergroot tot 75 c.M. Nadat deze afstand was bereikt, ging het water in de nauwe buis weer stijgen, doordat capillair water aan den grond werd onttrokken. De afstand werd daarom weer op 75 c.M. gebracht; er volgde weer een stijging in het nauwe been en dit werd zoolang herhaald, totdat ten slotte ca. 2 uren na de laatstelijk opgewekte daling geen stijging meer werd waargenomen en dus voor een oogenblik een toestand van hydrostatisch evenwicht was ingetreden.

Nu werd een laag droog zeezand ter dikte van 10 c.M. in de wijde buis gebracht. Dit geschiedde onder zacht kloppen tegen de buis, totdat geen volume-vermindering meer werd waargenomen.

Met een tweede toestel werd op volkomen dezelfde wijze gelijktijdig een proef aangezet, waarbij echter geen droog zand bovenop werd gbracht.

Het onderzoek bestond nu hierin, dat in beide toestellen gedurende 33 dagen elken dag de stand van het water in de nauwe buis werd opgenomen; tevens werd de temperatuur genoteerd. In tabel 3 komen voor 34 standen, telkens ongeveer op het midden van een dag opgenomen. Behalve deze waarnemingen op het midden van den dag, werden nog een groot aantal, in totaal 186, verricht in verband met de schommelingen in temperatuur, waarover nader op blz. 44 en 45.

Uit tabel 3 blijkt, dat in geval *a* in 33 dagen de daling van het phreatisch oppervlak 2.4 c.M. heeft bedragen en in geval *b* 1.6 c.M. Door het opbrengen van drogen grond is de daling dus 0.8 c.M. grooter geworden.

Terloops wordt opgemerkt, dat vóór het opbrengen van drogen grond in geval *a* het capillair oppervlak 75 — 63 = 12 c.M. beneden de oppervlakte van den grond was gedaald.

Ten einde een inzicht te verkrijgen in de waterverplaatsing in den opgebrachten grond, werd aan het einde van de 33 dagen de buis voorzichtig omgekeerd. De opgebrachte 10 c.M. grond gleed er uit behalve de onderste 4 m.M. Deze laatste werd voorzichtig los-

TABEL 3.

Na dagen:	Toestel met 10 c.M. drogen grond (*a*). Daling in c.M.:	Toestel zonder drogen grond (*b*). Daling in c.M.:
0	0.0	0.0
1	0.1	0.1
2	0.2	0.1
3	0.3	0.1
4	0.3	0.1
5	0.4	0.2
6	0.4	0.3
7	0.5	0.3
8	0.5	0.3
9	0.6	0.4
10	0.7	0.4
11	0.9	0.6
12	1.1	0.7
13	1.2	0.7
14	1.2	0.7
15	1.3	0.8
16	1.5	0.9
17	1.6	1.0
18	1.7	1.0
19	1.7	1.0
20	1.8	1.1
21	1.8	1.1
22	1.9	1.1
23	1.9	1.2
24	2.0	1.2
25	2.0	1.3
26	2.1	1.3
27	2.1	1.4
28	2.2	1.4
29	2.2	1.5
30	2.3	1.5
31	2.4	1.6
32	2.4	1.6
33	2.4	1.6

gemaakt, opgevangen en gewogen. Ook de andere grond werd gewogen. Daarna werd gedroogd en weer gewogen. Vóór het drogen bedroeg het gewicht van de geheele laag van 10 c.M. grond 100.120 Gr. en daarna 100 Gr. De droge grond had dus 0.120 Gr. water opgenomen. Uit de afzonderlijke wegingen bleek, dat deze 0.120 Gr. bijna uitsluitend in de onderste 4 m.M. voorkwam. Het verschijnsel dezer opstijging van 4 m.M. was uiterlijk niet waar te nemen.

De daling van 1.6 c.M. in geval *b* moet aan verdamping worden toegeschreven. In geval *a* zal door verdamping ook ten hoogste een dergelijke daling kunnen zijn teweeggebracht. De verplaatste hoeveelheid water bij 1.6 c.M. daling is 0.200 Gr.

In geval *a* is door den drogen grond water opgenomen. De daling van 2.4 c.M. staat gelijk met een waterverplaatsing van 0.300 Gr., zoodat in geval *a* ten minste 0.100 Gr. door den drogen grond moet zijn opgenomen. Volgens de weging was een iets grootere hoeveelheid (0.120 Gr.) opgenomen.

Uit de proef blijkt, dat een funiculaire werking is opgetreden, maar de hoeveelheid water, die er door verplaatst en vastgehouden wordt, uiterst gering is. De berekening leert, dat die hoeveelheid in 33 dagen overeenkomt met $^1/_{50}$ m.M. regen. VERSLUYS zegt overigens ook, dat de beweging in de funiculaire zône uiterst langzaam is.

Het is niet uitgesloten, dat in geval *a* verdamping gevolgd door condensatie is opgetreden. Uitsluitend hieraan is echter bezwaarlijk het komen van water in den opgebrachten grond aan het einde van de proef toe te schrijven, daar dan in geval *a* de daling zeker niet grooter zou zijn geweest dan in geval *b*.

Uit de te voren gemelde waarnemingen in verband met de temperatuur is mede gebleken, dat deze van invloed is geweest op den stand van het phreatisch oppervlak. Dit verband bleek duidelijk op dagen met vrij groote temperatuurschommelingen. Zoo werden op 27 Juni 1927 de waarnemingen in tabel 4 genoteerd.

Uit de tabel blijkt, dat bij stijging van temperatuur het water rijst en omgekeerd. De oorzaak van het verschijnsel is te vinden

in de vermindering van de capillariteitsconstante als gevolg van de verminderde viscositeit bij temperatuurstijging.

Naar het schr. voorkomt moet mede hieraan worden toeschreven,

TABEL 4.

Temperatuur op 27 Juni 1927.	Daling in c.M.
6.30 uur: 12.5° C.	—
8.30 „ 13.2 „	0.0
10.00 „ 14.0 „	—0.1
12.00 „ 14.2 „	—0.1
15.45 „ 16.2 „	—0.2
16.45 „ 16.0 „	+0.1
19.30 „ 15.9 „	+0.1
22.30 „ 15.2 „	0.0

dat drainreeksen 's nachts minder water afvoeren of zelfs ophouden te loopen (38,39).

Conclusie:

De aanwezigheid van water boven de capillaire zône is voornamelijk een gevolg van de heterogeniteit van den grond, waardoor sejuncties ontstaan. De planten kunnen profiteeren van het sejunctiewater, dat als een reservevoorraad is op te vatten. Ook funiculair en pendulair water voorzien mede in de waterbehoefte, doch de funiculaire beweging is zóó uiterst langzaam, dat een aanvulling van funiculair water practisch geen beteekenis heeft.

HOOFDSTUK V.

Het verband tusschen de afmeting der gronddeeltjes en den negatieven capillariteitsdruk.

Zooals uit tabel 2 (blz. 25) blijkt, is $D_{mi\,II}$ van fractie II (2—16 μ) grooter dan $D_{ma\,III}$ van fractie III (16—125 μ). Er zou dan ook niet anders te verwachten zijn:

Immers de grootste deeltjes van fractie II, dus die van 16 μ, kunnen nog hebben bijgedragen tot het ontstaan van $D_{mi\,II}$, terwijl de kleinste deeltjes van fractie III, dus die van 16 μ, kunnen hebben bijgedragen tot het ontstaan van $D_{ma\,III}$. Het zal dus van het aantal deeltjes van 16 μ in ieder der fracties II en III afhangen, of de waarden voor $D_{mi\,II}$ en $D_{ma\,III}$ veel verschillen. Naarmate het aantal deeltjes van 16 μ in beide fracties toeneemt, moet het verschil in negatieven capillariteitsdruk kleiner worden en omgekeerd. In het algemeen toch moet voor twee aangrenzende fracties A en B, waarvan A de kleinste is, de regel opgaan: $D_{mi\,A} > D_{ma\,B}$, en voor de deeltjes, welke den overgang tot beide fracties vormen, is bijgevolg de negatieve capillariteitsdruk $D_{cap.} < D_{mi\,A}$ en $> D_{ma\,B}$.

Men zou dan ook geneigd zijn uit tabel 2 de conclusie te trekken, dat van een homogenen grond, bestaande uit deeltjes van 16 μ, de neg. cap.dr. een waarde moet hebben, gelegen tusschen 180 en 260 c.M.

Worden — zoo doorgeredeneerd — n in grootte op elkaar volgende fracties onderzocht, dan is voor $n - 1$ korrelgrootten vast te stellen, binnen welke grenzen de negatieve capillariteitsdruk schommelt. Theoretisch is de neg. cap.dr. omgekeerd evenredig met de wijdte van de capillairen en dus ook met de korrelgrootte. Een dusdanige omgekeerde evenredigheid zou nu in de uitkomsten tot uitdrukking moeten zijn gekomen. Uit het navolgende zal blijken,

dat de redeneering alleen zou opgaan, indien de grenzen tusschen de fracties scherp waren te trekken en de fracties volgens die grenzen ook praktisch waren te scheiden.

Dr. D. J. HISSINK, Directeur van het Bodemkundig Instituut te Groningen, was zoo welwillend voor mij een aantal dergelijke fracties te maken. Dit gebeurt met het slibtoestel van Atterberg en wel uit de verschillende bezinkingstijden (40). De fracties worden fractie *a*, fractie *b*, enz. genoemd; hieronder volgen de afmetingen:

fractie *a*: 16—32 μ,
„ *b*: 32—48 μ,
„ *c*: 48—64 μ,
„ *d*: 64—96 μ,
„ *e*: 96—128 μ.

Bij het onderzoek bleek ook weer, dat een grondlaagje van ten hoogste 20 m.M. voldoende was om D_{ma} te bereiken. Het aantal bepalingen voor elken neg. cap.dr. was telkens 10. De uitkomsten volgen in tabel 5 †):

Tabel 5. Waarden voor D_{mi} en D_{ma} (in c.M.).

	D_{mi}	D_{ma}
Fractie a. 16— 32 μ	124	225
„ b. 32— 48 „	100	129
„ c. 48— 64 „	78	114
„ d. 64— 96 „	56	89
„ e. 96—128 „	40	80

De uitkomsten van het onderzoek zijn op het eerste gezicht verrassend. Immers telkens is D_{mi} van een fractie kleiner dan D_{ma} van de daarop in grootte volgende fractie.

Dit onverwachte resultaat moet zijn grond hierin vinden, dat de

†) Van alle 5 fracties werden D_{mi} en D_{ma} ook bepaald, na behandeling met ammonia. Slechts bij fractie *a* was invloed merkbaar.

grenzen der fracties anders zijn dan die, gevonden met de mechanische grond-analyse.

Alle fracties werden daarom microscopisch gemeten. Door de welwillendheid van Dr. K. ZIJLSTRA, Directeur van de 5e Afdeeling van het Rijkslandbouwproefstation te Groningen, was ik in staat op zijn laboratorium de metingen te verrichten. De hierbij gevolgde werkwijze was geheel dezelfde als die †) door Dr. Zijlstra toegepast bij het meten van zetmeelkorrels. Echter zij hier medegedeeld, dat een gedeelte van iedere fractie, na gedroogd te zijn, met zuivere glycerine krachtig werd geschud; uit de verkregen suspensie werd met een pipet een druppel op een objectglaasje gebracht.

Er zijn bij ieder gronddeeltje 2 metingen verricht nl. volgens de grootste afmeting en één rechthoekig daarop, zoodat het product van beide afmetingen vrijwel het zichtbare, in een plat vlak geprojecteerde oppervlak weergaf. Daar bij de verwerking van de verkregen getallen is gebleken, dat door beschouwing van alleen de grootste afmetingen overeenkomstige resultaten werden verkregen als door de beide afmetingen in rekening te brengen, zijn de volgende uiteenzettingen alleen op de grootste afmetingen gebaseerd.

Het aantal gemeten individuen van iedere fractie bedraagt ten minste 1000.

In de tabellen 6, 7, 8, 9 en 10, die resp. betrekking hebben op de fracties *a*, *b*, *c*, *d* en *e*, zijn de deeltjes telkens in klassen van 2—4, 4—6, enz. gerangschikt in kolom A. De klassegrenzen in de kolommen A van de tabellen 6, 7 en 8 zijn aangegeven in micra en van de tabellen 9 en 10 in 1,5625 micra: zoo beteekent b.v. 40—42 in tabel 6 40—42 μ en in tabel 9 40 tot 42 $\times$ 1,5625 μ. In de kolommen *B* zijn de aantallen individuen van iedere klasse vermeld; kolom *C* bevat de klassegemiddelden, verheven tot de 3e macht; kolom *D* is het product van *B* en *C* (uitgedrukt in 1000 μ^3) en kolom *E* is de sommatie van kolom *D*.

---

†) Wordt mettertijd door Dr. ZIJLSTRA gepubliceerd.

Tabel 6. (Heeft betrekking op fractie *a*).

A	B	C	D	E
0— 2	133	1	0	0
2— 4	85	27	2	2
4— 6	69	125	8	10
6— 8	36	343	12	22
8—10	21	729	15	37
10—12	12	1331	15	52
12—14	7	2197	15	67
14—16	6	3375	20	87
16—18	4	4913	19	106
18—20	9	6859	61	167
20—22	11	9261	101	268
22—24	24	12167	292	560
24—26	46	15625	718	1278
26—28	54	19683	1062	2340
28—30	49	24389	1195	3535
30—32	72	29791	2144	5679
32—34	72	35937	2587	8266
34—36	86	42875	3687	11953
36—38	66	50653	3342	15295
38—40	79	59319	4686	19981
40—42	77	68921	5031	25012
42—44	62	79507	4929	29941
44—46	74	91125	6743	36684
46—48	43	103823	4464	44148
48—50	35	117649	4117	45265
50—52	48	132651	6267	51532
52—54	43	148877	6401	57933
54—56	28	166375	4658	62591
56—58	17	185193	3148	65739
58—60	17	205379	3491	69230
60—62	12	226981	2723	71953
62—64	10	250047	2500	74453
64—66	5	274625	1373	75826
66—68	3	300763	902	76728
68—70	4	328509	1314	78032
70—72	1	357911	357	78389
72—74	3	389017	1147	79536
74—76	2	421875	843	80379
76—78	3	456533	1369	81748
78—80	1	493039	493	82241
84—86	1	614125	614	82855

$1/32$ (2589)
$1/16$ (5178)
$1/8$ (10357)
$1/6$ (13809)
$1/4$ (20714)
$1/3$ (27618)

Tabel 7. (Heeft betrekking op fractie *b*).

A	B	C	D	E
4— 6	5	125	0	
6— 8	1	343	0	
8— 10	1	729	0	
16— 18	1	4913	4	4
18— 20	2	6859	13	17
20— 22	1	9261	9	26
22— 24	1	12167	12	38
24— 26	1	15625	15	53
26— 28	4	19863	78	131
28— 30	6	24389	146	277
32— 34	7	35937	251	528
34— 36	5	42875	214	742
36— 38	8	50653	405	1147
38— 40	9	59319	533	1680
40— 42	26	68921	1781	3461
42— 44	22	79507	1749	5210
44— 46	43	91125	3918	9128
46— 48	35	103823	3633	12761
48— 50	48	117649	5647	18408
50— 52	51	132651	6765	25273
52— 54	53	148877	7890	33163
54— 56	63	166375	10481	43644
56— 58	29	185193	5370	49014
58— 60	42	205379	8625	57639
60— 62	90	226981	20428	78067
62— 64	46	250047	11502	89569
64— 66	62	274625	17026	106595
66— 68	46	300763	13834	120429
68— 70	40	328509	13140	133569
70— 72	38	357911	13600	147169
72— 74	37	389017	14393	161562
74— 76	36	421875	15187	176749
76— 78	19	456533	8674	185423
78— 80	29	493093	14298	199721
80— 82	37	531441	19663	219384
82— 84	13	571787	7433	226817
84— 86	25	614125	15353	242170
86— 88	8	658503	5268	247438
88— 90	7	704969	4934	252372
90— 92	8	753571	6028	258400
92— 94	10	804357	8043	266443
94— 96	6	857375	5144	271587
96— 98	4	912673	3650	275237
98—100	5	970299	4851	280088
100—102	2	1030301	2060	282148
102—104	1	1092727	1092	283240
104—106	2	1157625	2315	285555
110—112	4	1367631	5470	291025
112—114	1	1442897	1442	292462
116—118	3	1601613	4804	297271
120—122	1	1771561	1771	299042
124—126	1	1953125	1953	300995

$\frac{1}{32}$ (9406)
$\frac{1}{16}$ (18812)
$\frac{1}{8}$ (37624)
$\frac{1}{6}$ (50166)
$\frac{1}{4}$ (75249)
$\frac{1}{3}$ (100332)

$\frac{1}{32}$ (9406)
$\frac{1}{16}$ (18812)
$\frac{1}{8}$ (37624)
$\frac{1}{6}$ (50166)
$\frac{1}{4}$ (75249)
$\frac{1}{3}$ (100332)

Tabel 8. (Heeft betrekking op fractie *c*).

A	B	C	D	E
20— 22	1	9261	9	9
28— 30	3	24389	73	82
36— 38	1	50653	50	132
38— 40	2	59319	118	250
44— 46	2	91125	182	432
46— 48	1	103823	103	535
48— 50	7	117649	823	1358
50— 52	2	132651	265	1623
52— 54	4	148877	595	2218
54— 56	12	166375	1996	4214
56— 58	14	185193	2592	6806
58— 60	14	205379	2875	9681
60— 62	35	226981	7944	17625
62— 64	28	250047	9501	27126
64— 66	42	274625	11534	38660
66— 68	36	300763	10827	49487
68— 70	43	328509	14125	63612
70— 72	45	357911	16105	79717
72— 74	35	389017	13615	93332
74— 76	47	421875	19828	113160
76— 78	38	456533	17348	130508
78— 80	41	493039	20214	150722
80— 82	79	531441	41983	192705
82— 84	42	571787	24015	216820
84— 86	56	614125	34391	251211
86— 88	36	658503	23705	274916
88— 90	42	704969	29608	304524
90— 92	46	753571	34664	339188
92— 94	29	804357	23325	362513
94— 96	35	857375	30007	392520
96— 98	29	912673	26467	418987
98—100	19	970299	18435	437422
100—102	37	1030301	38121	475553
102—104	22	1092727	24039	499582
104—106	22	1157625	25467	505049
106—108	10	1225043	12250	517299
108—110	11	1295029	14245	531544
110—112	5	1367631	6838	538382
112—114	10	1442892	14428	552810
114—116	4	1520875	6083	558893
116—118	2	1601613	3203	562096
118—120	2	1685159	3370	565462
120—122	9	1771561	15944	581406
122—124	3	1860867	5582	586988
124—126	4	1953125	7812	594800
126—128	3	2048383	6145	600943
128—130	2	2146689	4293	605238
130—132	2	2248091	4496	609734
132—134	4	2352637	9410	619144
136—138	1	2571353	2571	621715
140—142	1	2803221	2803	624518
144—146	1	3048625	3048	627566
148—150	1	3307949	3307	630873
154—156	1	3723875	3723	634596

$1/32$ (19831)
$1/16$ (39662)
$1/8$ (79324)
$1/6$ (105766)
$1/4$ (158649)
$1/3$ (211532)

Tabel 9. (Heeft betrekking op fractie *d*).

A	B	C	D	E
32— 34	2	35937	71	71
34— 36	2	42875	85	156
36— 38	2	50653	101	257
38— 40	3	59319	177	434
40— 42	6	68921	413	847
42— 44	17	79507	1351	2198
44— 46	14	91125	1275	3473
46— 48	17	103823	1764	5237
48— 50	16	117649	1882	7119
50— 52	40	132651	5306	12425
52— 54	40	148877	5955	18380
54— 56	43	166375	7154	25534
56— 58	40	185193	7407	32941
58— 60	44	205379	9036	41977
60— 62	95	226981	20993	62970
62— 64	66	250047	16503	79473
64— 66	61	274625	16752	96225
66— 68	55	300763	16541	112766
68— 70	49	328509	16056	128822
70— 72	58	357911	20758	149580
72— 74	49	389061	19061	178641
74— 76	46	421875	19406	198047
76— 78	43	456533	19630	217677
78— 80	22	493039	10846	228523
80— 82	49	531441	26040	254563
82— 84	21	571787	12007	266570
84— 86	14	614125	14739	281309
86— 88	16	658503	8936	290245
88— 90	15	704969	10574	300819
90— 92	21	753571	15824	316643
92— 94	11	804357	8847	325490
94— 96	11	857375	9431	334921
96— 98	12	912673	10952	345873
98—100	3	970299	2910	348783
100—102	12	1030301	12363	361146
102—104	3	1092727	3278	364424
104—106	2	1157625	2315	366739
106—108	1	1225043	1225	367964
108—110	2	1295029	2590	370554
112—114	2	1442897	2885	373439
114—116	2	1520875	3041	376480
116—118	2	1601613	3203	379683
118—120	2	1685159	3370	383053
120—122	1	1771561	1771	384824
122—124	1	1860867	1860	386684
124—126	1	1953125	1953	388137

$1/32$ (12145)
$1/16$ (24290)
$1/8$ (48580)
$1/6$ (64773)
$1/4$ (97159)
$1/3$ (129546)

$1/32$ (12145)
$1/16$ (24290)
$1/8$ (48580)
$1/6$ (64773)
$1/4$ (97159)
$1/3$ (129536)

Tabel 10. (Heeft betrekking op fractie *e*).

A	B	C	D	E
32— 34	1	35937	35	35
40— 42	5	68921	344	379
42— 44	3	79507	238	617
44— 46	7	91125	637	1254
46— 48	1	103823	103	1357
48— 50	9	117649	1058	2415
50— 52	10	132651	1326	3741
52— 54	14	148877	2084	5825
54— 56	21	166375	3493	9318
56— 58	17	185193	3148	12811
58— 60	25	205379	5134	17945
60— 62	47	226981	10668	28613
62— 64	24	250047	6001	34614
64— 66	49	274625	13456	48070
66— 68	36	300763	10827	58897
68— 70	39	328509	12811	71708
70— 72	61	357511	21832	93540
72— 74	56	389017	21784	115324
74— 76	49	421875	20671	135995
76— 78	36	456533	16435	152430
78— 80	43	493039	21200	173630
80— 82	68	531441	37137	209767
82— 84	47	571787	26873	236640
84— 86	44	614125	27021	263661
86— 88	43	658503	28315	291976
88— 90	30	704969	21149	313125
90— 92	31	753571	23360	336485
92— 94	19	804357	15282	351767
94— 96	25	857375	21434	373201
96— 98	33	912673	30118	403319
98—100	12	970299	11643	414962
100—102	27	1030301	27818	442780
102—104	11	1092727	12019	454779
104—106	13	1157625	15049	469848
106—108	7	1225043	8575	478223
108—110	8	1295029	10360	488583
110—112	5	1367631	6838	495421
112—114	4	1442897	5771	501192
114—116	4	1520875	6083	507275
116—118	5	1601613	8008	515283
118—120	6	1685159	10110	525393
120—122	7	1771561	12400	537793
122—124	3	1860867	5582	543375
124—126	3	1953125	5859	549234
126—128	2	2048383	4096	553330
128—130	2	2146689	4293	557623
132—134	1	2352637	2352	559975
134—136	1	2460375	2460	562435
140—142	4	2803221	11212	573647

$1/82$ (17926)
$1/16$ (35853)
$1/8$ (71706)
$1/6$ (95608)
$1/4$ (143412)
$1/3$ (191216)

$1/82$ (17926)
$1/16$ (35853)
$1/8$ (71706)
$1/6$ (95608)
$1/4$ (143412)
$1/3$ (191216)

Er is reeds gelegenheid geweest in 't algemeen op te merken, dat de kleinste deeltjes van invloed zijn op de waarde van D_{ma} en de grootste deeltjes op de waarde van D_{mi}. Verder is het duidelijk, dat de allerkleinste deeltjes van een fractie de waarde van D_{ma} niet bepalen, indien het gezamenlijk volume van die deeltjes slechts een zeer klein gedeelte uitmaakt van het totale volume van de fractie; wel zullen zij kunnen deelnemen aan de vorming van het capillair oppervlak. De klasse 2—4 μ van fractie *a* in tabel 6 neemt een relatief volume in van 2, terwijl het totale volume van fractie *a* 82855 is; in de deeltjes van deze klasse alleen zal dus geen aaneengesloten capillair oppervlak kunnen ontstaan. Wordt het volume 8 van de daarop in grootte toenemende klasse 4—6 μ er bijgevoegd, waardoor dus het totale volume 10 wordt, dan zal in de deeltjes van beide klassen samen ook nog niet een aaneengesloten capillair oppervlak kunnen ontstaan. Op deze wijze doorgaande met de bijvoeging van klassen moet eindelijk wel een volume worden verkregen, waarin een aaneengesloten capillair oppervlak zal ontstaan. De grootste deeltjes, die daartoe nog hebben moeten bijdragen, bepalen de waarde van D_{ma}.

Op de waarde van D_{mi} zal geen invloed worden uitgeoefend door de deeltjes van de allergrootste klasse, indien zij slechts een klein gedeelte van het totale volume der fractie innemen. De klasse 84—86 μ van fractie *a* in tabel 6 neemt een volume in van 614 op een totaal volume van 82855. De deeltjes van deze klasse zullen geen invloed kunnen uitoefenen op de vorming van een aaneengesloten capillair oppervlak met een neg. cap.druk D_{mi}. Door bijvoeging van in grootte afnemende klassen wordt het volume van de grootere deeltjes eindelijk zóó groot, dat vorenbedoeld capillair oppervlak ontstaat, waarin de kromtestraal der menisci bepaald wordt door de afmetingen van de laatst toegevoegde klasse. De afmetingen van deze kleinste klasse bepalen dus de waarde van D_{mi}.

Conclusie: In iedere fractie (of in iederen grond) wordt D_{ma} bepaald door de grootste van een zeker volume kleine deeltjes en D_{mi} door de kleinste van een zeker volume groote deeltjes.

Wordt bij fractie *a* voor dit bepaalde volume *kleine* deeltjes $^1/_3$ van het totale volume (= 27618) genomen, dan zijn de deeltjes

met de grootste afmetingen, zooals uit tabel 6 blijkt, 42μ. Wordt nu verder achtereeenvolgens $^1/_4$, $^1/_6$, $^1/_8$, $^1/_{16}$ en $^1/_{32}$ genomen, dan zijn de *grootste* deeltjes resp. 40, 36, 34, 32 en 28μ.

Wordt bij fractie *a* voor dit bepaalde volume *groote* deeltjes $^1/_3$ van het totale volume genomen, dan blijkt uit tabel 6, dat de deeltjes met de *kleinste* afmetingen 52μ zijn. Wordt nu verder weer achtereenvolgens $^1/_4$, $^1/_6$, $^1/_8$, $^1/_{16}$ en $^1/_{32}$ genomen, dan zijn de *kleinste* deeltjes resp. 54, 58, 62, 68 en 74 μ.

Op gelijke wijze is gehandeld met de fracties *b*, *c*, *d* en *e*. In de tabellen 6, 7, 8, 9 en 10 is telkens rechts van de kolom *E* aangegeven, waar de grenzen van de genomen volumina zijn gelegen.

De uitkomsten van deze werkwijze zijn vereenigd in tabel 11.

Tabel 11.

Fracties.	Negatieve cap. druk.		Vol. v. d. kleinste deeltjes (uitgedrukt in het totale vol.), waarvan de grootste D_{ma} bepalen en tevens vol. v. d. grootste deeltjes (uitgedrukt in het totale vol.), waarvan de kleinste D_{ma} bepalen.											
			$^1/_3$		$^1/_4$		$^1/_6$		$^1/_8$		$^1/_{16}$		$^1/_{32}$	
	D_{ma} (in c.M.).	D_{mi} (in c.M.).	Grootste afmeting van de kleinste deeltjes (in μ)	Kleinste afmeting van de grootste deeltjes (in μ).	Grootste afmeting van de kleinste deeltjes (in μ).	Kleinste afmeting van de grootste deeltjes (in μ).	Grootste afmeting van de kleinste deeltjes (in μ).	Kleinste afmeting van de grootste deeltjes (in μ).	Grootste afmeting van de kleinste deeltjes (in μ).	Kleinste afmeting van de grootste deeltjes (in μ).	Grootste afmeting van de kleinste deeltjes (in μ).	Kleinste afmeting van de grootste deeltjes (in μ).	Grootste afmeting van de kleinste deeltjes (in μ).	Kleinste afmeting van de grootste deeltjes (in μ).
a	225	124	42	52	40	54	36	58	34	62	32	68	28	74
b	129	100	64	80	60	82	58	88	54	92	50	102	46	112
c	114	78	82	98	80	102	74	108	70	114	66	126	62	132
d	89	56	109	128	103	138	97	144	94	150	84	159	78	181
e	80	40	125	150	119	156	113	166	106	178	100	191	91	200

Een toename van den neg. cap.dr. moet samengaan met een afname van de afmetingen der deeltjes, waardoor de druk wordt bepaald. Wordt ieder der kolommen in tabel 11, waarboven $^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_6$, $^1/_8$, $^1/_{16}$ en $^1/_{32}$ staat, vergeleken met de kolom, waarboven neg. cap.dr. staat, dan blijkt: De beste overeenkomst bestaat tusschen de $^1/_8$-kolom en die van den negatieven cap.dr. Immers de lijn, gaande van de kleinste afmeting 34 μ over de steeds grooter wordende afmetingen 54, 62, 70 μ, enz. naar de grootste 178 μ heeft hetzelfde verloop als de lijn, gaande van den grootsten neg. cap.dr. 225 c.M. over de steeds afnemende getallen 129, 124, 114 c.M., enz. naar het kleinste (40 c.M.). Er is geen andere combinatie te vinden, waar de overeenkomst zoo sprekend is.

Conclusies: 1°. De maximum negatieve capillariteitsdruk wordt beheerscht door deeltjes, die zoodanige afmetingen hebben, dat het volume van alle kleinere $^1/_8$ is van het totale volume.

2°. De minimum negatieve capillariteitsdruk wordt beheerscht door deeltjes, die zoodanige afmetingen hebben, dat het volume van alle grootere $^1/_8$ is van het totale volume.

In tabel 12 zijn nog eens weergegeven: in de eerste kolom de negatieve capillariteitsdruk, in de tweede kolom de afmetingen der gronddeeltjes, waardoor de druk wordt teweeggebracht en een derde kolom met de producten van de getallen in de eerste en in de tweede kolom.

De producten van druk en afmeting loopen uiteen van 7000 tot 9200. De gemiddelde waarde van de 10 producten is 8074. Dit getal 8074 is te beschouwen als een constante waarde van het product van den negatieven capillariteitsdruk (uitgedrukt in c.M.) en de bijbehoorende afmeting van de deeltjes (uitgedrukt in μ). Hieruit volgt de betrekking:

$$D_{cap.} = \frac{c}{d},$$

waarin c = 8074

d = afmeting der gronddeeltjes in μ.

Door gebruik te maken van deze formule kan, nadat D_{mi} en D_{ma}

Tabel 12.

Negatieve cap. druk		Afmeting der deeltjes		Product	
D_{ma}.	D_{mi}.	met betrekking tot D_{ma}.	met betrekking tot D_{mi}.	van D_{ma} en bijbehoorende afmeting.	van D_{mi} en bijbehoorende afmeting.
225		34 (†)		7650	
	124		62 (†)		7688
129		54		6966	
	100		92		9200
114		70		7980	
	78		114		8892
89		94		8366	
	56		150		8400
80		106		8480	
	40		178		7120

van een grond zijn bepaald, die grond in een 3-tal fracties worden ingedeeld.

Zoo vindt men voor de 4 gronden en fracties, waarvan in Hoofdstuk III sprake was, het volgende:

Zeezand. Gevonden: D_{mi} = 37 en D_{ma} = 63.

Bijgevolg: $^1/_8$ van het volume > 218 μ (= 8074 : 37)
$^1/_8$ „ „ „ < 128 μ (= 8074 : 63)
$^6/_8$ „ „ „ 128 tot 218 μ.

B. 504. Gevonden: D_{mi} = 70 en D_{ma} = 123.

Bijgevolg: $^1/_8$ van het volume > 115 μ (= 8074 : 70)
$^1/_8$ „ „ „ < 65 μ (= 8074 : 123)
$^6/_8$ „ „ „ 65 tot 115 μ.

†) Zooals op blz. 48 is gezegd, zijn de metingen der deeltjes verricht na drogen. Men zou de veronderstelling kunnen opperen, dat daardoor complexen van deeltjes zijn gevormd en dientengevolge voor de afmetingen der deeltjes te groote waarden zijn gevonden. In verband hiermede zij opgemerkt, dat complexen van deeltjes onder het microscoop niet zijn waargenomen. Daarenboven zouden dan de bovenste twee producten in tabel 12 (7650 en 7688) grooter moeten zijn dan de gemiddelde waarde (8074); zij zijn daarentegen juist kleiner,

Fractie III (B 29). Gev.: D_{mi} = 93 en D_{ma} = 180.
Bijgevolg: 1/8 van het volume > 87 μ (= 8074 : 93)
1/8 „ „ „ < 45 μ (= 8074 : 180)
6/8 „ „ „ 45 tot 87 μ.

Fractie II (B 29). Gev.: D_{mi} = 260 en D_{ma} = 750.
Bijgevolg: 1/8 van het volume > 31 μ (= 8074 : 260)
1/8 „ „ „ < 11 μ (= 8074 : 750)
6/8 „ „ „ 11 tot 31 μ.

Bij de microscopische meting van de fracties *a, b, c, d* en *e* is mij gebleken, dat de volgens de slib-analyse berekende afmetingen (toepassing van de formule van STOKES) veel verschillen van de werkelijke. Zoo geven berekeningen uit de tabellen 6, 7, 8, 9 en 10:

Fractie *a*. (16—32 μ volgens slibben)	26 % v/h *aantal*	< 16 μ;	0 % v/h *volume*	< 32 μ.
	55 % „ „	> 32 μ;	93 % „ „	> 32 μ.
	19 % „ „	16—32 μ;	7 % „ „	16—32 μ.
Fractie *b*. (32—48 μ volgens slibben)	2 % „ „	< 32 μ;	0 % „ „	< 32 μ.
	83 % „ „	> 48 μ;	96 % „ „	> 48 μ.
	15 % „ „	32—48 μ;	4 % „ „	32—48 μ.
Fractie *c*. (48—64 μ volgens slibben)	1 % „ „	< 48 μ;	0 % „ „	< 48 μ.
	88 % „ „	> 64 μ;	96 % „ „	> 64 μ.
	11 % „ „	48—64 μ;	4 % „ „	48—64 μ.
Fractie *d*. (64—96 μ volgens slibben)	1 % „ „	< 64 μ;	0 % „ „	< 64 μ.
	66 % „ „	> 96 μ;	84 % „ „	> 96 μ.
	33 % „ „	64—96 μ;	16 % „ „	64—96 μ.
Fractie *e*. (26—128 μ volgens slibben)	14 % „ „	< 96 μ;	3 % „ „	< 96 μ.
	40 % „ „	> 128 μ;	70 % „ „	> 128 μ.
	46 % „ „	96—128 μ;	27 % „ „	96—128 μ.

Het blijkt, dat in de fracties *a, b, c, d* en *e* resp. slechts 7 %, 4 %, 4 %, 16 % en 27 % van het totale volume gelegen is binnen de grenzen, volgens de slib-analyse aangegeven en dat speciaal de bovenste grenzen verre worden overschreden. In het bovenstaande overzicht zijn ook de percentages van het aantal opgenomen. Het is duidelijk, dat voor de beoordeeling van de graad van nauwkeurigheid de getallen der volumina dienen te worden genomen; er kan

wel een groot aantal deeltjes binnen de grenzen liggen, terwijl dit slechts een betrekkelijk gering gedeelte uitmaakt van het totale volume. Zoo vond HISSINK (41) van twee fracties II (2— 16 μ volgens slibben) en van twee fracties IIIa (16—76 μ volgens slibben) het volgende:

bij fractie II van zeeklei ligt 90.6 % van het *aantal* tusschen 2—16 μ,
„ „ II „ keileem „ 93.5 % „ „ „ „ 2—16 μ,
„ „ IIIa „ zeeklei „ 91.3 % „ „ „ „ 16—76 μ,
„ „ IIIa „ keileem „ 85 % „ „ „ „ 16—76 μ.

Bij narekening van de volumina bleek mij echter:

bij fractie II van zeeklei ligt 30 % van het *volume* tusschen 2—16 μ,
„ „ II „ keileem „ 54 % „ „ „ „ 2—16 μ,
„ „ IIIa „ zeeklei „ 85 % „ „ „ „ 16—76 μ,
„ „ IIIa „ keileem „ 46 % „ „ „ „ 16—76 μ.

Op dergelijke groote verschillen zou ook aanstonds de aandacht vallen, indien D_{mi} en D_{ma} worden bepaald. Dan zou b.v. voor fractie IIIa van keileem gevonden zijn D_{ma} = 192 c.M. en D_{mi} = 71 c.M., terwijl dan $^1/_8$ van het volume < 42 μ, $^1/_8$ van het volume > 114 μ en $^6/_8$ van het volume tusschen 42—114 μ gelegen is.

Samenvatting: Van een 5-tal fracties, die volgens de met de slibanalyse verkregen uitkomsten aan elkaar moesten grenzen, werden D_{mi} en D_{ma} bepaald. De gevonden waarden wezen er op, dat de aangegeven grenzen niet juist zijn. Microscopische metingen, die vervolgens werden verricht, wezen dit ook uit. Door deze metingen werd het mogelijk een betrekking op te stellen tusschen den negatieven capillariteitsdruk en de bijbehoorende afmetingen der gronddeeltjes en met behulp daarvan een indeeling van den grond in een 3-tal fracties te maken.

HOOFDSTUK VI.

Slotbeschouwingen over capillaire werking in verband met de heterogeniteit van den grond en de aanwezigheid van gangen en holten.

Bij capillaire opstijging in grond op het laboratorium wordt wel gevonden, dat het maximum-watergehalte niet juist boven het phreatisch oppervlak wordt aangetroffen, maar op eenigen afstand daarboven. MC LAUGHLIN was een der eersten, die hierop de aandacht vestigde (42). WADSWORTH en SMITH (43) vonden, dat het maximum-watergehalte voorkwam boven het phreatisch oppervlak op een afstand, die varieerde van 12 tot 23 % van de totale stijghoogte. Volgens uitkomsten, door GAROLA vermeld (44), blijkt het verschijnsel ook.

Het zal wederom blijken, dat ook dit verschijnsel met de heterogeniteit van den grond samenhangt.

De strooming door capillaire buizen is door POISSEUILLE (45) aangegeven met de volgende betrekking

$$Q = N\frac{SD^4}{L},$$

waarin Q is de hoeveelheid vloeistof, die in een bepaalden tijd door een capillaire buis wordt afgevoerd; N is een constante, afhankelijk van den aard der vloeistof en van de temperatuur; S is het drukverschil aan de einden van de capillaire buis; D is de diameter en L de lengte van de buis.

De snelheid $v = \frac{Q}{F}$ (F = doorsnede), bijgevolg

$$v = \frac{4N}{\pi} \cdot \frac{SD^2}{L}.$$

Verder is de capillaire stijghoogte $h = \frac{4\sigma}{D}$ en $D = \frac{4\sigma}{h}$ en dus

$$v = \frac{4N}{\pi} \cdot \frac{S\left(\frac{4\sigma}{h}\right)^2}{L} = K\frac{S}{h^2L}.$$

Is het water tot een hoogte L boven het phreatisch oppervlak gestegen, dan is het drukverschil S aan begin- en eindpunt $h - L$ en de snelheid ter hoogte van L

$$v_L = K\frac{h - L}{h^2L} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (I)$$

Voor een homogenen grond met een capillaire stijghoogte h_1 geldt dus

$$v_{1_L} = K\frac{h_1 - L}{h_1{}^2L} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (II)$$

en voor een anderen homogenen grond met een capillaire stijghoogte h_2

$$v_{2_L} = K\frac{h_2 - L}{h_2{}^2L} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (III)$$

Stel $v_{1_L} = v_{2_L}$, dan

$$K\frac{h_1 - L}{h_1{}^2L} = K\frac{h_2 - L}{h_2{}^2L} \quad \text{en} \quad L = \frac{h_1h_2}{h_1 + h_2} \quad . \quad . \quad . \quad (IV)$$

In woorden: op een hoogte boven het phreatisch oppervlak, die gelijk is aan het product van de stijghoogten, gedeeld door de som van de stijghoogten, is de snelheid van opstijging in twee homogene gronden dezelfde. —

Beneden deze hoogte is, zooals uit (II) en (III) is af te leiden, de snelheid in den grond met een grootere stijghoogte kleiner dan in den grond met een kleinere stijghoogte.

In twee homogene gronden is de snelheid van opstijging aanvankelijk het grootst in dien, bestaande uit de grootste deeltjes en wel, totdat een stijghoogte is bereikt, bepaald door de betrekking (IV); boven die hoogte is de snelheid van opstijging grooter in den grond, bestaande uit de kleinste deeltjes.

In een heterogenen grond, bestaande uit een mengsel van deze homogene gronden, zal dientengevolge van het phreatisch oppervlak

af tot een hoogte L daarboven het watergehalte geleidelijk toenemen. Immers tot die hoogte worden alle grootere capillairen gevuld. Van de kleinere capillairen wordt in den aanvang het geringste aantal gevuld. Naarmate de stijghoogte toeneemt, wordt dit aantal grooter, daar de snelheid van opstijging in de kleinere capillairen naar verhouding minder afneemt dan in de groote capillairen. Op de hoogte L is het *hoogste watergehalte* te verwachten. Boven die hoogte worden alle kleine capillairen gevuld en steeds minder groote capillairen. Het watergehalte neemt dus weer af en wel tot de hoogte h_2, de stijghoogte in den meest grofkorreligen grond. Van hier af tot de hoogte h_1 worden alleen alle kleine capillairen gevuld en is het watergehalte dus constant.

Een heterogene grond is in werkelijkheid te beschouwen als een mengsel van een zeer groot aantal homogene. Een gelijke redeneering als bovenstaande is hierop ook toepasselijk om aan te toonen, dat het analoge verschijnsel zich hier kan voordoen. Daarmee is niet gezegd, dat in de natuur na capillaire opstijging op eenige hoogte boven het phreatisch oppervlak het watergehalte maximaal zal zijn. Zoo zal aanwezigheid van een hoeveelheid water, die zich reeds in een grondlaag bevindt, alvorens hierin capillaire opstijging plaats heeft, oorzaak zijn, dat een toename gevolgd door een afname van het watergehalte in de capillaire zône meermalen niet voorkomt. Na opstijging in drogen grond evenwel zal het verschijnsel zich voordoen, indien althans holten en gangen niet voorkomen.

Het is bezwaarlijk bij een grond alle capillaire ruimten geheel met water gevuld te krijgen. Dit bleek uit de volgende proef:

Een 5-tal buisjes van 10 c.M. lengte en met een inwendigen diameter van 1.62 c.M. werd onder kloppen gevuld met grond B. 504; de buisjes werden onder afgesloten door een kopergaasje bedekt met een linnen lapje en vastgehouden door een koperen huls. Uit het soortelijk gewicht en het volume-gewicht werd berekend, dat het poriënvolume 42.7 % was. De buisjes werden zoo in water geplaatst, dat de oppervlakte zich op dezelfde hoogte bevond als de oppervlakte van den grond. De buisjes werden herhaaldelijk uit het water genomen, snel afgedroogd en gewogen. De wegingen

van de 5 buisjes gaven de volgende gemiddelde uitkomsten. (Tabel 13).

Tabel 13.

Na	Opgenomen water		Lucht	
	in % van het totale volume.	in % van de poriën ruimte.	in % van het totale volume.	in % van de poriënruimte.
5 min.	35.1	82.2	7.6	17.8
3 uren	35.3	82.7	7.4	17.3
9 „	37.3	87.3	5.4	12.7
24 „	37.3	87.3	5.4	12.7
29 „	37.5	87.8	5.2	12.2
32 „	37.0	86.7	5.7	13.3
48 „	37.0	86.7	5.7	13 3
52 „	36.8	86.2	5.9	13.8
58 „	36.8	86.2	5.9	13.8
72 „	36.8	86.2	5.9	13.8
240 „	36.8	86.2	5.9	13.8

Bij deze proef bleef dus nog 13.8 % van de totale poriënruimte met lucht gevuld. In verband met de geringe lengte van de grondkolom, waarin de capillaire beweging plaats had, zullen het vooral de kleinste capillairen zijn geweest, die niet met water werden gevuld.

Waarschijnlijk zijn nog wel andere factoren mede oorzaak van de aanwezigheid van lucht, zooals de aanwezigheid van een luchthuidje (†) om droge grondkorrels, maar alleen hieraan kan het voorkomen van vrij groote hoeveelheden lucht onmogelijk worden toegeschreven; de *heterogeniteit* van den grond doet hier vooral haar invloed gelden.

In de literatuur wordt slechts weinig cijfermateriaal aangetroffen

†) De aanwezigheid van een luchthuidje zal een der voornaamste oorzaken zijn, dat bij de bepaling van het soortgelijk gewicht van den grond te lage uitkomsten worden gevonden.

omtrent de distributie van het water in een capillaire zône. Bovendien kan, met het oog op het in het voorgaande behandelde verschijnsel, aan die gegevens weinig waarde worden toegekend, indien niet tevens is opgegeven of is na te gaan, welk gedeelte van het totale poriënvolume met water is gevuld en op welke wijze de vulling van de capillaire ruimten heeft plaats gehad. Bij de eerder vermelde proeven van WADSWORTH en SMITH wordt dienaangaande alleen gezegd, dat op bepaalde hoogten boven het phreatisch oppervlak een maximum-watergehalte voorkomt.

Dat de wijze, waarop het water in de capillaire ruimten is gekomen, van invloed is op het naderhand gevonden watergehalte, blijkt uit proeven van KING (46). KING vulde buizen met zand van verschillende korrelgrootten en vermeldt hoe de verzadiging met water heeft plaats gehad: „When the apparatus was filled with sand, water was slowly introduced from the bottom, so as to expel the air, until the pieces were full . . . .". Het is moeilijk aan te nemen, dat op deze wijze de lucht geheel werd verwijderd en de capillaire ruimten geheel met water werden gevuld. Vervolgens werden de buizen langen tijd aan zichzelf overgelaten, waarbij verdamping was uitgesloten, en toen werd op verschillende hoogten het watergehalte bepaald. KING drukt het watergehalte uit in procenten van het droge gewicht, waardoor niet is na te gaan hoe de relatieve vulling van de poriënruimte op verschillende hoogten is geweest. Maar afgezien hiervan, is uit de getallen af te leiden, dat de lucht niet geheel verwijderd is geweest. Bij zand No. 60 vindt KING op een hoogte van

24—21	inches	13.52	gew.	%	water
21—18	„	23.57	„	„	„
18—15	„	27.93	„	„	„
15—12	„	23.61	„	„	„
12—9	„	22.46	„	„	„
9—6	„	22.76	„	„	„
6—3	„	22.88	„	„	„
3—0	„	23.54	„	„	„

Op een hoogte van 15—18 inches komt dus het maximum-watergehalte voor. Was de lucht bij den aanvang volkomen verwijderd geweest, dan zou beneden de hoogte van 15—18 inches het

watergehalte hieraan ten naaste bij gelijk hebben moeten zijn; de verschillen gaan daarentegen tot 5 %.

Uit de wet van POISSEUILLE is ook af te leiden, dat de snelheid, waarmee het water in capillairen afzakt, onafhankelijk is van de dikte van de afzakkende waterlaag en evenredig met het kwadraat van den diameter of, wat op hetzelfde neerkomt, omgekeerd evenredig is met de capillaire stijghoogte. Deze betrekking geldt uiteraard alleen, indien door het afzakken van water geen lucht onder druk komt te staan, omdat daardoor het afzakken wordt tegengegaan. Zoolang nog water op den grond staat, zal het afzakkende water een grootere snelheid hebben.

In twee homogene gronden, waarvan de korrelgrootten zich verhouden als 1 tot 2, zullen de snelheden van afzakken tot elkaar staan als 4 tot 1. In een natuurlijken — dus heterogenen — grond zal het water zich vooral snel in de grootere capillaire ruimten naar beneden bewegen, daarentegen zullen kleine capillaire ruimten aanvankelijk met lucht gevuld blijven. Tijdens het afzakken zullen tevens sejuncties ontstaan. Nadat een afzakkende capillaire waterkolom de met lucht gevuld gebleven, nauwe capillairen is gepasseerd, zullen deze zich door capillaire werking met water van minder nauwe capillairen uit weer geheel of gedeeltelijk kunnen vullen, indien althans de lucht kan ontwijken.

Gedurende het afzakken neemt de hoeveelheid afzakkend water af. Zoodra het capillair oppervlak is bereikt, stijgt het phreatisch oppervlak onmiddellijk evenveel als de hoogte van de afzakkende waterkolom bedraagt. In verband hiermede kan dan ook, hetgeen door schr. in de volgende passage van de z.g. Commissie-Lovink (47) cursief wordt aangeduid, bezwaarlijk als juist worden aangenomen:

„Het water, dat aan de oppervlakte van den grond wordt toegevoerd, zal onder den invloed van de zwaartekracht, voor zoover de tusschenruimten dit toelaten, naar de lagere grondlagen doorsijpelen. Echter zal slechts dàt deel van het oppervlakte-water een diepere grondlaag bereiken, dat niet in een hoogere wordt vastgehouden. Wanneer dus een grond, waaraan door de verdamping een deel van het capillaire water is onttrokken, door oppervlakte-

water wordt gedrenkt, zal dit allereerst in de bovenste lagen worden vastgehouden *tot deze de grens hunner capillaire verzadiging hebben bereikt,* vervolgens zal water doorsijpelen naar diepere lagen en dit zal bij voldoende toevoer van water zoolang aanhouden, tot ook *het laatste boven het grondwater gelegen bodemlaagje capillair verzadigd is. Eerst nu* zal een toestand intreden, waarbij *meerdere toevoer* van oppervlakte-water *aanleiding* geeft *tot stijging van het grondwaterniveau.*"

De afname van de hoeveelheid afzakkend water kan echter wel zoo groot zijn, dat het capillair oppervlak niet wordt bereikt en een stijging van het grondwater dus niet plaats vindt. Vooral na kleine regenbuien en bij een diep liggend capillair oppervlak zal dit allicht het geval kunnen zijn. Daarbij komt nog, dat door rechtstreeksche verdamping en middellijk door planten zooveel water kan worden onttrokken, dat aan het afzakken al spoedig een einde komt. Het uit de praktijk bekende feit, dat een flinke regenbui in droge tijden van meer beteekenis kan zijn voor de watervoorziening der gewassen dan dezelfde hoeveelheid neerslag in meer kleine buien, zal grootendeels zijn verklaring hierin moeten vinden, dat het water in het laatste geval niet voldoende diep zakt.

In het vorenstaande is geen rekening gehouden met het voorkomen van de niet-capillaire ruimten. In een cultuurgrond verkeert de bovenste laag tot de diepte, waartoe de wortels van cultuurgewassen reiken en andere biologische of physische processen hun invloed doen gelden, in een structuur, waarbij ook grootere niet-capillaire ruimten, nl. gangen en holten, tusschen het capillaire celwerk voorkomen.

In zware kleigronden kunnen beneden de bouwvoor in droge perioden soms, naast tallooze min of meer verticaal gerichte scheuren, ook voornamelijk horizontaal gerichte voorkomen. Dientengevolge wordt de onderbreking tusschen de capillaire ruimten zoo menigvuldig, dat niet meer gesproken kan worden van het bestaan van één capillair celwerk; er zijn dan a. h. w. een groot aantal grootere en kleinere kluiten ontstaan. In zulk een grond zal het water in 't algemeen snel zakken en door de aanwezigheid dier

horizontale scheuren zal capillaire aanvulling van beneden naar boven niet meer kunnen plaats vinden.

In lichte kleigronden en in zand zal echter één capillair celwerk, ondanks het voorkomen van niet-capillaire ruimten, bestaan; capillaire opstijging is in beide soorten grond mogelijk. Aanvulling van water voor de cultuurgewassen door capillaire opstijging nu zal in de lichte kleigronden dan alleen van beteekenis zijn, wanneer een groot aantal vrije vloeistofspiegels van voldoende capaciteit regelmatig verspreid voorkomen. Zijdelingsche toevloeiing van grootere afstanden is voor de aanvulling in deze gronden van hoegenaamd geen beteekenis. In zandgronden daarentegen staat de capillaire opstijging, behalve onder den invloed van toevloeiing uit vrije spiegels, ook onder dien van een nabij en hooger gelegen, ingesloten phreatisch oppervlak.

De aanwezigheid van gangen tusschen het capillair celwerk zal de hoeveelheid water in de capillaire zône voor alle gronden kleiner doen worden, maar in de lichte kleigronden en zandgronden zal de capillaire opstijging hierdoor niet worden belemmerd.

Over de wijze, waarop het water den grond indringt, zijn de meeningen verschillend. LAWES, GILBERT en WARINGTON (48) namen bij een 3-tal drainbakken waar, dat na regenval reeds spoedig een vrij groote hoeveelheid water kon worden opgevangen en daarna, na langeren tijd, nog een minder groote hoeveelheid. Deze laatste hoeveelheid is, naar zij zeggen, „discharged from the pores of a saturated soil". De grond verkeerde bij deze proeven in natuurlijken toestand, er kwamen dus gangen in voor; de grond in de 3 bakken was dik 20, 40 en 60 inch en wordt gekwalificeerd als klei. Het water gaat, zoo concludeeren LAWES c.s., door de kanalen, ontstaan door biologische en physische processen, naar beneden. LEATHER (49) meent, dat deze theorie niet houdbaar is, maar dat het water grootendeels gelijkmatig in den grond dringt en door capillaire werking en zwaartekracht naar beneden wordt gevoerd.

In werkelijkheid zal het water zoowel door gangen als door capillaire ruimten naar beneden dringen. Maar door LAWES c.s. werd, op grond van de proeven met de drainbakken, voornamelijk een afzakking door de grootere ruimten aangenomen, omdat bij hun

proeven de grondlagen een geringe dikte hadden (resp. 50, 100 en 150 c.M.), zoodat het door de grootere ruimten afzakkende water minder tijd had om door capillaire werking te worden opgenomen. Daarenboven was de grond in de drainbakken niet begroeid, daardoor vochtiger, zoodat na neerslag opname van water door capillaire ruimten minder plaats kon vinden.

Of in de natuur het water voornamelijk door gangen dan wel door capillaire ruimten naar beneden zakt, zal afhangen van:

1°. de hoeveelheid neerslag. Is deze in een bepaalden tijd gering, dan zal, moge ook het water zich eerst voornamelijk in gangen naar beneden bewegen, het na korten tijd door de wanden der gangen capillair worden opgenomen. Is de hoeveelheid neerslag groot, dan zal zelfs al het water tenslotte, zonder capillair te worden opgenomen, in de gangen naar beneden kunnen zakken.

2°. de textuur van den grond. In een grofkorreligen grond zal het water, dat in gangen afzakt, spoediger de wanden van de gangen binnendringen dan in een fijnkorreligen grond. Daar bovendien de gangen in den grofkorreligen grond eerder zullen invallen, zal de afzakking van water dan ook voornamelijk geschieden in de capillaire ruimten.

Bereikt het water, in de gangen afzakkend, een vrij phreatisch oppervlak, dan zal het direct tot de stijging daarvan bijdragen, om daarna geleidelijk het ingesloten phreatisch oppervlak te doen stijgen; die beide stijgingen hebben weer capillaire opstijging ten gevolge. Dit verschijnsel zal zich uiteraard alleen dan spoedig merkbaar voordoen, zoo het phreatisch oppervlak ondiep gelegen is.

Het in de capillairen afzakkende water vormt op zijn weg naar beneden sejuncties en het wordt, door zijn geringe snelheid, relatief meer door plantenwortels opgenomen. Zoodra het capillair oppervlak wordt bereikt, gaat daarmede onmiddellijk een verhooging van het phreatisch oppervlak gepaard en wel een even groote als die van het capillair oppervlak.

In 't algemeen kan dus gezegd worden, dat door de aanwezigheid van gangen het afzakken van het water wordt bevorderd en de capillaire opstijging niet wordt belemmerd.

Ten slotte worden nog de holten in den grond beschouwd. Holten zijn, zooals in de Inleiding reeds is gezegd, op te vatten als niet-capillaire ruimten, die slechts door capillaire ruimten met de atmosfeer in verbinding staan. Zijn holten met lucht gevuld, dan zullen zij, noch bij daling, noch bij stijging van water in de omringende capillaire ruimten, met water worden gevuld. De eenige mogelijkheid van vulling met water der holten is, dat zij ontstaan zijn uit gangen, die, terwijl zij met water zijn gevuld, invallen. Vindt daarna een daling van het phreatisch oppervlak plaats beneden de plaatsen, waar de holten voorkomen, dan blijven zij gevuld met water, zoolang zij zich in de capillaire zône bevinden. Daalt echter het phreatisch oppervlak zoo ver, dat het capillair oppervlak de holten bereikt, dan wordt het water aan de holten onttrokken. Bijgevolg zijn met water gevulde holten op te vatten als kleine waterreservoirs en zij kunnen als zoodanig aan de watervoorziening der planten ten goede komen. De altijd voortdurende en steeds afwisselende biologische en physische processen in de bovenste grondlagen, waardoor gangen ontstaan en weer verdwijnen, dragen hiertoe bij.

SAMENVATTING.

De capillaire stijghoogte is bepaald door meting van den negatieven capillariteitsdruk met capillarimeters. Daarbij is gebleken, dat de negatieve capillariteitsdruk toeneemt met de dikte van het grondlaagje in den capillarimeter en dat bij een dikte van ten hoogste 20 m.M. een maximum wordt bereikt. De capillariteitsdruk, gemeten bij een uiterst dun grondlaagje, is dienovereenkomstig genoemd de *minimum-negatieve capillariteitsdruk* en die, gemeten bij een grondlaagje van ten hoogste 20 m.M., de *maximum-negatieve capillariteitsdruk*.

Hieruit is afgeleid, dat in een toestand van evenwicht boven het phreatisch oppervlak een capillaire zône bestaanbaar is, waarin

a. vrijwel alle capillaire ruimten met water zijn gevuld;

b. vrijwel alle capillaire ruimten van een laag tot een dikte, bepaald door den minimum-negatieven capillariteitsdruk, met water zijn gevuld, terwijl daarboven het aantal met water gevulde capillaire ruimten geleidelijk afneemt.

Zijn de deeltjes, waaruit de grond is samengesteld, alle even groot, dan zal in een zoodanigen — *homogenen* — grond met de door schr. gebezigde capillarimeters slechts één negatieve capillariteitsdruk kunnen worden gevonden; de dikte van het grondlaagje is bij een homogenen grond niet van invloed. In de capillaire zône van een homogenen grond zullen alle capillaire ruimten met water zijn gevuld.

Een grond bestaat echter in werkelijkheid uit deeltjes, die zeer verschillend van grootte zijn en in een zoodanigen — *heterogenen* — grond moet, zooals is aangetoond, de dikte van het grondlaagje in den capillarimeter van invloed zijn op den gevonden negatieven capillariteitsdruk. De *heterogeniteit* van den grond is dan ook oorzaak, dat zich in de capillaire zône de onder *a* en *b* genoemde gevallen van vulling der capillaire ruimten in werkelijkheid kunnen voordoen.

Na daling van een capillair oppervlak, waarbeneden alle capillaire

ruimten met water zijn gevuld, wordt in den toestand van evenwicht geval *a* verkregen en na stijging van een capillair oppervlak in een nog niet volkomen drogen grond geval *b*.

De heterogeniteit van den grond is verder oorzaak, dat de vulling van *alle* capillaire ruimten met water onmogelijk is, hoe ook die vulling heeft plaats gehad; daarom zijn de beperkingen in de gevallen *a* en *b* vermeld. Het kan daardoor o.a. voorkomen, dat het maximum-watergehalte, nadat water capillair in drogen grond is opgestegen, niet wordt aangetroffen juist boven het phreatisch oppervlak, maar op eenigen afstand daarboven.

De beteekenis van de capillaire opstijging voor de watervoorziening van de cultuurgewassen wordt doorgaans te hoog aangeslagen. Daalt een phreatisch oppervlak, dat aanvankelijk in rusttoestand verkeerde, ten gevolge van een gelijkmatige wateronttrekking over een groote uitgestrektheid overal evenveel, dan is aanvulling van water door capillaire werking van hoegenaamd geen beteekenis. Een zoodanige aanvulling zal practisch slechts van belang zijn in gronden met een grove textuur, indien in totaal een gezamenlijk vrij phreatisch oppervlak (een vrije waterspiegel) van voldoende uitgestrektheid aanwezig is; in gronden met een fijne textuur heeft zelfs dan de aanvulling nog weinig te beteekenen, omdat de capillaire werking te langzaam is.

Dat nochtans aan de capillaire opstijging in woord en in geschrift vrij algemeen een groote waarde wordt toegekend, vindt zijn verklaring wellicht hierin, dat gevolgtrekkingen zijn gemaakt uit verschijnselen, waargenomen in buizen, die met grond gevuld, in water werden geplaatst. Hier immers *moet* merkbare capillaire opstijging wel van een vrij phreatisch oppervlak uit plaats hebben.

Aanvulling van water door funiculaire werking is practisch geheel te verwaarloozen. In zeezand werd in 33 dagen door funiculaire werking ten hoogste een hoeveelheid water verplaatst, overeenkomende met $^1/_{50}$ m.M. neerslag.

Uit een landbouwkundig oogpunt is het van belang te weten over welke hoeveelheden water de cultuurgewassen kunnen beschikken, indien in geenerlei opzicht aanvulling van water plaats vindt. De bovenste laag van den grond, tot zoo diep als de wortels

zich kunnen ontwikkelen, verkeert door het voortdurend ontstaan en verdwijnen van gangen en holten in een geheel anderen toestand dan de daaronder liggende. Is de lucht-capaciteit van den grond op verschillende diepten bekend en tevens de ligging van het phreatisch oppervlak, dan kan door de bepaling van den negatieven capillariteitsdruk (minimum en maximum) een inzicht verkregen worden omtrent de hoeveelheid water, die als reserve dienst kan doen. Door de bepaling van de absolute watercapaciteit van KOPECKY wordt dit inzicht niet verkregen.

Tijdens de daling van water in capillaire ruimten worden, ten gevolge van de heterogeniteit van den grond, *sejuncties* gevormd. Een sejunctie is een hoeveelheid water, die in toestand van rust verkeert en geheel is omgeven door een capillair oppervlak. Vooral voor de watervoorziening van cultuurgewassen op gronden met een grove textuur en met een diep liggend phreatisch oppervlak speelt het sejunctiewater een voorname rol.

In een homogenen grond is de capillaire stijghoogte omgekeerd evenredig met de korrelgrootte. Door microscopische meting van de gronddeeltjes van een 5-tal fracties kon worden uitgemaakt, dat de maximum-negatieve capillariteitsdruk omgekeerd evenredig is met de afmetingen van zoodanige deeltjes, dat het volume van alle kleinere deeltjes $^1/_8$ is van het totale volume, en verder, dat de minimum-negatieve capillariteitsdruk omgekeerd evenredig is met de afmetingen van zoodanige deeltjes, dat het volume van alle grootere deeltjes $^1/_8$ is van het totale volume. Tevens bleek hierbij, dat de volgens de slibanalyse berekende afmetingen der deeltjes belangrijk afwijken van de werkelijke.

Het product van den negatieven capillariteitsdruk en de afmeting van de daarmede correspondeerende gronddeeltjes is constant. De grootte van deze constante is berekend en met behulp hiervan kan, nadat de maximum- en minimum-negatieve capillariteitsdruk zijn bepaald, de grond in een drietal fracties worden ingedeeld.

Dat in drogen grond een minder groote capillaire opstijging wordt geconstateerd dan in vochtigen grond, kan mede zijn oorzaak vinden in de heterogeniteit (fig. 13).

LITERATUUR.

1. E. WOLLNY. Forsch. Geb. Agr. Physik VII, 1884, blz. 280.
2. H. v. KLENZE. Untersuchungen über die kapillare Wasserleitung ... enz. Landw. Jahrb., 1877, blz. 83—131.
3. MÜLLER-POUILLET's Lehrbuch der Physik und Meteorologie, 9e Auflage, Band I, blz. 432.
4. J. VERSLUYS. De capillare werkingen in den bodem. 1916, blz. 1.
5. J. VERSLUYS. De capillare werkingen in den bodem. 1916, blz. 15.
6. (4) blz. 113 en 114.
7. (4) blz. 13.
8. (4) blz. 42.
9. T. v. MAANEN. Tijdschrift Ned. Heide-Mij. 1927, blz. 137—138.
10. MITSCHERLICH. Bodenkunde. 1920, blz. 255.
11. FLEISCHER-VOGLER. Kulturtechnik. Bd. I, T. I. 1909, blz. 141.
12. EHRENBERG. Die Bodenkolloide. 1915, blz. 205.
13. WAHNSCHAFFE UND SCHUCHT. Anl. z. wiss. Bodenunters. 1914, blz. 180.
14. HISSINK. De bodem, blz. 68.
15. HILGARD. Soils. 1921, blz. 228.
16. WAHNSCHAFFE UND SCHUCHT. Anleitung zur wissenschaftlichen Bodenuntersuchung. 1914, blz. 161.
17. HEINRICH. Grundlagen zur Beurteilung der Ackerkrume in Beziehung auf Pflanzenproduktion. 1882, blz. 220.
18. MITSCHERLICH. Bodenkunde. 1920, blz. 149.
19. TULAIKOW. Russ. Journ. f. exp. Landw. 1907, Bd. VIII.
20. (1) blz. 269—306.
21. LOUGHRIDGE. California Station Report. 1892—93, blz. 91.
22. HILGARD. Soils. 1921, blz. 210—211.
23. KRAWKOW. Über die Prozesse der Bewegung des Wassers und der Salzlösungen im Boden. Journ. f. Landw. 48. 1900, blz. 209—222.
24. (1) blz. 294.
25. L. J. BRIGGS and M. H. LAPHAM. The capillary movement of water in dry and moist soils. U. S. Dep. Agr. Bureau of soils. Bull. no. 19, blz. 26.
26. (1) blz. 293.
27. ATTERBERG. Kongl. Landsbruks-Akademiens. Handling och Tidskrift. 1903, blz. 183—253. Landw. Vers. St. 69, 1908, blz. 107—143.

28. (27) blz. 109.
29. (4) blz. 36 e. v.
30. O. W. ISRAELSEN. The Application of Hydrodynamics to Irrigation and Drainage Problems. Hilgardia. Vol. 2, No. 14, 1927, blz. 500—504.
31. (25) blz. 26 e. v.
32. V. G. ROTMISTROW. The nature of drought. Odessa experimental field. 1913.
33. H. A. WADSWORTH and ALFRED SMITH. Some observations upon the effect of the size of the container upon the capillary rise of water through soil columns. Soil Science. Vol. XXII. 1926, blz. 199—213.
34. J. KOPECKY. Die physikalischen Eigenschaften des Bodens. Int. Mitt. für Bodenkunde. Bd. IV. 1914, blz. 138—180.
35. H. BURGER. Die physikalische Bodenuntersuchung, ins besondere die Methode zur Bestimmung der Luftkapazität. Actes de la IVième conférence int. de pédologie. Vol. II, blz. 150—162.
36. H. BURGER. Physikalische Eigenschaften der Wald- und Freilandböden. Mitt. Schweiz. Centralanstalt forstl. Versuchswesen. XIII Bd. 1 Heft. 1922.
37. (4) blz. 39.
38. PUCHNER. Bodenkunde für Landwirte. 1923, blz. 363.
39. RAMANN. Bodenkunde. 1911, blz. 349.
40. Dr. D. J. HISSINK. De methode van het mechanisch grondonderzoek. Versl. v. landbouwk. onderz. der Rijksl.proefstations no. XXXI, 1926, blz. 261.
41. (40) blz. 301—311.
42. W. MC LAUGHLIN. Capillary movement of soil moisture. U. S. Dept. Agr. Bull. 835: 11. 1920.
43. (33).
44. C. V. GAROLA. Etudes sur l'ascension capillaire dans les sols. Annales de la Science Agronomique. 1925, blz. 1—31.
45. (3) blz. 407 en 447.
46. F. H. KING. Principles and conditions of the movement of ground water. 19th Ann. Rep. U. S. G. S. II 1897—98, blz. 86—90.
47. Verslag der Comm. ingesteld bij Besl. v. d. Min. v. Waterstaat d.d. 11 Aug. 1922, tot het instellen van een hernieuwd onderzoek naar de baten, welke van een afsluiting en droogmaking der Zuiderzee verwacht mogen worden. Blz. 76.
48. J. B. LAWES, J. H. GILBERT, R. WARINGTON. On the amount of the rain and drainage-waters collected at Rothamsted. Journ. of the R. A. S. XVII S. S. 1881; blz. 274.
49. J. W. LEATHER. Loss of water from soil. Mem. of the Dept. of Agr. in India. Chem. Series. 1908.