

ÅRSBOK 23 (1929) N:o 1.

OM JORDARTERNAS
KAPILLARITET

EN NY METOD FÖR BESTÄMNING AV KAPILLÄR-
KRAFTEN (ELLER KAPILLÄRA STIGHÖJDEN)

Av

GUNNAR BESKOW

With an English summary:

*On the capillarity of soils. A new method for determining
the capillary pressure (or the capillary rise).*

Pris 1.00 krona.

STOCKHOLM 1930

KUNGL. BOKTRYCKERIET. P. A. NORSTEDT & SÖNER

293068

ÅRSBOK 23 (1929) N:o 1.

OM JORDARTERNAS
KAPILLARITET

EN NY METOD FÖR BESTÄMNING AV KAPILLÄR-
KRAFTEN (ELLER KAPILLÄRA STIGHÖJDEN)

Av

GUNNAR BESKOW

With an English summary:

*On the capillarity of soils. A new method for determining
the capillary pressure (or the capillary rise).*



STOCKHOLM 1930

KUNGL. BOKTRYCKERIET. P. A. NORSTEDT & SÖNER

293068

FÖRORD.

Vid den undersökning av det s. k. tjälproblemet, som på nyåret 1927 påbörjades vid Sveriges geologiska undersökning i samarbete med Svenska väginstitutet och för medel som ställts till förfogande från sistnämnda håll, framstod det, på grund av den dominerande betydelse jordarternas kapillaritet befanns äga för hithörande företeelser, rätt snart som ett viktigt önskemål möjligheten att snabbt och enkelt kunna bestämma även stora kapillära stighöjder, helst på små provkvantiteter. Förf. utarbetade då (våren 1927) den här beskrivna metoden, å vilken sedan en del tekniska detaljförbättringar under försökens gång vidtagits. Metoden har, ehuru med annat tekniskt utförande av apparaturen, sedan två år använts vid Statens Provvningsanstalt för bestämning av kapillariteten hos vägmaterial etc.

FOREWORD.

In connection with the investigation of the frost and thaw problem in the case of roads, which was begun by the Geological Survey of Sweden in co-operation with the Swedish Road Institute (the means for which were supplied by the last-mentioned institution), it soon became apparent — in view of the dominating importance that the capillarity of soils proved itself to possess in connection with various questions relating to the subject — that it was eminently desirable to be able quickly and simply to determine even great capillary rises, preferably by the use of small quantities of soil specimens. The present author then (in the spring of 1927) worked out the method here described, various small technical improvements having been made during the course of the experiments. The method in question, which has been communicated earlier in lectures and instruction courses, has been employed for two years at, *inter alia*, the Government Testing Institute in Stockholm for determining the capillarity of road material etc.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING.

| | Sid. |
|---|------|
| Inledning | 5 |
| Definition av begreppet kapillaritet | 5 |
| Brukliga kapillarimetermetoder | 7 |
| En ny kapillarimetermetod. Metodbeskrivning | 9 |
| Princip | 9 |
| Utförligare beskrivning | 9 |
| Diskussion av jordarternas kapillaritet på grundval av utförda försök | 15 |
| Ensorderade jordar | 19 |
| Förhållandet mellan ensorderade och naturliga (komplexa) jordars kapillaritet | 24 |
| Sammanfattning av försöksresultaten | 33 |
| Det yttre lufttryckets betydelse för kapillariteten | 35 |
| Kapillärrör i vakuum | 36 |
| Jordartspelare i vakuum | 41 |
| Bestämning av kapillariteter > 10 m vid vanligt lufttryck (1 atm.) | 45 |
| Sammanfattning | 53 |
| Kapillaritetens praktiska betydelse | 54 |
| Summary | 58 |
| Litteraturförteckning | 65 |

Inledning.

Definition av begreppet kapillaritet. Som bekant utgör den egenskap hos en jordart, som brukar benämnas jordartens kapillära stighöjd, i själva verket ett mått på en i jordarten under vissa förhållanden verkande kraft,¹ kapillärkraften eller kapillära stignkraften. Denna kraft är lokaliserad i gränsskiktet mellan en jordartens porer utfyllande vätskekvantitet (vanligen vatten) och en intill gränsande gaskvantitet (vanligen luft). (I stället för systemet gas + vätska kan även två med varandra icke blandbara vätskor av olika ytspänning, t. ex. olja och vatten, tänkas.) Själva kraften är en manifestationsform av ytspänningen, och beror på krökningen av gränsytan vätska : gas (resp. vätska : vätska) i de porer, i vilka den nämnda gränsen står. Jordarternas kapillära stignkraft är en funktion dels av en egenskap hos själva jordarten, nämligen dess porstorlek, dels av en egenskap hos den använda vätskan,² nämligen just dennas ytspänning, eller rättare kapillaritetskonstant. Kapillaritetskonstanten $a^2 = \frac{2\alpha}{\delta}$, där $\alpha =$ ytspänningen, mätt i milligram pr mm, och $\delta =$ vätskans täthet. (Chwolson, 1902, sid. 591, 597 o. a.) Såväl a^2 som α minskas med stigande temperatur hos vätskan, för de flesta vätskor enligt en linear funktion, och så att kapillariteten vid vätskans kritiska temperatur är = 0. (Chwolson 1902, sid. 608.) För vatten är a^2 vid $0^\circ = 15.387 \text{ mm}^2$, vid $+15^\circ = 14.969$, vid $+20^\circ = 14.833$, alltså vid rumstemperatur ungefär = 15.

¹ Ur strängt fysikalisk synpunkt är benämningen »kraft» oegentlig — kapillär»kraften» manifesterar sig i själva verket som ett tryck, d. v. s. »kraft per ytenhet». På vätskan i kapillärerna är trycket negativt (= undertryck, »sugning»), och denna sugning uppstår omedelbart under den konkava vätskeytan (menisken) i kapillären. På det fasta kapillärssystemet verkar kapillärkraften däremot som ett lika starkt positivt (kompressivt) tryck. Tänker man sig ett jämntjockt kapillärrör med en vattenpelare mitt i, så komma denna vattenpelares båda menisker att utöva en lika stor dragnig på vattenpelaren åt var sitt håll, d. v. s. ett undertryck uppstår i vattnet. Rördelen mellan meniskerna utsättes för precis samma hopklämmande (positiva) tryck. Motsvarande gäller för t. ex. en torkande lera. Eller om man tänker sig ett vertikalt kapillärrör, vilket håller en vattenpelare upplyft till viss höjd; vattenpelaren »hänges» på menisken och utövar omedelbart under denna en hydrostatisk dragnig (= sugning) motsvarande dess höjd. Kapillärröret utsättes för motsvarande kompressiva tryck. På motsvarande sätt blir t. ex. i en sandpelare, vilken håller vatten kapillärt upplyft, trycket på sandkornen t. ex. i en punkt nära ytan icke lika med det obetydliga belastningstrycket av överliggande sand, utan detta tryck plus belastningstrycket av den kapillärt upplyfta (i ytan hängande) vattenpelaren — ett sakförhållande, som även framträder i sandens olika bärighet vid olika vattenförhållanden.

² Systemet vätska + luft förutsättes i det följande.

Kapillärphenomen låta sig ju bäst studeras i rör eller planparallella springor. Villkoret för att en kapillär stigning skall äga rum är, att kapillärtrumets yta skall vara av ett material, som låter fukta sig av ifrågavarande vätska. I de fall, där nämnda material fullkomligt fuktas av vätskan, blir kapillära stighöjden oberoende av materialets karaktär f. ö. Så låter sig t. ex. glas, trä, olika metaller och mineral, alltså även bergarter, fullkomligt fuktas av vatten (under förutsättning att ytan är fullt ren, alltså ej överdragen av ett tunt skikt av fett, harts el. dyl.); vattnets kapillära stighöjd i ett kapillär rör av något dylikt material är oberoende av materialets karaktär, och endast beroende av rörets vidd (samt vattnets temperatur).

Stighöjden i ett kapillär rör är omvänt proportionell mot vidden, direkt proportionell mot vätskans kapillaritetskonstant, så att stighöjden (h) är $h = \frac{a^2}{r}$, där r = kapillär rørets radie i mm. Kapillaritetskonstanten är alltså = vätskans stighöjd i ett kapillär rör med 1 mm radie.¹

För en planparallell springa är formeln:

$$H = \frac{a^2}{d},$$

där d = avståndet mellan väggarna.

För en jordart äro förhållandena väsentligt komplicerade; »kapillär» eller porsystemet i en jordart är ju ytterst oregelbundet, med till storlek och form starkt växlande, av mer eller mindre förträngda passager förbundna hålrum. Likväl kan man tala om en genomsnittlig porstorlek hos jordarten, vilken varierar i samma riktning som den genomsnittliga kornstorleken och vid lika sorteringsgrad och partikelform är direkt proportionell mot denna. Därjämte har den kapillära stighöjden befunnits variera i omvänd riktning mot por- och kornstorlek.

Atterbergs (1903) kapillaritetsbestämningar å renslammat material visa en synnerligen regelbunden ökning av kapillära stighöjden med minskad kornstorlek; likaså Wollnys (1884, S. 269 ff.) bestämningar; för naturliga jordar visa S. Johanssons (1913) försök en i stort sett rådande motsvarande avhängighet för stighöjden av genomsnittliga kornstorleken.

¹ Som kapillaritetskonstant betecknas av olika förf. två olika storheter: 1) Ytspänningen = α , vilken är den på längdenheten av en tänkt linje på en vätskeyta verkande, vinkelrätt mot densamma riktade spänningen. α kan uttryckas i mgr/mm eller dyn/cm. 2) Storheten a^2 (specifika kohesionen); $a^2 = \frac{2\alpha}{\delta}$, där δ = vätskans specifika vikt. Kapillära stighöjden h är $[h] = \frac{2\alpha}{\delta r} = \frac{a^2}{r}$; $a^2 = rh$.

I detta arbete betecknas a^2 som kapillaritetskonstanten. Mitscherlich (1913) anger å sid. 123 $rh =$ dubbla kapillaritetskonstanten γ ($rh = 2\gamma$), varvid kapillaritetskonstanten (γ) för vatten anges till $\frac{15}{2}$; å sid. 136 anges för vattnets kapillaritetskonstant vid temperaturerna 0—30° 15.41—14.56 (utan decimaler = 15), vilka senare värden äro de för kapillaritetskonstanten a^2 bestämda. Denna nomenklatureogentlighet synes böra påpekas; den å sid. 123 använda »kapillaritetskonstanten» γ , vilken är hälften så stor som kapillaritetskonstanten å sid. 136 (utan att någon åtskillnad mellan de båda konstanterna göres) skall förmodligen vara den Gauss'ska konstanten = $\frac{a^2}{2}$.

Formeln för kapillära stighöjden i en jordart kan alltså antagas äga en viss likhet med den för kapillär rör gällande, och kan förslagsvis skrivas:

$$H = p_d \cdot \frac{a^2}{d},$$

där d = genomsnittlig porstorlek (eller kornstorlek), p_d en storhet, vilken antages variera med olika sorteringsgrad och kornstorlek, dock så att produkten $p_d \cdot \frac{a^2}{d}$ växer med avtagande d . För lika sorteringsgrad kan p_d med stor sannolikhet förmodas vara en konstant.

Kapillaritetskonstanten a^2 äger för vatten följande värden:¹

| | | | | | | | | |
|----------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $t = 0^\circ$ | 5° | 10° | 15° | 20° | 25° | 30° | 35° | 40° |
| $a^2 = 15.406$ | 15.251 | 15.105 | 14.959 | 14.821 | 14.686 | 14.556 | 14.424 | 14.295 |

Som av tabellen framgår, kan a^2 för rumstemperatur betraktas som tämligen konstant, och avrundat = 15.

Brukliga kapillarmetermetoder. Vid de metoder som använts för bestämning av en jordarts kapillärkraft, har i vanliga fall kraften mätts genom den maximala höjd, vartill en av kapillärkraften upplyft vattenpelare i jordarten nått, d. v. s. då full jämvikt mellan kapillärkraften och den upplyfta vattenpelarens hydrostatiska motkraft inträtt. I vanliga fall har därvid vattenpelaren till hela sin höjd varit belägen i jordarten, d. v. s. måst stiga genom en jordartspelare av en höjd = hela kapillära stighöjden.

Denna metod med direkt kapillär stigning i jordfyllt rör äger sin största lämplighet för grövre sandjordar. Den hastighet, varmed vattnet stiger i en jordpelare, avtar ju mycket snabbt ju mer vattenytan närmar sig den maximala stighöjden, då dels motståndet ökas direkt proportionellt mot pelarens höjd, dels drivkraften avtager.

Den drivande kraften (k) i ett visst moment av den kapillära stigningen är

$$k = h - l,$$

där h = maximal kapillär stighöjd, l = pelarhöjd.

Motståndet (M), är

$$M = m \cdot l,$$

där m är en för jordarten vid viss packning (och temperatur) karakteristisk storhet = jordartens specifika motstånd mot vattenströmning; där ingår även vattnets viskositetskoefficient.

Vattnets stighastighet (P) är

$$P = \frac{k}{M} = \frac{h - l}{m \cdot l}$$

Man ser, att, då l närmar sig värdet h , avtar P mycket hastigt; teoretiskt uppnås aldrig gränsvärdet $l = h$, utan kurvan närmar sig asymptotiskt linjen

¹ Efter Volkmann. Ref. Landolt-Börnstein, Phys. Chem. Tab., 5. Aufl.

$y = h$, d. v. s. det åsyftade slutliga stabila jämviktsläget uppnås först efter oändligt lång tid. För sandjordar uppnås emellertid som nämnt praktiskt taget fullständig jämvikt efter måttlig stigtid; redan för grovmo visar emellertid t. ex. Atterbergs försök (med kornfraktionen 0.1—0.05 mm) en utomordentligt lång erforderlig stigtid (72 dygn); för finmo (0.05—0.02 mm) kunde icke den slutliga kapillära stighöjden bestämmas. De nackdelar, som vidlåder denna metod, när det gäller finare jordarter, äro alltså ett erforderligt tidsmoment, som genom sin längd praktiskt taget omöjliggör bestämningarna för jordarter finare än grovmo, samt apparatursvårigheter, i det att stigrör av mycket stora längder och förhållandevis stora kvantiteter jordart erfordras.

En väsentlig teoretisk och praktisk vinst innebär J. Versluys metod (1916). Den till hela sin längd i jordarten stående vätskepelaren ersättes här av en till större delen fri vätskepelare (tidsvinst), varjämte en stor del av vattenpelaren ersättes av en kvicksilverpelare (lätthanterligare apparatur). Metoden innebär i korthet följande: Ett u-böjt glasrörs ena längre skänkel avslutas av en tratt, i vilken jordarten vilar på en grövre buffertjord. I u-rörets nedre del är kvicksilver påfyllt, varjämte rörets korta skänkel är utvidgad och tjänar som kvicksilverreservoir. Den längre skänkeln är vattenfylld ända upp till den kapillärt vattenmättade jordarten. Vid avdunstning från jordartens i tratten yta uppsuges vatten underifrån, varvid vattenpelarens underyta och därmed kvicksilverpelarens överyta stiger i det långa skänkelröret, tills det hydrostatiska trycket av kvicksilver + vatten motsvarar jordartens kapillära stigkraft, och stillestånd inträder.

Av mycket stort intresse är en av S. Johansson (1913) mer i förbigående, i samband med permeabilitetsförsök, föreslagen metod. »Kapillaritetens» egenkap av en i jordarten lokaliserad kraft kommer här till klart uttryck: vid permeabilitetsförsök å sandjord låter J. kapillärkraften addera sig till vätskepelarens hydrostatiska tryck, och observerar skillnaden i genomströmnings-hastighet i de fall, då kapillärkraften är verksam, och då den icke är verksam; då det hydrostatiska trycket är känt, erhålles härav kapillärkraften.

Med dessa metoder har emellertid, så vitt förf. har sig bekant, inga bestämningar av större kapillära stighöjder utförts, än de av Atterberg genom den direkta stigmetoden bestämda. Ehuru metoderna i många avseenden innebära väsentliga förbättringar, synas likväl vissa nackdelar vidlåda dem, särskilt just när det gäller finkornigare jordarter. Här är dock icke platsen att ingå på en närmare kritik av dessa metoders fördelar och nackdelar. Versluys' metod, som även försökts av S. Johansson, erfordrar, som av V:s citerade avhandling framgår, relativt lång tid och erbjuder ofta vissa svårigheter vid jordarternas packning; S. Johanssons föreslagna och på sandjordar utförda metod har sedermera av honom ej använts; det är dock att vänta, att för finkornigare jordar den nödvändiga packningen i torrt eller halvtorrt tillstånd kommer att orsaka svårigheter, varjämte, på grund av den rätt stora roll observationsfelen här spela, resultatet blir mindre exakt.

Speciellt för undersökningar av tjälskjutande jordar i Norrland har under-teknad utarbetat följande metod för kapillaritetsbestämning.

En ny kapillarmetermetod. Metodbeskrivning.

Princip.

I ett glaskärl *a* vilar på en buffert av grövre jord eller metallträdsduk + filterpapper den jordart, vars kapillära stighöjd skall bestämmas. Glaskärlat *a* är lufttätt inpassad i halsen till en skiljetratt *b*, vilken nedtill med en gummislang är förbunden med en höj- och sänkbar skiljetratt *c*. Skiljetrattarna *b* och *c* äro vätskebehållare; vid försökets igångsättande hålles vattenpelaren i *b* ända upp till jordarten, vilken är kapillärt vattenfylld. Metoden innebär nu, att man successivt sänker skiljetratten *c*, till dess det läge passerats, då höjdskillnaden mellan de båda vätskeytorna (= undertrycket) motsvarar jordartens kapillära stighöjd. Vid sänkningen under detta läge har undertrycket blivit större än kapillära stighöjden, och denna kan ej längre uppbära vattenpelaren, utan vätskepelaren börjar sänka sig, och då den kapillära vattenytan nått jordprovets underkant, bryter luften »plötsligt» igenom. Observationerna av peltorhöjden (höjdskillnaden mellan jordprovets underkant och vätskeytan i *c*) vid det läge då genom brott ägde rum och näst föregående höjdläge ge två gränser, mellan vilka kapillära stighöjden ligger. Genom förnyad bestämning med helt små sänkningar inom detta intervall kan värdet för kapillära stighöjden inneslutas mellan varandra mycket nära liggande gränser, d. v. s. ett mycket noggrant värde erhålles.

Vid bestämningen av större kapillära stighöjder ersättes vidare vattenpelaren till största delen av en kvicksilverpelare, varigenom apparaturens ringa storlek och lätthanterlighet bibehålles.

Utförligare beskrivning.

Apparaturen (fig. 1). Cylindriska skiljetrattar av 100—200 cm³ volym har använts, och torde för laboratoriemässiga bestämningar vara de lämpligaste. Då kvicksilver i de flesta fall användes, är det önskligt, att kvicksilvernivåerna i skiljetrattarna ej för mycket ändras, om volymändring i vattensystemet över kvicksilvret i skiljetratt *b* äger rum (ofta kvarstår någon luftblåsa t. ex. under jordprovet, och denna utvidgar sig starkt vid det minskade trycket); skiljetrattarna böra därför helst vara vida. Avläsningen sker på en fast, mm-graderad skala, mot vilken bägge kvicksilverytorna böra kunna avläsas. Slangen, som förenar skiljetrattarna, bör vara mycket tjockväggad (= vacuumslang), så att det varierande kvicksilvertrycket ej åstadkommer för stora volymförändringar i själva slangen.

Den glasbehållare, i vilken jordprovet inneslutes, kan vid bestämning av jordarter, där icke större kornstorleksfraktioner än fint grus ingå, lämpligen vara

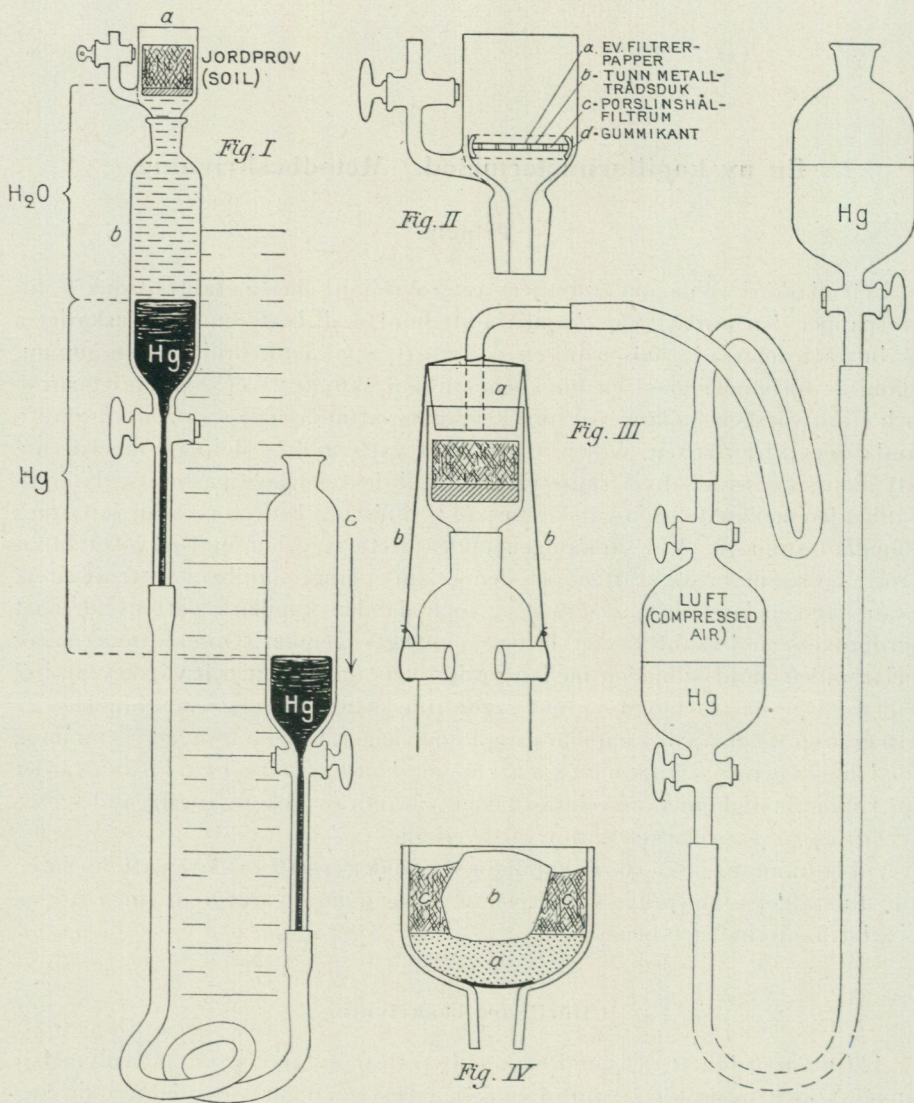


Fig. 1. Apparatur för kapillaritetsbestämning (förf:s metod). Fig. I är normalapparaturen, fig. II en detaljbild av provbehållaren. Fig. IV visar anordningen vid bestämning av kapillariteten hos ett stycke orubbad, naturligt lagrad jord. Fig. III visar anordningen med övertryck vid bestämning av kapillära stghöjder > 9.5 m.

Fig. II: a = eventuellt filterpapper. c = porcelinshålfiltrum.
b = tunn metalltrådsduk d = gummikant.

Fig. 1. Apparatus for the determination of capillarity (author's method). Fig. I is the normal apparatus, fig. II a detail-picture of the specimen-container. Fig. IV shows the arrangement for the determination of the capillarity of a piece of undisturbed, natural soil. Fig. III shows the arrangement with compression for the determination of capillarities greater than 9.5 metres.

Fig. II: a = filter paper (if desirable). c = perforated porcelain filter.
b = thin metal gauze. d = rubber edging.

Fig. IV: a = sand bed.
b = soil specimen.
c = stiff clay.

så liten som 2—2.5 cm i inre diameter och c:a 2—3 cm i höjd (måttan gälla den cylindriska delen). Lämpligast är om det grova rör, varmed den nedtill avslutas, är inslipat att passa i skiljetrattens hals; en genomborrad gummipropp kan givetvis även användas. Ett litet krånör, vilket är fäst omedelbart under den nivå, där den raka cylinderns trattformiga böjning börjar, och vilket alltså kommer att utmytna omedelbart under buffertbädden (se fig. 1), är ytterst lämpligt ehuru på intet sätt nödvändigt.

Buffertanordningen kan utföras på olika sätt. Man kan som buffert använda en sandbädd, vilken vilar på ett metalltrådsnät i trattförträngningens mynning; eventuellt kan sandbädden täckas av filterpapper. Ännu bättre är likväl om sandbädden täckes av fin metalltrådsduk, vilken t. ex. genom en gummiring hålles fastklämd över sanden; på så sätt kan jordprovet mellan de skilda försöken å samma prov omröras och ompackas utan att sanden inkommer i provet. En liknande buffertanordning utan användande av sand är önskvärd isynnerhet i de fall, då permeabilitetsbestämning skall utföras å samma, orörda prov. Denna buffertanordning består av ett litet porslinshålfiltrum, täckt av finaste metalltrådsduk (ett eller flera lager), omgiven av en gummiring (t. ex. skuren av en grov gummislang), så att den sluter tätt mot rörets sidor. Om jordarten i avsevärd mängd passerar igenom nätet, täckes detta med tunt filterpapper.

Särskilt vid bestämning av jordarter med hög kapillär stighöjd bör vattnet (destillerat vatten bör helst användas) före försöket kokas för bortdrivande av lösta gaser. I vattenpelaren under jordprovet härskar ju under försökets gång undertryck, varför gasblåsor eljest urskiljas ur vattnet, och denna gaskvantitet utvidgar sig mycket starkt vid det låga tryck, som till slut blir rådande, något som givetvis innebär en olägenhet, i det att den eljest fixa, övre kvicksilverytan även sjunker, och även dess läge på nytt måste avläsas varje gång den rörliga kolven sänkes.

Packningen av jordarten är givetvis en mycket viktig procedur. Då kapillära stighöjden blir olika, beroende på hur tätt partiklarna ligga, d. v. s. på packningen, är det nödvändigt att finna en någorlunda objektiv packningsmetod, så att jämförbara värden vid olika bestämningar erhålles. Vid försök har förf. funnit, att om jordarten packas starkt vattenmättad, vid grötlik konsistens, och därpå det överflödiga vattnet långsamt suges ut med användande av mycket ringa undertryck (motsv. c:a 10—30 cm vatten, för resp. finmo och mellanlera), erhålles vid upprepade försök å samma jordart ett i det allra närmaste konstant värde å kapillära stighöjden, d. v. s. packningen efter denna försiktiga utsugning blir i det närmaste konstant, oberoende av ganska stora variationer i den ursprungliga vattenhalten.

Användes starkt undertryck vid överskottsvattnets utdragande, blir genomströmningshastigheten så stor, att de finare jordartspartiklarna medryckas och igenslamma porerna, varigenom en högre kapillär stighöjd erhålles. Har man två prov av samma jordart, som packas vid olika överskottsvattenhalt, och man verkställer utsugningen vid mycket ringa undertryck, visar det v a t a s t packade provet något l ä g r e kapillär stighöjd än det vattenfattigare, beroende på den även efter utsugningen något glesare packningen. Sker utsug-

ningen hastigt, med stort undertryck, visar den ursprungligt våtaste jordarten däremot större kapillär stighöjd än den andra, beroende på att den ovannämnda igenslamningen av porerna blivit kraftigast i det vattenrikaste provet. Igenslamningen sker lättare, ju mer sorterad jordarten är; vid bestämningar å ensorterade kornfraktioner erhålles samma värde på kapillära stighöjden oberoende av utsugningshastigheten, givetvis emedan ingen igenslamning här kan äga rum.

Bestämningen av en finare jordarts kapillära stighöjd sker nu på följande sätt: Sedan jordprovet packats, hållas för säkerhets skull några droppar vatten på dess överyta, och utsugningen vid ringa undertryck börjar. När denna är färdig, d. v. s. när jordprovets yta ej längre är blank av fri fuktighet, och intet svagt slambemängt vatten mer strömmar ur provet, sänkes den rörliga skiljetratten stegvis med rätt stora belopp varje gång (t. ex. 4—8 cm),¹ och får i varje läge kvarstanna någon minut.²

Plötsligt suges så luften igenom jordprovet, vätskeytorna sjunka och ett hastigt växande luftrum uppträder under jordprovet. Kranarna tillvidras, den rörliga skiljetratten höjes så att vattnet på nytt kan pressas uppåt, kranröret på provbehållaren och därefter skiljetrattskranarna (-kranen) öppnas, och vattnet får stiga, tills det på nytt nått jordprovet.

Den noggrannare bestämningen skall nu äga rum inom det intervall, som ligger mellan sänkningslägena omedelbart före och efter genombrottet. Emellertid är det säkrast att börja precisionsbestämningen vid något mindre undertryck än det sista före genombrottet. Det kan hända, att undertrycket vid detta senare läge ytterst obetydligt överstigit kapillära stignkraften, och att tidsmomentet varit för kort för att den verksamma ringa överkraften skulle ha hunnit draga vattenpelaren ur jordprovet. Emellertid lär man sig snart av utsugningshastigheten och tiden från sista sänkning till genombrottet att bedöma ungefär var inom det givna intervallet kapillära stighöjden ligger. För säkerhets skull bör dock som nämnt den noggranna bestämningen börja med ett par cm kvicksilver mindre undertryck än undergränsen för det givna intervallet. Sänkningarna upprepas nu som förut, med ett belopp av t. ex. $\frac{1}{2}$, 1 eller 2 cm per gång, beroende på hur stor noggrannhet som önskas. Om tidsmomentet vid varje sänkning vore oändligt, låge ju kapillära stighöjden med absolut säkerhet inom det t. ex. endast en halv cm kvicksilver breda intervallet mellan sista och näst sista läget. Nu kan ju som nämnt kapillära stighöjden i så ringa grad överskrida ett visst tryckläge, att intet genombrott sker vid begränsat tidsmoment. Ju längre tidsmomentet är, desto mindre blir detta möjliga fel, d. v. s. noggrannheten växer med ökad tid mellan sänkningarna. Ju tätare jordarten är, desto längre tid kräves även. Även vid de tätaste jordar, som med denna apparatur kunna bestämmas, med en stignkraft på upp till 9 m vatten,

¹ Kviksilver förutsättes använt.

² Gäller det en finare mjåla eller lättlera är visserligen kapillära stighöjden så stor, att det kan förefalla överflödigt att utföra några försök på så låga undertryck som de första decimeterna kvicksilver. Emellertid hoppessas dessa jordarter något vid ökad belastning, varvid något vatten utdrages; för att hindra igenslamning är det därför rådligt att även här verkställa sänkningarna successivt även i början, ehuru avstånden kunna tagas större och intervallen kortare.

har dock icke längre tidsmoment än högst 3 min. brukat användas; felet är likväld mindre än 1 cm kvicksilver. För grövre jordar använder jag i regel 1—2 min., beroende på grovleken, och det möjliga felet uppgår till allenast några mm kvicksilver. För man dessutom anteckningar över tiden samt den tid, som erfordras för genombrottet, kan man, som ovan antytts, med ganska stor sannolikhet fixera stighöjdens läge inom eller något utanför det givna intervallet.

De protokoll, som förts vid undersökningarna, ha varit av följande typ:

| | | |
|--|-----------|---------------------------------|
| $H_2O = 12 \text{ cm}$ | | |
| Hg | Hg | |
| + 59.3 | + 38.3 | 1 min. |
| | 37.3 | 1 > |
| | 36.3 | 1 ¹ / ₂ > |
| | 35.3 | > > |
| + 59.2 | 34.3 | > > |
| | 33.2 = 26 | > > |
| | 32.2 = 27 | Genombrott efter 5 sek. |
| Kap. stigh. = 12 + 26 · 13.6 = 366 cm H_2O . | | |
| Avrundas till 365 cm H_2O . | | |

Vattenpelarens över kvicksilverytan höjd har uppmätts till 12 cm. Med Hg betecknas avläsningarna av kvicksilverytorna mot skalan, vilken här är graderad underifrån. Den högra kolumnen markerar givetvis den rörliga kolvens kvicksilveryta; den andra är ju fix. Emellertid har denna sjunkit något (1 mm) under försökets lopp, vilket beror på att en luftblåsa står under jordpelaren och denna vid ökat undertryck utvidgar sig.

Genombrottet ägde rum mycket snart efter sista sänkning. Överkraften var alltså stor; kapillära stigmaten torde motsvara det föregående läget, eller t. o. m. vara någon mm kvicksilver lägre än detta tryck. Som värde på kapillära stighöjden är detta läge (intervallets undre gräns) antagen. $[K = 12 + (59.2 - 33.2) 13.6 = 366 \text{ cm } H_2O]$.

Felmarginal. Felmarginalen vid denna bestämningsgrad beror väsentligen på en ofrånkomlig olikhet i packningsgrad vid olika tillfällen. Upprepade försök å olika jordarter ha givit vid handen, att, om de ovan angivna reglerna för packningen någorlunda iakttagas, värdena för välsorterade jordar falla inom en variationsmarginal av högst ± 5 % bredd — för moräner kan amplituden bli upp till 20 à 30 %. Vid något större noggrannhet vid packningen minska variationerna väsentligt, ned till ± 2 %. $\pm (3 \text{ à } 4)$ % torde få betraktas som normala variationsbelopp. Påpekas bör, att detta icke får betraktas som en verklig felmarginal — den vid en viss packningsgrad existerande kapillära stighöjden kan fastställas med en större noggrannhet — utan som en *v a r i a t i o n s m a r g i n a l* beroende därpå, att ett och samma jordartssystem ur kapillari-tetssynpunkt är något variabelt, beroende på omöjligheten att erhålla absolut konstant packningsgrad. En dylik variabilitet skulle med visshet göra sig gällande även vid upprepade bestämmingar med direkta stigobservationsmetoden.

Till denna variation kommer den grad av noggrannhet, varmed bestämningen utförts, alltså felamplituden för själva metoden. Noggrannheten kan ju här göras hur stor som helst — i vanliga fall hålles ju dock amplituden rätt betydande, i regel ett par %. Felen kunna ju addera sig med maximalbelopp, och vid en packningsvariation av 4 % och ett observationsfel av 2 % blir totala möjliga osäkerheten 6 % — ehuru sannolikheten för att denna felgräns skall tangeras är mycket starkt förminskad.

För vinnande av ökad säkerhet kunna lämpligen flera bestämningar utföras. Ur dem framgår den för jordarten ifråga gällande variationsamplituden vid olika packning; om värdena efter andra och tredje bestämningen nära överensstämma med varandra, anger medeltalet med stor visshet ett synnerligen exakt värde; äro variationerna betydande, böra flera bestämningar utföras. Den sannolika säkerheten kan i de olika fallen beräknas ur de vanliga formlerna för sannolikhetskalkyl.

Utföres — utom förbestämningen — endast en noggrann bestämning, kan resultatet anges med en säkerhetsmarginal = \pm (5 à 6) %; en kontrollbestämning är alltid önskvärd, och efter denna kan i regel felmarginalen reduceras till åtminstone \pm 3 %.

Den tid, som erfordras för en fullständig kapillaritetsbestämning — grovbestämning och en noggrann bestämning inklusive packning av provet, — är, efter någon vana vid metoden, mycket ringa — för grövre jordarter en halvtimme, för finare jordar en timma, eventuellt något längre för de stora stigmakrafterna av upp mot $9\frac{1}{2}$ m.

Den angivna gränsen för de kapillära stighöjder, som med denna metod kunna bestämmas — c:a $9\frac{1}{2}$ m — är snävare än den teoretiska. Gränsen för det möjliga undertrycket är ju lufttrycket, som, om bestämningen utföres å ort nära havsytan, i medeltal är 1 atm. minus vattenångans tryck vid den rådande temperaturen (vid rumstemperatur något över 0.02 atm.). Undertryck på upp till 10 m vatten skulle alltså kunna erhållas, innan ett av vattenånga fyllt, växande vakuum utbildades över vattenpelaren. Emellertid äro smärre luftblåsor under jordprovet, och framförallt i själva jordprovet så gott som omöjliga att undvika, och vid det låga trycket utvidgar sig denna luftkvantitet så starkt, att kvicksilvret uttränges ur den övre kolven.

Stighöjder över $9\frac{1}{2}$ m kunna emellertid bestämmas med principiellt samma metod, endast att i stället för, eller kombinerat med undertrycket under jordarten ett övertryck över densamma insättes. Vad som eftersträvas är ju en hydrostatisk tryckskillnad för jordprovets över- och undersida = kapillära stigmakraften. Genom ett lufttätt vid provbehållaren upptill anslutet rör tillföres luft från en pumpanordning — t. ex. en kvicksilverpump —, och övertrycket mätes medelst en manometer. Användes kvicksilverpump, kan själva kvicksilverpumpen tjänstgöra som manometer, i det att höjdskillnaden mellan kvicksilverytorna i det öppna systemet anger trycket (Fig. 1: III).

Vid den i det föregående beskrivna apparaturen har trycket på översidan hållits konstant = atmosfärstryck, och trycket under jordarten successivt minskats. I det senare fallet kan antingen ett konstant undertryck eller också

intet undertryck alls användas, och den stegvisa ökningen hänföra sig till övertrycket, eller också ett visst, konstant övertryck införs, och variationerna åstadkommas medelst undertrycket, varvid detta, för större variationsområdes vinnande, kan varieras från ett motverkande övertryck, med högt belägen rörlig kolv, via nollläget till vanligt undertryck.

I ovanstående beskrivning är bestämningen skildrad som utförd allenast å omrört, sekundärt packat prov. Metoden kan även med största fördel användas för bestämning av kapillära stignakten hos naturligt lagrad, orubbad jord, även med bibehållen fuktighetshalt. Man uttager på något sätt ett provstycke av jordarten, vilket förpackas i lufttätt tillslutet kärl. Vid bestämningen av kapillära stighöjden användes här ett något vidare provkärl (fig. 1: IV) med en inre diameter av 3.5—4 cm, en höjd av 2—3 cm; i botten på detta är en bädd av fuktig, fin sand (a) anbringad. Jordstycket (b) nedskäres till lämplig storlek — däremot kan formen vara helt oregelbunden — och lägges på sandbädden, så att en ordentlig yta av jordprovet är i beröring med sanden, eller en del av jordstycket är något nedpressad i sanden. På sanden hålles vatten, så att denna blir kapillärt mättad och t. o. m. täckes av något överskottsvatten; därefter kringpackas jordprovet försiktigt med någon lämplig plastisk, tät massa (c). Lämpligast har förf. funnit styv lera vara. Denna hålles vid mjukt plastisk — dock ej grötaktig — konsistens, placeras i små portioner på sandbädden mellan jordprovet och glaskärlets väggar, så att en tät intill jordprov och väggar slutande, på sandbädden vilande, sammanhängande lermassa erhålles. Jordprovets översta del måste däremot vara fri. På det kapillärt mättade jordprovets översida hålles för säkerhets skull ett par droppar vatten, och bestämningen utföres på samma sätt som förut är skildrad.

Beträffande den använda leran är att påpeka, att denna måste vara styvare, eller rättare äga större kapillär stighöjd än den jordart, som den omsluter, och vars kapillära stighöjd skall bestämmas. Vilken någorlunda styv lera som helst duger emellertid för de bestämningar, som utföres å den vanliga apparaturen med endast undertryck och en verkningsgrad av högst 10 m.

Diskussion av jordarternas kapillaritet på grundval av utförda försök.

Det har ovan påpekats, att kapillära stighöjden ej är en för en viss jordart absolut konstant storhet, utan att den dels, ehuru till mycket ringa belopp, varierar med temperaturen, dels, och i mycket hög grad, beror på jordartens packningsgrad.

Men även vid viss packning och viss temperatur är det att vänta, att kapillära stighöjden hos en jordart ej är en fullkomligt skarpt begränsad storhet. Dels är i en naturlig jordart de olika porernas storlek och form olika, dels kan i ett sådant komplicerat kapillärsystem en skillnad förefinnas mellan den kapillaritet, som erhålles, om vattnet får stiga, och den, som erhålles, om det får sjunka till jämviktsläget, motsvarande den skillnad, som oregelbundna kapillär rör visa.

En väsentlig teoretisk olikhet mellan den vanliga stigmetoden och författarens metod ligger just däri, att i det förra fallet en stigning till jämviktsläget äger rum, i det senare en sänkning (nedsugning) i ett till högre nivå vattenfyllt system. För att belysa en del hithörande frågor utföres följande försök:

Ett rör för vanlig kapillär stigning sammansattes av ett stort antal korta rördelar, sammanfogade medelst gummiringar kring skarvarna, så att ett fullkomligt tätt, lätt delbart system erhöles. Det vertikalt hållna röret fylldes med fin sand, vars kapillära stighöjd förut var bestämd genom förf:s metod. Rörets längd togs så stor, att den avsevärt översteg jordartens kapillära stighöjd. Jordpelaren vattenfylldes ända upp, och vattnet fick därefter fritt sjunka, tills ingen märkbar ändring i den kapillära vattenpelarens läge kunde förmärkas,

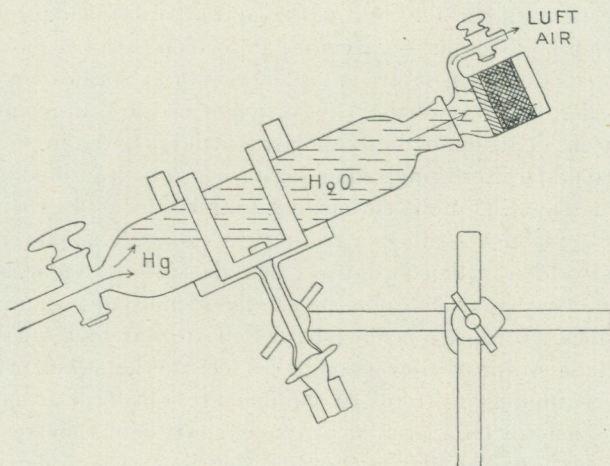


Fig. 2. Hur luften under jordprovbehållaren utdrives för förnyad kapillaritetsbestämning, genom att bringa den övre skiljetratten i nästan vågrätt läge och med provbehållarens öppnade kranrör uppåt hålla ett måttligt övertryck.

Fig. 2. Showing how the air under the specimen-container is driven out for a fresh determination, by bringing the upper separatory funnel into an almost horizontal position and maintaining a moderate compression, with the opened cock of the container turned upwards.

och alltså jämvikt inträtt. Röret söndertogs därefter försiktigt, och fuktighetsanalys utfördes å den i varje rördel inneslutna delen av jordpelaren. Resultatet av fuktighetsanalyserna framgår av nedanstående grafiska framställning (fig. 3).

Som synes är fuktighetskurvan sammansatt av två vertikala avsnitt, representerande vardera en konstant vattenhalt, och där emellan en kontinuerlig övergångszon.

Den understa delen av jordpelaren är den kapillärt helt mättade, där samtliga porer äro vattenfyllda, och jordarten har en konstant vattenhalt av 33 %. Denna högre konstanta vattenhalt kan betecknas som kapillära vattenhalten för ifrågavarande jordart.

I den därefter följande övergångszonen sker en gradvis minskning av vattenhalten, d. v. s. allt fler och fler porer äro luftfyllda, tills den övre konstanta

zonens vattenhalt nås. Denna övre konstanta zon är av stort intresse. Dess fuktighetshalt avtar ju icke med ökad höjd, utan förblir konstant, oberoende av höjden. Denna vattenhalt (20 %) torde få betecknas som ifrågavarande jordarts

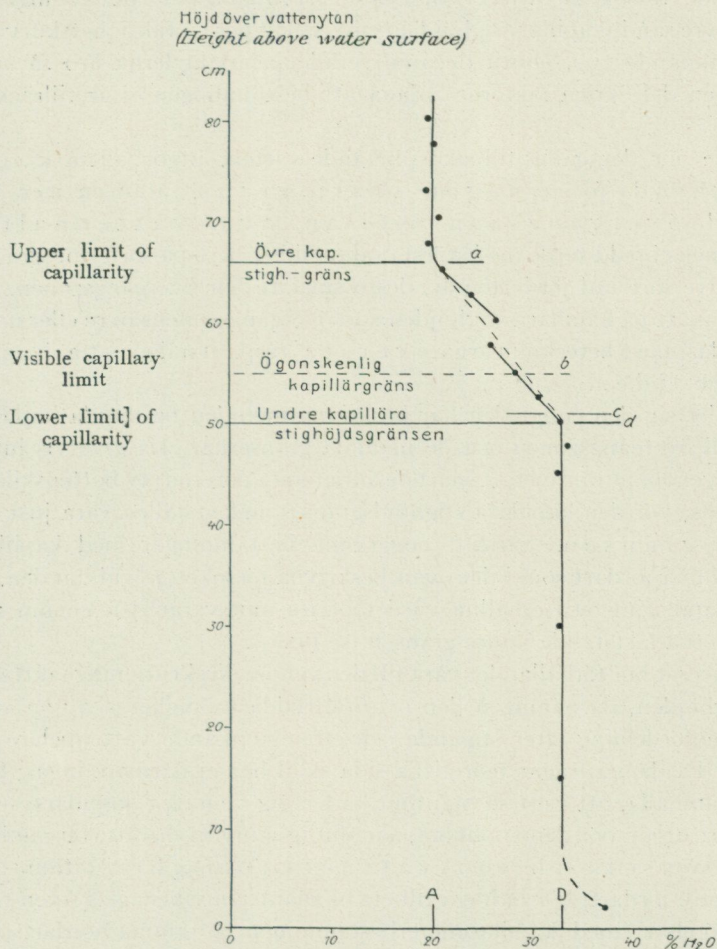


Fig. 3. Vattenfördelningen i en jordartspelare (fin sand) vid efter sjunkning av vattnet uppnådd jämvikt. a = övre kapillära stighöjdsgränsen, d = undre kapillära stighöjdsgränsen, b = ögon-skenlig kapillärgräns, c = genom kapillarimetern bestämd stighöjd. A = adsorbtionsvattenhalten, D = kapillärsvattenhalten (eller rättare summan av adsorbtionsvatten och kapillärsvatten). Varje punkt anger vattenhalten hos en 2 cm lång pelardel, med mitten på den markerade höjden.

Fig. 3. Distribution of water in a column of soil (fine sand) when equilibrium has been reached after the sinking of the water. a = upper limit of capillary rise, d = lower limit of rise, b = visible capillary limit, c = rise determined by capillarimeter. A = Adsorption water-content, D = capillary water-content (or, rather, the sum of the adsorption water and the capillary water).

adsorbtionsvattenhalt (i vidsträckt bemärkelse, innefattande även det »funiculära-pendulära» vattnet), d. v. s. det vatten, som fasthålls på jordartspartiklarnas väggar, och som icke låter sig påverkas av hela jordarts- eller

rättare porsystemet som sådant omfattande hydrostatiska krafter, m. a. o. icke i likhet med kapillärvattnet sänker sig till ett av hydrostatiska krafter reglerat jämviktsläge.¹

Ett liknande försök är utfört vid Statens Provningsanstalt av ingenjör Juter, på grövre sand (kapillär stighöjd 40 cm), vilket ger en fuktighetskurva av fullkomligt liknande typ, ehuru de analyserade pelarlängderna äro så stora (10 cm) och en del övriga faktorer sådana, att bestämningen ej är tillräckligt exakt.

Åtminstone när det gäller tillbakasjunkande vatten, utgör alltså kapillära stighöjden ej någon skarp gräns, utan en mer eller mindre bred övergångszon mellan två vattenhalter. Övergångszonens bredd torde med största sannolikhet bero på sorteringsgraden, så att ju bättre sorterad jordarten är, desto smalare blir övergångszonen.

Som exakt mått på kapillära stighöjden kan övergångszonens övre eller undre gräns användas, med beteckningarna *ö v e r s t a* resp. *u n d e r s t a* kapillära stighöjden.

Hur förhåller sig den enligt den här beskrivna metoden bestämda kapillära stighöjden till övergångszonen och de nämnda gränserna? Då givetvis luften börjar sugas igenom jordprovet, så snart de allra första porerna (av bottenskiktet) blivit luftfyllda, bör den kapillära stighöjdsgräns, som fastställes, vara just den *u n d e r s t a* gränsen. Särskilt noggranna bestämningar med kapillarmetern på samma jordart som i det ovan beskrivna försöket ge vid handen, att det genom kapillarmetern erhållna värdet precis motsvarar den genom fuktighetsanalyserna fastställda undre gränsen (se fig. 3).

Mer komplicerat bör förhållandet vara till den genom direkt stigning iakttagna kapillära stighöjden, då nämligen den ovan antydda möjligheten av en olika kapillär vattenfördelning efter stigande och efter sjunkande vattenpelare gör sig gällande. På denna frågas teoretiska sida skall här ej närmare ingås; förf. vill endast framhålla, att i ett så ofantligt *m å n g g r e n i g t* kapillärssystem, som en jordart utgör, bör denna olikhet, när slutlig jämvikt inträtt, bli minimal eller ingen. Även *a d s o r b t i o n s v a t t n e t s* rörlighet (åtminstone i en finkornigare jordart) bör bidra till ett likadant jämviktsläge. Även tyda direkta jämförelser, med kapillarmeterbestämningar å samma jordartsprov å vilka bestämningar enligt direkt stigmetoden äro utförda, därpå, att ingen nämnvärd skillnad mellan de på de motsatta vägarna uppnådda jämviktslägena av den kapillära vattenpelaren torde förefinnas.

¹ Här är icke platsen att närmare ingå på den ytterst intressanta frågan om jordarternas adsorptionsvatten. Givetvis bevisar det relaterade försöket icke, att den övre konstanta vattenhalten förblir konstant hur högt som helst; på teoretiska grunder är detta emellertid ytterst sannolikt.

Sedan detta skrivits, har ett arbete blivit tillgängligt (A. F. Lebedeff, The movement of ground and soil waters. Proc. and Papers of the First International Congress of Soil Science, Washington 1928, s. 459—494), där förf. bl. a. publicerar motsvarande försök, men utfört på en grövre sand (kapillaritet c:a 20 cm) och med en längd hos jordpelaren av 150 cm. Från övergångszonens slut (50 cm över rörets nederända) och upp till överänden (på 150 cm höjd), alltså omfattande en vertikal sträcka av 100 cm, var vattenhalten utomordentligt konstant, omkring 1.81 %, med helt små variationer i bägge riktningarna (s. 474). Vid användande av en centrifug, vilken förstärkte tyngdkraften 400 ggr, erhöles samma värde på den i sanden kvarvarande adsorptionsvattenhalten (1.91 %). Lebedeffs undersökningar visa existensen av en för varje jordart karakteristisk, av gravitationen oberoende, adsorptionsvattenhalt (the molecular moisture holding capacity of the soil).

Den genom direkt stigning iakttagna kapillära stighöjden är nästan alltid något större än det genom kapillarimetern bestämda värdet (jfr tabell 1), givetvis beroende därpå, att ögat icke drar gränsen, där de första små luftkanalerna vidtaga, utan först där ett så stort antal luftfyllda porer börjar, att en tydlig skillnad förefinnes mellan den vattenfyllda och luftfyllda delen av jordpelaren. Den genom direkt stigning erhållna gränsen torde väl motsvara ungefär mitten av övergångszonen, något olika, beroende på subjektiva faktorer.

Ensoterade jordar.

Utom de kapillaritetsbestämningar, som utförts å naturliga jordar, har förf. gjort bestämningar å bl. a. Atterbergs genom sällning och slamning framställda olika kornstorleksfraktioner. De grövre kornstorlekarnas kapillära stighöjder äro av Atterberg bestämda genom direkta stigmetoden. För de finkornigare blev däremot stigtiden så lång, att bestämningen av maximala stighöjden medelst denna metod icke kunde fullföljas. De nya bestämningarna äro av intresse som jämförelse med och fullföljande av Atterbergs försök, och framför allt på grund av den intressanta frågan om kapillära stighöjdens avhängighet av kornstorleken.

I en jordart, sammansatt av lika stora sfäriska partiklar, bleve porstorleken direkt proportionell mot partikelstorleken, och alltså kapillära stighöjden omvänt proportionell mot partikelstorleken, enligt enkel tillämpning av lagen för kapillära stighöjden i regelbundna kapillärer, att stighöjden är omvänt proportionell mot kapillärvidden. Det är att vänta, att renslammade fraktioner av naturliga jordarter skola visa liknande förhållande, oaktat partikelstorleken ej är fullt konstant i varje prov, och partikelformen kan väntas vara endast genomsnittligt densamma.

En grafisk framställning med koordinaterna kornstorlek och stighöjd skulle alltså ge en linjär kurva, vilket dock icke är fallet med den grafiska framställningen av de Atterbergska kapillaritetsbestämningarna (Ekström 1927).¹ Orsaken härtill är, att som enhet för kornstorlekskoordinaten rätt värde måste väljas. Stighöjden bör ju vara omvänt proportionell mot kornstorleken; som enheter böra alltså kapillär stighöjd och inverterade värdet av kornstorleken väljas.

En grafisk framställning enligt denna princip visar även, att värdena i själva verket fördela sig synnerligen väl kring en rät linje, d. v. s. att kapillära stighöjden för ensoterade jordarter är direkt proportionell mot kornstorlekens inverterade värde. (Fig. 4.)

De avvikelser, som punkterna visa, äro obetydliga, särskilt i betraktande av det faktum, att fraktionerna ej äro ensoterade, utan omspanna en ganska stor variationsamplitud (största partikelstorlek i en och samma fraktion = 2

¹ Att kapillära stighöjden är direkt proportionell mot kornstorleken har dock Atterberg synbarligen varit fullt medveten om, ehuru han icke direkt uttalar det. (Jfr Atterberg 1903, ex. S. 205, 245, 252.)

| Nr | Kornstorlek mm | »Tyngd- punkt» (= d) mm | $\left(\frac{1}{d}\right)$ | Kapillaritet, cm vatten: | | | Avvikelse fr. beräknad: | | Ur kapillari- teten beräknad | |
|------|-------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------|--|----------------------------|-----------------------|--|---|
| | | | | Enl. Atter- berg (k_A) | Enl. förf. (k) | Beräk- nad (k_1) (sid. 31) | Skil- nad $k-k_1$ | % av beräk- nad | korn- stor- leks- tyngd- punkt | korn- fin- leks- tyngd- punkt |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| I | 1.0—0.5 | 0.7071 | 1.414 | 13.1 | 11.3 | 8.5 | + 2.8 | + 33 | 0.53 | 1.88 |
| II | 0.5—0.2 | 0.3162 | 3.162 | 24.6 | 25.5 | 19.0 | + 6.5 | + 34 | 0.235 | 4.25 |
| III | 0.2—0.1 | 0.1414 | 7.071 | 42.8 | 40.7 | 42.4 | - 1.7 | - 4.0 | 0.147 | 6.79 |
| IV | 0.1—0.05 | 0.071 | 14.14 | 105.5 | 99 | 84.9 | + 14.1 | + 16.6 | 0.066 | 16.5 |
| V | 0.05—0.02 | 0.032 | 31.62 | 200 | 186 | 190 | - 4 | - 2.1 | 0.0322 | 31.6 |
| VI | 0.02—0.01 | 0.014 | 70.71 | — | 440 | 424 | - 16 | + 3.8 | 0.0136 | 73.4 |
| VII | 0.01—0.005 | 0.0071 | 141.4 | — | 820 | 849 | - 19 | - 2.2 | 0.0073 | 137 |
| VIII | 0.005—0.002 | 0.0032 | 316.2 | — | — | 1900 | — | — | — | — |
| > | 0.0053—0.0023* | 0.0035* | 286 | — | 1700** | 1715 | - 15 | - 0.9 | 0.00353 | 283 |
| IX | [>0.002—0.001>] | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| > | 0.0016—0.0005 | 0.0009* | 1100 | — | 7000*** | 6600 | + 400 | + 6.0 | 0.00086 | 1170 |
| A | Mo | 0.055* | 18.2 | — | 137 | 109 | + 28 | + 25.7 | — | — |
| B | Finmo | 0.027* | 37 | — | 227 | 222 | + 5 | + 2.2 | — | — |
| C | 0.02—0.006 | 0.011 | 90.9 | — | 590 | 545 | + 45 | + 8.3 | — | — |

Tabell 1. Kapillära stighöjden hos ensorterade jordartsfraktioner.

I—VIII. Atterbergs material.

A—C. Av dr G. Ekström vid S. G. U. preparerade fraktioner.

*) Mikroskopisk bestämning.

**) Kapillär stighöjd bestämd genom användande av bensol, och reducerad till vatten.

***) Bestämd genom metoden sid. 45—50 och fig. 8—9.

Capillary rise in the case of equi-granular soil fractions.

2 = Size of grain in mm.

3 = »Centre of gravity» of grain.

4 = »Centre of gravity» of grain-fineness.

5—7 = Capillary rise in cm. 5. According to Atterberg. 6. According to the author. 7. Calculated (see fig. 7, p. 31).

8—9 = Difference from calculated. 8 = $k-k_1$; 9 = percentage.

10 = »Centre of gravity» of grain-coarseness calculated from capillary rise.

11 = Grain-fineness calculated from capillary rise.

I—VIII. Atterberg's material.

A—C. Soil fractions prepared by Dr. G. Ekström, Geological Survey of Sweden.

*) Microscopical determination.

**) Capillary rise determined by the use of benzol, and reduced to water.

***) Capillarity determined by use of the method described p. 63 and fig. 8—9.

till $2\frac{1}{2}$ ggr större än minsta), och att tyngdpunkten givetvis kan ligga förskjuten något åt ena eller andra sidan.

Man kan alltså, om man känner en ensorterad jordartsfraktions kornstorlek (eller kornstorlekstyngdpunkt) (d) ange dess kapillära stighöjd (k) enligt följande formel:

$$k = c \frac{h}{d}$$

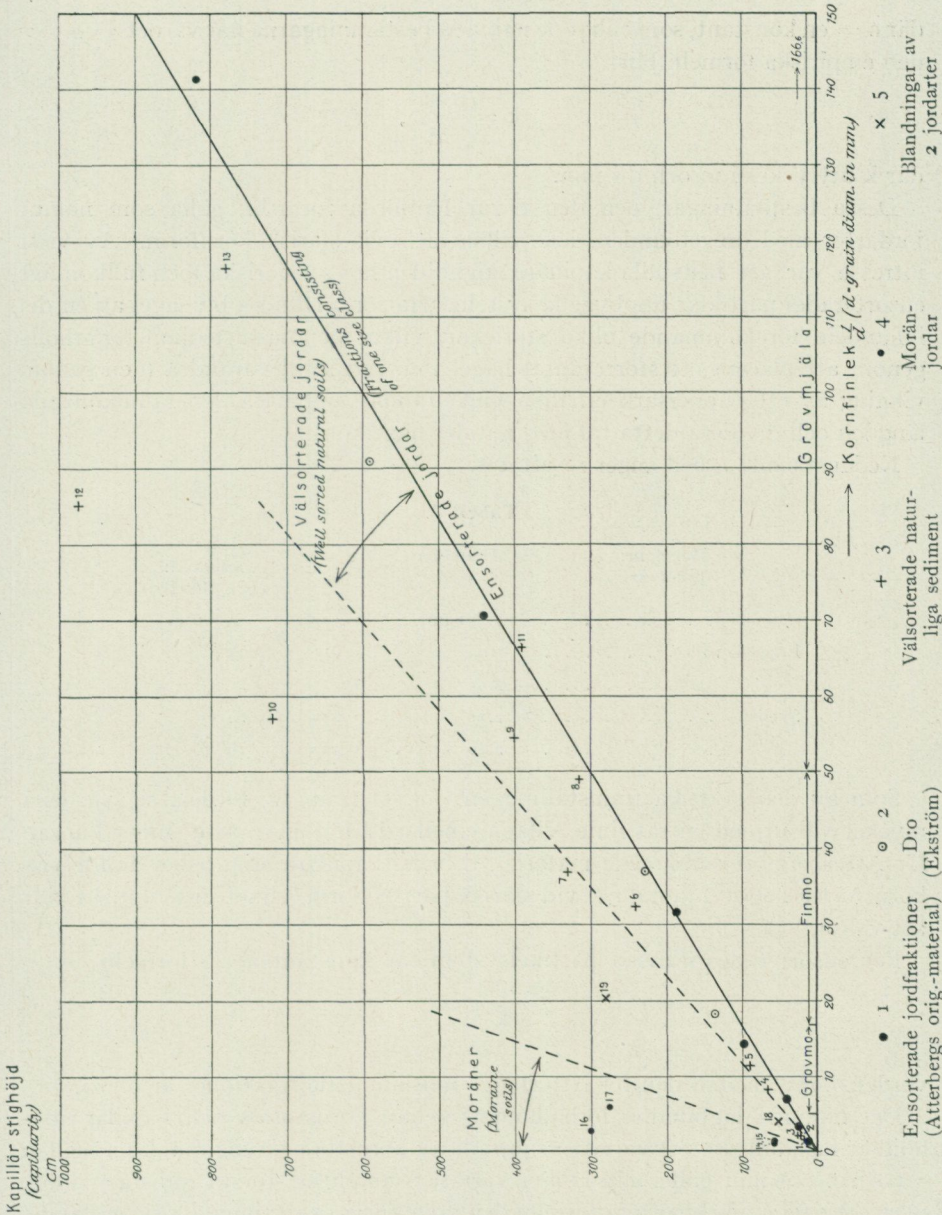


Fig. 4. Relationen mellan kapillär stighöjd och »kornfinlek» (= inverterade värdet av kornstorleken; se tabell 1 och 6). Den tjocka heldragna linjen är kurvan för Atterbergs ensorтерade jordartsfraktioner. Siffrorna vid jordartstecknen hänföra sig till nummer i tabell 6, s. 32.

Fig. 4. Relation between capillarity and »grain-fineness» (= inverted value of size of grain; see tables 1 and 6). The thick continuous line is the curve for Atterbergs' equi-granular soil fractions. The figures refer to table 6, p. 32.

1. Equi-granular soil fractions: Atterberg's original material.
2. Equi-granular soil fractions, prepared by Ekström.
3. Well-sorted natural sediments.
4. Moraine soils.
5. Mixtures of two soils.

där c = en konstant, som enligt de nämnda bestämningarna har värdet = 0.060; den empiriska formeln blir:

$$k = \frac{0.060}{d},$$

där k uttryckes i m och d i mm .

Dessa bestämningar, och den därur hänfödda formeln, gälla som nämnt jordarter med oregelbunden, icke tillnärmelsevis sfärisk kornform. Av visst intresse var att fastställa kapillära stighöjden hos av sfäriska (och fullkomligt sorterade) partiklar uppbyggda system. Härför användes blyhagel av en del i handeln förekommande olika storlekar, vilkas genomsnittsdiameter erhöles genom att placera ett större antal hagel i en rad intill varandra (i en genom vikning av ett pappersark erhållen vinkelränna), uppmäta den sammanlagda längden och dividera detta tal med antalet hagelkorn.

Nedanstående tabell anger resultatet.

Tabell 2.

| Hagel nr: (Shot nr) | Diameter = d : | $\frac{1}{d}$ | Kapillär stighöjd: (Capillarity) |
|------------------------|---------------------|---------------|--|
| »Dunst» | 1.372 mm | 0.729 | 38.5 mm |
| Engelsk 10 | 1.633 » | 0.611 | 34 » |
| » 9 | 1.950 » | 0.513 | 27 » |
| Svensk 0 | 2.26 » | 0.442 | 23.5 » |
| » 2 | 2.80 » | 0.357 | 19 » |

Som av den grafiska framställningen (fig. 5) framgår, fördela sig värdena mycket väl utmed en rät linje, vilken emellertid förlöper något under kurvan för Atterbergs renslammade material, d. v. s. kapillära stighöjden är för viss kornstorlek något m i n d r e vid sfärisk partikelform, vilket ju teoretiskt var att vänta.¹

För sorterade, sfäriska partikelsystem får konstanten c i formeln

$$k = \frac{c}{d}$$

värdet 0.053, medan den för Atterbergs renslammade fraktioner är 0.060.

Det nämnda lagbundna förhållandet mellan kornstorlek och kapillär stighöjd är fastställt för ett variationsområde av kornstorlekstyngdpunkten mellan 3.2 och 0.0009 mm, gäller alltså för en variationsamplitud största: minsta = 3560, utan att någon märkbar förändring i den raka kurvans riktning gör sig gällande. En extrapolering mot mindre kornstorlek och högre stighöjd kan därför anses berättigad. För en kornstorlek av 0.0002 mm, motsvarande gränsen mellan mikroler och ultraler, erhålles en kapillaritet av 300 m; för 0.00002 mm 3000 m.² Amplituden för det extrapolerade området utgör i första

¹ Egendomligt nog förmodar Atterberg (1903) motsatsen: »Sandslag med mera avrundade korn böra visa större stighöjder». (S. 205.)

² Det bör påpekas, att det ofta antages, att det yttre lufttrycket sätter en gräns för de kapillära stighöjder eller kapillära stigkrafter, som under naturliga förhållanden kunna komma till utveckling.

fallet 4.5, i senare 45, alltså en åttahundradel, resp. en åttiondel av den kornstorleksamplitud, inom vilken formeln är empiriskt fastställd.

Extrapoleringen kan alltså sägas vara obetydlig. Likväl bör det påpekas, att, när man närmar sig dessa kornstorleksgrader, inom de naturliga jordarna den genomsnittliga mineralkarakteren starkt förändras, i det att de fjälliga mineralen (glimmer och klorit) alltmer taga överhanden. Därmed förändras ju

Kapillär stighöjd (h)
(Capillarity)

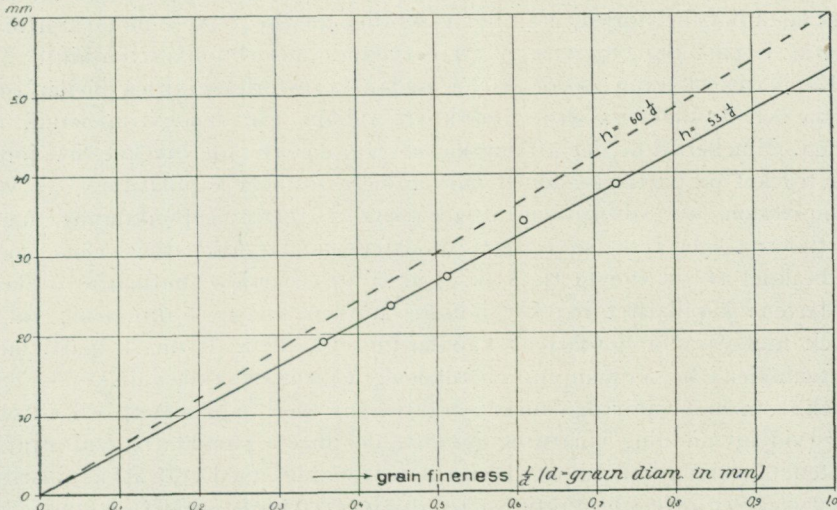


Fig. 5. Förhållandet mellan kapillaritet och partikelfinlek hos hagel (= ensorterade sfäriska system; tabell 2). Den streckade kurvan är kurvan för Atterbergs ensorterade jordartsfraktioner.

Fig. 5. Relation between capillarity and size of particles in the case of an equi-granular spherical system (shots), table 2. The broken curve is the curve for Atterberg's equi-granular soil fractions.

dels partikelformen och porformen, samt porstorleken i förhållande till partikelstorleken. Ännu viktigare är, att med fallande kornstorlek och ökad halt av glimmerliknande jordartspartiklar adsorbtionsvattnet får allt större absolut och relativ betydelse. Emedan, som Goldschmidt visat (1926), de glimmerartade partiklarna i en våt minerallera omgivas av ett i förhållande till partikelns storlek betydande vattenlager, vilket fasthålls av de molekylära krafterna i partikeln och bildar en sorts fortsättning av kristallens atomgitter, komma de fasta partiklarna icke att beröra varandra, och det kapillära vattnet kommer att röra sig i ett porsystem vars väggar utgöras av vatten.

Här är icke platsen att närmare ingå på denna komplicerade fråga, vilken behandlas i ett senare kapitel (sid. 35; se särskilt sammanfattningen, sid. 53).

Men även om det yttre lufttrycket satte en godtycklig gräns för den kapillära stigkraft, som i naturen kan realiseras, innebure detta sakförhållande ingen motsägelse mot ovanstående resonemang; den allenast av porsystemets vidd avhängiga jordartsfysikaliska storhet, som kallas kapillaritet, existerar och kan bestämmas oberoende av huruvida det yttre lufttrycket i vanliga fall räcker till att realisera den möjliga kapillärkraften. Man kan alltså tala om kapillariteter (eller kapillära stighöjder) betydligt över 10 m, och även bestämma dem (se metodbeskrivningen, sid. 14 och 46).

När adsorbtionsvattenhöljets tjocklek blir betydande i jämförelse med partikeldiametern, innebär detta en märkbar ökning av den praktiska partikelstorleken, och det är därför att vänta, att för dessa kornstorlekar kapillära stighöjden skall bli mindre än formeln anger, och kapillaritetskurvan icke fortsätta som en rät linje — allt under förutsättning att man räknar med de torra partiklarnas diameter.

Som senare är framhållet (s. 28), visar även beräkningar av naturliga jordar med måttlig lerhalt, att lerets inverkan å kapillära stighöjden icke motsvarar dess fasta partikelstorlek, utan blir väsentligt mindre, d. v. s. motsvarar inverkan av lerpartiklar omgivna av ett betydande adsorbtionsvattenskiikt.

Kapillaritetskurvan borde därför, sedan kornstorleksgränsen mellan grovmjåla och finmjåla passerats, märkbart avböja från den extrapolerade räta linjen. Emellertid är det att märka, att vid ensorterade mycket fina jordar, när trycket på partikelsystemet närmar sig maximala kapillariteten, en stark kompression av adsorbtionsvattenhöljerna i »beröringspunkterna» mellan partiklarna äger rum (se sid. 52), så att dessa där förmodligen äga endast en bråkdel av sin största tjocklek. Vid sämre sorterade (naturliga) jordar är jordartens kapillaritet mycket mindre än den finaste fraktionen; vid ett tryck motsvarande jordartens kapillaritet äro alltså de finaste partiklarnas vattenhöljen icke sammanpressade till den grad, som de skulle vara vid det högre tryck, som motsvarar den finaste fraktionens egen kapillaritet, och alltså få här (vid inblandning i naturlig jordart) de finaste partiklarnas adsorbtionsvattenhöljen en avsevärd betydelse. Slutsatsen blir emellertid, att kapillaritetskurvan för ensorterade fraktioner i själva verket torde erhålla en *m y c k e t o b e t y d l i g* avvikelse från den räta linjen ännu ganska långt in på »ler»-området, och alltså extrapolation i stor utsträckning är berättigad.

Mellan adsorbtionsvattnet och det kapillära vattnet finnes emellertid ingen skarp gräns, utan de övergå i varandra. Ju finkornigare jordarten är, desto mindre är vidare den kapillära vattenhalten i förhållande till adsorbtionsvattenhalten. Det är att vänta, att vid tillräckligt ringa partikelstorlek, när storlekskillnaden mellan partiklarna och vattenmolekylerna ej längre är så svindlande, de båda begreppen sammanfalla, eller rättare allt vatten i den mättade jordarten är att betrakta som adsorbtionsvatten, men den yttre delen av detta under vissa förhållanden likväl reagerar kapillärt.

Förhållandet mellan ensorterade och naturliga (komplexa) jordars kapillära stighöjd.

Orsaken till att de ensorterade jordartsfraktionerna visa högre kapillär stighöjd än motsvarande sfäriska system, kan tänkas ligga icke endast i skillnaden i fråga om partikelform, utan även däri, att de nämnda fraktionerna ju i själva verket äro betydligt osorterade. Teoretiskt är det att vänta, att t. ex. en mellan vissa kornstorleksgränser inom intervallet regelbundet fördelad jordartssammansättning skall visa *h ö g r e* kapillär stighöjd än en fullkomligt ensorterad

fraktion belägen i den förstnämndas »kornstorlekstyngdpunkt». För att belysa hithörande frågor ha en del olika bestämningar utförts.

Å ett antal blandningar av Atterbergs renslammade fraktioner äro bestämningar av kapillära stighöjden utförda (se nedanstående tabell):

Tabell 3.

| a | | b | c | | d | e |
|--------------|-----------|---------------------|--------------------|-----|--|---|
| Komponenter: | | Proportion A : B | Kap. stigh. cm. | | Medeltal ur kap. stigh. för A och B. | Observerad kap. stigh. hos blandn. A + B |
| A | B | | A | B | | |
| 0.01—0.005 | 0.02—0.01 | 1 : 1 | 820 | 440 | 630 | 635 |
| 0.01—0.005 | 0.05—0.02 | 1 : 1 | 820 | 190 | 505 | 730 |
| 0.01—0.005 | 0.1 —0.05 | 1 : 1 | 820 | 99 | 460 | 740 |
| 0.01—0.005 | 0.2 —0.1 | 1 : 1 | 820 | 41 | 430 | 725 |
| 0.01—0.005 | 0.2 —0.1 | 1 : 2 | 820 | 41 | 301 | 650 |

Tab. 3. Kapillaritetsförhållandet vid diskontinuerliga 2-komponentblandningar.

Capillarity conditions in the case of discontinuous two-component mixtures.

a = Components.

b = Proportion A : B.

c = Capillary rise in cm. of the components.

d = Mean of the capillary rises of the components.

e = Observed capillary rise of the mixture A + B.

Ur försöken kan följande generella regel dragas: Vid blandning av två närliggande fraktioner blir kapillära stighöjden det proportionella medeltalet av de båda fraktionernas kapillära stighöjder. Vid blandning av två starkare åtskilda kornstorleksgrupper dominerar helt den finare fraktionen. Om man med en viss finkornigare fraktion blandar en grövre, blir — efter ett visst avstånd — inverkan av den grövre fraktionen allt mindre, ju grövre sagda fraktion är, och blandningens kapillära stighöjd närmar sig den oblandade fina fraktionens! Teoretiskt är detta sakförhållande lätt förståeligt: om mycket grova partiklar ligga inbäddade i en finkornigare massa, utfyller denna helt den grövre massans porsystem, eller kringsluter de glest liggande kornen, vilka huvudsakligen få den betydelsen, att de fördela den finkornigare jordarten till ett månggrenigt, men för övrigt oförändrat kapillärsystem. Om den finare fraktionens mängd är så liten, att den icke förmår utfylla porerna mellan den grövre, vore det att vänta, att dennas lägre kapillära stighöjd skulle göra sig i hög grad gällande. Emellertid är ett sådant system omöjligt att i praktiken studera, då den finare fraktionen slammas ner och utfyller det grova systemets nedre del. Överhuvud taget äga partikelblandningar, vilka bestå av två från varandra vitt skilda, ensorterade fraktioner endast teoretiskt intresse; de naturliga jordarna bestå ju alltid av en kontinuerlig kornstorleksserie, oftast med ett utpräglat frekvensmaximum.

En tillnärmelsevis fullständig systematisk undersökning av de kontinuerliga jordartsblandningar, som motsvara de naturliga jordarna, innebure givetvis ett mycket tidsödande arbete. Emellertid har förf. bestämt kapillära stighöjden hos ett antal jordarter, å vilka slammingsanalys är utförd. För att kunna sätta kapillära stighöjden i exakt relation till slammingsanalysens resultat, har ur denna varje jordarts genomsnittliga kornstorlek, eller »kornstorlekstyngdpunkt» beräknats. Kornstorlekskurvorna bruka ju konstrueras med koordinaterna: procenttal av viss fraktion och logaritmen för partikeldiametern. För att erhålla den av kurvan begränsade ytans tyngdpunkt, skall alltså summan tagas av produkterna mellan varje kornstorleks procenttal och logaritmen för dess partikeldiameter; denna summa, dividerad med 100, utgör logaritmen för den genomsnittliga kornstorleken.

Om man i koordinatsystemet kapillär stighöjd: inverterade kornstorleken inför de så erhållna värdena, fördela sig de naturliga jordarterna ej utmed en linje, men längs en sektion, som förlöper betydligt högre än kurvan för ensorterade jordar, d. v. s. kapillära stighöjden är större än hos motsvarande ensorterade jordart. Man finner även, att kapillära stighöjden (och även avvikelserna) är större ju mer osorterad jordarten är.

Detta sakförhållande, som är teoretiskt lättförståeligt, och som står i full överensstämmelse med de anförda resultaten av blandningar mellan renslammade fraktioner, framgår dels av de primära jordarterna, dels av blandningar mellan dessa, varvid alltid den så erhållna, mer osorterade nya jordarten (blandningen) ligger väsentligt över förbindelselinjen mellan komponenternas punkter i diagrammet.

De bäst sorterade naturliga jordarna — mestadels älv- och fjordsediment, från sandjordar till finmjäljordar, — fördela sig inom en relativt smal sektion, som ligger omedelbart över linjen för Atterbergs renslammade fraktioner.

Som gränslinjer för denna sektion kunna dels ensorteringslinjen $k = \frac{0.060}{d}$, dels

ungefär linjen $k = \frac{0.083}{d}$ betraktas.

Extremt osorterade äro ju bland de naturliga jordarna moränerna. Dessa falla i själva verket längs en synnerligen brant förlöpande sektion, där exponenten i kapillaritetsformeln, i stället för värdet 0.060 vid ensorterade och 0.060—0.083 vid välsorterade jordar, får värdet 0.4—1.0, eller möjligen ännu högre.

Det är alltså uppenbart, att de grövre partiklarna äga betydligt mycket mindre inverkan på jordarternas kapillära stighöjd än de finare. Men hur förhåller sig denna inverkan, och kan förhållandet uttryckas exakt?

Beträffande denna fråga kan till en början erinras om blandningarna mellan Atterbergs renslammade fraktioner (se S. 25). Vid blandning av två angränsande fraktioner, nämligen 0.02—0.01 och 0.01—0.005 visade det sig, att blandningens kapillära stighöjd utgjorde det proportionella medeltalet mellan de båda komponenternas kapillära stighöjd, d. v. s. kapillariteten ut-

gjorde här en direkt additiv egenskap. Då kapillariteten hos de ensorterade komponenterna är en linjär funktion av inverterade kornstorleken, blir alltså kapillariteten hos blandningen proportionell mot den kornfinlekstyngdpunkt, som erhålles, om det proportionella medeltalet tages mellan komponenternas inverterade kornstorlek (vilket i fortsättningen kommer att kallas »kornfinlek»).

Det kunde antagas, att motsvarande förhållande skulle gälla för de naturliga jordarna. Av dessa beräknades alltså ett mindre antal lerfria eller lerfattiga jordarter på liknande sätt, d. v. s. procenttalen ingående kornstorleksfraktioner multiplicerades med »kornfinlekstalen» (inverterade värdet av kornstorleken), varpå summan av dessa produkter dividerades med 100. Kombineras de så erhållna »kornfinlekstyngdpunkterna» med de observerade kapillära stighöjderna, visar det sig, att värdena falla synnerligen väl längs linjen för ensorterade jordarter, vilket gäller från välsorterade strömsediment till de mest osorterade moräner. De användbara, kapillaritetsbestämda, analyserade jordarternas antal var emellertid tämligen ringa (endast 5 st.). Emellertid kunde av dessa bestämningar den preliminära arbetshypotesen uppställas, att hos de naturliga jordarna, även de mest osorterade, kapillära stighöjden alltså skulle erhållas genom direkt proportionell addition av de erhållna fraktionernas kapillära stighöjder, d. v. s. att kapillära stighöjden vore direkt proportionell mot kornfinlekstyngdpunkten.

Då vid dessa beräkningar de finaste fraktionerna erhålla ett oerhört stort inflytande, låta sig jordarter med även rätt små mängder ler tyvärr icke med säkerhet bestämmas, då ju i gruppen ler ingår allt material finare än 0.002 mm. »Ler»-fraktionens verkliga tyngdpunkt låter sig endast i vissa fall tämligen säkert beräknas ur sorteringskurvans karaktär f. ö.; i de flesta fall blir beräkningen osäker. I tabell 4 äro endast ett par jordarter med obetydlig lerhalt upptagna; »ler»-gruppens sannolika tyngdpunkt är här beräknad av sorteringskurvans form, och de så erhållna värdena på kornfinlekstyngdpunkten visa full överensstämmelse med den ovan givna regeln.

Vidare är det att märka följande:

Den använda beräkningsmetodens förutsättning är, att lagen om kapillaritetens direkta proportionalitet mot kornstorleken hos ensorterade fraktioner äger giltighet. Om det förhåller sig så, som ett par försök och teoretiska resonemang göra sannolikt, att en avvikelse från denna lag äger rum (för finmjåla visserligen obetydlig), beroende på att adsorbtionsvattenskiktets tjocklek blir avsevärd i förhållande till partikelstorleken, finge alltså lerfraktionen, även om dess sammansättning vore känd, alltså icke medräknas på samma sätt som de grövre fraktionerna, utan den effektiva partikelstorleken, d. v. s. storleken av dess fasta partikel med omgivande adsorbtionsvattenskikt, finge här användas. Givetvis kunna fraktionsprocenttalen multipliceras med kapillariteten i stället för kornfinleken.

Vid beräkning av välsorterade jordarter med mer betydande lerhalt (mjäl-mo-jordar med några till ett tiotal % ler), visar det sig att, fastän lerets kornstorlekstyngdpunkt kan med rätt stor sannolikhet beräknas, den

Tabell 5.

| Komponenterna (<i>components</i>) | | | | | | | Blandningen (<i>mixture</i>) | | | |
|--|------|------|------|-------|-------|-------|---|--|------------------------|--|
| Kornstorlek mm (<i>Grain size,</i> <i>mm</i>) | 0.5- | 0.2- | 0.1- | 0.05- | 0.02- | 0.01- | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.005 | | | | |
| Kapillaritet (<i>Capillarity</i>) | 25.5 | 40.7 | 99 | 190 | 440 | 820 | Observerad kapillär stighöjd = k | Medeltal av de 2 ytterkom- ponenter- nas kapil- laritet, = k_1 | Differens $k - k_1$ | Medeltal ur alla kompo- nenternas kapillaritet |
| Blandningar av de med + betecknade komponenterna | | | | | | + | 820 | — | — | |
| | | | | | + | + | 635 | 630 | + 5 | 630 |
| | | | | + | + | + | 505 | 505 | 0 | 483 |
| | | | + | + | + | + | 475 | 460 | + 15 | 387 |
| | | + | + | + | + | + | 450 | 430 | + 20 | 318 |
| | + | + | + | + | + | + | 435 | 423 | + 12 | 269 |

Tabell 5. Kapillaritet hos kontinuerliga jordblandningar.

*Capillarity of continuous fraction mixtures.**Mixtures of the components indicated by +.*

1 = Observed capillary rise.

2 = Mean of the capillarity of the two extreme components.

3 = Difference $k - k_1$.

4 = Average of the capillarity of all the components.

stighöjderna för varje fraktion direkt kunde adderas, och förskjutningarna av fraktionstyngdpunkterna från det teoretiska läget blevo betydelselösa.

Det visade sig då, att vid blandning i lika proportioner av två, högst tre närliggande fraktioner, utgjorde blandningens kapillära stighöjd det proportionella medeltalet av de tre komponenternas stighöjder (inom försöksfelmarginalen), men vid flera komponenter blev blandningens stighöjd väsentligt större än medeltalet, och skillnaden ökades med ökat blandningsintervall (ökat komponentantal). (Se tabell 5).

M. a. o.: Om till en viss mängd finkornig jord sättes angränsande, närmast grövre fraktion, sänkes stighöjden till medeltalet, likaså när till denna blandning sättes nästa fraktion. Varje grövre fraktion, som därefter tillsättes, sänker stighöjden med ett obetydligt, allt mer avtagande belopp. Det förefaller av tabellens sannolikt, att det gränsvärde, till vilket blandningens kapillära stighöjd asymptotiskt närmar sig, när allt grövre fraktioner tillsätts, utgöres av den finaste fraktionens halva kapillära stighöjd. Detta värde är ju medelvärdet mellan de därvid i blandningen ingående båda ytterfraktionerna, den grövsta och den finaste, varvid här den grövstas stighöjd är = 0.

I själva verket visar det sig, att samtliga kontinuerliga blandningars stighöjd

Kapillär stighöjd
(Capillarity)

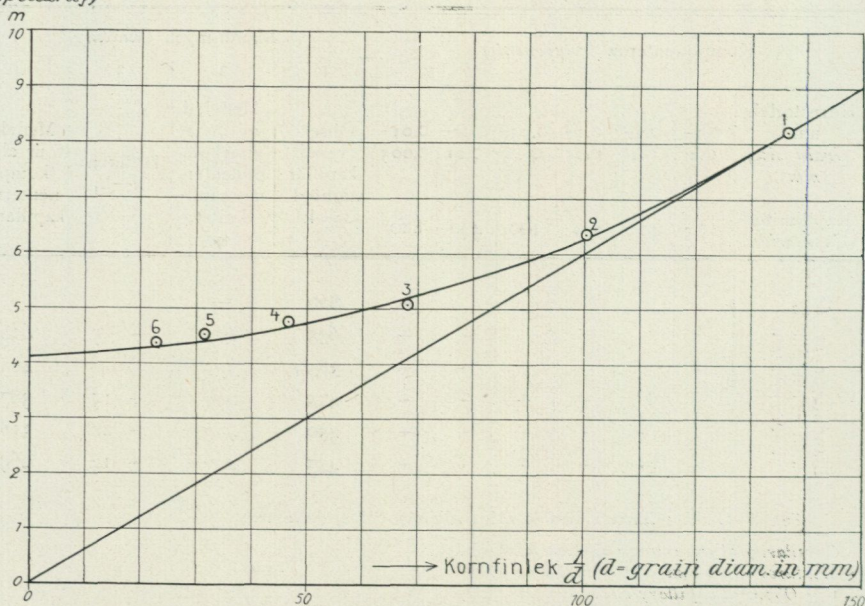


Fig. 6. Förhållandet mellan kapillaritet och kornfinlek för kontinuerliga blandningar av Atterbergs ensorterade kornfraktioner (se tabell 5). Till utgångskomponenten 1 (kapillär stighöjd = 820 cm) har lika viktsdel av närmast grövre komponent satts, till denna blandning (n:o 2) av därefter närmast grövre, så att 3-komponentblandningen n:o 3 erhållits, o. s. v. Den böjda kurvan utgör alltså utvecklingskurvan för en kontinuerlig likaproporitionsblandning, där 1 är den finaste komponenten. Blandningens kapillaritet är medeltalet för de båda ytterkomponenternas, och med växande blandningsamplitud närmar sig kurvan asymptotiskt det gränsvärde, för vilket blandningsamplituden är oändlig, d. v. s. ytterkomponenternas kapillaritet är 820 och 0 cm, och blandningens kapillaritet alltså är den finaste komponentens halva kapillaritet.

Anm. Vid beräkningen av blandningarnas kornfinlekstyngdpunkt äro komponenternas verkliga kornfinlekstyngdpunkter använda, d. v. s. de äro reducerade till motsvarande läge på kapillaritetskurvan.

Fig. 6. Relation between capillarity and grain-fineness for continuous mixtures of Atterberg's equigranular particle fractions (see table 5). To the initial component 1 (capillary rise = 820 cm) an equal part by weight of the next coarser component has been added; to this mixture (no. 2) has been added a third equal part by weight of the succeeding coarser component, so that the three-component mixture no. 3 has been obtained, and so on. The bent curve is thus the development curve for a continuous, similar-proportional mixture, in which no. 1 is the finest component. The capillarity of the mixture is the mean of the two extreme components, and with growing mixture-amplitude the curve asymptotically approaches the limiting value for which the mixture-amplitude is infinitely large, i. e. the capillarity of the extreme components is 820 mm and 0 cm, and thus the capillarity of the mixture is half the capillarity of the finest component.

N. B. In calculating the centre of gravity of fineness of the mixtures, the real centres of gravity of the fineness of the components are employed, i. e. they are reduced to their corresponding positions on the capillarity curve.

ligger mycket nära medeltalet för de båda ytterfraktionernas stighöjder — avvikelserna äro icke större, än att de falla inom ramen för de summerade försöksfelen.

Det gäller här jordarter med nästan rektangulär sorteringskurva; för naturliga jordar är motsvarande beräkning svår att utföra, då ju givetvis icke de yttersta, oftast kvantitativt obetydliga fraktionernas värden få väljas. Om man emel-

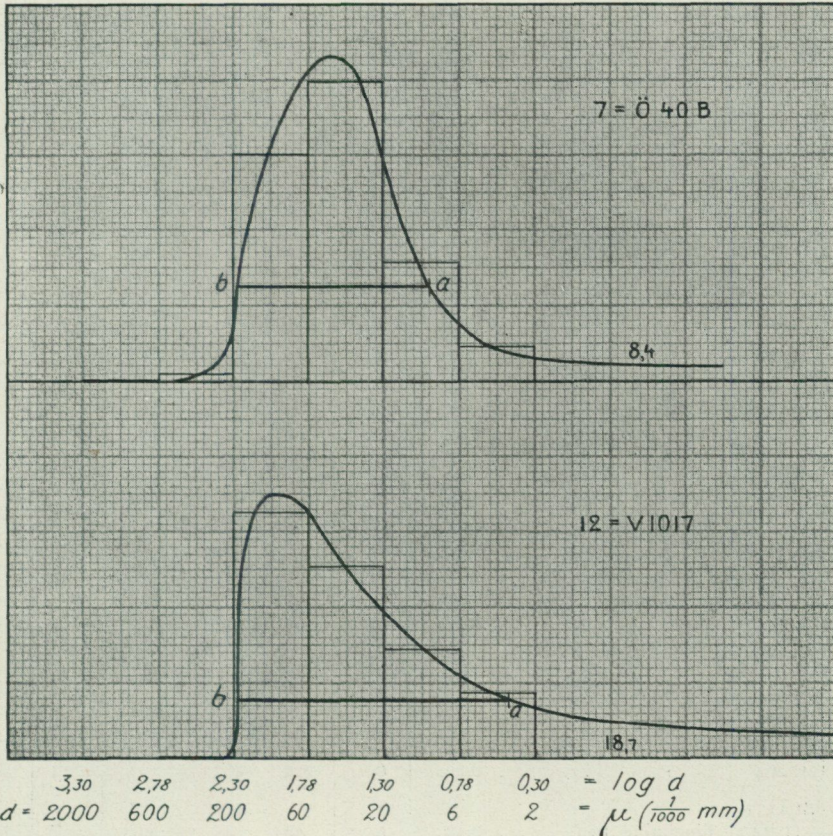


Fig. 7. Sorteringskurvor för två jordarter. Den horisontella linjen a—b i var figur delar de av kurvorna inramade ytorna i två lika stora hälfter. Linjen a—b betecknar alltså sorteringskurvens medelbredd; ur kornstorlekstalet för ändpunkterna a och b beräknas dessas kornfinlekstyngdpunkter, och motsvarande kapillaritet för a och b. Medeltalet ur ändpunkternas (a och b) kapillaritet motsvarar jordartens »beräknade kapillaritet» i kolumn 6 b, tabell 6.

Fig. 7. Assortment curves for two soils. The horizontal line a—b divides the areas enclosed by the curves into two halves. Thus the line a—b shows the mean breadth of the assortment curve; from the grain size figures at the end points are calculated their »centre of gravity» of fineness and the corresponding capillarity for a and b. The mean of the capillarity of the end-points (a and b) corresponds to the »calculated capillarity» of the soil in column 6 b, table 6.

lertid ur den mekaniska analysen uträknar det procenttal, vid vilket summan av de överskjutande fraktionsprocenten är = summan av de underliggande, alltså = 50 %, och i den konstruerade fördelningskurvan drar en horisontell linje vid detta procenttal (varvid alltså den överliggande och underliggande delen av fördelningsytan bli lika stora), representerar denna linje, mellan dess skärningspunkter med sorteringskurvan, dennas genomsnittsbredd. Jag har på detta sätt beräknat de kapillaritetsbestämda och analyserade jordarterna, och därvid har det visat sig, att dessa punkter ganska väl motsvarat de ovan beskrivna blandningarnas ytterfraktioner, d. v. s. att jordartens kapillära

Tabell 6.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | 7 | 8 | |
|-----|---|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------|--|---------------|----------------|------|
| | | | | | Kapillär stighöjd cm | | | | | |
| Nr. | Jordprovets beteckning (se Ekström, 1927) | Jordartsnamn | Kornstorleks-tyngdpunkt = d (mm) | »Kornfinlek» $\frac{1}{d}$ | Kapillär stighöjd cm | | | Differens b—a | Avvikelse i %* | |
| | | | | | a Observerad | b Beräknad enligt sid. 31 | c (Beräknad som medeltal ur komponenternas) | | | |
| 1 | Äl 73 | Sand | 0.617 | 1.62 | 18 | 12.5 | — | 5.5 | 30.5 | |
| 2 | H 22 | » | 0.482 | 2.075 | 22 | 18 | — | 4 | 13.2 | |
| 3 | St 11 | » | 0.479 | 2.08 | 26.5 | 20 | — | 6.5 | 24.5 | |
| 4 | St 13 | Sandig grovmo | 0.123 | 8.13 | 67 | 60 | — | 7 | 10.4 | |
| 5 | V 1022 | Grovmo | 0.0887 | 11.3 | 90 | 87 | — | 3 | 3.3 | |
| 6 | H 220 | Finmo | 0.0308 | 32.4 | 240 | 220 | — | 20 | 8.3 | |
| 7 | Ö 40 b | Mjälåg mo | 0.0272 | 36.8 | 330 | 331.5 | + | 1.5 | 0.45 | |
| 8 | Äl 122 | Mjälåg finmo | 0.0203 | 49.2 | 315 | 350 | + | 35 | 10 | |
| 9 | Äl 131 | » | 0.0184 | 54.5 | 400 | 365 | — | 35 | 8.7 | |
| 10 | V 889 | Finmolättlera | 0.0175 | 57.0 | 720 | 520 | — | 200 | 27.8 | |
| 11 | Äl 204 | Mjälåg (moig) | 0.0152 | 66.0 | 390 | 516 | + | 126 | 24.7 | |
| 12 | V 1017 | Molättlera | 0.0117 | 85.2 | 1 000 | 1 050 | + | 50 | 5 | |
| 13 | H 22 | Mo-mjällättlera | 0.00858 | 116.5 | 780 | — | — | — | — | |
| 14 | Äl 18 | Morängrus | 0.898 | 1.11 | 56 | 94 | + | 38 | 40 | |
| 15 | Ve 61 | Moränsand | 0.891 | 1.121 | 56 | 50 | — | 6 | 10.7 | |
| 16 | H 501 | Moränmo | 0.359 | 2.79 | 300 | 190 | — | 110 | 36.8 | |
| 17 | E 264 | » | 0.166 | 6.01 | 275 | 262 | — | 13 | 4.7 | |
| 18 | St 13 + H 22 | Blandning 1:1 | 0.245 | 4.07 | 52 | 45 | 44.5 | — | 7 | 13.5 |
| 19 | Ö 40 B + V 1022 | » 1:1 | 0.0491 | 20.4 | 280 | 160 | 210 | — | 120 | 42.9 |

Tabell 6. Kapillära stighöjden hos analyserade naturliga jordarter (samt blandning av dylika).

*) Avvikelsen är räknad i % av observerad stighöjd när tecknet är —, i % av beräknad när tecknet är +. Om t. ex. beräknad stighöjd är = 100 cm och observerad i fallet a = 50, i fallet b = 200 cm, innebär detta lika stort fel i bägge fallen (= 50 % = $\frac{1}{2}$). Men räknades avvikelsen i båda fallen från den beräknade (resp. observerade) stighöjden skulle felprocenten blivit 50 och 100 (resp. 100 och 50).

Capillarity of analysed natural soils (and mixtures of soils).

2 = Designation of soil specimens (see Ekström 1927).

3 = Name of soil.

4 = Centre of gravity of grain-coarseness = d mm.

5 = Grain-fineness = $\frac{1}{d}$.

6 = Capillarity, cm = k. a) Observed.

b) Calculated (see p. 31).

c) Calculated as a mean of those of the components.

7 = Difference b—a.

8 = Divergence in %.

The divergence is calculated as a percentage of the observed capillarity when the sign is negative, and as a percentage of the calculated capillarity when the sign is positive. If, for example, the calculated capillarity is = 100 cm and the observed capillarity in case a = 50, in case b = 200 cm, this implies an equally large error in both cases (= 50 % = $\frac{1}{2}$). But if the divergences in both cases were reckoned from the calculated capillarity (or the observed respectively) the percentages of error would have been 50 and 100 (or 100 and 50 respectively).

Tabell 7.

| Nr | Jordart | | | | | Finjord (= < 2 mm) | | | | | | | |
|----|---------|----------------------|-----------|-----------|----------|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|--------------|------|
| | | >2 cm | 2-6 mm | 6-2 mm | <2 mm | 2- 0.6 mm | 0.6- 0.2 mm | 0.2- 0.06 mm | 0.06- 0.02 mm | 0.02- 0.006 mm | 0.006- 0.002 mm | <0.002 mm | |
| 1 | Äl 73 | Sand | — | — | 0.5 | 99.5 | 55.2 | 40.7 | 3.2 | 0.5 | 0.2 | 0.2 | — |
| 2 | H 22 | » | — | — | 0.7 | 99.3 | 33.5 | 61.8 | 4.1 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | — |
| 3 | St 11 | » | — | — | 2.7 | 97.3 | 31.9 | 63.4 | 2.8 | 0.4 | 1.1 | 0.4 | — |
| 4 | St 13 | Sandig grovmo . . | — | — | — | 100.0 | 0.1 | 28.0 | 62.1 | 6.2 | 1.4 | 0.7 | 1.5 |
| 5 | V 1022 | Grovmo | — | — | — | » | 0.2 | 0.9 | 84.5 | 11.9 | 0.9 | 0.8 | 0.8 |
| 6 | H 220 | Finmo | — | — | — | » | — | 0.1 | 20.1 | 58.4 | 16.5 | 1.5 | 3.4 |
| 7 | Ö 40 b | Mjälilig mo | — | — | — | » | 0.2 | 1.0 | 30.1 | 39.9 | 15.8 | 4.6 | 8.4 |
| 8 | Äl 122 | Mjälilig finmo . . . | — | — | — | » | 0.1 | 0.1 | 11.0 | 54.1 | 23.4 | 3.3 | 8.0 |
| 9 | Äl 131 | » | — | — | — | » | — | 0.1 | 1.2 | 61.2 | 28.5 | 2.2 | 6.8 |
| 10 | V 889 | Finmolättlera . . . | — | — | — | » | 0.4 | 0.5 | 19.6 | 40.3 | 18.6 | 6.2 | 14.4 |
| 11 | Äl 204 | Mjåla (moig) | — | — | — | » | — | 0.1 | 0.9 | 35.8 | 46.1 | 9.7 | 7.4 |
| 12 | V 1017 | Molättlera | — | — | — | » | — | 0.1 | 32.6 | 25.5 | 14.3 | 8.8 | 18.7 |
| 13 | H 22 | Mo-mjällättlera . . | — | — | — | » | 1.1 | 1.7 | 19.5 | 19.0 | 14.8 | 15.1 | 28.8 |
| 14 | Äl 18 | Morängrus | + | 19.0 | 24.7 | 56.3 | 25.3 | 26.2 | 29.2 | 13.4 | 4.7 | 0.8 | 0.4 |
| 15 | Ve 61 | Moränsand | + | 10.5 | 17.0 | 72.5 | 29.6 | 33.5 | 27.1 | 4.9 | 1.9 | 0.4 | 2.6 |
| 16 | H 501 | Moränmo | + | 14.6 | 15.0 | 70.4 | 17.7 | 14.6 | 31.0 | 24.6 | 6.8 | 2.2 | 3.1 |
| 17 | E 264 | » | + | 6.7 | 8.5 | 84.8 | 10.9 | 23.1 | 30.8 | 18.4 | 9.4 | 3.6 | 3.8 |

Mekanisk jordanalys (sällning samt slamning med Atterbergs slamcylinder) av de i tabell 6 upptagna jordarterna. Efter Ekström 1927, s. 140—143.

Table 7. Mechanical composition (in percentage) of the soils in table 6; after Ekström 1927, p. 140—143.

stighöjd utgör medeltalet mellan de båda ändpunkternas beräknade kapillära stighöjder.

Framhållas bör dock, att på grund av att fraktionsuppdelningen vid de mekaniska analyserna likväl omfattar rätt stora intervall, varjämte de verkliga kornstorleksgränserna ej fullkomligt motsvara de teoretiska, erbjuder sorteringskurvans konstruktion avsevärda, i vissa fall ganska stora osäkerhetsmoment, varför någon exakt överensstämmelse icke kan påvisas. Ovanstående relation får alltså betraktas som en relativt god tillnärmelsregel.

Sammanfattning av försöksresultaten.

Följande relationer mellan jordarters kapillära stighöjd och deras mekaniska sammansättning äro i detta arbete framlagda:

I. För ensorterade jordarter är kapillära stighöjden direkt proportionell mot inverterade värdet av kornstorleken och kan uttryckas genom formeln:

$$k = c \cdot \frac{1}{d}$$

där d = partikeldiametern.

c är här en konstant, vars värde är beroende av kornformen. För sfäriska system (hagel) är den = 0.053, för Atterbergs renslammade jordartsmaterial (1903) är den = 0.060, allt under förutsättning av att k uttryckes i meter och d i mm.

Ifrågavarande regel är experimentellt fastställd att gälla till och med en stighöjd av upp till 70 m. För små partikelstorlekar, ungefär från och med finmjäla, synes emellertid partiklarnas adsorbtionsvattenhölje nå en avsevärd tjocklek i förhållande till partikelstorleken. Redan för finmjäla, och i synnerhet för ler, blir alltså det kapillära porsystemet bildat av partiklar med större diameter än den torra partikelns, och kapillära stighöjden bör följaktligen bli något lägre än regeln fordrar, om man nämligen räknar med den torra partikelns diameter. Ifrågavarande förhållande, som indirekt framgår av lerhaltiga naturliga jordarters kapillaritetsförhållande, kan direkt visas genom jämförelse mellan en och samma fraktion (eller jordarts) kapillära stighöjd vid användande dels av vatten, dels av en icke bipolar vätska (Goldschmidt 1926), t. ex. bensol, varvid reduktion göres för den senare vätskans kapillaritetskonstant i förhållande till vattnets.

II. För naturliga jordarter gäller den regeln, att om man genom summering av produkterna mellan procenttal och logaritmer för kornstorleken samt dividering med 100 uträknar jordartens kornstorlekstyngdpunkt, falla i diagrammet kornstorlek : kapillaritet, de naturliga jordarna över linjen för de sorterade fraktionerna, och avvikelserna blir större, ju mer osorterad jordarten är. De naturliga, välsorterade akvatiska sedimenten ligga i en smal sektion omedelbart intill den sorterade linjen, med en exponent av 0.06—0.08; de starkt osorterade moränerna ligga utomordentligt långt ifrån, med en exponent av 0.4—1.0, eller mer.

Orsaken härtill är, att de grövre kornstorlekarna i en jordartsblandning äga ett proportionellt ofantligt mycket mindre inflytande på kapillariteten än de finaste.

III. Relationen mellan osorterade jordarter (naturliga eller syntetiska blandningar) och kapillariteten har fastställts genom tillnärmelse regler:

a) Vid diskontinuerliga 2-komponentblandningar, blandning av två komponenter utan mellanliggande fraktioner, blir inverkan av den grövre komponenten allt mindre, ju större avståndet mellan komponenterna är, d. v. s. om till en viss finkornig fraktion A sättes en grövre B, blir blandningens kapillaritet till en början, när fraktionerna ligga nära varandra (ev. angränsa) = medeltalet av stighöjderna, men med vidgat avstånd blir blandningens stighöjd högre, ju grövre B är, och närmar sig med säkerhet asymptotiskt den enkla stighöjden för A.¹ Sådana blandningar äga dock endast teoretiskt intresse, och äga inga motsvarigheter bland de naturliga jordarna.

b) Vid kontinuerliga blandningar (av intill varandra liggande fraktioner), där medelamplituden icke är särskilt stor,²

¹ Att kvantiteten A är så stor, att den åtminstone helt utfyller porerna mellan B, förutsättes. Vid försöken ha lika kvantiteter A och B använts.

² Medelamplituden bör icke överskrida 10 : 1 (t. ex. 0.06—0.006 mm, o. s. v.).

utgör kapillariteten en direkt additiv egenskap av de olika fraktionernas kapillaritet; då denna senare är direkt proportionell mot kornstorlekens inverterade värde (= »kornfinleken»), erhålles blandningens kapillaritet genom summering av produkterna mellan procenttal och kornfinlek och dividering med 100; den så erhållna »kornfinlekstyngpunkten» läge på kapillaritetskurvan för ensorterade fraktioner ger kapillariteten. Denna regel gäller även för de väl sorterade naturliga sedimenten.

c) Vid ökad medelamplitud och kontinuerlig blandning blir kapillariteten högre än enligt den ovan givna regeln. Detta innebär, vad som också direkt framgår av försök med successivt ökad blandningsamplitud, att de därefter tillkommande grövre fraktionerna erhålla ett ständigt mindre inflytande. När blandningsamplituden närmar sig oändligheten (d. v. s. den grövsta fraktionens kapillaritet närmar sig noll), närmar sig blandningens kapillaritet ett värde som är = den finaste komponentens halva kapillaritet. Mer generellt, för alla jordarter, även för mycket osorterade (stor amplitud), synes den regeln gälla, att stighöjden utgör medeltalet av kapillariteten för de båda ytterkomponenterna (vid naturliga sorteringskurvor beräknade som ändpunkterna av den linje, som markerar sorteringskurvas genomsnittsbredd, se fig. 7).

Det yttre lufttryckets betydelse för kapillariteten.

Den vanliga och synnerligen klarläggande bilden av kapillärkraften och den kapillära stigningen: den krökta gränssytan vatten: luft (menisken) i ett kapillärrör verkande som en kolv, vilken med viss kraft per ytenhet (= tryck) drages uppåt, och därvid suger med sig en vattenpelare, vilken lyftes tills dess de båda motsatt riktade »krafterna» eller rättare trycken (kapillärtrycket och vattenpelarens hydrostatiska tryck) bli lika stora, då stillestånd (jämvikt) inträder, innebär den viktiga konsekvensen, att om överensstämmelsen är fullständig, det yttre lufttrycket måste sätta en gräns för de kapillära stighöjder, som kunna realiseras. Såvida icke särskilda försiktighetsmått iakttagas (urkocht vatten etc.), kan ju genom sugverkan en vattenpelare icke lyftas till större höjd än som motsvarar atmosfärstrycket minus vattenångans partialtryck vid ifrågavarande temperatur; därefter utbildas ett av vattenånga fyllt rum över vattenpelaren.¹ Det har av flera författare antagits, och förefaller a priori sannolikt, att motsvarande förhållande gäller vid kapillär stigning. Då förf. i litteraturen icke kunnat finna några experimentella data, som vare sig bekräfta eller osannolikhöra denna teori, har en del försök utförts för att belysa denna fråga.

¹ Användes ej urkocht vatten, avskiljes redan vid betydligt högre tryck luftblåsor, vilka vid fortsatt tryckminskning utvidga sig under upptagande av ökad mängd vattenånga; existensen av en aldrig så obetydlig gasfas gör att den teoretiska maximala vätskepelarhöjden icke kan överskridas.

Enklast och direktast låter sig förhållandet studeras vid låga stighöjder och alltså låga lufttryck, d. v. s. vid iakttagelse av kapillariteten i vakuum.

Den apparatur, som förf. använt, har utgjorts av en Atterbergs slamcylinder, 34 cm hög och med 5 cm inre diam., i vilken rören inneslutits, och som sedan evakuerats genom vattensug. I cylindern har vidare termometer och kvicksilvermanometer placerats. Försök ha gjorts dels med kapillärrör, dels med i glasrör inneslutna jordpelare.

Kapillärrör i vakuum.

Rören ha tillverkats omedelbart före försökens igångsättande genom utdragning av i gaslåga uppmjukade vanliga smala glasrör. Efter någon övning gick det lätt att erhålla mycket jämna kapillärrör, av olika finlekar, och med stighöjder (för vatten) upp till 3 decimeter.

Som stigvätska användes till en början destillerat (ej urkokt) vatten, färgat med metylenblått. För att det lösta färgämnet skulle i minsta möjliga mån inverka på ytspänning etc., gjordes färgningen så svag som möjligt, så att de kapillära vätskepelarna endast framträdde helt ljust blå.¹

Ett flertal försökserier utfördes, under delvis olika förhållanden. Gemensamt för samtliga försök är följande:

På cylinderns botten hälldes vattnet till några cm höjd, varefter de nyss tillverkade kapillärrören ställdes i cylindern med nederändarna neddoppade i vattnet. Den kapillära stigningen skedde raskt och utan oregelbundenheter, tills jämvikt nåtts, vilket i de grövre rören inträffade efter några sekunder, i de finaste efter högst några minuter. Sedan stighöjden uppmätts, skedde evakueringen med vanlig vattensug.

Det visar sig då, att när trycket med endast några mm Hg överskrider vattenångans partialtryck, de dittills fullkomligt orörliga kapillära vattenpelarna plötsligt börja sjunka. I stort sett sjunker de olika vattenpelarna till en viss höjd, oberoende av kapillärvidden, men dels blir överensstämmelsen aldrig fullständig, dels visa vattenpelarna ytterst oregelbundna rörelser (beroende på lokala temperaturförändringar etc., se nedan), i det de ömsom sjunka och stiga, till synes på ett ytterst nyckfullt sätt.

Följande översikt visar ett par lägen vid det första försöket (varvid temperatur och tryck inne i cylindern ej uppmättes).

| Rör N:o | Försök Ia. | | |
|--------------------------------|------------|------|---------|
| | 1. | 2. | 3. |
| Stighöjd före evakuering . . . | 19.4 | 16.3 | 13.3 cm |
| » efter » | 8.6 | 8.8 | 8.0 » |

Detta läge bibehölls med endast smärre variationer rätt länge tills evakueringen avbröts, och ett nytt rör insattes:

¹ Ej ens i de fall, där i kapillärrören vattenpelaren upprepade gånger lyfts över stighöjden och fått sjunka, och sedan rören under flera dygn fått torka i fria luften, kunde någon som helst, kapillariteten påverkande, beläggning på rörväggarna eller någon ytspänningen förändrande hinna spåras.

Försök Ib.

| Rör N:o | 1. | 2. | 3. | 4. |
|------------------------------------|------------------------|------|------|--------|
| Stighöjd före evakuering | 19.4 | 16.3 | 13.3 | 8.5 cm |
| » efter » | 7—8.5 cm varierande | | | 2.6 cm |

Trycket var så lågt som går att erhålla med en god vattensug vid vattentemperaturen ca 11—10° C; lufttemperaturen rumtemperatur (18—20° C).

Sedan den kvalitativa överensstämmelsen med den uppställda teorin påvisats, fortsattes försöken med större noggrannhet, och med temperatur- och tryckbestämningar inne i cylindern. Utan svårighet kunde trycket erhållas så lågt, att vattnet vid omkring 20° C råkade i rätt livlig kokning; vid denna och något högre temperatur erhöles en viss tryckskillnad mellan tillfällena med pågående evakuering och de tillfällena, då evakueringslangen tilltäppts (då genom fortsatt, så småningom avtagande kokning totala trycket i cylindern steg till ett något högre belopp).

Tabell 8.

Försök N:o II. Stigvätska: Med metylenblått färgat, okokt, destillerat vatten.

Fluid: with methylen-blue coloured, unboiled, distilled water.

| Rör N:o | 1. | 2. | 3. | Temp. | Tryck. | |
|------------------------------------|---|------------------|---------|--------------|-----------------|---------|
| <i>Capillary glass tube no.</i> | | | | <i>Temp.</i> | <i>Pressure</i> | |
| Stighöjd före evakuering | 17.3 cm | 13.7 cm | 12.2 cm | 20.1° | 1 atm. | |
| <i>Rise before evacuation</i> | | | | | | |
| Evacuation | Evakuering pågående | 13.0 | 12.1 | 2.0 | 19.0° | 16.5 mm |
| | D:o d:o; vattnet något kokande | 9.8 | 11.8 | 0.0 | 18.4° | |
| | D:o d:o d:o | 8.0 ¹ | 11.5 | 0.0 | 18.2° | |
| | Evakuering avstängd ² | » | » | » | 18.5° | 16.0 mm |
| | Stighöjd efter luftinsläppning ³ | 17.2 | 13.7 | 12.2 | 19.3° | 1 atm. |
| <i>Rise after full pressure</i> | | | | | | |

¹ Vid uppvärmning med handen av det intill glasväggen liggande röret n:o 1 sjönk vattnet hastigt från 9.8 till 8.0 cm.

² Ingen märkbar skillnad.

³ Omedelbart som första lilla luftmängd (= några mm) insläpptes, började pelarna hastigt stiga.

Tabell 9.

Försök N:o III. Stigvätska: som föregående.

Fluid: with methylen-blue coloured, unboiled, distilled water.

| Rör N:o | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | Temp. | Tryck. | |
|-------------------------------|-----------------------------------|------|------|------|----------------------|------|--------------|-----------------|---------|
| <i>Capillary tube no.</i> | cm | cm | cm | cm | cm | cm | <i>Temp.</i> | <i>Pressure</i> | |
| Före evakuering | 4.15 | 9.5 | 11.4 | 13.8 | 14.5 | 17.1 | 19.2° | 1 atm. | |
| <i>Rise before evacuation</i> | | | | | | | | | |
| Evacuation | Evak. avstängd | 4.15 | 9.3 | 11.4 | 13.8 | 14.5 | 16.9 | 19.0° | 20.1 mm |
| | » pågående ¹ | » | » | » | Begynnande sjunkning | | 19.1° | 18.9 mm | |
| <i>Sinking beginning</i> | | | | | | | | | |

¹ 4, 5 och 6 börja sjunka och fortsätta så länge evakuering pågår. När slangen tillkläms, begynnande stigning.

| Rör N:o | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | Temp. | Tryck. | |
|--------------------------------------|---|------|------|------|------|------|-------|----------|---------|
| Capillary tube no. | cm | cm | cm | cm | cm | cm | Temp. | Pressure | |
| Evacuation | Stötvis evak. | 4.15 | 8.8 | 10.2 | 12.4 | 12.0 | 11.7 | 18.5° | 17.0 mm |
| | 1 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Evak. tillstängd ² | — | — | 4.7 | 5.0 | 5.0 | 5.8 | — | — |
| | Evak. pågående ³ | 3.7 | 6.3 | 3.9 | 5.1 | 5.1 | 5.3 | 23.0° | 16.8 mm |
| | 4 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Evak. avstängd ⁵ | 3.4 | 7.8 | 9.3 | 5.1 | 12.2 | 5.0 | 26.6° | 25.5 mm |
| Luft insläppt ⁶ | — | 8.8 | 11.3 | 13.8 | 14.5 | 16.8 | 22.5° | 1 atm. | |

¹ Vid uppvärmning med handen av glasväggen intill kapillärörören sjönko pelarna kraftigt — ett par av dem t. o. m. till o cm.

² Ganska stillastående vid dessa värden (efter uppvärmning).

³ Efter uppvärmning med båda händerna runt om cylindern, nedtill.

⁴ Ett par gånger företogs växelvis uppvärmning av hela apparaten (speciellt vattnet) med evakueringen avstängd, växelvis evakuering (stark kokning av vattnet), för att borttaga all luft. Därvid iakttofs: vid uppvärmning stego pelarna, vid evakuering sjönko de, ehuru med mycket olika belopp.

⁵ Imbildning på väggarna.

⁶ Mot slutet blev (på grund av den starka uppvärmningen och evakueringen) färgkoncentrationen i pelarnas översta del (c:a 5 mm) märkbart starkare än i övrigt, varför försöket avbröts. Den slutliga stighöjden blev i vissa rör därför något mindre än den ursprungliga.

För att undvika all eventuell inverkan av den tillsatta, mycket obetydliga färghalten, försöktes med rent, ofärgat vatten. Det visade sig, att även vid rätt små kapillärvidder vattenpelaren tydligt kunde iakttagas.

Tabell 10.

Försök N:o IV. Stigvätska: Ofärgat, urkokt, destillerat vatten.

Uncoloured, boiled, distilled water.

| Rör N:o | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | Temp. | Tryck. |
|---------------------------------------|------|---------|-----------|------|-------|-----------|----------|
| Capillary tube no. | cm | cm | cm | cm | cm | Temp. | Pressure |
| Stigh. före evakuering | | | | | | | |
| Rise before evacuation | 4.15 | 5.35 | 9.5 | 12.8 | 18.2 | 21.5° C | 1 atm. |
| Evak. pågående ¹ | 4.05 | 5.1 | 4 | 9.6 | 15.85 | 19.2° C | 16.5 mm |
| » avstängd ² | 3.7 | 4.5 | 0.5 + 1.6 | 6.6 | 0 | 22° C | 19.0 mm |
| — — — — ³ | | 0—0.5—1 | cm | | | — | — |
| Evak. avstängd | 3.7 | 4.5 | 6.6 | 7.1 | 12 → | 23° C | 19.8 mm |
| » » ⁴ | 3.4 | 4.0 | 5.5 | 4.0 | 0.5 | (24.8° C) | — |
| — — — — ⁵ | — | — | — | — | — | — | — |

¹ Vid evakueringen, även sedan vattnet börjat koka, till en början mycket obetydlig eller ingen sjunkning. Vid obetydlig värming med händerna började genast hastigt sjunkning.

² Gasblåsa inkom i nr 3; pelaren bestående av en undre del till + 0.5 samt en övre, lös pelare, 1.6 cm lång. Vid värming med händerna sjönk n:o 5 till o! Samtidigt drevs i N:o 3 den lösa vattenpelaren explosionsartat mot höjden, och stänkte ut genom rörets övre mynning.

³ Genom lokal uppvärmning med händerna låto sig alla pelarna drivas ned till o eller några mm däröver. Vid borttagning av handen stiga pelarna hastigt.

⁴ Efter lokal, svag värming med gaslåga av väggen intill rören.

⁵ Under pågående lokal värming av väggen med gaslåga, samt minuterna därefter, medan väggen ännu är varm, ser man, i synnerhet för n:o 1 och 2, hur vattenpelarna måttligt sakta stiga till en viss höjd, och sedan plötsligt, nästan explosionsartat, hastigt sjunka till noll, på nytt stiga till c:a samma höjd som förut (för 1 = 3.3—3.5, för 2 = c:a 4.0), o. s. v.

| Rör N:o Capillary tube no. | 1. cm | 2. cm | 3. cm | 4. cm | 5. cm | Temp. Temp. | Tryck. Pressure |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|--------------------|
| Evak. pågående ¹ . . . | 3.7 | 4.5 | 7.0 | 7.1 | — | 23.1° C | — |
| » avstängd . . . | 3.8 | 4.5 | 6.8 | 7.1 | — | — | — |
| — — — — ² . . . | — | — | — | — | — | — | — |
| » » . . . | 3.8 | 4.5 | 6.9 | 7.1 | — | 13.0° C | 13.5 mm |
| Något luft insläppt ³ . Rise after admitting but little air | 4.18 | 5.38 | 9.55 | 12.9 | — | 16.5° C | 20.0 mm |

¹ Efter sakta stigning av alla pelarna under avkylningsgång nåddes detta, påfallande orörliga, jämviktsvärde.

² Vattenkylning av cylindern c:a 30 min.

³ Den ringa insläppta luftmängden (ett par mm Hg) tillräcklig att återföra vattenpelarna till deras utgångshöjd (t. o. m. något högre, beroende på kapillaritetskonstantens ökning med fallande temperatur). Stigningen började omedelbart, och förlöpte fullkomligt normalt (snabbt och kontinuerligt).

Försök N:o V. Stigvätska: Ofärgat, okokt vanligt vattenledningsvatten.

7 rör med stighöjderna 5.15, 5.25, 6.75, 7.9, 11.2, 11.3, 15.6 cm användes. Vid evakueringen bildades rätt tidigt rikligt med gasblåsor i vattnet. Även i de kapillära vattenpelarna bildades dylika blåsor, vilka starkt utvidgade sig och omöjliggjorde regelbunden observation. Bortsett från detta var förloppet mycket lika de föregående — pelarna bringades lätt att sjunka vid svag, lokal värmning.

Efter upprepad värmning, även med låga, voro de flesta gasmellanrummen i kapillärpelarna bortdrivna — samtliga pelare höllo sig kring medelhöjden 4—5 cm. De grövsta pelarna nådde lättare för stor höjd än de finare — den finaste (15.6 cm stighöjd) hölls en längre tid vid 0.

Efter insläppning av 10 mm Hg luft stego pelarna till utgångshöjden.

Sammanfattade bliva observationerna följande:

I. Vid evakueringen börja först de högsta (finaste) vattenpelarna att sjunka, med regelbunden ordningsföljd.

II. Vid användning av rent, urkokt, destillerat vatten hade sjunkningen påtagligt mycket svårare att »komma igång» än i övriga fall.

III. Vid lokal uppvärmning sjunka, vid lokal avkylning stiga vattenpelarna. Däremot förändras icke pelarhöjden vid en hela systemet omfattande temperaturförändring av motsvarande storleksordning.

IV. De höjder, som vattenpelarna intaga i det evakuerade kärlet äro — ehuru ofantligt mycket lägre än de ursprungliga — dock något högre än den höjd, som motsvarar trycket i cylindern minus vattenångans partialtryck. I de fall där denna skillnad var praktiskt taget noll — d. v. s. all luft utdriven, och totaltrycket endast hänförande sig till vattenången, något som uppnåddes genom uppvärmning och evakuering — var likväl pelarhöjden avsevärd. Vid de olika försöken hölls pelarhöjden i dessa fall anmärkningsvärt jämn vid 4—5 cm.

V. För att bringa ned pelarna till höjden noll erfordras en lokaluppvärmning av kapillärröret en eller ett par grader, under bibehållet lågt tryck i

cylindern. Trycket i det uppvärmda kapillärröret blir i detta fall mindre än den mättade vattenångans tryck vid ifrågavarande temperatur.

VI. Sjunkningen vid uppvärmning börjar i regel plötsligt och sker mycket hastigt. I vissa fall (i synnerhet vid smalare rör) förblir pelaren vid det uppnådda låga läget så länge temperaturen icke sjunker. I andra fall (vid grövre kapillärrör) kan man se, hur i rören intill den relativt kraftigt uppvärmda glasväggen en pulserande rörelse äger rum ännu under väggens svalnande, i det vattenpelaren stiger till en viss höjd, så hastigt sjunker till närmare noll, på nytt stiger till samma höjd, hastigt sjunker, o. s. v. Stighastigheten är endast omkring en tredjedel av sjunkningshastigheten.

VII. Vid sjunkningen — ej ens vid den plötsliga, hastiga sjunkningen vid uppvärmning — kan minsta tecken till någon avspaltning av vattenpelarens ytparti skönjas.

VIII. Även skakning kan utlösa hastig sjunkning — särskilt gäller detta vid användandet av rent, urkokt vatten.

Av observationerna kunna följande slutsatser dragas:

En kapillär vattenpelare följer den ovan givna regeln av lufttryckets kapillaritetsbegränsande inverkan (åtminstone inom ifrågavarande tryckområde), med den begränsningen, att vattnet synes kunna tåla ett visst verkligt undertryck, i regel upp till ca 5 cm vatten. Detta metastabila överskridande av nämnda gräns blir större och sker lättare i absolut rent, urkokt vatten, än i svagt förorenat vatten. Vidare ökas förmågan av att tåla undertryck på intet sätt med ökad kapillär finleksgrad, tvärtom är i vissa fall förhållandet det motsatta.

Vid lokal uppvärmning av kapillärrören ökas vattenångans partialtryck intill menisken, medan trycket i cylindern är i det närmaste oförändrat, d. v. s. om p = totala trycket över menisken, $p_{\text{H}_2\text{O}}$ = den mättade vattenångans tryck vid den intill menisken rådande temperaturen, avtar alltså uttrycket ($p - p_{\text{H}_2\text{O}}$); vid lokal avkylning växer samma uttryck, och i full överensstämmelse med teorien sjunker den kapillära vattenpelaren i det förra, och stiger i det senare fallet.

Vid hela systemet omfattande temperaturförändringar däremot bibehåller uttrycket ($p - p_{\text{H}_2\text{O}}$) ett i det allra närmaste konstant värde, emedan totala tryckförändringen beror på och är exakt lika stor som förändringen av vattenångans partialtryck; tryckförändringen av den ytterligt obetydliga luftmängden vid temperaturvariationer på högst ett tiotal grader kan nämligen helt negligeras.

Hur sjunkningen i detalj måste tänkas försiggå, är en fråga, som förf. saknar möjlighet att närmare ingå på. Den normala, långsammare sjunkningen vid evakueringen eller vid lindrig uppvärmning sker på ett sätt, som ger vid handen, att den sänkande kraften endast är en del av pelarhöjden, d. v. s. att meniskens lyftande ytspänningseffekt till en del är kvar under hela sänkingsförloppet.

Den plötsliga sjunkningen vid avsevärd uppvärmning av de grövre kapillärrören sker med en så stor hastighet, att det förefaller som om ytskiktet plöts-

ligt destruerades, och vattenpelaren drevs ned av hela sin tyngd; därunder nybildas så småningom ett nytt ytskikt, som bromsar upp rörelsen och lyfter pelaren upp till den förra höjden. I detta fall är, som framhållits, gasfasen i kapillärröret över menisken icke mättad med avseende på vattenånga; det förefaller troligt, att vid den starka avdunstningen ytskiktet icke hinner nylagra sig till full fasthet utan plötsligt »brister», och vattenpelaren sjunker. Men även om denna, givetvis ytterst grova, framställning är riktig, återstår flera olösta detaljproblem. Då hela fenomenet i övrigt visar ett typiskt metastabilitetsförlopp skulle man vänta, att det normala vore den ständiga oscillationen, en stigning tills plötsligt omedelbart under menisken gasutveckling skedde, och vätskepelaren sjönk, för att stiga när ett nytt ytskikt hunnit struera sig, o. s. v. Vilket är det fysikaliska förloppet (eller tillståndet) vid menisken i det normalare fallet, när kapillärpelaren i vakuum står till synes orörlig, långt under den normala höjden? Vilken förändring sker vid menisken, när vid något minskat tryck pelaren sakta sjunker till ett något lägre jämviktsläge? Detta är allt frågor, vilka överlåtas åt den specialfysiska forskningen.

*

Då det är storheten atmosfärstryck minus vattenångans partialtryck, som begränsar kapillariteten, bör vid låga kapillära stighöjder en sänkning kunna ernås även genom att kraftigt öka ångtrycket, d. v. s. vid vanligt lufttryck stegra temperaturen till bortåt 100° .

Ett par försök ha utförts med kapillärrör upphettade i vanligt värmeskåp. Vid en temperatur av något över 100° (varvid vattnet i det kärl vari kapillärrören mynnade kokade svagt) voro de kapillära vattenpelarna sänkta till noll¹, men stego mycket hastigt, så snart temperaturen sjönk vid öppnandet av dörren till värmeskåpet.

Då förf. saknat härför erforderlig apparatur, och dessutom ej haft anledning fullfölja försöken in på alltför avlägsna gebit, ha noggrannare kvantitativa försök (med konstant, exakt bestämd temperatur under pågående observation, etc.) icke utförts. Det är möjligt, att en rätt avsevärd överhettning erfordras, d. v. s. att metastabilitetsområdet vid dessa temperaturer sträcker sig över betydligt större tryckområden.

Jordartspelare i vakuum.

Utan prövning kunna de vid försök med kapillärrör av glas vunna resultaten icke tillämpas på av jordpartiklar uppbyggda kapillärsystem, beroende på den variabla marginalen för metastabilt överskridande av den givna gränsen. Med de föregående analoga försök med jordarters kapillaritet i vakuum ha därför utförts. Metodiken har därvid varit något olika.

¹ Denna sänkning beror icke på den med temperaturen avtagande kapillaritetskonstanten — denna avtar nästan lineärt, och når först vid kritiska temperaturen (för vatten 365° C) värdet noll.

Försök I. Från början vattenfyllt jordartssystem; vattnet sjunkande i vakuum till jämvikt.

För att hindra jordpelarens sprängning genom gasutvidgning användes urkokt, destillerat vatten. Ett glasrör av 10 mm diameter fylldes med det ännu varma vattnet, och den torra jordarten ihölls försiktigt i vattnet. Då jordarten var nästan ensorterad, uppstod ingen nämnvärd olikformighet vid sedimenteringen. Den använda fraktionen var 0.2—0.1 mm, kapillär stighöjd enligt Atterberg 42.8, enligt förf. 40.7 cm.

Glasrörets nederända förseddes med en för vatten lätt genomsläpplig filterpapperspropp, och röret placerades vertikalt i den förut använda evakueringscyllindern, vars botten täcktes av ett ca 15 mm. högt skikt av urkokt, destillerat vatten. I cylindern voro som förut en termometer och en kvicksilvermanometer inneslutna.

Vid evakueringen avskildes den översta centimetern av pelaren och lyftes i höjden — beroende på att vid packningen något luft inkommit nära ytan. I övrigt visade sig — som vid packningen även iaktogs — jordpelaren praktiskt taget fullkomligt luftfri — endast några spridda, helt små, gasfyllda porer bildades, tillsammans endast täckande några % av glasrörets innervägg. Evakueringen med vattensug pågick några minuter, och avbröts när trycket (vid 20.5°) var 19.0 mm Hg, genom att evakueringsslangen tillklämdes.

Redan under de första minuterna kunde en tydlig sjunkning iakttagas, i det uppifrån räknat allt fler gasfyllda porer började utbilda sig, och denna vattentömning ur porerna förflyttade sig långsamt nedåt. Vattensjunkningen skedde tämligen oregelbundet — även rätt långt under den något oskarpa gränsen för den övre pelardelen med hög frekvens av gasfyllda porer uppstodo här och var klungor av gasfyllda porer.

Nedanstående sammanställning ger en bild av förloppet. Som vattenhöjd anges den höjd över fria vattenytan, där gränsen mellan den vattenfyllda och den rikligt gasfyllda delen av jordpelaren står. Där denna gräns omfattar en bredare övergångszon anges övergångszonens gränsvärden.

Tabell 11.

The fall of the capillary water-column in a water-filled soil-column (in a glass tube) at very low pressure (vacuum).

| Tid <i>Time</i> | Temp. <i>Temp.</i> | Tryck <i>Pressure</i> | Vattenhöjd <i>Height of water column</i> |
|-------------------------|-----------------------|--------------------------|---|
| — 5 min. | | 1 atm. | 30 cm |
| 0 min. | 20.5° C | 19.0 mm | 29 cm Evakueringen slutförd |
| + 20 min. | — | — | 20 cm |
| + 1 t. 2 min. | 19.4° C | 18.7 mm | ca 16 cm |
| + 1 t. 28 min. | 19.1° C | 18.7 mm | ca 18—10 cm |
| + 20 t. | 18.2° C | 18.0 mm | 18—10 cm |
| + 20 t. 10 min. | — | ca 1/2 atm. Stigande. | 18—14 cm Luft insläpptes |

Tabell 12.

Försök II. Kapillär stigning i vakuum. Från början torrt jordartssystem.
Jordart: Atterbergs fraktion 0.5—0.2 mm.

Capillary rise in vacuum. Dry soil column in a vertical glass tube, by shaking brought to slide down with its lower part in water, in vacuum. Soil: Atterberg's fraction 0.5—0.2 mm (see table p. 20).

| Tid Time | Temp. Temp. | Tryck Pressure | Stighöjd cm Capillary rise cm | |
|----------------------|----------------|-------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 0 min. | 21.5° | 20 mm | 0 | Stigningen börjar |
| 7 min. | — | — | 9.0 | |
| 13 min. | — | — | 9.6 | |
| 15 min. | 21.0° | 20.1 mm | — | |
| 35 min. | 19.8° | 19 mm | 10.2 | |
| 1 tim. | 19.3° | 18.2 mm | 10.35 | |
| 1 tim. 20 min. . . . | 19.0° | 18.0 mm | 10.4 | |
| 1 tim. 21 min. . . . | | | | Vattenkylning av apparaturen |
| 2 tim. 10 min. . . . | 13.0° | 13 mm | 9.0—9.3 | |
| 2 tim. 45 min. . . . | 11.5° | 12.5 mm | 9.0—9.3 | |
| 3 tim. 45 min. . . . | — | 1 atm. | Stigande | Fullt lufttryck påsläppt. |

Gränsen för den kapillärt fyllda delen av jordpelaren var, som även delvis framgår av protokollet, efter fullbordad sjunkning ytterst diffus och svår att fastställa. Vid insläppandet av luft framgick den däremot med stor skärpa, i det de relativt sparsamma gasfyllda porerna under 14 cm genast vattenfylldes — över 14 cm bildade de gasfyllda porerna ett sammanhängande system, vilket omedelbart fylldes av luft. Kapillära stighöjden hos jordarten vid ifrågasvarande vakuum var alltså 14 cm.

Efter ökning av trycket började vattnet rätt hastigt stiga.

Då det kunde antagas, att kapillära stighöjden lättare och exaktare låte sig bestämmas vid stigning, utfördes en ny försöksserie, med den skillnaden, att rören fylldes med torr jordart; och placerades i cylindern något upplyftade över vattenytan. Sedan evakuering skett, bringades rören att falla ned från den pall varpå de stått. Sandfyllningen nådde ända ned till rörets underkant, och kvarhölls genom en på röret placerad huv av metalltrådsnät och filterpapper. Så snart rören nått vattnet kommo alltså sandpelarna i beröring med vattnet, och stigningen började.

På grund av temperaturvariationer på ett par °C (särskilt avkylning under nätterna) uppstodo kondensationsföreteelser, ej blott synnerligen rikligt på cylinderns innerväggar och rörens ytterväggar, utan även över jordartspelarna, starkast i n:o 1, därefter i n:o 2, och minst i n:o 3. Kapillärgränsen gick även mot slutet rätt tydligt att iakttaga, men däröver var jordarten fuktig, och i kontakt mot gläserens innervägg syntes spridda fuktfläckar över kapillärgränsen. I n:o 1 var jordarten efter andra natten svagt fuktig upp till c:a 1½ cm över kapillärgränsen, i n:o 2 c:a 1½ cm, i n:o 3 endast 2 à 3 mm.

Tabell 13.

Försök III. Analogt med föregående, men med 3 jordartsrör samtidigt.
 Jordarter: Atterbergs fraktioner n:o 1 = 1.0—0.5, n:o 2 = 0.5—0.2, n:o
 3 = 0.2—0.1 mm.

*Analogous with the former, but with 3 soil columns: Atterberg's fractions 1.0—0.5
 (no. 1), 0.5—0.2 (no. 2), and 0.2—0.1 mm (no. 3).*

| Tid <i>Time</i> | Temp. <i>Temp.</i> | Tryck <i>Pressure</i> | Stighöjder cm: <i>Capillary rises cm:</i> | | | |
|------------------------|-----------------------|--------------------------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| | | | N:o 1 | N:o 2 | N:o 3 | |
| 0 min. | 20.7° | 19.0 mm | 0 | 0 | 0 | Stigningen började |
| 3 min. | — | — | 5.2 | 6.7 | 7.6 | |
| 9 min. | 21.5° | 20.0 mm | 6.2 | 7.4 | 10.2 | |
| 13 min. | — | — | 6.7 | 7.6 | 11.0 | |
| 20 min. | 21.1° | — | 7.0 | 8.0 | 11.8 | |
| 27 min. | 20.8° | 19.4 mm | 7.1 | 8.35 | 12.5 | |
| 33 min. | 20.8° | — | 7.2 | 8.5 | 12.9 | |
| 46 min. | 20.6° | 19.3 mm | 7.4 | 8.7 | 13.3 | |
| 1 tim. 51 min. | 20.3° | 19.3 mm | 8.2 | 9.3 | 13.8 | |
| 2 tim. 31 min. | 19.8 | 19.0 mm | 8.4 | 9.5 | 14.1 | |
| 22 tim. | 18.9° | 17.7 mm | c:a 9.4 | 11.0 | 15.3 | |
| 1 dygn 5½ tim. | 21.2° | 20.2 mm | c:a 9.5 | 11.0 | 15.4 | |
| 1 dygn 22 tim. | 19.0° | 18.0 mm | c:a 9.5 | 11.0(—11.2) ¹ | 15.4(—15.6) ¹ | |

¹ De högre värdena förmodligen hänfödda till kondensationsvatten.

Kapillära stighöjderna för de tre jordartsfraktionerna vid rumstemperatur (18—21° C) och ett tryck, som endast med någon mm Hg överskrider vattenångstrycket, bli alltså enligt de olika bestämningarna:

Tabell 14.

| | 1.0—0.5 mm | 0.5—0.2 mm | 0.2—0.1 mm | |
|---|------------|------------|------------|--|
| Försök I. | | | c:a 14 cm | } <i>Capillarity at low pressure (only one or two mmHg more than the vapour pressure)</i> |
| » II. | | 10.4 cm | — | |
| » III. | 9.5 cm | 11.0 cm | 15.4 cm | |
| Normal stighöjd (vid fullt lufttryck). | 13.1 | 24.6 | 42.8 | (Enl. Atterberg) |
| <i>Capillarity at full atmospheric pressure</i> | 11.3 | 25.5 | 40.7 | (Enl. förf.) (author's value) |

Överensstämmelsen mellan de vid olika bestämningar erhållna värdena är som synes god; variationerna kunna hänföras till något olika packningsgrad (packningen hårdast vid försök III) och lufttryck.

I likhet med vid försöken med kapillärrör blir stighöjden — ehuru mycket mindre än den vid vanligt tryck rådande — avsevärt högre än de värden, som motsvara det ångfria lufttrycket. Men medan vid kapillärrören det belopp, varmed denna gräns överskrides, icke växer med finleken, är detta tydligen fallet ifråga om jordarterna.

Vid fortsättning av försöken med de två närmast finare Atterbergska fraktionerna (0.1—0.05 och 0.05—0.02) visade det sig, att trots det att en speciell evakueringscylinder av större längd anskaffats, och jordarten packades i stigrör av 55 cm längd (effektiv pelarhöjd omkring 50 cm) var icke rörens längd tillräcklig för att observera slutliga stighöjden hos den finaste fraktionen; stighöjden hos fraktionen 0.1—0.05, vid högst någon mm Hg lufttryck och 17—20° C, bestämdes till c:a 45 cm (mot 100 cm vid vanligt tryck).

Någon tydlig lagbundenhet ifråga om förhållandet mellan kapillariteten i vakuum och kapillariteten vid vanligt lufttryck vid olika finleksgrad framgår som synes icke ur dessa försök, vilka icke tillåta någon extrapolering i något avseende. Snarast synes det dock som om från en viss kornstorlek räknat med ökad finleksgrad relativa överskridandet av lufttrycksgränsen skulle ökas.

Bestämning av kapillariteter > 10 m vid vanligt lufttryck (1 atm.).

Då alltså resultaten av kapillaritetsförsöken i vakuum äro av den art, att de icke tillåta några slutsatser beträffande den praktiskt viktiga, ursprungliga frågan, huruvida de finkorniga jordarternas realiserbara kapillaritet begränsas av det vanliga lufttrycket vid jordytan (omkring en atm.), måste andra försöksanordningar vidtagas. På följande sätt har den vid 1 atm. tryck verk samma kapillariteten hos jordarter med avsevärt över 10 m:s kapillaritet bestämts (se fig. 8). Principen innebär bestämning av stighastigheten i en jordpelare, vars genomsläpplighet är bestämd; härur erhålles det drivande hydrostatiska trycket, d. v. s. kapillariteten. Enklast borde ju detta kunna erhållas genom att låta vattnet stiga i en torr, väl packad jordpelare, och mäta stighöjden vid olika tidsintervall (vid grafisk framställning av kurvan för stighöjden i förhållande till tiden anger tangenten stighastigheten, vilken alltså kan bestämmas för olika pelarhöjd); genomsläppligheten bestämmes därefter på vanligt sätt för en viss del av pelaren. Emellertid visar det sig, att vid sådan bestämning (vid stigning i i rör packade jordpelare) stighastigheten blir avsevärt mindre än den borde enligt nämnda beräkning, d. v. s. att det erhållna värdet för kapillariteten blir alldeles för lågt. Orsaken härtill är, att motståndet i jordpelaren blir för högt. Dels instänges ett stort antal smärre luftkvantiteter i jordpelaren, beroende på den med lokalt ojämn hastighet skeende stigningen, dels uppstå lätt, särskilt beträffande finare jordarter, större eller mindre släppor, vilka, även om de äro hårfina, representera ett i ofantligt hög grad ökat motstånd.

Följande ändring vidtogs därför:

Försöksjordarten utrördes i destillerat vatten och upphettades till kokning för utdrivande av lösta gaser. Den tjockt vällingartade jordartssuspensionen

fylldes därpå på ett längre glasrör (längd = 15 cm, diam. = 19.5 mm; fig. 8 A), vilket nedtill var försett med en gummipropp (1), täckt av ett metalltrådsnät (2) och ovanpå detta ett filterpapper (3). I den genomborrade gummi-proppen var ett glasrör instuckat.

Jordartssuspensionen fick nu, insatt i permeabilitetsbestämningsapparaturen (fig. 8 I), under ett vattenövertryck av omkring 1 m, under några dagars tid »sätta sig», dels genom partiklarnas sedimentation, dels därigenom, att den genom jordartsprovet drivna vattenströmmen åstadkom en från bottnen gradvis uppåt växande, hårdare pelare av väl packad jord. När jordarten var fast (d. v. s. ägde märkbar bärighet) även i ytan, avjämnades jordpelarens yta längs glasrörets överkant, varpå genomsläpplighetsbestämningar utfördes, vilka avbrötos, sedan specifika genomsläppligheten befunnits vara konstant.

Under tiden hade en annan, helt kort (2 cm hög) jordpelare av samma jordart beretts genom packning av tjock jordartsvälling i en kort glascylinder av samma diameter (19.5 mm), och dennas torkning under pågående tillstampning. Ena ytan på den kortare jordcylindern utplanades med minutiös noggrannhet; likaså överytan på den vattenmättade, längre jordartspelaren. Denna bringades i obruten vattenförbindelse med en vattenfylld, i $\frac{1}{10}$ cm³ graderad byrett. Den torra, korta jordpelaren placerades nu hastigt ovanpå den vertikalkstående, vattenmättade pelaren, så att de väl avplanade ytorna kommo i möjligast fullständiga beröring med varandra. Härvid började kapillär stigning i den torra jordarten, varvid vattnet i byretten började sjunka. Tid samt vattenstånd i byretten noterades varje minut från försökets början.

Då vattenminskningen i byretten motsvarar den vattenkvantitet, som uppsugits i den mindre pelaren,¹ erhåller man, då jordpelarens genomsläpplighet är känd, ur de avlästa värdena den hydrostatiska kraft, varmed vattenuppstigning skett, d. v. s. den aktiva kapillariteten.

Med denna metod bestämdes kapillariteten hos fraktionen 0.1—0.05 mm (kapillaritet 100 cm), varvid synnerligen god överensstämmelse erhöles med det direkt bestämda värdet. Sedan alltså metodens användbarhet prövats, utfördes motsvarande bestämning med fraktionerna 0.005—0.001.

Med fraktionen 0.005—0.002 utfördes ett stort antal försök, varvid största vikt lades vid att få kontaktytorna så jämna som möjligt. De erhållna kapillaritetsvärdena varierade endast obetydligt, från c:a 8.5—10.5 m, varvid de högsta värdena erhöles vid den omsorgsfullaste avjämnningen av kontaktytorna.

Med fraktionen 0.002—0.001 — vilken kunde förmodas äga en teoretisk kapillaritet av minst 25 m — erhöles vid motsvarande försök, och ytterligt omsorgsfull avjämnning, ett värde å kapillariteten av endast c:a 7.5 m. Då — även om lufttrycket begränsar den aktiva kapillariteten — i alla händelser inte den aktiva kapillariteten i fraktionen 0.002—0.001 kan vara lägre än i 0.005—0.001, måste orsaken vara, att motståndet i kontaktytan trots den omsorgsfulla tillslutningen av ytorna blir avsevärt mycket större i den finare fraktionen. Givetvis måste det vara lättare att erhålla kontakten så nära som

¹ Gäller endast sedan försöket pågått en tid, till en början sker uppsugningen på bekostnad av vattnet i jordarten (under krympning).

I = permeabilitets-apparatur. II = underdel av röret A: 1 = gummipropp, 2 = metalltrådsnät, 3 = filterpapper. III—IV = apparatur för bestämning av kapillär vattenuppsugningshastighet. III: B = litet rör med torr jordart, A = samma rör och jordart som i I, II A (= våt jordart). IV = röret A med anordning (E) för ökad avdunstning från jordartens överyta. Kombinationen av Fig. IV och Fig. III D, A motsvarar apparaturen fig. 9, vilken använts vid de i t. ex. fig. 10 grafiskt återgivna försöken.

I = permeability apparatus. II = lower part of tube A: 1 = rubber stopper, 2 = metal gauze, 3 = filterpaper. III—IV = apparatus for determination of velocity of capillary suction. III: B = small tube containing same soil as I, II, A (= moist soil). IV = tube A with device for increased evaporation from upper surface of the soil; a = dry air (passed through a CaCl_2 tube), viz. warmed by passing a helicoid copper tube heated by means of a gas-jet. b = tube conducting to a water-jet airpump. The combination of apparatus fig. IV and III corresponds to the apparatus fig. 9, and which was used for the experiments graphically represented in, e. g. fig. 10; the decrease of water in tube D being measured at succeeding time-intervals.

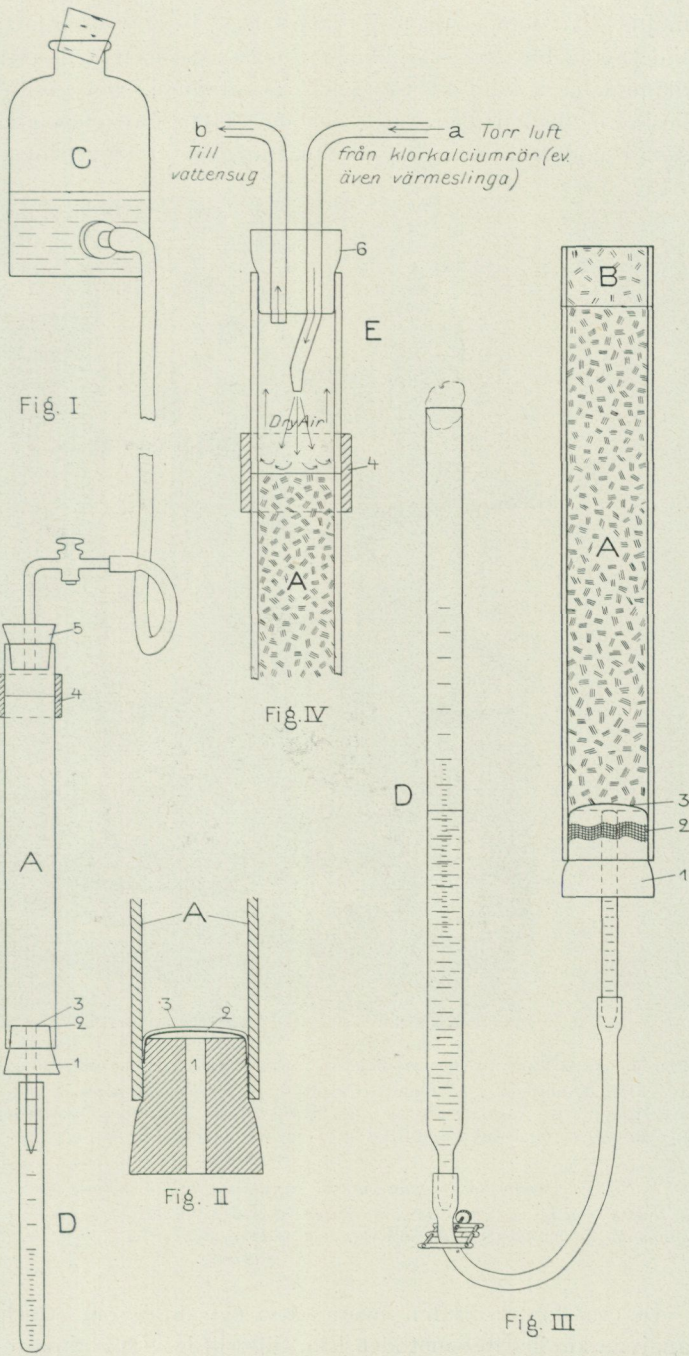


Fig. 8. Apparatur för bestämning av permeabilitet och kapillaritet (vid normalt atmosfärstryck).
 Fig. 8. Apparatus for determining permeability and capillarity (at normal atmospheric pressure).

möjligt lika homogen som jordarten f. ö., ju grövre jordarten är — med ökad finleksgrad blir storlekskillnaden mellan de normala porerna och oöndvikliga ojämnheter å kontaktytorna hastigt växande. Det visade sig även, att kohesionen mellan den långa och den korta jordartspelaren, även sedan den senare undertill var helt vattenmättad, var ytterligt ringa.

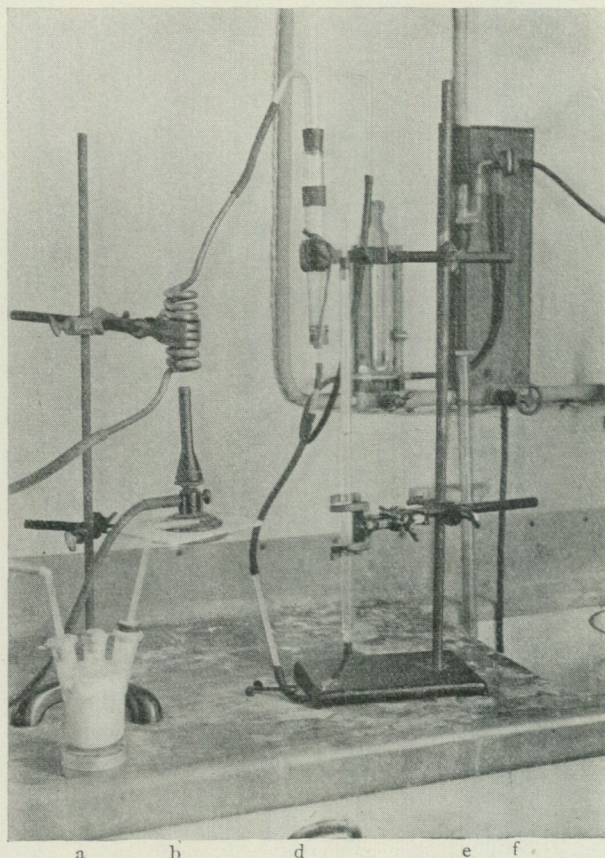


Fig. 9. Apparatur för bestämning av kapillariteten genom uppsugnings-avdunstningsmetoden. a = klorkalciumflaska, b = kopparrörspiral (vid försöken omges denna av ett skyddshölje av asbestpapp), d = jordartsrör (se fig. 8, fig. IV); i den övre gummiproppen äro insugnings- och utsugningsrör inpassade, samt därjämte en termometer (ej utritad å fig. 8: IV), e = byrett, f = vattensug.

Fig. 9. Apparatus for determining capillarity by the suction and evaporation method. a = with CaCl_2 , b = helicoid copper tube heated by means of a gas-jet (c), d = tube fig. 8: IV, but with a thermometer through the top rubber stopper, e = tube D, fig. 8: III, f = water-jet airpump.

De erhållna resultaten måste alltså betraktas som ytterligt osäkra, och den angivna kapillaritetsmetoden icke tillförlitlig vid så finkorniga jordarter.

För att eliminera den felkälla, som den ofullständiga kontakten mellan den vattenmättade och den ursprungligen torra jordpelaren representerade, vidtogs följande ändring av metoden:

I stället för att åstadkomma uppstigningen genom kontakt med torr jordart, åstadkoms den genom kraftig avdunstning från den vattenmättade jordpelarens överyta, och mätning av den per tidsenhet uppsugna vattenkvantiteten som förut.

Den ökade avdunstningen erhöles genom att ur en glasrörspets låta en luftström blåsa mot jordpelarens överyta. Luftströmmen åstadkoms medelst vattensug, så som fig. 8, IV visar. För ökad effekt är det lämpligt att torka luftströmmen över klorkalcium (klorkalciumflaska eller -rör), och vidare kan effekten ytterligare stegras efter behov genom uppvärmning av luften. Förf. använde härför en vertikalstående spiral av kopparrör, omgiven av asbestpapp, i vars mitt en sprit- eller gaslåga brann. I detta senare fall befanns det önskvärt att mäta temperaturen i luftkammaren över jordpelarens yta. Efter någon tid har nämligen jordpelarens överyta antagit samma temperatur som den varma luften, och då kapillaritetskonstanten minskas med ökad temperatur, är det nödvändigt att vid starkare uppvärmning verkställa reduktion till rumstemperatur.¹

Med denna apparatur verkställdes försök först och främst med fraktionen 0.002—0.001, varav två serier äro framställda grafiskt i fig. 10, och en sammanfattning av samtliga analoga försöksserier i tabell 14. Här är icke platsen att närmare ingå på de vid försöken betydelsefulla olika detaljfaktorerna eller de slutsatser, som kunna dragas av försöksserierna. I sammanfattning blir förloppet följande:

En jordart sådan som fraktionen 0.002—0.001 mm, vilken visserligen faller inom gruppen »ler», men till sina plasticitetsegenskaper huvudsakligen motsvarar en fin mjåla (ehuru med avsevärd krympning), förhåller sig på följande sätt:

Efter det uttorkningen från överytan börjat, dröjer det en viss tid, innan uppsugningen underifrån börjar — beroende på att den första avdunstningen furageras från själva jordarten, synbarligen i samband med krympningen av jordpelaren. När denna vattenminskning i jordpelaren nått dess botten, börjar uppsugningen — i de flesta fall till synes plötsligt. Uppsugningen är till en början dock avsevärt mindre än den maximala, men stegras kontinuerligt (se fig. 10). Under tiden fortsätter krympningen (synlig huvudsakligen i bildningen av en — givetvis vattenfylld — horisontell släppa mellan jordpelarens botten och buffertbädden (filtrerpapperet), samt (vertikala) små sprickor i synnerhet i jordpelarens övre hälft).

Slutligen nås den (vid de rådande avdunstningsförhållandena) maximala uppsugningshastigheten, och stigkurvan förlöper rätlinigt.

Egentligen borde avdunstningshastigheten drivas upp till den höjd, att en — om också mycket tunn — övre skorpa av uttorkad (icke kapillärt mättad)

¹ Ofantligt mycket större blir ju temperaturens inverkan på viskositetskoefficienten och därmed genomsläppligheten. Uppvärmningen av jordpelaren skrider emellertid så långsamt nedåt, att till en början den erforderliga korrigeringen blir obetydlig och kan utföras approximativt. Vatten- (eller luft-)kylning av glastuben vid jordpelarens övre del är givetvis önskvärd, och kan arrangeras utan större svårigheter.

Tabell 15.

| Försök n:r | Luft- ström- mens temp. °C | Jord- pelarens tempe- ratur °C | Största- uppsugn- hastighet under pågående avdunstn. cm ³ /min | Jordpelarens genomsläpplig- het, reducerad t. jordpelar- temperaturen cm ³ /min · m _{H₂O} | Verksamt negativt kapillär- tryck (i m vatten) | Uppsugen vattenmängd efter avdunstningen: | | |
|--|--|--|--|--|---|--|-----------------|------------------------------|
| | | | | | | (Efter tiden) | cm ³ | % av total- volymen |
| | Temperature of the air | Temperature of the soil column | Maximal quantity water raised by proceed- ing evapora- tion cm ³ /min | Permeability of the soil column, reduced to the actual tempera- ture of soil column cm ³ /min · m _{H₂O} | Effective negative capillary pressure (in metres water) | Water quantity buoyed up in the soil column after breaking of the evaporation | | |
| | | | | | | (After the time) | cm ³ | % of the total volume. |
| a. Fraktion 0.005—0.002 mm. Jordpelarens dimensioner: ¹ längd = 13.9 cm, diam = 1.95 cm, volym = 41.5 cm ³ | | | | | | | | |
| I | 21.5° | 21.5° | 0.0125 | 0.0084 | 1.9 m | — | — | — |
| II | ca 60° | 23° | 0.060 | 0.0087 | 7.2 m | 50 tim | 0.4 | 1.0 % |
| b. »Fraktion 0.002—0.001». Jordpelarens dimensioner: ¹ längd = 13.4 cm, diam = 1.95 cm, volym = 40.0 cm ³ | | | | | | | | |
| I | 20° | 20° | 0.011 | 0.000412 | 27 m | — | — | — |
| II | 20° | 20° | 0.011 | » | 27 m | — | — | — |
| III | ca 40° | 23° | 0.022 | 0.000443 | 50 m | 66 tim | 0.59 | 1.5 % |
| IV | ca 60° | 23° | 0.030 | » | 68 m | 71 tim | 0.75 | 1.9 % |
| V | 57° | 23° | 0.0285 | » | 65 m | — | — | — |
| VI ² | ca 62° | 23° | 0.020 | » | 46 m | 72 tim | 0.60 | 1.5 % |

¹ Efter fullbordad svällning.

² Synbarligen genom torrdestillation av gummi uppstod hinnavsättning på jordprovets överyta, vilken hindrade avdunstningen.

Tabell 15. Bestämning av (minimivärden på) kapillariteten genom mätning av vattenuppsugningshastigheten vid stark avdunstning från jordpelarens yta.

Table 15. Determination of (minimum values of) the capillarity, by measuring the quantity of water raised per minute by increased evaporation from the surface of the soil column. See p. 63 and fig. 8—9.

Dimensions of the soil columns:

a) Fraction 0.005—0.002 mm. High = 13.9 cm, diam. = 1.95 cm, volume = 41.5 cm³.

b) »Fraktion 0.002—0.001» (correct magnitude = 0.0016—0.0005 mm). High 13.4 cm, diam. = 1.95 cm, volume = 40.0 cm³.

jord bildas. Vid ifrågavarande jordart har — med den pelarlängd och lufttemperatur, som använts — detta icke lyckats. De erhållna värdena äro alltså att betrakta som minimivärden. Emellertid är vattentransporthastigheten i jordart uttorkad till under omslagpunkten så försvinnande ringa i jämförelse med den kapillära transporthastigheten, att utbildningen av även en ytterst tunn sådan skorpa erfordrar en oproportionerligt kraftig stegring av avdunstningsmöjligheterna. Om man alltså avpassar pelarlängd och avdunstningshastighet så, att till en början upptransporten blir avsevärt lägre

än den normala, och därefter ökar avdunstningsmöjligheten (effektivare luftbetrykning av överytan och ökad temperatur), skall man finna, att, när man nått en viss uppsugningshastighet, ytterligare stegring av avdunstningsmöjligheten får ytterst ringa eller knappt märkbar effekt på uppsugnings-

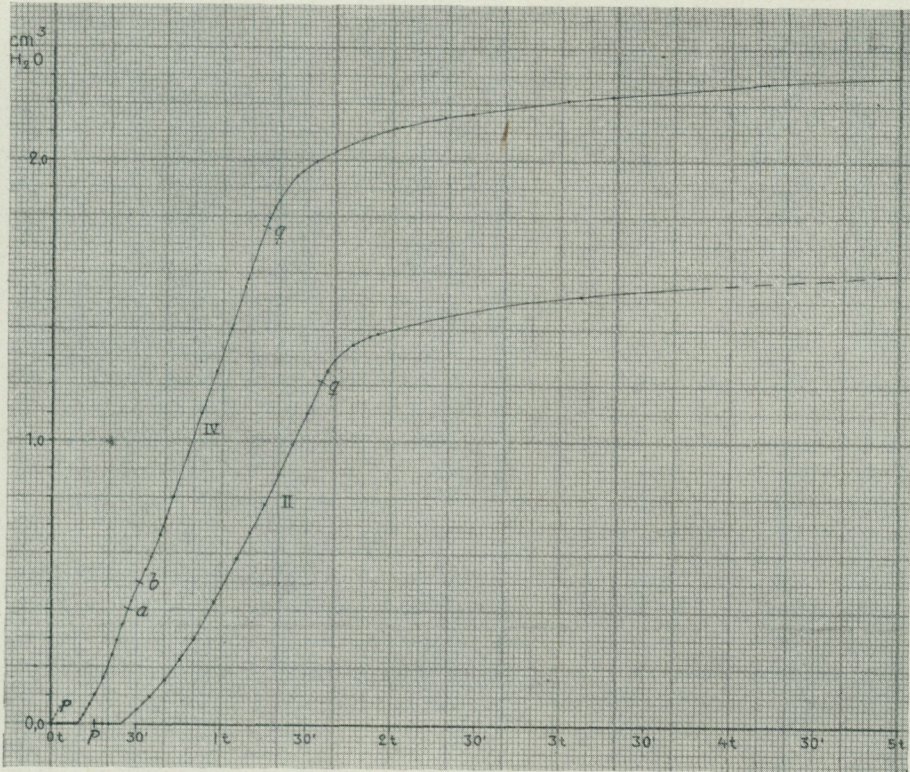


Fig. 10. Kurva för vattenuppsugningen med avseende på tiden vid genom särskilda anordningar (se fig. 9) ökad avdunstningshastighet från överytan av en kapillärt mättad jordpelare. Jordart: fraktion »0.002—0.001», verklig kornstorlek 0.0016—0.0005 mm.

P = avdunstningen påbörjad, q = d:o avslutad; uppsugningen därefter beror på jordartens svällning (= utvidgning av de på grund av kapillärtrycket hoptryckta adsorbtionsvattenhöljerna. Sträckan a—b, kurva IV: avdunstningsprocessen avbruten 3 min. på grund av apparaturskada.)

Fig. 10. Time-suction curve for the increased velocity of evaporation (obtained by special device — see fig. 8: III A, D, and IV.) from the upper surface of a capillary-saturated column of soil. Soil: fraction »0.002—0.001» mm, actual size of grain (microscopically determined) = 0.0016—0.0005 mm.

P = evaporation commenced; q = evaporation concluded; suction is subsequently due to the swelling of the soil (= expansion of the adsorption-water films previously squeezed together on account of the capillary pressure). The section a—b, curve IV: evaporation interrupted for 3 min. by reason of damage to the apparatus.

hastigheten. Man har då nått gränsen för den kapillära upptransportförmågan, och ytterligare avdunstning skulle resultera i bildning av en uttorkningsskorpa. Emellertid röner här avdunstningshastigheten mycket ringa inflytande av ökning av avdunstningsmöjligheterna. Avdunstningshastigheten från ytan av en (nägorlunda finkornig) jordart avtar nämligen hastigt med minskad

fuktighetshalt, beroende på den successivt ökade skillnaden mellan det mättade ångtrycket över jordarten och över en fri vattenyta. Vid låga vattenhalter (endast adsorbtiionsvattenhalt) kommer detta sakförhållande till synes i den s. k. hygroskopiciteten. Men även vid större vattenhalter (kapillärmättnad) äger samma förhållande rum — vid ifrågavarande försök har det visat sig, att vid en viss lufttemperatur och luftströmstyrka, när avdunstningen från fraktionen 0.002—0.001 låg i närheten av det största uppnådda värdet, avdunstningen från fraktionen 0.005—0.002 blev mångdubbelt större.

Beträffande den finare jordarten var dess största kapillära transportförmåga nästan fullt utnyttjad, d. v. s. det negativa kapillärtrycket i jordartens yta var i det närmaste maximalt. Det lika stora kompressiva (positiva) trycket mellan jordartspartiklarna var alltså också i det närmaste maximalt, d. v. s. adsorbtiionsvattenhöljerna ägde sin minsta tjocklek före omslagspunkten. Från de i jordartsporererna långt inkrupna meniskerna och från de tunna adsorbtiionsvattenhöljerna (med sitt avsevärt nedsatta ångtryck) blir avdunstningen förhållandevis ringa — i den grövre jordarten däremot är endast en del av det negativa kapillärtrycket och det kompressiva trycket mellan partiklarna aktiverat, och alltså adsorbtiionsvattenhöljerna relativt mäktiga och meniskerna relativt svagt inbuktade, varför avdunstningen blir avsevärt större. Hela denna fråga står i samband med frågan om jordarternas konstitution, vilken ytterligare belyses genom de ovan beskrivna försöken.

Som bekant åstadkommer det negativa kapillära trycket, vilket åstadkommes genom meniskernas inbuktning, och som råder i kapillärernas vätska, ett lika stort positivt (kompressivt) tryck på kapillärssystemet (se noten sid. 5). Simon Johansson har antagit (1914, sid. 52—57) lerornas krympning bero på detta kompressiva tryck, orsakat av de alltmåra anspända kapillärmeniskerna. I anslutning härtill kan anföras ett arbete av Zunker (1928), där han i en på ett flertal försöksserier grundad framställning starkt betonar och närmare utvecklar den roll, de variabla adsorbtiionsvattenhöljerna spela (själva volymminskningen måste ju givetvis återföras till ett närmande till varandra av de fasta jordpartiklarna, d. v. s. minskning av vattenmängden kring desamma), och även beräknar adsorbtiionsvattenhöljernas tjocklek i olika fall. I slutet av arbetet (s. 553) omnämner även Zunker — dock mer i förbigående, utan någon starkare betoning — att vid lufttorkning av en jordart det av meniskerna på jordarten åstadkomna trycket åstadkommer volymminskningen med utklämning av adsorbtiionsvattenhöljerna.

Detta samband är värt att ytterligare betonas.

I en torkande jordart med en vattenhalt över omslagspunkten åstadkommes genom de alltmåra inbuktade meniskerna ett ständigt ökat negativt kapillärtryck i porernas vätskefas, som motsvaras av ett ständigt ökat lika stort positivt (kompressivt) tryck verkande å det fasta (kapillärbildande) partikel-systemet. Men jordartspartiklarna omgivas av adsorbtiionsvattenskikt, vilka i finkornigare jordarter nå avsevärd tjocklek i förhållande till partikeldiametern, och under inverkan av det kompressiva trycket »utklämmas» dessa vattenskikt i »beröringspunkterna» mellan partiklarna, vilket resulterar i en total

volymminskning. Emellertid besitta adsorbtionsvattenhöljerna en tendens att genom attraktion av nya molekyler utvidga sig på de »hopklämda» ställena. Adsorbtionsvattenhöljerna verka på så sätt i viss mån elastiska — vid nedsänkning av den i viss grad uttorkade jordarten i vatten blir den kapillära meniskspänningen i ytan = noll, och adsorbtionsvattenhöljernas latent expansivitet orsakar en vatteninsugning med åtföljande svällning.

Jordarternas bärighetsförhållanden och plastiska egenskaper bero i hög grad på denna samverkan av det yttre, kompressiva trycket (orsakat av meniskspänningen, av belastning, eller helt enkelt av motståndet mot vatteninströmning), och det lika stora expansiva mottrycket, orsakat av adsorbtionsvattenhöljernas elasticitet; och i den mån de bero härav, äro alla hithörande processer reversibla.¹

Alldeles oberoende av de för tillfället rådande kapillära förhållandena, d. v. s. meniskspänningen vid jordartens yta, motsvaras det positiva trycket mellan jordartspartiklarna i en viss punkt av ett lika stort negativt tryck i själva vätskan, och detta antingen statisk jämvikt råder eller vattenströmning pågår.

Vid ovan relaterade försök är det visserligen kapillariteten, som är den primära orsaken till stigningen. Men man kan lika väl säga, att det är det av vattenhöljernas elastiska tryck orsakade negativa trycket i porerna, som är orsaken — och i själva verket är det detta senare, som åstadkommer strömningen från ett jordparti till ett annat i pelaren, ända fram till överytan (meniskerna). Trycket växer från undersidan (där spänningen är noll) till översidan, där det når sitt maximalvärde, på ett sådant sätt att slutligen ett kontinuitetstillstånd uppträder. När avdunstningen avbrytes, fortsätter uppsugningen likväl, med en i det närmast efterföljande ögonblicket oförminskad hastighet, vilken sedermera, allt eftersom volymen ökas och den elastiska spänningen mellan partiklarna minskas, successivt avtar (se fig. 9).

Sammanfattning.

Genom de i detta kapitel refererade försöken är det visat, att den ofta framförda teorien, att det yttre lufttrycket skulle sätta en gräns för den kapillaritet, som kan realiseras, icke är riktig. Enligt teorin ifråga är det närmast skillnaden mellan totala lufttrycket och vattenångans partialtryck ($P - P_{H_2O}$), som icke skulle kunna överskridas, emedan annars ett av vattenånga fyllt vakuum skulle utbildas under menisken.

¹ Emellertid äger även kohesionen (= attraktionen mellan de fasta partiklarna) stor betydelse. Vid fullständig eller i det närmaste fullständig uttorkning synes en så tät anlagring av mineralpartiklarna intill varandra ske (ev. genom sammankittning av ej reversibla äkta kolloider), d. v. s. en så starkt kohesiv sammanhållning, att den ej ens vid vattenmättning kan sprängas av vattenmolekylerna, m. a. o. adsorbtionsvattenskiktet kan icke tränga sig emellan beröringspunkterna (se t. ex. Zunker 1928, s. 539). Denna irreversibla process kan äga rum i större eller mindre utsträckning, och omfatta dels hela massan (t. ex. vid tegelbränning) eller endast orsaka en viss aggregering (t. ex. vid torkning av såplera). Där dylika processer spela in, blir krympningen icke helt reversibel. Vid en relativt väl sorterad och grov »lera» (t. ex. den av förf. använda fraktionen 0.0016—0.0005 mm) synes emellertid några dylika processer icke alls förekomma, utan krympningen vara fullkomligt reversibel, d. v. s. motsvaras av en lika stor svällning vid återförande till ursprungliga vattentrycksförhållanden.

Vid försök med kapillärrör av glas i vakuum (vid rumstemperatur och ett tryck, som motsvarade eller med endast ett par mm överskred vattenångans partialtryck) visade sig visserligen en mycket avsevärd sänkning av stighöjden, men dels överskreds i större eller mindre grad den teoretiskt väntade gränsen, dels visade hela företeelsen ett ganska oregelbundet förlopp, beroende på metastabilt överskridande av tryckgränsen.

Vid försök med grova jordartsfraktioner (sandjordar, fraktionerna 1.0—0.5, 0.5—0.2, 0.2—0.1 mm) i vakuum, som ovan, erhöles visserligen betydligt mycket lägre stighöjder än vid vanligt lufttryck, men stighöjden växte likväl med kornfinleken och överskred mycket avsevärt den av torra lufttrycket givna gränsen.

För att kunna avgöra frågan beträffande de finare jordarterna beräknades kapillariteten hos fraktionen 0.002—0.001 mm (verklig kornstorlek enl. mikroskopisk mätning = c:a 0.0016—0.0005 mm) därigenom, att stighastigheten mättes i en jordpelare, vars genomsläpplighet förut var bestämd, varvid stigningen (eller rättare vattenuppsugningen) åstadkoms genom på olika sätt ökad avdunstning från jordpelarens överyta. Som det högsta (minimi)-värdet på kapillariteten hos ifrågavarande fraktion erhöles c:a 70 m.

Det yttre atmosfärstrycket verkar alltså icke begränsande på kapillariteten¹, och de hos t. ex. de styvare lerorna genom extrapolation av kapillaritetsvärdena för de av förf. bestämda fraktionerna sannolika kapillariteterna av flera hundra m kunna alltså i naturen realiseras (som hydrostatiska tryck, orsakande vattenuppsugning). Stighöjder av tillnärmelsevis dessa belopp torde väl aldrig realiseras, beroende på nämnda jordarters ringa genomsläpplighet. — Endast när det gäller grova kapillärer och alltså mycket låga tryckgränser (i vakuum) synes nämnda begränsning genom lufttrycket äga rum, ehuru även här den teoretiska gränsen metastabilt överskrides.

Kapillaritetens praktiska betydelse.

Detta avsnitt skall här behandlas ytterst kortfattat; i tidigare publicerade (Beskow, 1929 a och b) samt kommande arbeten beröres nämnda fråga i olika sammanhang.

Som i förordet påpekas är det uppenbart, att jordarternas kapillaritet äger stor betydelse för vägar och järnvägar, och framför allt beträffande det s. k. tjälproblemet. Tjälskjutningsprocessen med dess vatten-isanrikning (vilken sedermera i tjällossningen orsakar tjälskottsbildningen) beror ju på jordarternas kapillära vattenuppsugningsförmåga, och av de faktorer, av vilka uppsugningshastigheten beror, är kapillariteten den ena huvudfaktorn; den andra är givetvis permeabiliteten.

¹ I ett tidigare arbete (Beskow 1929 b) har förf. — på grundval av de då utförda, ovan refererade försöken med kapillärrör i vakuum — anslutit sig till nämnda teori vid konstruktionen av ett diagram (1929 b, fig. 3), vilket alltså bör korrigeras i nämnda avseende, d. v. s. kurvorna fortsätta obrutna inom kapillaritetsområdet > 10 m.

Det är ju uppenbart, att det vid djuptäckdikning är av stor vikt att känna kapillariteten hos den jordart, som skall dräneras; blir dräneringsdjupet större än kapillariteten, upphäves vattenuppsugningen fullständigt; i andra fall kan minskningen i uppsugningshastighet någorlunda beräknas.

Och t. ex. vid användning av sandbäddar i vägkroppar på terräng med mycket högt grundvatten kan det vara av vikt att känna sandens kapillaritet; är denna för hög, kan sandbädden komma att leda upp vatten från grundvattentytan till överliggande jord o. s. v.

I nedanstående tabell äro ett antal kapillaritetsbestämningar å norrländska jordar från tjälskjutande terräng sammanställda.

| Jordart (<i>Soil name</i>) | Lokal (<i>Local</i>) | Län | Kapillaritet <i>Capillarity</i> cm |
|-----------------------------------|--------------------------|-----------------|--|
| 1. Finsand (= grovmo) | Bygdsiljum | Västerbottens | 52 |
| 2. Grovmo (»Vattusand») | Åbyn—Ålund | » | 101 |
| 3. Moig morän (Tjälskj.; jäsande) | Skansholm | » | 125 |
| 4. Mjälilig morän » » | Vägen Glommerträsk-Jörn | » | 240 |
| 5. Mo » » | Umeå (W. stadsgränsen) | » | 250 |
| 6. Finmo » » | S. Sunderbyn | Norrbottens | 250 |
| 7. Finmo-mjälila » » | Avasjö, Risbäck | Västerbottens | 450 |
| 8. Finmo-mjälila » » | Stornäs, Risbäck | » | 460 |
| 9. Mjälila » » | Östrands by (Älvsby s:n) | Norrbottens | 470 |
| 10. Lättlera » » | Älvsbyn | » | 670 |
| 11. Lättlera » » | Brännland | Västernorrlands | 765 |
| 12. Mellanlera » » | Fröland | » | > 9.5 m |

Tabell 15. Kapillär stighöjd hos ett antal norrländska jordarter. N:o 3—12 äro s. k. »jäsleror», tagna från svårare tjälskjutande mark.

Capillary rise for a number of Norrland soils. Nos. 3—12 are so-called »jäsleror», taken from ground liable to frost-lifting.

Som synes omfattar de tjälskjutande och tjälskottsbyggande jordarna ett kapillaritetsområde från $1\frac{1}{4}$ —10 m — i detta fall representeras den grövsta tjälskjutande jorden av en morän. I serien av naturliga sediment har det visat sig, att den kornstorleksgräns, vid vilken de tjälskjutande jordarna börja, ungefär sammanfaller med gränsen grovmo: finmo, vilken beträffande de naturliga sedimenten motsvarar kapillariteten $> 1 - 1\frac{1}{2}$ m.

De svåraste tjälskjutande jordarna omfatta ett något snävare område för kapillariteten, som kan fixeras till 2—8 m. Samtidigt äro dessa — i synnerhet det mest väl sorterade — ytterligt utpräglade »jäsleror», varför de även bli svåra tjälskotts jordar.

Kapillariteten är en enkelegenskap, vilken i hög grad (ehuru alls icke entydigt) karakteriserar en jordart. Som ovan visats är den en funktion av partikelstorleken, och borde — som Simon Johansson (1913, S. 12 ff) framhållit — i flera fall kunna ersätta direkt grovleksbestämning genom mekanisk analys — helst som kapillariteten är en av de i sig praktiskt viktiga jordartsegenskaperna:

Den även av Sveriges geologiska undersökning antagna jordartsindelningen med avseende på kornstorleken skulle alltså, överförd till kapillariteten, få följande utseende.

| Kornstorleksgränser (mm) | Jordarts- beteckning | Kapillaritet (gränsvärden) |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 2—0.6 | Grovsand | 3—10 cm |
| 0.6—0.2 | Mellansand | 10—30 » |
| 0.2—0.06 | Grovmo | 30—100 » |
| 0.06—0.02 | Finmo | 1—3 m |
| 0.02—0.006 | Grovmjåla | 3—10 » |
| 0.006—0.002 | Finmjåla | 10—30 » |

Ovanstående indelning hänför sig emellertid till de sorterade jordarterna; för att kunna tillämpas på naturliga sediment måste gränsvärdena höjas med omkring 20 %. Men härtill kommer, att de naturliga sediment, vilka huvudsakligen bestå av finmjåla och finare grovmjåla, äga viss lerinblandning samt lerig konsistens, och benämnas lättlera eller t. o. m. mellanlera. Med beaktande av dessa omständigheter kommer man till nedanstående indelning:¹

| Jordartsbenämning: | Kapillaritet: |
|---|---------------|
| Grovsand | 3.5—12 cm |
| Mellansand | 12 —35 » |
| Finsand eller grovmo ² | 35 —120 » |
| Finmojord | 1.2—3.5 m |
| Mjåljord | 3.5—6.5 » |
| Lättlera | 6.5—12 » |
| Mellanlera | c:a 12—? » |

Denna indelning torde få betraktas endast som ett praktiskt komplement till den på mekanisk analys grundade noggrannare jordartsindelningen, motiverad av kapillaritetens praktiska betydelse samt den stora lätthet och ringa arbetskostnad i jämförelse med utförlig mekanisk analys, varmed en kapillaritetsbestämning kan utföras. Vidare bör det ånyo betonas, att den endast äger tillämpning på normala, någorlunda väl sorterade sediment, och icke t. ex. på moränjordar.

Ty kapillariteten är ett enkelvärde, som på visst sätt uttrycker genomsnittliga kornfinleken, men däremot ej ger uttryck åt sorteringsgraden. Som kom-

¹ Jfr Simon Johanssons indelning (1913, S. 14), vilken dock hänför sig till andra kornstorleksgränser.

² Det förefaller som om jordartsindelningen bleve betydligt mer logisk, om begreppet »finsand» får omfatta en undergrupp av samma storlek som »grovsand» och »mellansand», och ej en dubbelt så stor. Då vidare den ytterligt viktiga gränsen mellan tjålksjutande och icke tjålksjutande jordarter synes gå ungefär vid gränsen mellan finmo och grovmo, är detta ytterligare ett starkt sakskäl att icke inränga finmon inom sandbenämningen utan draga gränsen mellan sand och finare sediment vid kornstorleken 0.06 mm, och alltså låta »finsand» endast vara synonymt med grovmo.

plement kan genomsläppligheten betraktas, vilken, sammanställd med kapillariteten, uttrycker sorteringsgraden; vid viss kapillaritet innebär större specifik permeabilitet alltid högre grad av sortering. Då alltså kapillaritet och permeabilitet dels ge en god uppfattning av en jordarts mekaniska sammansättning, dels äro de primära jordartsfysikaliska faktorer, som bestämma jordarternas vattenhushållande förmåga och på så sätt äro av största praktiska betydelse, ha permeabilitetsförsök å jordarter utförts av talrika forskare, och har en exakt, objektiv metod för permeabilitetsbestämningar å jordarter utgjort ett eftersträvat önskemål. Tyvärr medföra även de minsta variationer i packningsgrad mycket stora variationer i genomsläpplighet, varjämte igenslamning av porerna lätt åstadkommer förändringar. Att exakt bestämma genomsläppligheten hos en viss jordart vid visst tillfälle (= viss packningsgrad) erbjuder inga svårigheter, men att med tillräcklig noggrannhet erhålla ett för jordarten karakteristiskt värde å specifika genomsläppligheten har hittills icke lyckats. Ju bättre sorterad jordarten är, dess mindre blir variationsamplituden, och för helt enkelkorniga jordartsfraktioner kunna ganska goda värden å specifika genomsläppligheten erhållas. Till en del hithörande, ännu ej slutförda, permeabilitetsförsök (i kombination med kapillaritetsbestämningar) hoppas förf. senare kunna återkomma.

I föreliggande uppsats är styrkan av den speciella kraft eller rättare det tryck, som kallas kapillariteten, och vidare metodiken för bestämning av detta tryck behandlad; framställningen berör huvudsakligen kapillaritetens statik.

Det som gör kapillariteten praktiskt viktig är ju emellertid framför allt, att detta tryck åstadkommer rörelser, vattenströmningar, vilka dels regleras av motståndet (eller genomsläppligheten), dels av de förändringar i den aktuella drivkraften, som yttre hydrostatiska tryck (t. ex. höjd över grundvattenyta) orsaka. Det problemaggregat, som omfattar kapillaritetens dynamik, är givetvis ofantligt mycket mer komplicerat än den statiska kapillariteten (framför allt vid exakt matematisk framställning). En del hithörande frågor äro kortfattat behandlade i ett par tidigare uppsatser (Beskow, 1929 a och särskilt 1929 b), övriga resultat av ännu pågående undersökningar äro avsedda att inflyta i kommande publikationer.

Summary.

Capillarity in soils is a physical force (or more correctly a pressure), and in certain circumstances the capillary rise in certain soils is a measure of this force, which is localised in the bounding surface between water-filled and air-filled pores in the soil. It is a function partly of a property of the soil, namely its size of pore, and partly of a property of the liquid itself, namely its surface tension, or rather, the capillary constant. The force itself is a manifestation of surface tension and depends upon the curve of the bounding surface between the fluid and the gas in the pores in which the limit in question lies.

(The air can be replaced by any gas, and the water by any liquid, or by two liquids which do not mix.)

In regular capillary systems (tubes or interstitial spaces between plates in parallel planes) the capillary rise (h) is a simple function of (inversely proportional to) the capillary width, according to the formula $h = \frac{a^2}{r}$ (capillary tube) and $h = \frac{a^2}{d}$ (interstitial space) respectively, where r and d are the radius and width.¹

In the case of soils the question is obviously immensely complicated, owing to the fact that soils present a very dispersed, irregular pore-system, with infinite variations of pore-spaces. When the shapes of the particles, the degree of assortment, and the degree of packing are the same, however, it is to be expected that the capillary rise will be a linear function of the inverted value of the size of the particles (or of the pore-spaces), which indeed experiments quoted below prove to be the case.

Generally the capillary pressure is measured by the height to which it is capable of lifting a column of water (= capillary rise). The capillary rise is the rise attained when a final position of equilibrium is reached, to which the rising water-column in a column of soil approaches asymptotically (in respect of time), and which theoretically is only reached after an infinitely long period. In the case of coarser soils (sand) it is true that practically the position of equilibrium is reached after a comparatively short time, but with increased fineness the requisite time increases rapidly, owing to the reduced permeability. The highest (definite) capillary rise, which was determined by reading off the direct rise, is 105 cm (particle-size 0.1—0.05 mm), and this was only reached after 72 days (Atterberg, 1903, p. 205). For the next finer grade (0.05—0.02 mm) the final position of equilibrium was not reached at all.

Besides this method (direct rise), two other methods, differing in principle are referred to, S. Johansson's² and J. Versluys'.³

¹ a^2 is the capillarity constant, which in the case of water at room temperature is about 15.c (See Table p. 7).

$a^2 = \frac{\alpha}{\delta}$ where α = the surface tension of the liquid in mg/mm, and δ is the density of the liquid.

² S. Johansson, Undersökning över vattnets rörelse i sandjord. Sveriges geologiska undersökning, Ser. C. No. 243 (1913).

³ J. Versluys: De capillaire werkingen in dem boden. Amsterdam, 1916.

With the object of being able to determine the capillarity of even fine-grained soils quickly and with small quantities of material, the author has worked out a new method.

Principle. The theoretical assumption on which the method is based is that capillarity is a force that is completely operative even in the smallest quantities of soil. In order to indicate the strength of this force a hydrostatic measure is generally employed, i. e. the height of the column of water that it can sustain. This column need not be entirely within the soil, but the greater part of it can be free.

Description of the method.

(Fig. 1: I.) In a glass vessel (a) rests, on a buffer of coarser soil or on a wire gauze + filter paper, the soil whose capillary rise is to be determined. The glass vessel is fitted hermetically into the neck of a separatory funnel b, which, by means of a rubber tube, is connected below with a similar funnel c, which can be raised and lowered. The funnels b and c contain water. At the commencement of the experiment the column of water in b reaches right up to the soil, which is water-saturated. In pursuance of the method the funnel c is now successively lowered until the position has been passed where the difference in height between the two water-surfaces (= suction) corresponds to the soil's capillary rise. When c is lowered beyond this position the suction has become greater than the capillary force, which can no longer sustain the column of water. The column of water begins to fall, and when the water-surface has reached the under-surface of the soil, the air suddenly »breaks through». Observations of the height of the column (the difference in height between the under-surface of the soil-specimen and the surface of the water in c) at the position of c when the air breaks through and of its next preceding height-position give two limits between which the capillary rise lies. By means of fresh determinations with quite small successive lowerings within this interval (precision determinations) the value of the capillary rise can be enclosed between two limits lying very near to each other, i. e. a very exact value can be obtained.

For the determination of greater capillary rises, the water column is replaced for the greater part by a column of mercury, in order that the apparatus may not become too large and unwieldy (see fig. 1).

The packing of the soil is of extreme importance, as varying degrees of closeness give rise to varying capillary rises in the same soil. However, it has proved that the variations are quite small if the following method of packing is employed:

The soil is worked up with such an amount of water that an averagely thick, porridge-like and absolute homogeneous consistency is obtained, when it is placed in the test vessel (Fig. 1: I & II), precautions being taken against the formation of air-bells. The precaution should also be taken of pouring a few drops of water on the surface of the specimen. Then the specimen is subjected to a slight suction by means of a few cm of mercury until all excess of water is removed, and the surface of the specimen is no longer shiny with free moisture. Now and again it is advisable gently to pack the specimen by means of taps with a flattened glass rod.

That the excess of water is removed slowly (= by slight suction) is very important, as otherwise the finer particles are apt to be carried with the water and to clog the pores, so that a too high value of the capillary rise is obtained.

When the excess of water has been removed as described, the gradual successive lowerings of the funnel c commence.

These precautions refer chiefly to the finer kinds of soil (light clays etc.); the packing of sand soils is very simple, and generally speaking the determinations are very easy in the case of coarser soils, and above all well sorted soils are considerably easier to determine than badly sorted soils — or rather in the latter case the values obtained vary within greater limits, owing to the difficulty of obtaining correspond-

ing degrees of packing in the case of badly sorted soils. This does not imply any failure of the method, for each determination gives the capillarity only for the degree of packing involved in the particular case.

With a little practice, however, it is possible to obtain quite good results even for the most difficult soils. For ordinary sediment deposited in water, the margin of error need never exceed $\pm 6\%$, and generally it can be brought down to $\pm 3\%$ or $\pm 2\%$ by means of one or two precision determinations in each case.

The above method can be employed with good results even in the case of natural, undisturbed soil, and without altering the natural moisture content. A piece of earth (regular or irregular) is cut out and placed on a bed of water-saturated sand, after which it is well packed round with some dense plastic material (Fig. 1: III) — I have found stiff clay to be the most suitable material. (Naturally its capillary rise must be greater than that of the specimen.) The upper part of the specimen, which must be free, is moistened with a few drops of water for safety's sake, after which the determination proceeds as usual.

By means of the above-described method a capillary rise of something in the neighbourhood of 10 metres can be determined — the theoretical limit is of course the external atmospheric pressure minus the partial pressure of the water vapour. Greater capillary rises than 9.5 metres can be determined by the introduction of compression above the specimen, most suitably combined with suction in the ordinary way. Compression is most simply effected by means of a mercury pump, which at the same time serves as a manometer (see Fig. 1: IV, p. o). There is theoretically no limit to the capillarity that can be determined by this method, beyond that imposed by the strength of the materials.

Some experimental results.

A number of experiments have been carried out to discover the relation between the results obtained by the present method and those obtained by other methods.

1. A soil (sand) was poured into a vertical water-filled tube composed of a number of short sections jointed together by means of rubber rings. The lower end of the tube, which was covered with a metal gauze, was immersed in water, and the upper end was protected from excessive evaporation by means of a (bored) cork. During a few days the water was allowed to sink, until complete equilibrium was attained (cessation of movement), when the apparatus was taken apart, and moisture analyses of the different parts of the sand column were made. The result is exhibited graphically in Fig. 3.

The distribution of water was as follows:

At the top a constant, lower water-content A (= adsorption water), to the limit a, at the bottom also a constant water-content C (= adsorption water + capillary water) to the limit c; between these a transition zone (a—c). The transition zone was obviously due to the unevenness of the size of the pore-spaces: the more well-sorted the soil is, the narrower will the transition zone probably be.

Thus we can distinguish two limits of capillary rise: a lower one (= c), in which all the pores are water-filled and above which the larger ones are air-filled, and an upper one (= a), in which the last water-filled (least) pores cease. The visible limit of capillary rise (= b) lies between these, as the eye draws the limit where a larger number of pores are air-filled, and thus the soil looks lighter.

It now proves that the capillary rise as determined by the author's method lies very close to the lower limit, and this is entirely explicable, as the »break-through» of the air obviously occurs as soon as the first pores (of the bottom layer) become filled with air.

The author's method has been applied to Atterberg's series of equi-granular soil fractions (see Atterberg 1903), whose capillarity Atterberg has determined by direct measurement. It proved that there was fairly close agreement (see Table 1, p. 20). As a rule the values obtained by the present method were a little lower than Atterberg's, which was to be expected for the above-mentioned reasons.

A very large number of determinations have been carried out, partly with equi-granular grades and mixtures, and partly with natural soils (Tables 1—6; 15, Figs. 4, 5 and 7), by means of which the author has attempted to discover the connection between capillary rise and particle-size.

The following relations have been found between the capillary rise in soils and their mechanical composition:

I. For equi-granular soils the capillarity is directly proportional to the inverted value of the size of grain¹ and can be expressed by the formula $K = c \cdot \frac{1}{d}$, where d is the diameter of the particle, c is here a constant the value of which is dependent on the shape of the particles. For a spherical system («shot») it is 0.053, and for Atterberg's sorted and graded soil material (1903) it is 0.060, K being expressed in metres and d in mm.

The rule has been experimentally established as holding for capillary rises of up to about 10 metres. In the case of small particle-sizes, about from and including fine »mjäla» (a flour-fine soil in which the particles range from 0.006 mm in diameter), the film of adsorption water on the particles, however, seems to attain a considerable thickness in relation to the size of the particles. Even for fine »mjäla» and especially for clay (less than 0.002 mm) the capillary pore system is thus composed of particles of larger diameter than the dry particles, and the capillarity will be less than that given by the formula, if the diameter of the dry particles is inserted. These conditions, which appear indirectly from the capillary conditions in the case of natural clayey soils, can be shown directly by establishing a comparison between the capillary rises of one and the same soil fraction (or natural soil) when water and a non-bipolar liquid (Goldschmidt 1926), e. g. benzol, are used, allowance being made for the difference between the capillarity constants of this liquid and water. Hitherto, however, such a determination has only been carried out for one soil grade (0.005—0.002 mm).

II. For natural soils the following rule holds: If we calculate the »centre of gravity» of the size of grain by adding together the products of the percentages into the logarithms of the grain-sizes and dividing by 100, then in the capillarity-grain-fineness diagram the natural soils will fall above the line for the equi-granular grades, and the divergency will be the greater the more unsorted the soil is. The natural, well-sorted water-sedimented soils lie in a narrow section immediately contiguous to the equi-sorted line, with an exponent (c) of 0.06—0.08; entirely unsorted morain soils lie far away, with an exponent (c) of 4—10, or more.

The cause of this is that the coarser particles in a soil mixture have (proportionately) a far less influence on the capillarity than the finer ones.

III. The relation between unsorted soils (natural or artificial mixtures) and their capillarity has been approximately established in the following rules:

a) In the case of discontinuous mixtures, (mixtures of two components without intermediate fractions) the influence of the coarser component will be the less, the greater the difference between the components, i. e. if a certain fine-grained fraction A is added to a coarser-grained one B, then, if the degrees of fineness of A and B are not far removed from each other (or are consecutive), to begin with, the capillarity of the mixture will be the mean of the capillarities of A and B, but the coarser B is chosen (A remaining constant), the higher

¹ The author has designated the inverted value of the size of grain by »grain-fineness».

will be the capillarity of the mixture, and it will obviously approach asymptotically to the simple capillarity of A.¹ Such mixtures, however, are only of theoretical interest, and are hardly likely to be met with among the natural soils.

b) In the case of continuous mixtures (consecutive size fractions), where the mean amplitude is not extremely great,² the capillarity is obtained by simple addition of the capillarities of the separate fractions.

As the capillarity of each separate fraction is directly proportional to the inverted value of the size of grain (= grain-fineness), the capillarity is obtained by adding the products of the percentage and fineness and dividing by 100. The position of the »centre of gravity» of fineness thus obtained on the curve for equi-granular grades gives the capillarity. This rule holds for well-sorted natural sediments.

c) In the case of increased average amplitude and continuous mixture, the capillarity will be greater than that given by the above rule. This implies — as indeed appears directly from experiments with successively increased mixture amplitudes — that the increasingly coarse fractions added have less and less influence on the capillarity. More generally, and also for very unsorted soils (large amplitude), the following rule seems to hold: The capillarity is the mean of the capillarities of the extreme components (in the case of curves for natural assortments calculated as the end-points of the line which indicates the assortment curve's mean breadth, see fig. 6). This rule holds particularly well for continuous mixtures in which all components appear in equal proportions (see table 5 and fig. 7). Agreement is pretty good for most natural soils, but in a small number of cases it is poorer. To what extent the divergencies are due to irregularities in the mechanical analyses, or whether they constitute real divergencies from the rule, it is difficult to decide.

The question of the capillarity's dependence on the mechanical composition of the soil — in the case of all imaginable mixtures — requires for its complete and exact solution a large number of determinations of soil materials, whose mechanical composition has been established with greater exactness by means of much closer and more certain grading.

The above rule (c) holds as a fairly good approximation even for very unsorted natural soils. In the case of equi-granular fractions and well-sorted natural sediment, the capillarity can be determined with great exactness from the size of the particles (rules a and b).

The importance of external atmospheric pressure for capillarity.

It has been shown by means of the experiments described in this chapter that the frequently propounded theory that the external atmospheric pressure sets a limit to the capillarity is not correct. According to the theory mentioned the capillary pressure cannot exceed the difference between the total atmospheric pressure and the partial pressure of the water vapour ($P - P_{H_2O}$), as otherwise a vacuum filled with water vapour would be formed under the meniscus.

In the case of experiments with glass capillary tubes in vacuum (at room temperature and under a pressure corresponding to, or exceeding by only a couple of mm., the partial pressure of the water vapour) a very considerable decline in the rise certainly presented itself, but firstly, the theoretically expected limit was still exceeded to a greater or lesser degree, and secondly, the

¹ It is assumed that the quantity of A is so large that it at least entirely fills the pores of B. Equal quantities of A and B were used for the experiments.

² The average amplitude ought not to exceed 1:1 (e. g. 0.06—0.006 mm and so on).

course of the whole phenomenon was rather irregular, owing to the pressure limit being metastably exceeded.

In the case of experiments with coarse soil fractions (sand soils, fractions 1.0—0.5, 0.5—0.2, 0.2—0.1 mm.) in vacuum, as above, it is true that considerably lower rises were obtained than at ordinary atmospheric pressure, but still the rise increased with the degree of fineness and very considerably exceeded the limit given by dry atmospheric pressure ($P - P_{\text{H}_2\text{O}}$).

In order to decide the question as regards the finer soils, a calculation was made for the capillarity with fractions 0.002—0.001 mm (actual size of grain by microscopic measurement = c. 0.0016—0.0005 mm) in the following way: the rapidity of rise was measured in a column of earth whose permeability had been determined beforehand, the rise (or rather the upward suction of the water) being brought about by means of strongly increased evaporation from the upper surface of the column, on which a stream of air (produced by a water-jet airpump) heated and dried by means of CaCl_2 was directed (see fig. 8). The highest (minimum) value of the capillarity obtained in this case was c. 70 m.

Thus the external atmospheric pressure has not a limiting influence on the capillarity, and, in the case of, e. g. stiff clays, the probable capillarities of several hundred metres (calculated by extrapolation of the capillarity values for the fractions examined) could occur in nature (as hydrostatic subpressures causing water to be drawn up. Capillary rises of anything like these values can obviously never actually occur, owing to the slight permeability of the soils in question). Only in the case of coarse capillaries and thus very low pressure limits (in vacuum) does the mentioned limitation present itself, although even then the limit in question is metastably exceeded.

The course of the last-mentioned experiment (for apparatus see figs. 8 and 9) throws a light upon the constitution of water-saturated soils which entirely supports the accounts by Simon Johansson (1913) and Zunker (1928).

When, e. g., a wet clay dries, the evaporation causes an increased curvature of the meniscus, which results in an increased suction effect, i. e. an increased negative pressure in the water-phase of the capillaries. This negative pressure causes an equally great positive (compressive) pressure on the solid capillary system. This »solid capillary system» consists however of soil particles surrounded by a film of adsorption water; when the compressive pressure in the particle-system is increased, the water film is squeezed together at the »points of contact», and the total volume is decreased; this process proceeds continuously, and the decrease in volume frees corresponding quantities of water, which evaporate with continuous capillary flow to the surface of the soil.

The load-sustaining capacity and plastic properties of especially the fine-grained soils depend on this cooperation of a compressive pressure (caused by meniscus tension, or resistance to the inflow of water respectively, or the external load-pressure) and an equally great expansive counter-pressure, due to the effort of the adsorption-water to expand by the attraction of water molecules. In this way the adsorption-water films have a pneumatically elastic effect — they can be compressed and expanded, all depending on the above-mentioned external pressure, and to the extent that they depend on this »elasticity» all such processes are reversible.

To commence with, when the evaporation experiment is started, the evaporated water is thus obtained from the water-supply of the soil itself, by the compression of a zone, which extends more and more, and which finally, when it has reached bottom (the contact surface with the free water), causes a sudden upward suction of water.

Entirely independently of the prevailing capillary conditions, i. e. the meniscus tension at the surface of the soil, the positive pressure between the soil particles at

a certain point corresponds to an equally great negative pressure in the fluid itself, whether static equilibrium is reached or water-flow is present.

In the experiments described above it is certainly the capillarity that is the cause of the rise. But one can equally well say that the cause is the negative pressure in the pores caused by the expansive elastic pressure of the water films — and in point of fact it is this latter which brings about a flow from one part to another of the soil column, right up to the outer surface (the menisci). The pressure grows from the under-side (where the pressure is zero) to the upper side, where it attains its maximum value, in such a way that a condition of continuousness results. When the evaporation is interrupted, the upward suction continues, however, with a rapidity which is undiminished in the immediately succeeding moment, this rapidity then gradually declining as the volume is increased and the elastic tension between the particles decreases (see fig. 10).

Supplementary Note.

After the present article had been sent to press, there appeared a work (J. H. Engelhardt, «Some contributions to the knowledge of capillary phenomena in connection with the heterogeneity of soil». *Soil Research*, Vol. I, 1929, No. 4. S. 239—301), in which is described a capillarimeter construction which is identical in principle with the present author's. The sole difference is of a technical nature: Engelhardt obtains subpressure by means of a water-jet airpump and measures it by means of a directly coupled, long mercury U-tube. For the rest the determination proceeds in the same way: by gradually increasing the sub-pressure until air enters beneath the surface of the soil sample. (Engelhardt does not, however, seem to employ the time-saving method of first making the rough determinations with longer intervals, and then making the more exact determinations within the critical area.) Which of the two methods is to be preferred depends chiefly upon the laboratory equipment, the space available, etc. In cases where a water-jet airpump can be made exclusively available for the purpose and the apparatus can be mounted in the neighbourhood, it is possibly less complicated simply to turn on a tap than to lower a separatory funnel. If the raising and lowering device used in the author's method is practically constructed, however, the difference will at least not be great. One advantage of the author's method is that the apparatus can be employed anywhere, independently of whether a supply of water is laid on or not. Determinations can therefore be made in the field or on premises not otherwise supplied with laboratory equipment, which may prove to be a matter of importance in cases of rapid soil determinations for practical purposes.

The arrangement with pressure exceeding one atmos., by which determinations of capillarities greater than 10 m. are rendered possible, is not described by Engelhardt; but it is obvious that the same or an analogous method as that proposed by the author for securing such pressure can be employed with Engelhardt's capillarimeter. As regards the experimental results given by Engelhardt and the theoretical presentation based on them, the author has neither time nor space to devote to them that attention that the great importance of the questions involved would render desirable; but he will as soon as possible return to them in another place, and deal with important points in Engelhardt's theoretical presentation, which would seem to invite discussion.

Litteraturförteckning.

- Atterberg, Albert, 1903. Studier i jordartsanalysen N:r 1—6. Kungl. Lantbruksakademiens Handl. o. Tidskr., Stockholm.
- Beskow, Gunnar, 1929 a, Tjälproblemets grundfrågor. Svenska vägfören:s tidskrift häfte 1, 1929. (Meddelande n:o 13 från Svenska väginstitutet)
- , 1929 b. Dräneringens betydelse för vägarnas tjälförhållanden. Sv. vägfören:s tidskr., h. 3, 1929. (Meddel. 15 fr. Sv. väginstitutet.)
- Chwolson, O. D., 1902. Lehrbuch der Physik; I Bd. Braunschweig.
- Ekström, Gunnar, 1927. Klassifikation av svenska åkerjordar. (Akademisk avhandling.) S. G. U. Ser. C. N:o 345. Årsbok 20 (1926).
- Goldschmidt, V. M., 1926. Undersökelse over Lersedimenter. Nordisk Jordbrugsforskning 1926, h. 4—7, S. 434—445. Köpenhamn.
- Johansson, Simon, 1913. Undersökning öfver vattnets rörelse i sandjord. S. G. U. Ser. C, N:o 243. Årsbok 1911.
- , 1914. Die Festigkeit der Bodenarten bei verschiedenem Wassergehalt. S. G. U. Ser. C. No 256. Årsbok 7 (1913).
- Lebedeff, A. F., 1928, The movement of ground and soil waters. Proc. and Papers of the First International Congress of Soil Science, s. 459—494. Washington.
- Mitscherlich, E. A., 1913. Bodenkunde, 2. Aufl. Berlin.
- Versluys, J., 1916. De capillaire werkingen in dem boden. (Akademisk avhandling.) Amsterdam.
- Wollny, E., 1884. Unters. über die kapillare Leitung des Wassers im Boden. Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik, Bd 7.
- Zunker, Über das Schwinden und Quellen der Böden und ein neues Bodenuntersuchungsverfahren. Der Kulturtechniker, XXXI Jahrg., Heft. 6. Nov/Dez 1928. S. 527—554.

SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNINGS SENAST UTKOMNA PUBLIKATIONER ÄRO:

Ser. Aa. Geologiska kartblad i skalan 1:50 000 med beskrivningar.

| | Pris kr. |
|---|----------|
| N:o 121 <i>Skövde</i> av H. MUNTHE, A. H. WESTERGÅRD och G. LUNDQVIST. 2 uppl. 1928 | 4,00 |
| » 144 <i>Nyed</i> av N. H. MAGNUSSON och G. ASSARSSON 1929 | 4,00 |
| » 156 <i>Ronehamn</i> av H. MUNTHE, J. E. HEDE och L. VON POST 1925 | 4,00 |
| » 157 <i>Skrikerum</i> av R. SANDEGREN och N. SUNDIUS 1926 | 4,00 |
| » 158 <i>Valdemarsvik</i> av R. SANDEGREN och N. SUNDIUS 1928 | 4,00 |
| » 159 <i>Gusum</i> av B. ASKLUND, G. EKSTRÖM och G. ASSARSSON 1928 | 4,00 |
| » 160 <i>Klintehamn</i> av H. MUNTHE, J. E. HEDE och G. LUNDQVIST 1927 | 4,00 |
| » 161 <i>Gotska Sandön</i> av HENR. MUNTHE 1924 | 2,00 |
| » 162 <i>Karlsborg</i> av A. H. WESTERGÅRD, H. E. JOHANSSON och N. WILLÉN 1926 | 4,00 |
| » 163 <i>Mariestad</i> av A. H. WESTERGÅRD, A. HÖGBOM och N. WILLÉN 1925 | 4,00 |
| » 164 <i>Hemse</i> av H. MUNTHE, J. E. HEDE och L. VON POST 1927 | 4,00 |
| » 165 <i>Filipstad</i> av N. H. MAGNUSSON och E. GRANLUND 1928 | 4,00 |
| » 166 <i>Lurö</i> av R. SANDEGREN 1927 | 4,00 |
| » 167 <i>Säffle</i> av N. H. MAGNUSSON och L. VON POST 1929 | 4,00 |
| » 169 <i>Slite</i> av H. MUNTHE, J. E. HEDE och G. LUNDQVIST 1928 | 4,00 |
| » 170 <i>Katthammarsvik</i> av H. MUNTHE, J. E. HEDE och G. LUNDQVIST 1929 | 4,00 |

Ser. Ba. Översiktskartor.

| | |
|---|------|
| N:o 11 Översiktskarta över Södra Sveriges myrmarker (Boggy ground in Southern Sweden). Efter de geologiska kartbladen utg. av S. G. U. 1:500 000. 1923. Med beskrivning av L. VON POST 1927 | 6,00 |
|---|------|

Ser. C.

Årsbok 17 (1923).

| | |
|---|------|
| N:o 320 LUNDQVIST, G., Limmisk diatoméockra och dess bildningsbetingelser. Zusammenfassung in deutscher Sprache. 1924 | 0,50 |
| » 321 GELJER, P., Some Swedish occurrences of bornite and chalcocite. 1924 | 1,00 |
| » 322 HÖGBOM, A., Guldinmutningarna vid Älvsbyn. 1924 | 0,50 |
| » 323 LUNDQVIST, G. och THOMASSON, H., Sjön Lekvattnet i Värmland. En limnologisk orientering. Med en tavla. Zusammenfassung in deutscher Sprache. 1924 | 1,00 |
| » 324 GELJER, P., Eulysitic iron ores in Northern Sweden. 1925 | 0,50 |
| » 325 ASKLUND, B., Petrological studies in the neighbourhood of Stavsjö, at Kolmården. With one Plate. 1925 | 2,00 |
| » 326 GELJER, P., Om några skiktade mangansilikatmalmer i Bergslagen. 1925 | 0,50 |
| » 327 SUNDBERG, K., LUNDBERG, H. and EKLUND, J., Electrical prospecting in Sweden. With 8 Plates. 1925 | 5,00 |
| » 328 HÖGBOM, A., Glacialgeologiska iakttagelser från Ångermanälvens källområde. Med 1 tavla. 1925 | 0,50 |

Årsbok 18 (1924).

| | |
|--|------|
| » 329 HÖGBOM, A., De geologiska förhållandena inom Stenjakokk-Remdalens malmtrakt. Med 3 tavlor. English summary. 1925 | 2,00 |
| » 330 LUNDQVIST, G., Utvecklingshistoriska insjöstudier i Sydsverige. Med 3 tavlor. Zusammenfassung in deutscher Sprache. 1925 | 2,00 |
| » 331 MUNTHE, H., HEDE, J. E. och VON POST, L., Gotlands geologi. En översikt. Med 9 tavlor. 1925 | 3,00 |
| » 332 JOHANSSON, S., Hydrogeologisk undersökning av ett lerområde vid Skara. Med 1 tavla. 1926 | 1,00 |
| » 333 TAMM, O., Experimental studies on chemical processes in the formation of glacial clay. 1925 | 0,50 |

Årsbok 19 (1925).

| | |
|---|------|
| » 334 EKSTRÖM, G. och FLODKVIST, H., Hydrologiska undersökningar av åkerjord inom Örebro län. 1926 | 1,00 |
| » 335 VON POST, L. och GRANLUND, E., Södra Sveriges torvtillgångar I. Med 15 tavlor. 1926 | 8,00 |
| » 336 SUNDIUS, N., On the differentiation of the alkalies in aplites and aplitic granites. 1926 | 1,00 |
| » 337 VON POST, L., Einige Aufgaben der regionalen Moorforschung. 1926 | 1,00 |
| » 338 GELJER, P. och MAGNUSSON, N. H., Mullmalmer i svenska järngruvor. With a summary: The occurrence of «soft ores» in Swedish iron mines. 1926 | 1,00 |
| » 339 CALDENIUS, C. C:ZON, Ravinbildningen i Gustavs. Med 3 tavlor. 1926 | 1,00 |

Årsbok 20 (1926).

| | Pris kr. |
|---|----------|
| N:o 340 LUNDQVIST, G., Örträsket och dess tappningskatastrofer. Med 1 tavla. Zusammenfassung in deutscher Sprache. 1927 | 1,00 |
| » 341 SAHLSTRÖM, K. E., Jordskalv i Sverige 1919—1925. Mit einem Resumee. 1 tavla. 1926 | 1,00 |
| » 342 HÖRNER, N. G., Brattförsheden. Ett värmländskt randdeltekomplex och dess dyner. Med 2 tavlor. English summary. 1927 | 3,00 |
| » 343 GEIJER, PER, Some mineral associations from the Norberg district. With analyses by ARTUR BYGDÉN. 1927 | 1,00 |
| » 344 ASSARSSON, G., Ancyclus- och Litorinagränser inom geol. kartbladet Gusum. Med en tavla. 1927 | 1,00 |
| » 345 EKSTRÖM, G., Klassifikation av svenska åkerjordar. 1927 | 2,00 |

Årsbok 21 (1927).

| | |
|--|------|
| » 346 MUNTHE, H., Studier över Ancylussjöns avlopp. Med 4 tavlor. Summary of contents. 1927 | 3,00 |
| » 347 VON POST, L., Svea älvs geologiska tidsställning. En pollenanalytisk studie i Ancylostidens geografi. Med 2 tavlor. Efterskrift: Ancylostidens Göta älv. English summary: The geological age of the Svea river. 1928 | 3,00 |
| » 348 SANTESSON, G., Undersökningar angående det senglaciala havets största utbredning inom Norrbottens län. Med 1 tavla. 1927 | 1,00 |
| » 349 GRANLUND, E., Senglaciala strandlinjer och sediment i västra Bergslagen. Med en karta. 1928 | 1,00 |
| » 350 BESKOW, G., Södra Storfjället im südlichen Lappland. Eine petrographische und geologische Studie im zentralen Teil des Skandinavischen Hochgebirges. Mit 2 Tafeln. 1929 | 5,00 |

Årsbok 22 (1928).

| | |
|---|------|
| » 351 GEIJER, PER, Masugnsbyfältens geologi. Med en karta. Summary: Geology of the Iron Ore Fields at Masugnsbyn. 1929 | 1,00 |
| » 352 JOHANSSON, S., Nyare jordarts- och markreaktionsundersökningar och deras betydelse för jordbruket. Med 2 tavlor. 1929 | 1,00 |
| » 353 LUNDQVIST, G., Studier i Ölands myrmarker. Med 9 tavlor. Resumee in deutscher Sprache. 1928 | 3,00 |
| » 354 ASKLUND, B., Kalirika bergarter inom södra och mellersta Sverige jämte en kort översikt av den svenska experimentverksamheten för framställning av kaligödselmedel. English summary. 1929 | 1,00 |
| » 355 WESTERGÅRD, A. H., A deep boring through Middle and Lower Cambrian strata at Borgholm, Isle of Öland. 1929 | 1,00 |

Årsbok 23 (1929).

| | |
|---|------|
| » 356 BESKOW, G., Om jordarternas kapillaritet. En ny metod för bestämning av kapillärkraften (eller kapillära stighöjden). Summary: On the capillarity of soils. A new method for determining the capillary pressure (or the capillary rise.) 1930 | 1,00 |
| » 357 ASSARSSON, G., and SUNDIUS, N., On the constitution of hydrated Portland cement. With one Plate. 1929 | 0,50 |
| » 358 MUNTHE, H., Några till den fennoskandiska geokronologien och isavsmältningen knutna frågor. 1929 | 0,50 |
| » 359 SAHLSTRÖM, K. E., Förteckning över lodade sjöar i Sverige. 2. 1929 | 0,50 |
| » 360 MAGNUSSON, N. H., Gillbergaskälens byggnad. Med 2 tavlor. Summary: The Gillberga syncline. 1929 | 2,00 |
| » 361 HEDSTRÖM, H., Fosforitbollar från Visingsöserien? 1930 | 0,50 |

Ser. Ca. Avhandlingar och uppsatser i 4:o.

| | |
|---|------|
| N:o 13 MAGNUSSON, N. H., Nordmarks malmtrakt. Geologisk beskrivning. Summary: The Iron and Manganese ores of the Nordmark district. 1929 | 7,00 |
| » 19 WEDEKIND, R., Die Zoantharia rugosa von Gotland (bes. Nordgotland). Nebst Bemerkungen zur Biostratigraphie des Gotlandium. Mit 30 Tafeln. 1927 | 8,00 |
| » 20 GEIJER, PER, Stråssa och Blanka järnmalmsfält. Geologisk beskrivning. Med 5 tavlor. Summary: The Iron Ore Fields of Stråssa and Blanka. 1927 | 5,00 |

Distribueras genom *Generalstabens Litografiska Anstalt, Stockholm 8*