

De relatieve dichtheid van zand- en veengrond en zijn betekenis ten aanzien van draagkracht en vochtgehalte volgens een laboratoriumproef

C.J. Schothorst

1. Inleiding

In aansluiting op het veldonderzoek naar de factoren die de draagkracht van grasland bepalen, werd op het laboratorium een proef aangelegd met dezelfde doelstelling.

Een dergelijke proef heeft het grote voordeel dat men bepaalde factoren naar verkiezing kan variëren. Men is niet afhankelijk van weersomstandigheden terwijl men hinderlijke correlaties kan voorkomen.

Bij deze proef werd uiteraard gebruikgemaakt van de ervaring die in het terrein reeds was opgedaan.\*)

Het doel van de proef in engere zin bestond uit het bepalen van de draagkracht bij gronden met een variatie in het organisch stofgehalte van 0 tot circa 90%, bij variërende dichtheid en vochtspanning.

2. Methode van onderzoek

Samenstelling van de monsters

Als punt van uitgang voor de laboratoriumproef gold de relatie "organisch stofgehalte - poriënvolume en volumegewicht" zoals deze in figuur 3 en 4 wordt weergegeven in NOTA no.170\*\*).

Zoals bekend mag worden verondersteld bestaat er een sterk verband tussen het organisch stofgehalte en het poriënvolume respectievelijk het volumegewicht. Bij een bepaald organisch stofgehalte kan het poriënvolume binnen zekere grenzen variëren afhankelijk van de dichtheid.

Zo kan men een maximale en een minimale dichtheid onderscheiden.

\*) NOTA no.123, d.d. 29-12-1961. De draagkracht van graslandgronden

\*\*) NOTA no.170, d.d. 31-3-1963. Het poriënvolume van losse en dichte zand- en veengronden



Bij deze proef ging de speciale belangstelling uit naar de functie van de relatieve dichtheid ten aanzien van de draagkracht. Daartoe werden acht variaties van organisch stofgehalte gekozen, zodanig dat een min of meer regelmatige variatie in het poriënvolume zou worden verkregen.

Hiervoor kon worden gebruikgemaakt van natuurlijke grond, zoals die in het terrein voorkomt. Dat wil zeggen dat mengingen om bepaalde variaties in organisch stofgehalte te verkrijgen, niet plaatsvonden.

Om verschillen in dichtheid te verkrijgen bij een bepaald organisch stofgehalte lag het voor de hand dit kunstmatig tot stand te brengen.

Dit zou kunnen worden bereikt door de grond in verschillende mate in elkaar te drukken. Bij het samenstellen van de kunstmatige poriënvolumina bleek dat door samendrukken met handkracht het poriënvolume maximaal circa 10 volume-procenten verlaagd kan worden ten opzichte van losse grond in vochtige toestand. Voor veen met een organisch stofgehalte van 92% was zelfs mechanische kracht noodzakelijk om dit te bereiken. Een verlaging van het poriënvolume van 92 tot 82% betekende voor dit veen een krimp van plusminus 50%. De noodzaak van mechanische kracht voor een dergelijke verdichting is dus wel begrijpelijk.

Bij een maximale verdichting van plusminus 10 volume-procenten ten opzichte van de losse toestand, is het mogelijk 3 variaties in dichtheid te onderscheiden met een verschil van 5 volume-procenten aan poriën, namelijk:

1. losse toestand, geen verdichting
2. gemiddelde toestand, verdichting 5 volume-procenten
3. dichte toestand, verdichting 10 volume-procenten

Om deze poriënvolumina te verkrijgen werd gebruikgemaakt van de reeds genoemde relatie, die in figuur 3 en 4 van NOTA no.170 wordt weergegeven. Zo kon voor iedere combinatie van organisch stofgehalte en poriënvolume het gewenste volumegewicht worden berekend. Doordat met vochtige grond moet worden gewerkt om natuurlijke omstandigheden zoveel mogelijk te handhaven, is het bij het vaststellen van de benodigde hoeveelheid grond noodzakelijk het vochtgehalte er in te betrekken.

Voor de uitvoering van de proef worden cilinders van 100 cc inhoud gebruikt.

Van de te gebruiken grond moeten de volgende gegevens bekend zijn, die dus vooraf moeten worden bepaald:

1. het vochtgehalte in gewichtsprocenten
2. het organisch stofgehalte; hieruit is het soortelijk gewicht af te leiden

De berekening van de totale hoeveelheid benodigde grond (gram per 100 cc) om het gewenste poriënvolume te bereiken is dan als volgt:

$$g = (100 - p) s$$

$$g_v = g + a$$

$g$  = volumegewicht

$p$  = poriënvolume

$s$  = soortelijk gewicht

$g_v$  = volumegewicht vochtige grond

$a$  = gewichtspercentage vocht

Na afweging van de benodigde hoeveelheid grond werden de ringen van 100 cc inhoud gevuld. Dit moest zodanig worden uitgevoerd dat de in te brengen grond de ringen geheel vulde bij gelijkmatige dichtheid. Dit was te doen door de losse variatie zeer licht, de gemiddelde variatie goed en de dichte variatie zo sterk als maar mogelijk is aan te drukken.

De dichtste variatie leverde hierbij de meeste moeilijkheden op. De verdichting van de zandmonsters met  $h = 0$  en 2%, werd uitgevoerd door deze met water te verzadigen en te trillen ( $h$  = organische stof in gewichtsprocenten).

In totaal bestond de proef dus uit 8 variaties in organisch stofgehalte met 3 variaties in dichtheid. Het geheel werd in duplo uitgevoerd, zodat de proef in totaal 48 monsters omvatte. In onderstaande tabel wordt de opzet van de proef schematisch weergegeven met de poriënvolumina zoals ze werden gerealiseerd.

Tabel 1 Schema van de proef

Grondsoort	Org.stof geh.in %	Volumegewicht			Poriënvolume		
		los	gem.	dicht	los	gem.	dicht
Zand	0	146	159	172	45	40	35
Licht humeus zand	2	125	137	158	50	45	40
Humeus zand	10	85	102	118	65	59	52
" "	13	74	89	106	70	64	57
Venig zand	25	54	68	71	76	70	68
Zandig veen	38	43	50	62	79	76	70
Slibhoudend veen	65	25	29	33	86	83	81
Veen	92	12	21	26	92	86	83

De derde groep van  $h = 10\%$  was bedoeld voor een lagere waarde van  $h$ . Het bleek bij de bepaling hoger uit te vallen dan het zich in het veld liet aanzien.

Instelling van de vochtspanning

De verdere gang van zaken bij de proef bestond uit:

1. het instellen van de monsters op verschillende vochtspanning
2. het meten van de draagkracht bij verschillende  $pF$ -waarden

Daar de monsters behoudens enkele uitzonderingen in vochtige toestand bij een  $pF$ -waarde van plusminus 2.0 waren samengesteld, werd begonnen met een  $pF$  van 2.0.

Dit sloot het beste aan op de aanwezige vochtspanning. Bovendien zou dan geen hinder worden ondervonden van eventueel optredende zwelverschijnselen bij het vochtiger worden van de monsters bij lagere  $pF$ -waarden.

Achtereenvolgens werd het vochtgehalte bepaald bij de volgende  $pF$ -waarden: 2.0 - 1.7 - 1.4 - 0.4 - 0.1 - 0.4 - 1.7 - 2.0 - 2.3. Op deze wijze was het tevens mogelijk eventueel optredende hysteresis-effecten vast te stellen.

In de verzadigingstoestand zakten enkele monsters in elkaar. Deze waren blijkbaar te los van samenstelling. Het betroffen de losse variaties van zand met 0% en 2% organische stof. Deze monsters waren voor verder onderzoek niet meer geschikt.

Zwelverschijnselen deden zich bij het vochtiger worden zo goed als niet voor, ook niet bij het verdichte veen.

Krimpverschijnselen begonnen pas op te treden bij pF 2.3, echter nog in geringe mate.

#### Het meten van de draagkracht

Met het meten van de draagkracht is nogal geëxperimenteerd. Hiervoor werd aanvankelijk een balans gebruikt met een maximaal weegvermogen van 3 kg. Met behulp van een staafje voorzien van een conus met een basisoppervlakte van  $0,5 \text{ cm}^2$  werd druk uitgeoefend op het monster dat op de balans werd geplaatst. Als cijfer voor de draagkracht werd aangehouden, de druk die benodigd is om de conus in zijn geheel in het monster te drukken (15 mm).

Bij belastingen van meer dan  $3 \text{ kg}/0,5 \text{ cm}^2$  was het noodzakelijk op een ander apparaat over te schakelen, namelijk op de penetrometer, waarbij gewichten werden gebruikt. Dit apparaat was eigenlijk niet geschikt voor zware belastingen, zodat dit niet bevredigde. Voor de laatste meting (bij pF 2.3) werd gebruikgemaakt van het apparaat dat inmiddels door de Afdeling Bedrijfsonderzoek was geconstrueerd. Dit bestaat uit een balans met een weegvermogen van 50 kg, gecombineerd met een drukpers. Dit systeem voldoet nog het beste.

Ideaal voor deze metingen is echter een balans met een nauwkeuriger schaalverdeling.

Bij het meten van de draagkracht leverde zand met 0% en 2% humus moeilijkheden op. Bij het indringen van de conus wordt grond verplaatst, zowel in droge als in natte toestand, zodat met deze metingen geen goede resultaten werden verkregen.

De metingen van de draagkracht vonden driemaal plaats, namelijk bij pF 2.0, 0.4 en 2.3. Dat is dus in vochtige, verzadigde en vrij droge toestand. Frequenter metingen hadden weinig zin wegens de geringe verschillen in vochtgehalten bij andere pF-waarden. Bovendien moesten de metingen tot het noodzakelijke beperkt blijven om verstoring van de monsters tot een minimum te beperken.

De metingen werden de eerste en de tweede keer in duplo uitgevoerd namelijk aan de boven- en aan de onderkant van het monster. De derde meting werd in drievoud gedaan aan de bovenkant van het monster. Als cijfer

voor de draagkracht werd de gemiddelde waarde van de meting aangehouden.

### 3. Resultaten van onderzoek

#### Dichtheid en draagkracht

In de figuren 1, 2 en 3 wordt het verband weergegeven tussen de draagkracht ( $S$  in  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) en het volumegewicht ( $g$ ) voor 8 variaties van organische stofgehalten ( $h$ ) bij pF 0.4 respectievelijk 2.0 en 2.3. Uit deze figuren blijkt dat de dichtheid (volumegewicht) bij alle waarden van  $h$  en pF een belangrijke rol speelt ten aanzien van de draagkracht. Bij gelijkblijvende waarden van  $h$  wordt de draagkracht groter naarmate het volumegewicht toeneemt en de grond dus dichter wordt. Dit geldt zowel bij een vochtspanning van pF 0.4 als bij pF 2.0 en 2.3.

In de figuren 4 tot en met 6 wordt dezelfde relatie weergegeven als in de figuren 1 tot en met 3. Het volumegewicht is hierbij echter vervangen door het poriënvolume. Het resultaat is van dezelfde aard.

Waar in deze figuren in enkele gevallen de dichte variatie ontbreekt, is deze geïnterpoleerd door de curven evenwijdig aan de andere curven te verlengen.

#### Minimale en maximale dichtheid

Zoals reeds in NOTA no.170 (figuur 3 en 4) is beschreven kan men een minimale en een maximale dichtheid onderscheiden. Hieronder wordt verstaan, de meest losse respectievelijk de meest dichte structuur die bij een bepaald organisch stofgehalte onder natuurlijke omstandigheden kan voorkomen. Deze structuur kan men uitdrukken in volumegewicht ( $g$ ) of in poriënvolume ( $p$ ) of grondvolume ( $v$ ) of totaal volume ( $v + p = V$ ).

De resultaten van dit onderzoek leveren de mogelijkheid om begrippen als "minimale dichtheid ( $d_{\min}$ ) en maximale dichtheid ( $d_{\max}$ )" beter te funderen en in cijfers uit te drukken.

#### Bepaling van de minimale dichtheid

Bij een zeer losse structuur kan men  $S$  stellen op  $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$  ( $S =$  draagkracht in  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ). Een geringere draagkracht zal men in de praktijk bij graslandgronden slechts aantreffen bij zeer slappe veengronden nabij of beneden het grondwaterniveau. Ook van bewerkte gronden (bijvoorbeeld de bouwvoor van bouwland) kan de draagkracht zeer gering zijn.

Losse structuren van grond met weinig of geen onderlinge binding waarbij  $S < 2 \text{ kg/cm}^2$  zijn zeer labiel. Zij blijven slechts intact zolang de grond niet in verzadigde toestand geraakt. Bij lage vochtspanningen zakken dergelijke losse structuren in elkaar zoals bij de proef op het laboratorium bij pF 0.4 ook is gebleken bij zand met  $h = 0\%$  en  $2\%$ .

Wat licht humeus of humusloos zand betreft zal men in de praktijk op natte grond die periodiek met het grondwaterniveau in aanraking komt over het algemeen een sterkere verdichting vinden dan op gelijke drogere grond, die zelden of nooit met grondwater in aanraking komt.

Als criterium voor de minimale dichtheid ( $d_{\min}$ ) wordt hier aangehouden  $S < 2 \text{ kg/cm}^2$  bij pF 2.0 en 2.3.

Hierbij wordt dus de pF 2.0 en 2.3 in het criterium betrokken in plaats van pF 0.4. De reden hiervan is, zoals uit het voorgaande wel duidelijk zal zijn, dat zover het grond met weinig onderlinge binding (weinig of geen organische stof) betreft, men de meest losse structuren niet bij pF 0.4 maar bij pF 2.0-2.3 aantreft. Voor veengronden geldt echter het tegengestelde. Hier komen de meest losse structuren voor beneden het grondwaterniveau en de dichtste structuren in de bovengrond van diep ontwaterd veen. Volgens de laboratoriumproef bleek bij een pF 2.0 nog geen en bij pF 2.3 een geringe krimp (verdichting) op te treden, zodat het voor veen wat de minimale dichtheid betreft weinig of geen verschil uitmaakt of men deze bepaalt bij pF 0.4 of 2.0 respectievelijk 2.3. Dit maakt wel veel verschil uit bij licht humeus en humusloos zand, waar de losse structuur bij een pF 0.4 niet intact blijft.

Om deze reden wordt voor de bepaling van  $d_{\min}$  de voorkeur gegeven aan pF 2.0 en 2.3 in plaats van 0.4.

Het verschil in vochtspanning van pF 2.0 en 2.3 leverde ten aanzien van de draagkracht geen duidelijk verschil op zodat deze zijn gecombineerd.

#### Bepaling van de maximale dichtheid

Als criterium voor de maximale dichtheid ( $d_{\max}$ ) wordt aangehouden:  $S > 12 \text{ kg/cm}^2$  bij pF 0.4.

Een draagkracht van  $S = 12 \text{ kg/cm}^2$  is ongeveer de uiterste waarde die bij een pF 0.4 wordt gevonden. Men kan stellen dat de meest dichte structuur wordt bereikt waarin bij verzadigde toestand van de grond (pF 0.4) een draagkracht van  $> 12 \text{ kg/cm}^2$  wordt geconstateerd.

Hoe lager de vochtspanning is, des te dichter moet de grond zijn om een bepaalde draagkracht te bereiken.

Sterkere verdichtingen waarbij  $S > 12 \text{ kg/cm}^2$  zullen bij pF 0.4 slechts worden aangetroffen in rijsporen. Dergelijke verdichtingen blijven hier buiten beschouwing.

De relatie, weergegeven in de figuren 1 tot en met 3 levert de mogelijkheid voor iedere waarde van  $h$   $d_{\text{max}}$  en  $d_{\text{min}}$  te bepalen.

De verhouding van mineralen en organische stof bij minimale en maximale dichtheid

In figuur 7 wordt de verhouding van de hoeveelheid mineralen (M) en organische stof in g per 100 cc (H) weergegeven voor de verschillende waarden van  $h$  bij maximale dichtheid ( $d_{\text{max}}$ ) bij pF 0.4, zoals die uit figuur 1 is af te leiden. Hetzelfde geldt voor de minimale dichtheid ( $d_{\text{min}}$ ), afgeleid uit de figuren 2 en 3. De punten liggen alle ten naaste bij op een lijn. Hierbij is dus  $g = H + M$ ,  $H = hg$  en  $M = g - hg$ .

Deze lijnen (a en b) buigen bij organische stofgehalten hoger dan plusminus 60% terug. Dit betreffen echte veengronden.

In deze gevallen daalt de totale hoeveelheid organische stof ondanks dat het percentage organische stof toeneemt. Dat wil dus zeggen dat bijvoorbeeld een grond met  $h = 90$ , per volume-eenheid minder organische stof bevat dan bijvoorbeeld een grond met  $h = 70$ .

Het feit dat de punten in figuur 7 nagenoeg op een lijn liggen betekent, dat er een constante verhouding bestaat tussen de hoeveelheid mineralen (M) en organische stof (H) bij een bepaalde verdichtingsgraad.

Volgens figuur 7 is het mogelijk om een grond met  $h = 0$  te verdichten tot een volumegewicht ( $g$ ) van plusminus 186 g. Voor  $h = 100$  zou  $g$  29 gram bedragen wanneer curve a rechtlijnig wordt doorgetrokken naar  $m = 0$ .

De maximale dichtheid volgens de hier toegepaste methode bedraagt dus voor 100 cc mineralen ( $m = 100$  en  $h = 0$ ):

$$\epsilon_d = 186 \quad p_d = 30$$

en voor 100 cc organische stof ( $m = 0$  en  $h = 100$ )

$$\epsilon_d = 29 \quad p_d = 80$$



Een maximale dichtheid van een grond wil dus zeggen, dat de grond een bepaalde hoeveelheid poriën bevat, die volgens de hier toegepaste methode niet verder is te verlagen.

De hoeveelheid poriën wordt bepaald door de hoeveelheid minerale delen (M) enerzijds en de hoeveelheid organische stof (H) anderzijds. Hetzelfde geldt voor de minimale dichtheid.

Volgens figuur 7 zal men onder natuurlijke omstandigheden bij  $h = 0$  en  $m = 100$  geen lossere gronden aantreffen dan

$$g_1 = 146 \quad p_1 = 45$$

Wanneer curve b rechtlijnig wordt doorgetrokken naar  $m = 0$ , wordt voor  $h = 100$  gevonden:

$$g_1 = 17 \quad p_1 = 89$$

Voor veengronden ( $h > 50$ ) kan een minimale dichtheid van 10 gram organische stof per 100 cc en minder voorkomen. Dit vindt men bij zeer slappe veengronden in de ondergrond.

Ook bij gronden met  $h < 50$  kunnen zeer losse structuren voorkomen als gevolg van bodembewerking. Deze laatste zijn echter als van tijdelijke aard te beschouwen.

In figuur 8 wordt het verband weergegeven tussen het organisch stofgehalte ( $h$ ) en het volumegewicht ( $g$ ) respectievelijk het poriënvolume ( $p$ ) bij  $d_{\min}$  en  $d_{\max}$ . Figuur 8 geeft nagenoeg hetzelfde beeld als figuur 3 van NOTA no.170. Het verschil bestaat hierin dat figuur 8 betrekking heeft op gegevens van de laboratoriumproef, terwijl die van NOTA no.170 betrekking hebben op monsters uit het veld.

#### De berekening van maximale en minimale dichtheid

Volgens de relatie in figuur 7 weergegeven is het mogelijk de maximale en minimale dichtheid te berekenen. Bij deze berekeningen wordt gebruikgemaakt van het totale volume ( $v + p = V$ ). Dit geeft bij de berekeningen minder aanleiding tot verwarring van begrippen en gedachten.

Van een te onderzoeken grond moeten de volgende gegevens bekend zijn:

1. het volumegewicht ( $g$ )
2. het organisch stofgehalte ( $h$ )
3. het volume ( $V = v + p$ ) = 100 cc

Wanneer de bemonstering in het veld plaatsvindt met cilindertjes van 100 cc inhoud levert dit geen enkele moeilijkheid op.

De hoeveelheid organische stof in grammen per 100 cc = hg = H. De hoeveelheid mineralen in grammen per 100 cc = g - hg = M.

Van de gegeven grond is

$$V = V_H + V_M \quad V = 100 \text{ cc}$$

De maximale dichtheid kan nu als volgt worden berekend:

Het totale volume van een grond in de meest dichte toestand is  $V_d$ :

$$V_d = V_{dH} + V_{dM} \quad V_d < 100 \text{ cc}$$

$$V_{dH} = \frac{100}{29} H = 3,45 H$$

$$V_{dM} = \frac{100}{186} M = 0,54 M$$

$$V_d = 3,45 H + 0,54 M$$

Evenzo is de minimale dichtheid te berekenen.

Het totale volume van een grond in de meest losse toestand is  $V_l$ .

$$V_l = V_{lH} + V_{lM} \quad V_l > 100 \text{ cc}$$

$$V_{lH} = \frac{100}{17} H = 5,9 H$$

$$V_{lM} = \frac{100}{146} M = 0,685 M$$

$$V_l = 5,9 H + 0,685 M$$

Volgens figuur 7 is bijvoorbeeld van een grond

$$V = 100 \text{ cc} \quad g = 73 \quad h = 25 \quad M = 55 \quad H = 18$$

Volgens berekening met behulp van de formule heeft deze grond bij maximale dichtheid ( $V_d$ ) een volume van 92 cc en bij minimale dichtheid een volume van 144 cc.

#### De relatieve dichtheid

Men kan een grond ook kenschetsen naar zijn dichtheid. Men spreekt dan van relatieve dichtheid (HUIZINGA, 1948). Hieronder verstaat men de

verhouding van het poriënvolume ten opzichte van het minimale respectievelijk van het maximale poriënvolume.

De relatieve dichtheid ( $d_r$ ) kan worden berekend met de volgende formule:

$$d_r = \frac{P_1 - P}{P_1 - P_d}$$

Men kan de relatieve dichtheid ook omschrijven als de verhouding van de dichtheid van een gegeven grond ten opzichte van de minimale dichtheid respectievelijk de maximale dichtheid

$$d_r = \frac{V_1 - V}{V_1 - V_d}$$

Door substitutie van de formules voor minimale en maximale dichtheid wordt de formule als volgt:

$$d_r = \frac{5,9 H + 0,685 M - 100}{(5,9 H + 0,685 M) - (3,45 H + 0,54 M)}$$
$$d_r = \frac{5,9 H + 0,685 M - 100}{2,45 H - 0,145 M} = \frac{5,215 gh + 0,685 g - 100}{2,595 gh - 0,145 g}$$

Bij toepassing van deze formule zal men voor zand en humeus zand en ook voor veenbovengrond algemene waarden vinden van 0 tot 100. Voor veen uit de ondergrond, dus voor nog niet gekrompen veen zal men echter zeer lage negatieve waarden verkrijgen.

Waarschijnlijk biedt de relatieve dichtheid een goede mogelijkheid om de mate van indroging van veengronden vast te stellen en in vergelijkbare cijfers uit te drukken.

#### Draagkracht en relatieve dichtheid

Met behulp van de formule voor de bepaling van de relatieve dichtheid, werd deze berekend voor de monsters van de laboratoriumproef. In de figuren 9 tot en met 11 wordt het resultaat van deze berekening ( $d_r$ ) weergegeven in verband met de draagkracht en wel bij pF 0.4, 2.0 en 2.3 voor de verschillende waarden van h.

De lijnen voor één bepaald organisch stofgehalte van de figuren 1 tot en met 3 worden op deze wijze in één curve weergegeven in figuur 9 tot en met 11. Volgens deze figuren blijkt de relatieve dichtheid een goed bruikbare maatstaf te zijn om een grond te kenschetsen naar zijn

dichtheid. Deze methode heeft dus het voordeel dat de 2 factoren "organisch stofgehalte en dichtheid" worden vervangen door één factor "de relatieve dichtheid". Dit kan het onderzoek waarschijnlijk sterk vereenvoudigen.

Het verschil in vochtspanning van pF 2.0 en 2.3 blijkt in dit geval van weinig of geen invloed te zijn op de draagkracht. Een lage vochtspanning van pF 0.4 verlaagt bij gelijkblijvende dichtheid, de draagkracht met bijna  $2 \text{ kg/cm}^2$  (figuur 12).

Wanneer voor de draagkracht van graslandgronden als eis wordt gesteld  $S > 5 \text{ kg/cm}^2$ , dan kan men uit figuur 12 de volgende conclusies trekken:

1. in zeer natte omstandigheden, zelfs bij verzadigde toestand kan een grond voldoende draagkrachtig zijn bij een relatieve dichtheid  $> 70$
2. bij een relatieve dichtheid  $< 45$  is een vochtspanning van pF 2.0 tot 2.3 nog onvoldoende ten aanzien van de draagkracht.

Dit zijn dus conclusies wat betreft de resultaten van het laboratoriumonderzoek. In hoeverre dit resultaat in overeenstemming is met het veldonderzoek zal nog nader worden onderzocht.

#### Draagkracht en vochtspanning

Het verband tussen draagkracht en vochtspanning wordt meer gedetailleerd weergegeven in de serie figuren 13 tot en met 18. Dit betreft het verband bij verschillende organische stofgehalten van 10 tot 90%.

In de eerste plaats komt ook hier de sterke invloed van de dichtheid scherp naar voren. De invloed van deze factor is aanzienlijk groter dan van de vochtspanning.

Toch is ook de vochtspanning van belang. Het lijkt er echter op dat de invloed van de vochtspanning afneemt naarmate het organisch stofgehalte toeneemt. Zij is het grootst bij  $h = 10$  respectievelijk 13 en zeer gering bij veen ( $h = 65$  en 92).

Dit geldt voor het traject van pF 0.4 tot pF 2.3. Zeer waarschijnlijk zou de betekenis van de vochtspanning groter zijn bij  $h < 10$ . Het is jammer dat de monsters  $h = 0$  en  $h = 2$  zijn mislukt en daarom hierbij buiten beschouwing moesten blijven.

Bij veengronden blijken hogere vochtspanningen te worden vereist dan pF 2.3 om van sterke invloed te kunnen zijn. Ook het veldonderzoek wees reeds in deze richting (NOTA no.123).

Van het meeste belang is de vochtspanning bij humushoudend zand met een relatieve dichtheid variërend van 45 tot 70%. In deze gevallen kan de vochtspanning van doorslaggevende betekenis zijn wat betreft een voldoende draagkracht. Zoals reeds in het voorgaande is vermeld is bij geringere respectievelijk grotere dichtheid de dichtheid bepalend voor de draagkracht.

In het eerste geval is zij onvoldoende ook bij vochtspanningen van pF 2.0 en 2.3 en in het tweede geval is zij bij pF 0.4 nog goed.

#### Dichtheid en vochtgehalte

Zoals in het voorgaande reeds werd besproken, werd de draagkracht bepaald bij variërende dichtheden en vochtspanningen.

Voor het traject van pF 0.1 tot pF 2.3 is het mogelijk de pF-curve te construeren voor de diverse variaties van h met verschillende dichtheden. Deze curve worden weergegeven in de serie figuren 19 tot en met 25.

Men kan verwachten dat naarmate een grond minder materiaal per volume-eenheid bevat en dus lossier van structuur is en een groter poriënvolume heeft, bij pF 0.4 meer vocht zal bevatten dan een dichte grond. Het vochtgehalte bij pF 0.4 wordt praktisch bepaald door het poriënvolume.

Omgekeerd zal het vochtgehalte bij pF 2.0 en 2.3 (vochthoudend vermogen) worden bepaald door de hoeveelheid grond per volume-eenheid. Dus naarmate een grond dichter is, is het vochtgehalte bij pF 2.0 en 2.3 groter (figuur 19 tot en met 25).

Zo kan een bepaalde grond met gelijk organisch stofgehalte maar met verschil in dichtheid, geheel verschillende pF-curve te zien geven. De verschillen in vochtgehalten bij een bepaalde vochtspanning zijn zeer aanzienlijk.

Zo bevat bijvoorbeeld volgens figuur 20 ( $h = 10$ ) een losse grond ( $d_r = 10$ ) bij pF 2.0 nog slechts 60% vocht ten opzichte van de verzadigingstoestand tegen een dichte grond ( $d_r = 90$ ) 90%. In volume-procenten uitgedrukt bedraagt het verlies bij pF 2.0, 24 volume-procenten voor de losse grond en 5 volume-procenten voor de dichte grond.

De pF-curve kunnen dus bij eenzelfde grond afhankelijk van de dicht-

heid sterk van elkaar verschillen. Ook wordt hierdoor verklaard, waarom de zodelaag van graslandgronden bij pF 2.0 vaak nog zo weinig vocht verlies in vergelijking met pF 0.4.

Deze zijn meestal sterk verdicht en houden daardoor relatief veel vocht vast.

Een ander opmerkelijk verschijnsel, zij het van ondergeschikt belang doet zich bij deze proef voor. Namelijk het vochtgehalte bij pF 0.4 blijkt bij de dichte variaties groter te zijn dan het berekend poriënvolume en bij de losse variaties vaak kleiner. Dit verschijnsel werd reeds vaker geconstateerd bij pF-curven. Blijkbaar houdt dit dus verband met de relatieve dichtheid.

Ook het hysteresis-effect blijkt te worden beïnvloed door de relatieve dichtheid. Deze effecten zijn in deze proef het grootst bij losse grond, vooral bij pF 1.4 en 1.7.

De betekenis van de dichtheid ten aanzien van het vochthoudend vermogen (vochtgehalte bij pF 2.0) wordt duidelijker gedemonstreerd in figuur 26. In deze figuur wordt het vochtgehalte bij pF 2.0 vergeleken met de relatieve dichtheid voor de verschillende waarden van h. Er bestaat in alle gevallen een duidelijk lineair verband.

Het vochthoudend vermogen van de grond neemt dus toe naarmate zij dichter wordt, dus naarmate het volumegewicht toeneemt en het poriënvolume afneemt. Dit geldt dus bij een bepaalde grond.

In het algemeen neemt met een stijgend organisch stofgehalte het volumegewicht af en het poriënvolume toe evenals het vochthoudend vermogen. De relatieve dichtheid werkt dus in tegengestelde richting. Dit wordt duidelijk aangetoond in figuur 27, waarbij het vochtgehalte bij pF 2.0 wordt vergeleken met het poriënvolume bij de verschillende dichtheden van h.

Hierbij blijkt dat de humeuze gronden bij maximale dichtheid en een vochtspanning van pF 2.0 nog zo goed als geen vocht hebben verloren ten opzichte van de verzadigde toestand ( $V_{max}$ ). Dit verlies lijkt hier geringer dan het in werkelijkheid is, omdat zoals reeds eerder is opgemerkt, bij een dichte grond vaak een hoger vochtgehalte wordt gevonden in de verzadigde toestand (pF 0.1 en 0.4) dan het volgens berekening kan bevatten. In werkelijkheid is het verlies ten opzichte van pF 0.4

plusminus 3 volume-procenten hoger.

Vreemd is in dit geval dat verdicht zand met  $h = 0$  en  $h = 2$  bij pF 2.0 zo weinig vocht bevat. Dit is niet in overeenstemming met het veldonderzoek.

Ook in vergelijking met pF-curven van ongestoorde zandmonsters zonder humus is het vochtgehalte zeer laag. Mogelijk ligt de oorzaak in het feit dat bij het samenstellen van deze monsters met los droog zand is gewerkt.

Uit figuur 28 kan men afleiden dat het vochthoudend vermogen sterk verband houdt met de hoeveelheid organische stof per volume-eenheid. Op de eerste plaats neemt het vochtgehalte bij pF 2.0 sterk toe met het organisch stofgehalte en op de tweede plaats bij gelijk organisch stofgehalte met het volumegewicht.

Het totale vochtgehalte bij pF 2.0 wordt bepaald door 2 componenten namelijk de mineralen en de organische stof. Om een zuiver beeld te verkrijgen van de hoeveelheid vocht die door de organische stof wordt vastgehouden, dient het door de mineralen gebonden vocht te worden afgetrokken.

Volgens een serie F-gegevens van Limburgse zandgronden, wordt door zand zonder organische stof met een volumegewicht van 160 g gemiddeld plusminus 16 volume-procenten vastgehouden bij pF 2.0. Dat is 0,1 cc per gram mineralen.

Het vochthoudend vermogen van de organische stof ( $V_H$ ) =  $V_T - V_M$

$V_T$  = totaal vochtgehalte

$V_M$  = vochthoudend vermogen van mineralen =  $\frac{16}{160} = 0,1$  cc

In figuur 28 is het op deze wijze berekende vochthoudend vermogen van de organische stof vergeleken met de hoeveelheid organische stof. Het blijkt dat voor de waarden  $h = 10, 13, 25$  en  $38$  het vochtgehalte bij pF 2.0 sterk verband houdt met de totale hoeveelheid organische stof per volume-eenheid. Dit betreffen humeuze gronden, geen veengronden. Voor  $h = 2$  wordt een lagere waarde gevonden, maar dit geval is zoals reeds vaker is opgemerkt minder betrouwbaar. De veengronden ( $h = 65$  en  $h = 92$ ) reageren afwijkend en houden meer vocht vast per gewichtseenheid.

Gemiddeld blijkt het vochthoudend vermogen van de organische stof bij de humeuze gronden circa 3,3 cc te bedragen per gram organische stof.

Het vochthoudend vermogen van veen hangt waarschijnlijk sterk af van de soort veen of van de mate van indroging van het veen (rijping).

#### Samenvatting en conclusies

Met behulp van een proef op het laboratorium werd een onderzoek ingesteld naar het verband tussen dichtheid, vochtgehalte en draagkracht.

De proef bestond uit 8 variaties van organische stof, variërende van zand tot veen. De draagkracht werd bepaald bij 3 verschillende dichtheden en 3 variaties van vochtspanning.

Men kan voor iedere grond een minimale en een maximale dichtheid onderscheiden, dat wil zeggen dat het poriënvolume aan bepaalde grenzen is gebonden. Men kan het poriënvolume van zand zonder organische stof minimaal verlagen tot bijvoorbeeld 30%. Een dergelijk minimum bestaat ook voor de organische stof.

De maximale dichtheid van een willekeurige grond wordt bepaald door de maximale dichtheid van mineralen en organische stof afzonderlijk.

Zo bedraagt volgens de hier toegepaste methode de maximale dichtheid van mineralen 186 gram per 100 cc ( $p = 30\%$ ) en voor de organische stof 29 gram per 100 cc ( $p = 80\%$ )

De minimale dichtheid werd voor mineralen berekend op 146 gram per 100 cc ( $p = 45$ ) en voor de organische stof op 17 gram per 100 cc ( $p = 88,5$ ) De minimale dichtheid van veen uit ondergrond kan echter aanzienlijk lager zijn.

De dichtheid van een grond kan in objectieve cijfers worden uitgedrukt, door middel van de relatieve dichtheid.

Hieronder wordt verstaan de dichtheid van een grond in verhouding tot zijn minimale respectievelijk zijn maximale dichtheid. Ze kan berekend worden met de volgende formule:

$$d_r = \frac{5,9 H + 0,685 M - 100}{2,45 H + 0,145 M}$$

De draagkracht van een grond blijkt volgens deze proef op de eerste plaats te worden bepaald door zijn dichtheid. Wanneer een draagkracht van meer dan  $5 \text{ kg/cm}^2$  wordt vereist, dan blijkt bij een relatieve dichtheid van meer dan 70 de draagkracht onder alle omstandigheden voldoende te zijn, ongeacht de vochtspanning, dus ook in verzadigde toestand.

Bij een relatieve dichtheid van minder dan 45 is de draagkracht bij



een vochtspanning van pF 2.0 à 2.3 nog onvoldoende.

De vochtspanning is belangrijk bij de gronden met een gemiddelde dichtheid ( $45 > d_r < 70$ ).

De draagkracht neemt toe met de vochtspanning. Naarmate echter het organisch stofgehalte stijgt worden hogere vochtspanningen vereist om een voldoende draagkracht te bereiken. Deze conclusie is van veel belang ten aanzien van de veengronden.

Hieruit volgt dat bij veengronden een diepe ontwatering niet direct maar indirect de draagkracht in gunstige zin kan beïnvloeden.

De resultaten van een veldonderzoek worden hierdoor bevestigd.

De dichtheid van een grond is ook in sterke mate bepalend voor het vochtgehalte bij verschillende vochtspanningen (pF-curve).

Een dichte grond heeft een relatief klein poriënvolume en daardoor een laag vochtgehalte bij pF 0.4 in tegenstelling met losse grond.

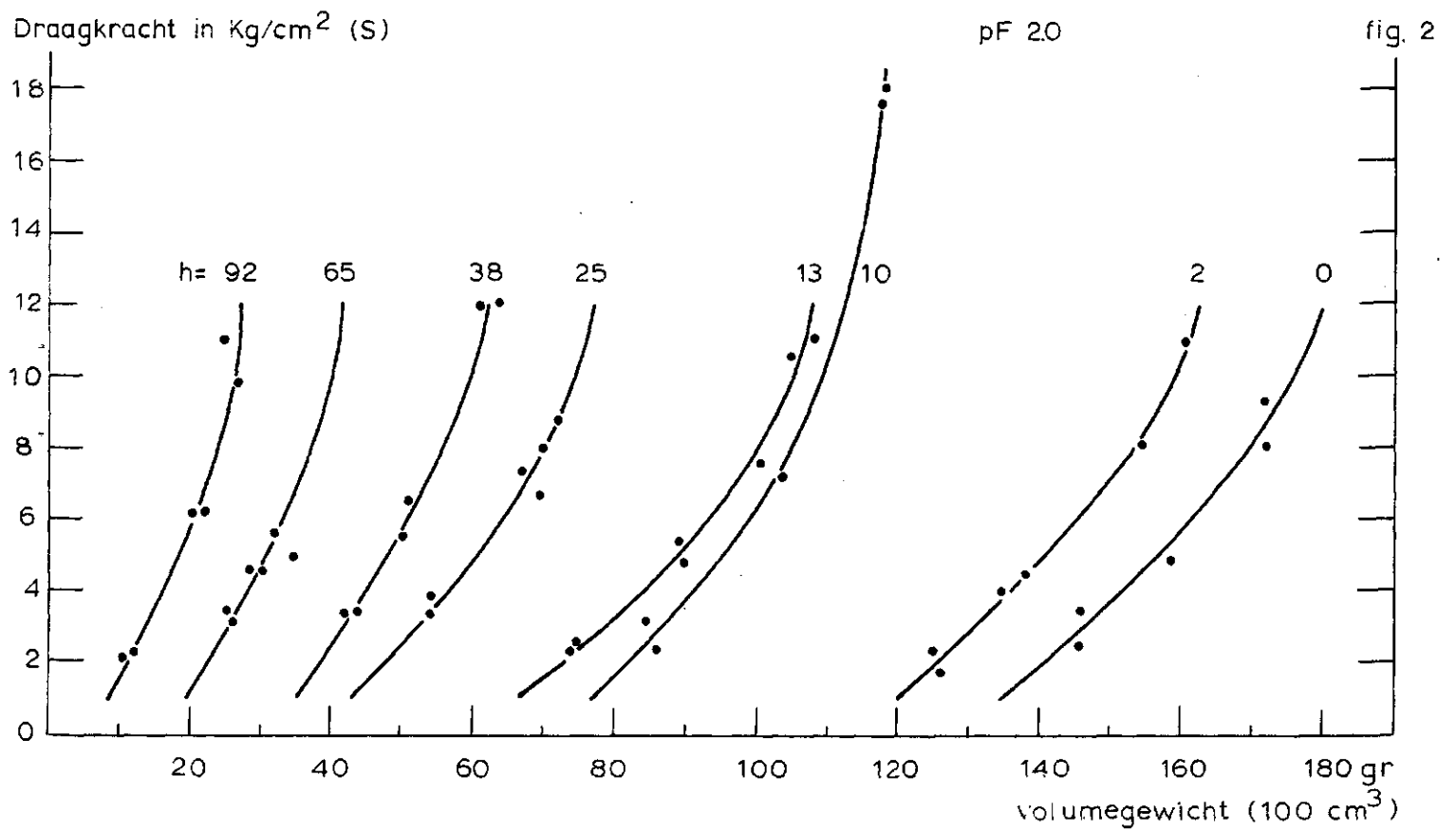
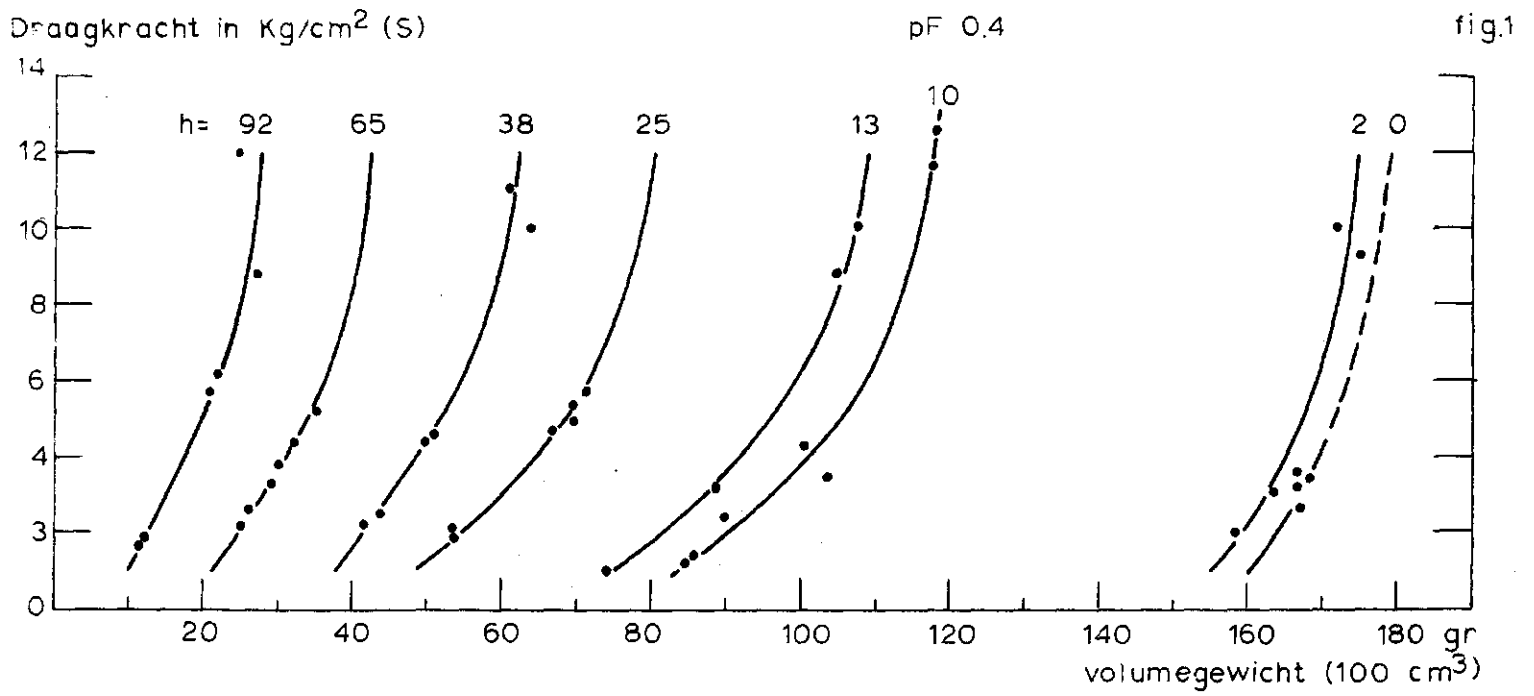
Omgekeerd bevat een dichte grond een relatief hoog vochtgehalte bij pF 2.0 respectievelijk 2.3 in tegenstelling met de losse grond. Het verschil pF 0.4 - 2.3 is dus zeer groot bij de losse grond en relatief klein bij de dichte grond.

Dit is ook de verklaring voor het feit dat in graslandzoden zo dikwijls een klein verschil werd geconstateerd tussen het vochtgehalte bij pF 0.4 en 2.0.

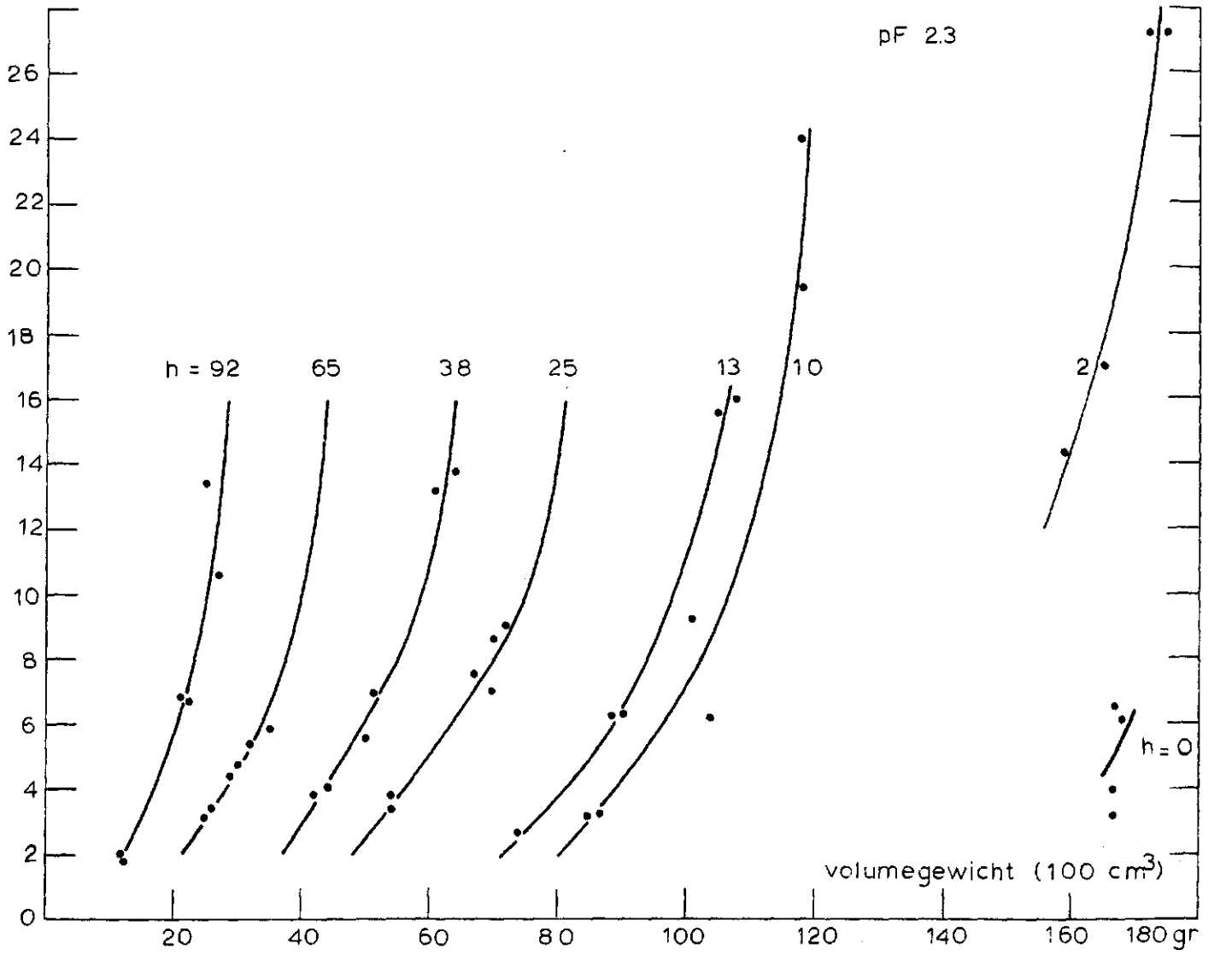
Het vochthoudend vermogen van een grond (pF 2.0 respectievelijk 2.3) wordt in sterke mate bepaald door de hoeveelheid organische stof per volume-eenheid, meer dan door het percentage organische stof. Dit is te verklaren in verband met de dichtheid. Het geldt echter voor de humeuze gronden, niet voor veen.

Deze conclusies betreffen de resultaten van een eenmalige laboratoriumproef. Herhaling van een dergelijk onderzoek zal nodig zijn om het een en ander te verifiëren en eventueel te corrigeren.

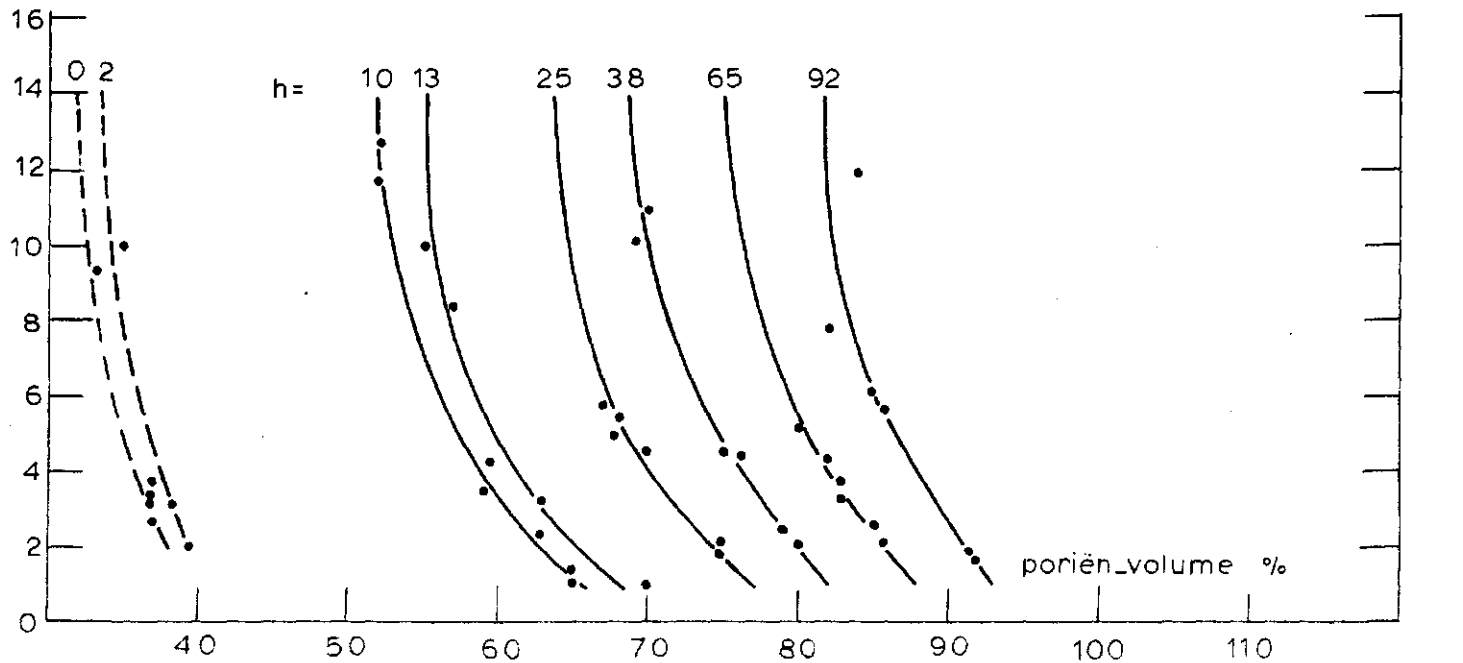
Ook zal nog nader moeten worden onderzocht in hoeverre deze conclusies geldig zijn onder veldomstandigheden.



Draagkracht in  $\text{Kg/cm}^2$  (S)

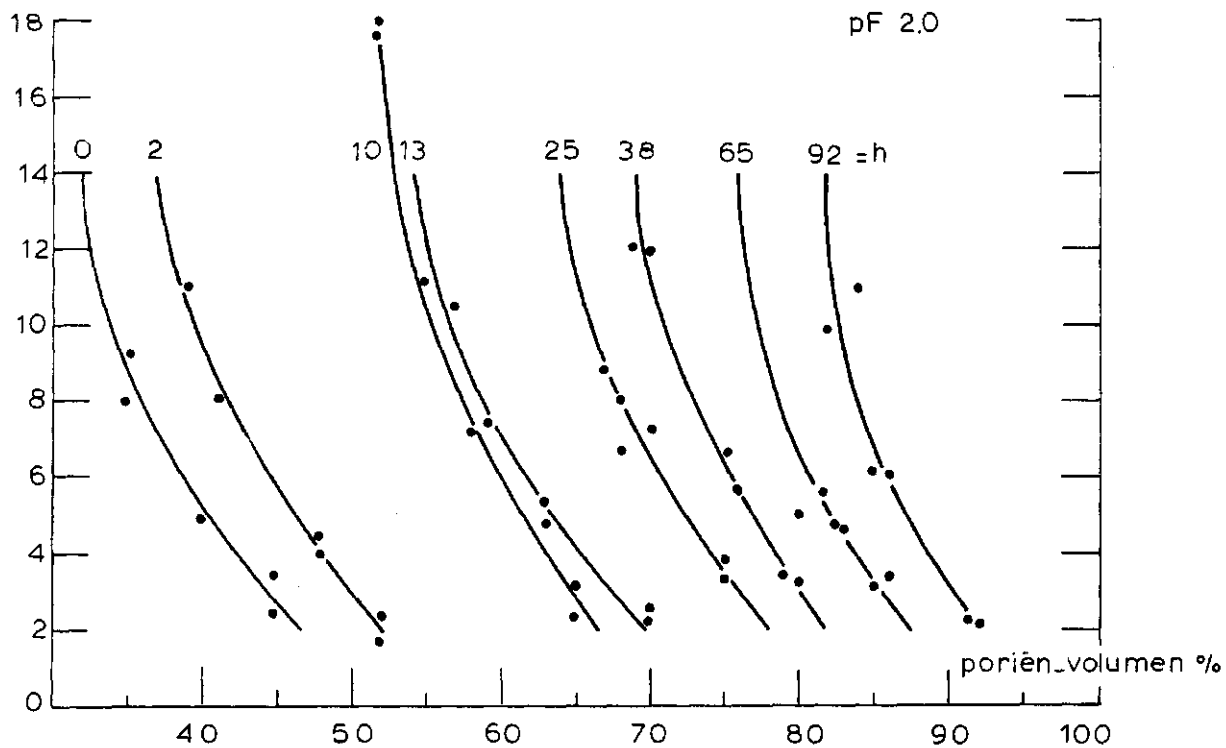


Draagkracht in  $\text{Kg/cm}^2$  (S)



Draagkracht in  $\text{Kg/cm}^2$  (S)

fig. 5



Draagkracht in  $\text{Kg/cm}^2$  (S)

fig. 6

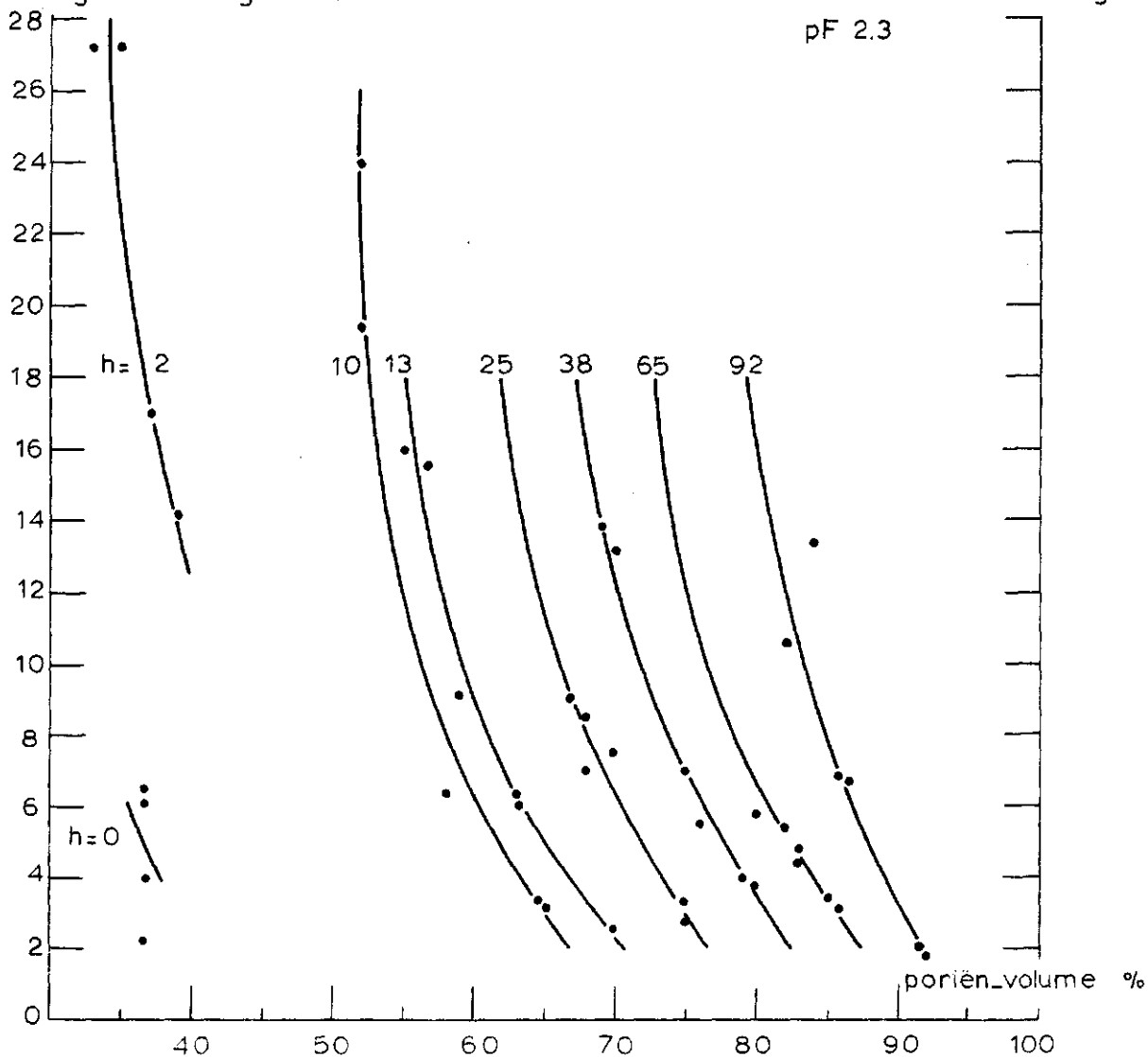
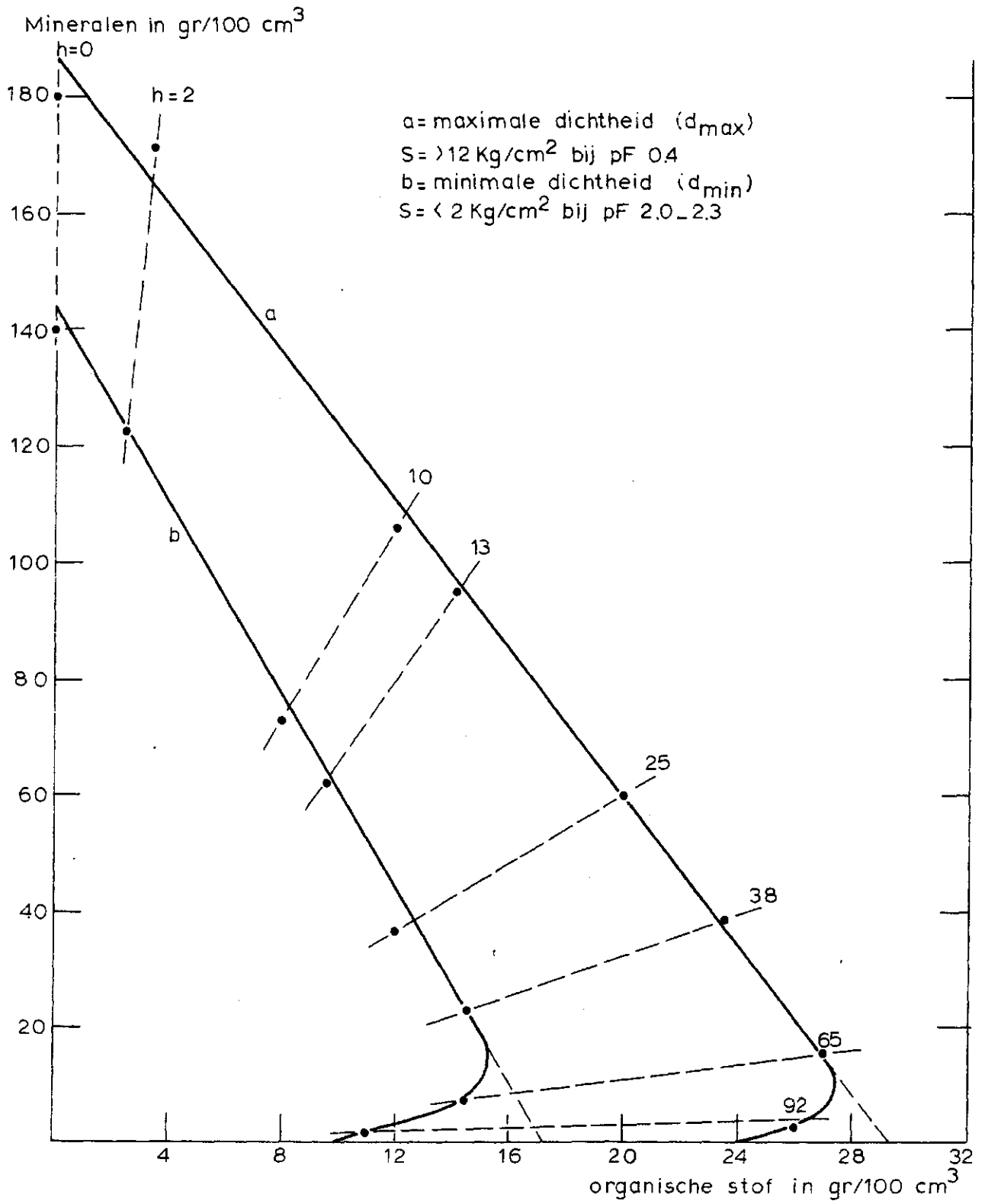
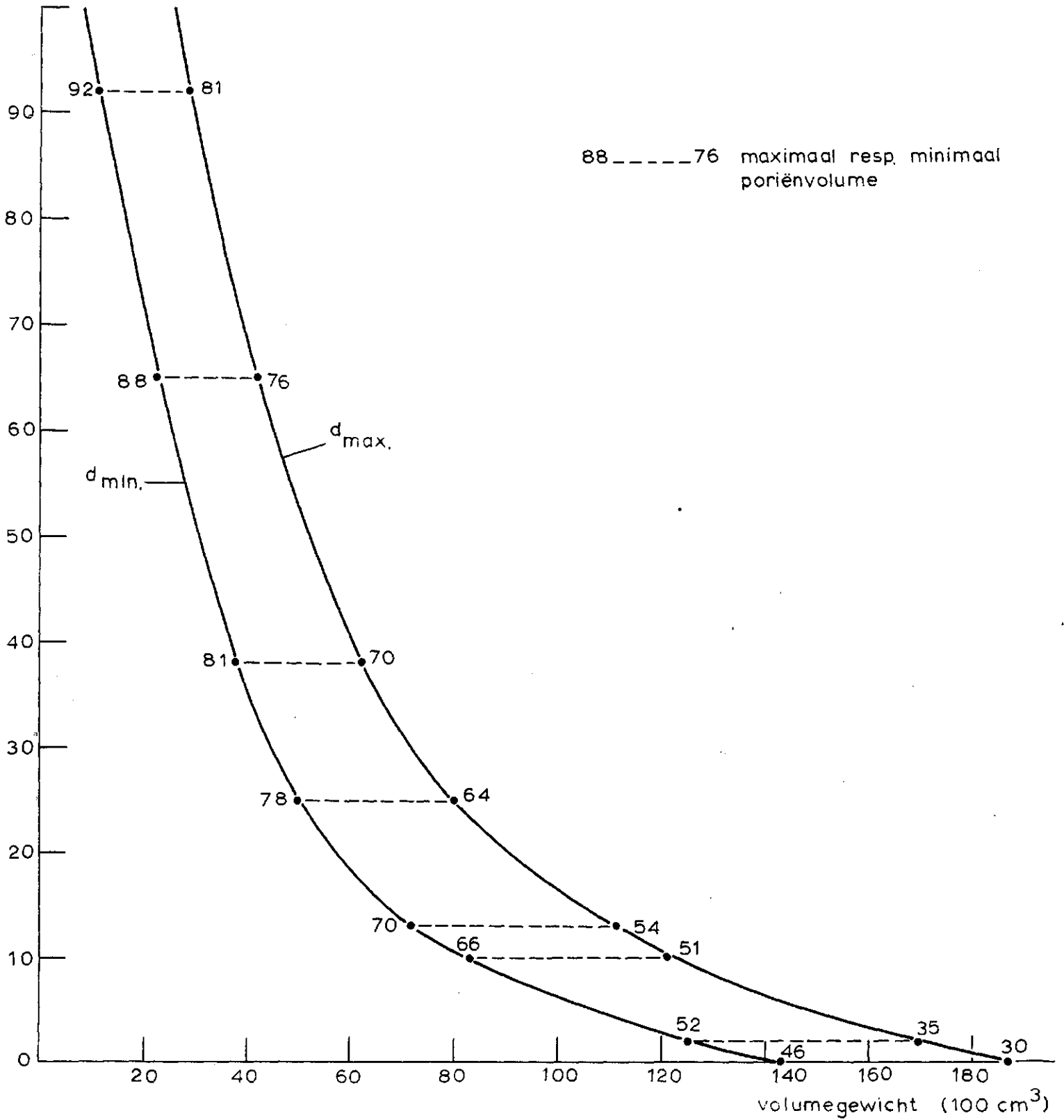


fig. 7



Organisch stofgehalte (h)

fig. 8





Draagkracht in  $\text{Kg/cm}^2$  (S)

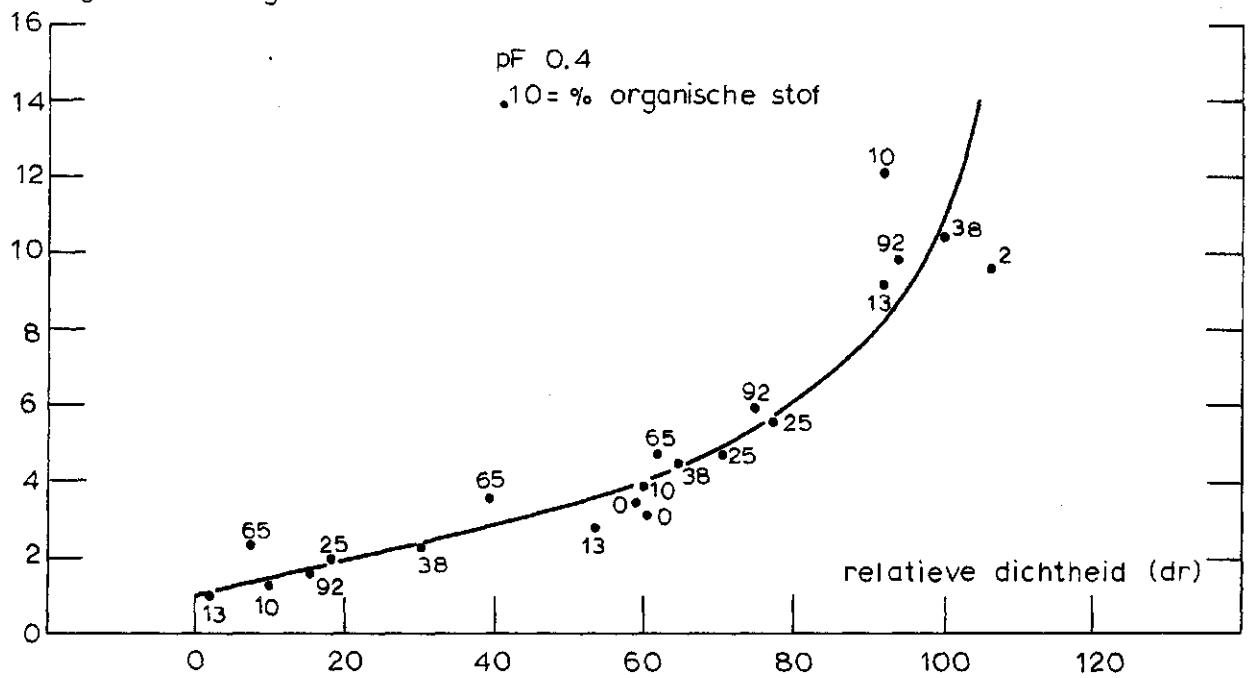


fig. 11

Draagkracht in  $\text{Kg/cm}^2$  (S)

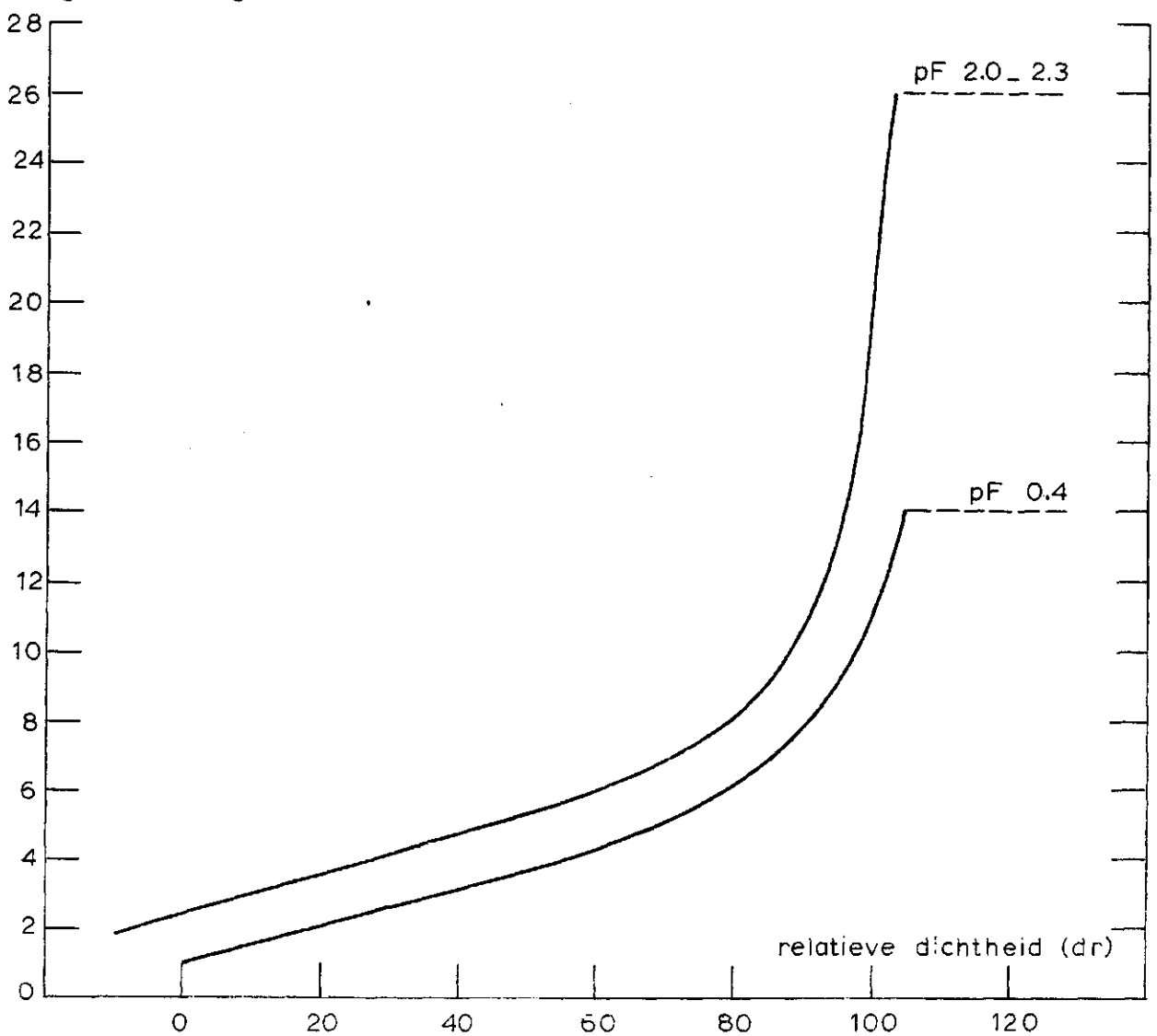


fig. 12



S in Kg/cm<sup>2</sup>

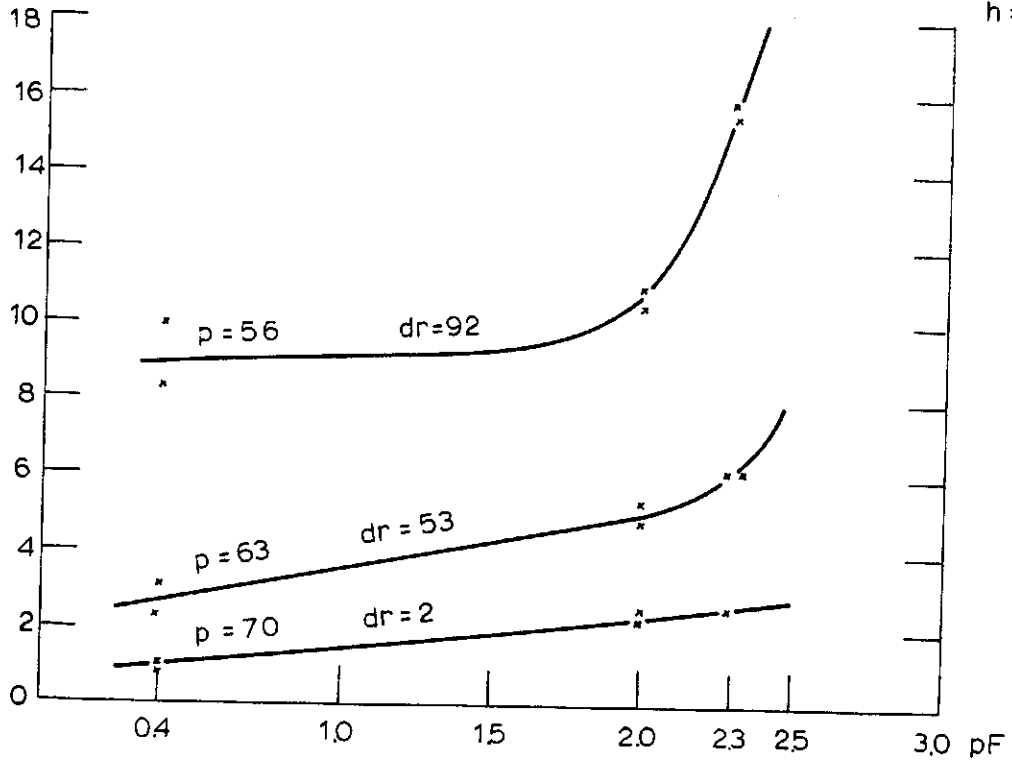


fig 14  
h = 13%

S in Kg/cm<sup>2</sup>

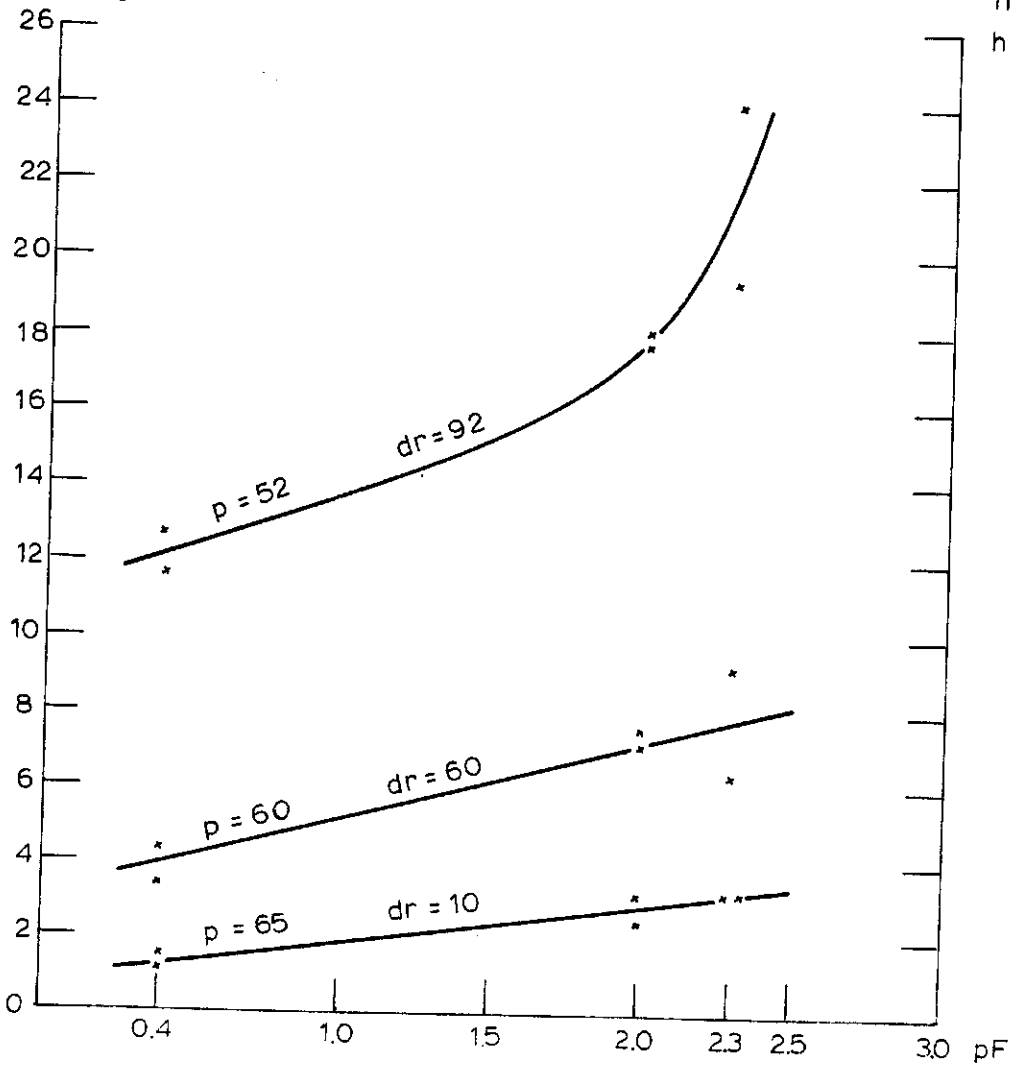
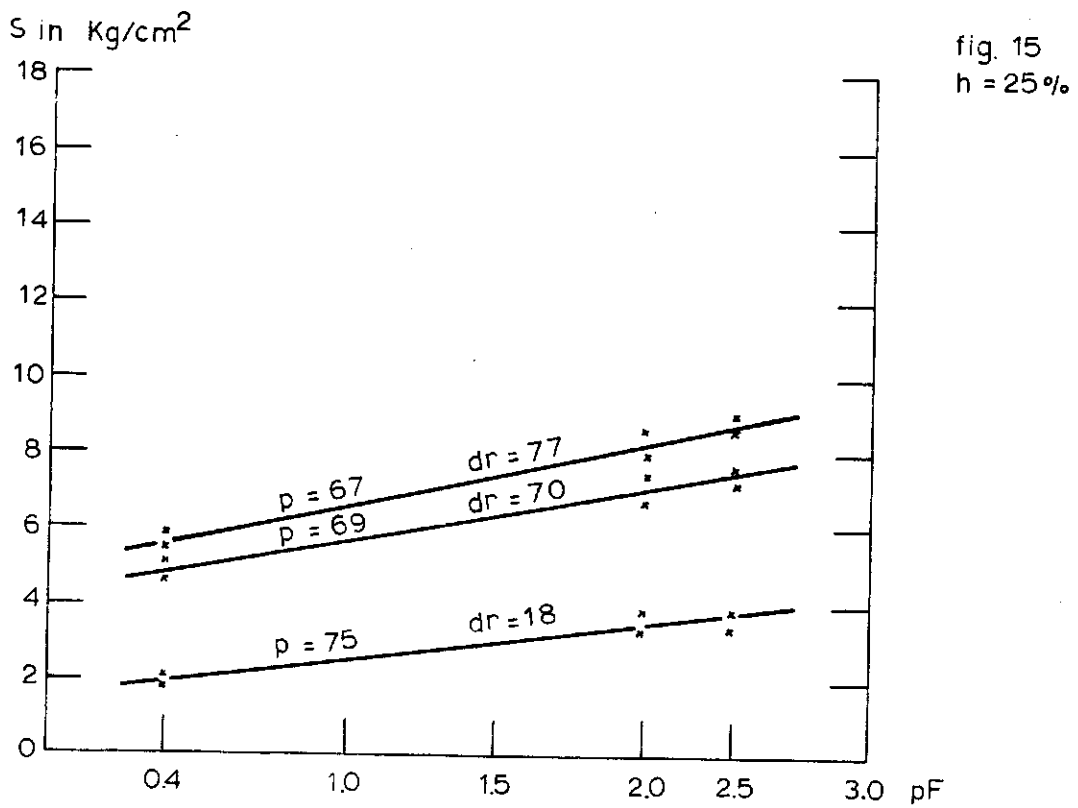
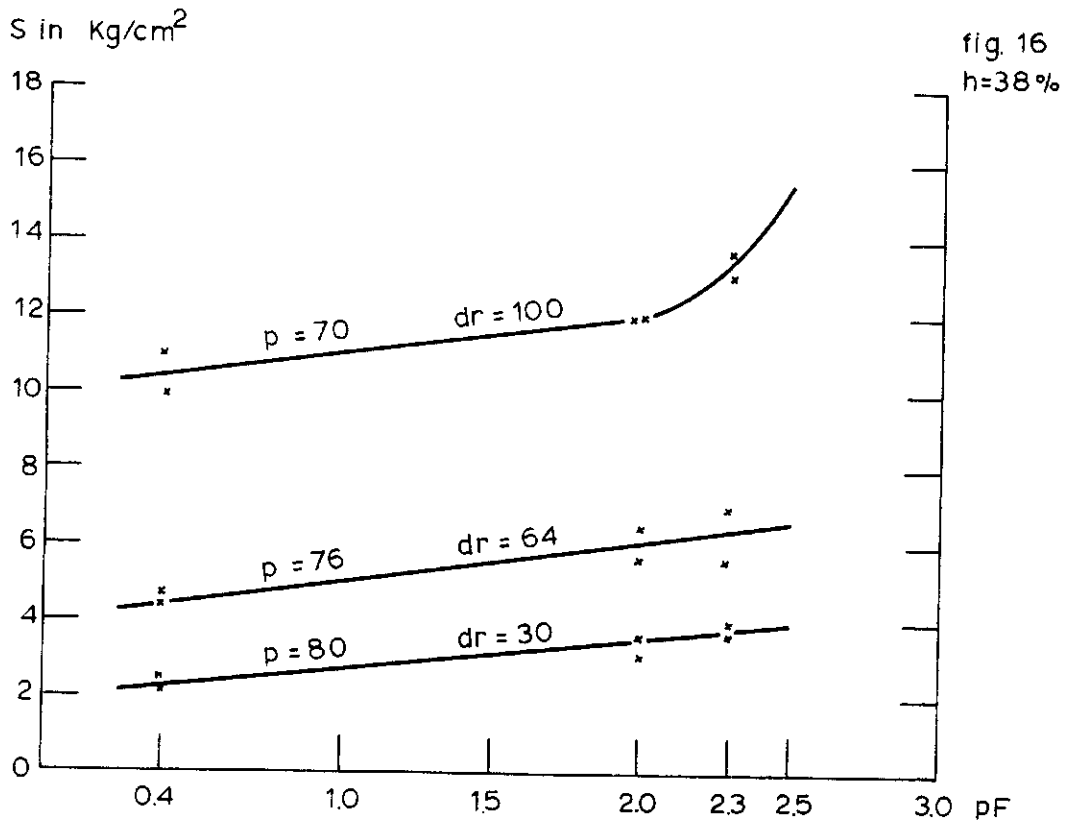


fig 13  
h = 10%



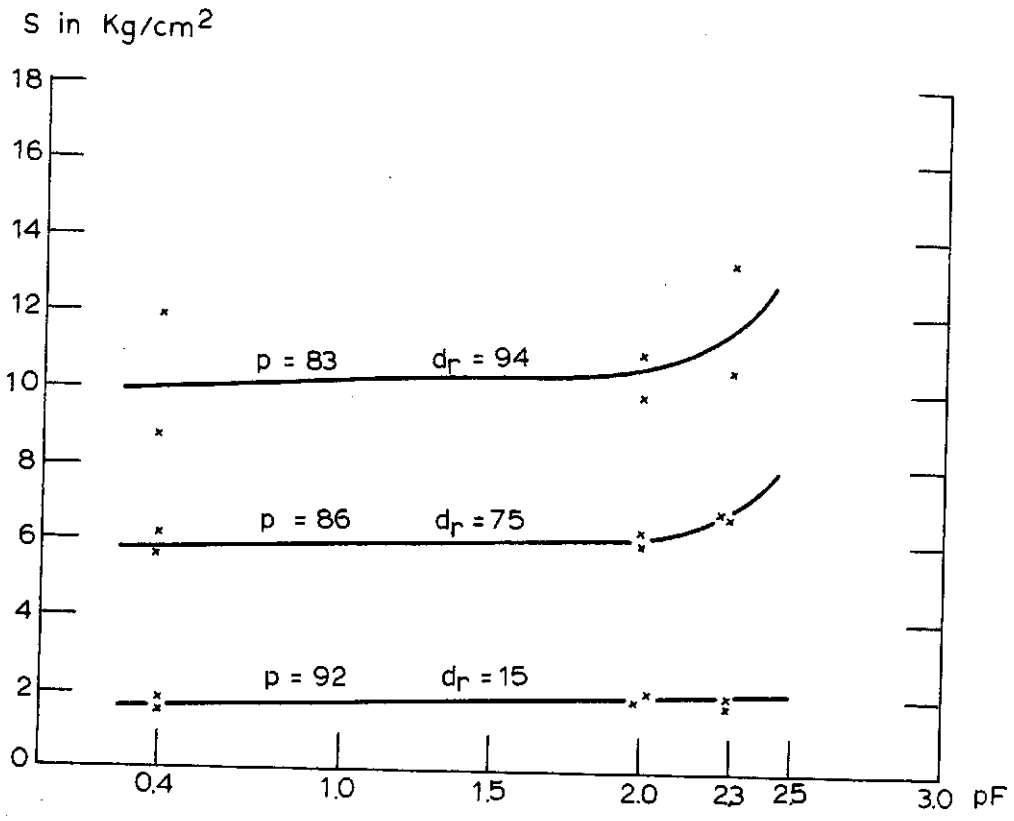


fig.18  
h = 92%

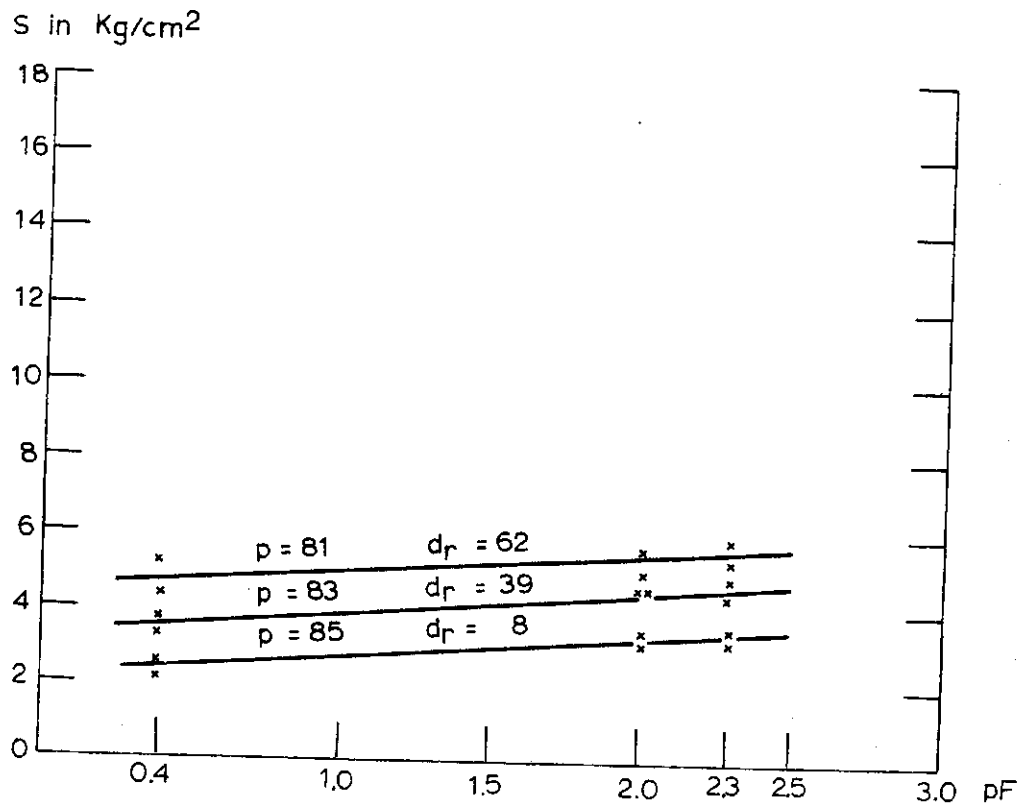
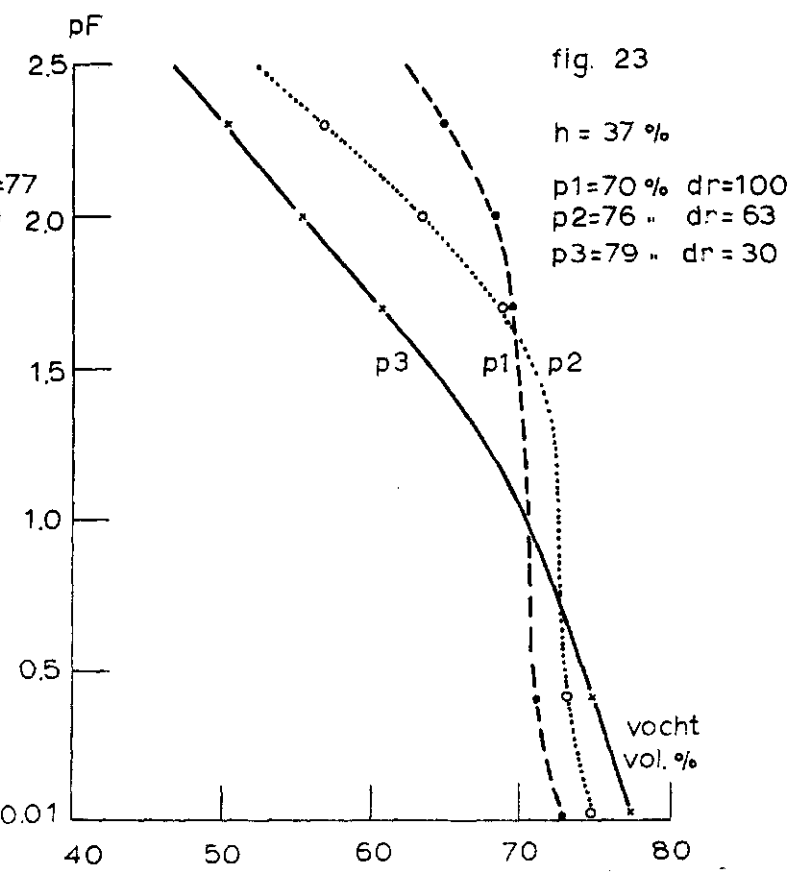
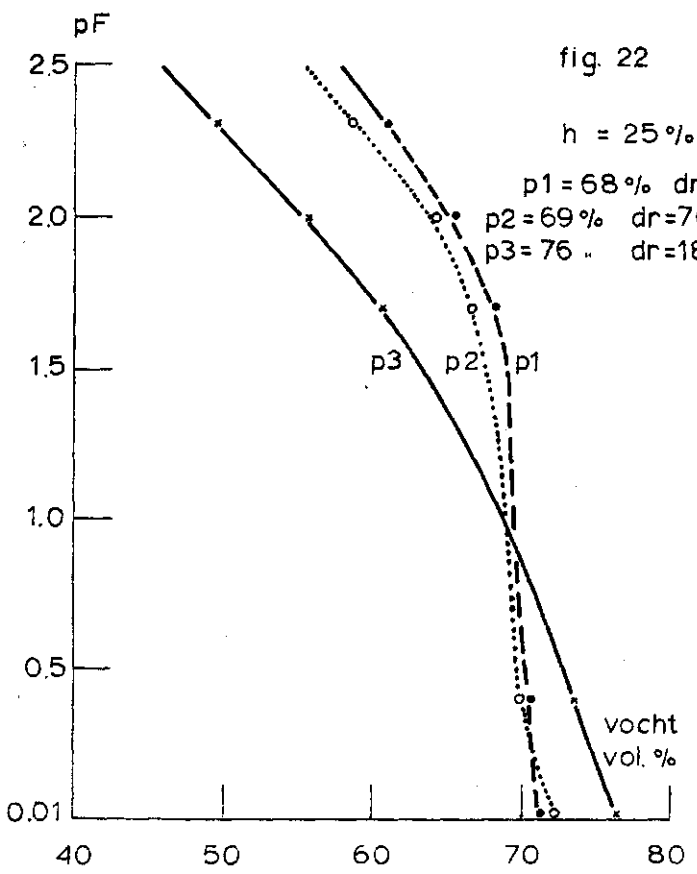
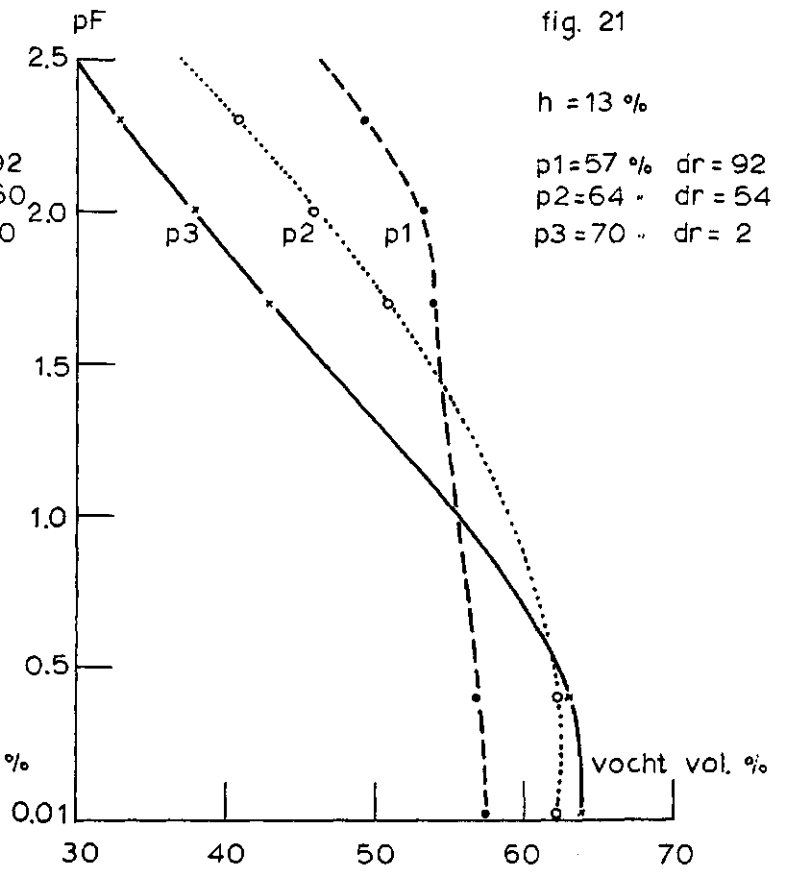
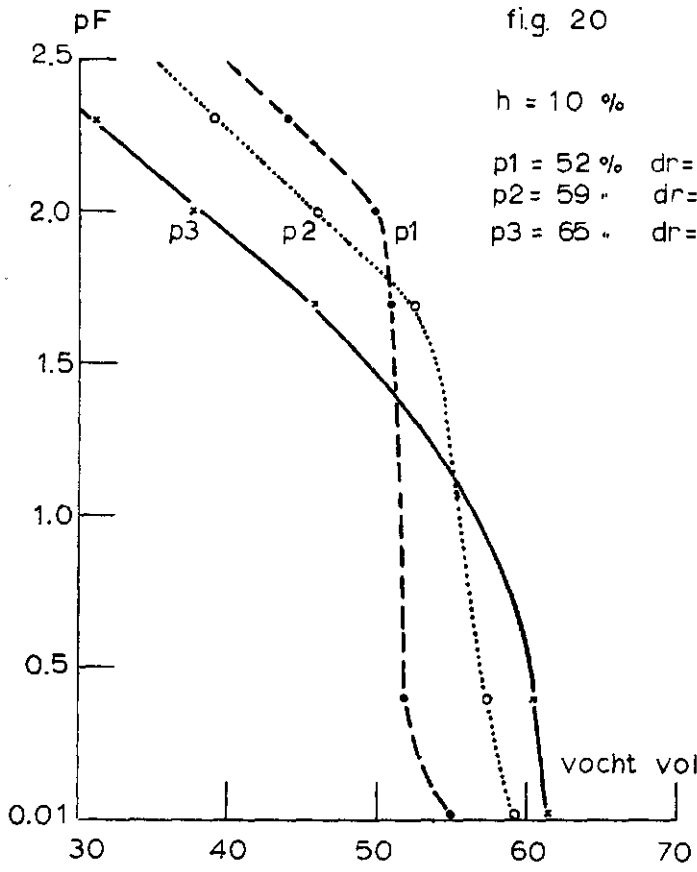
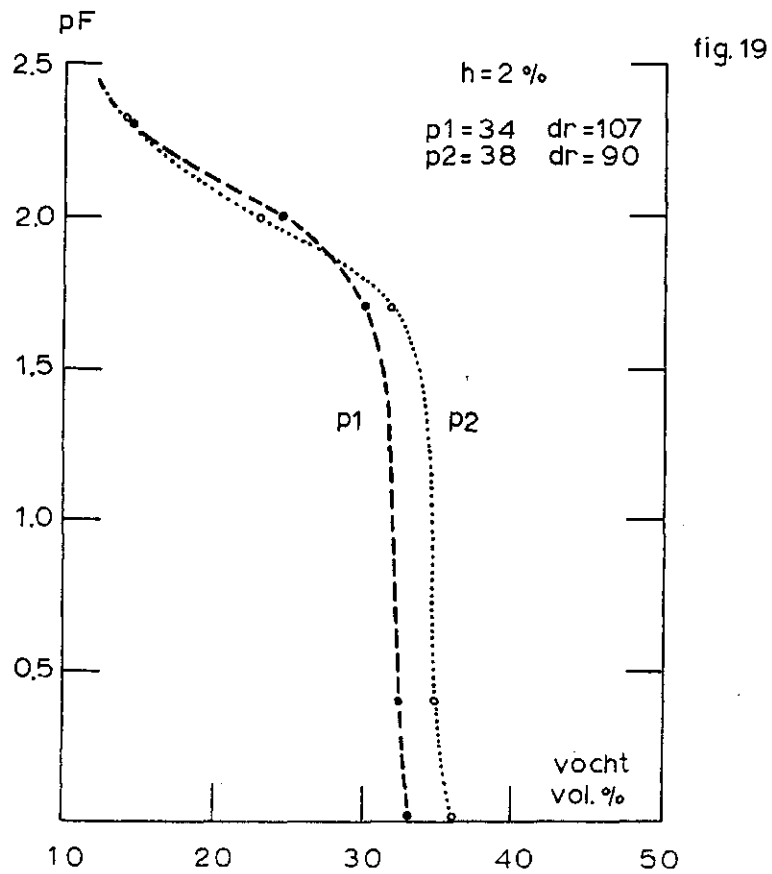
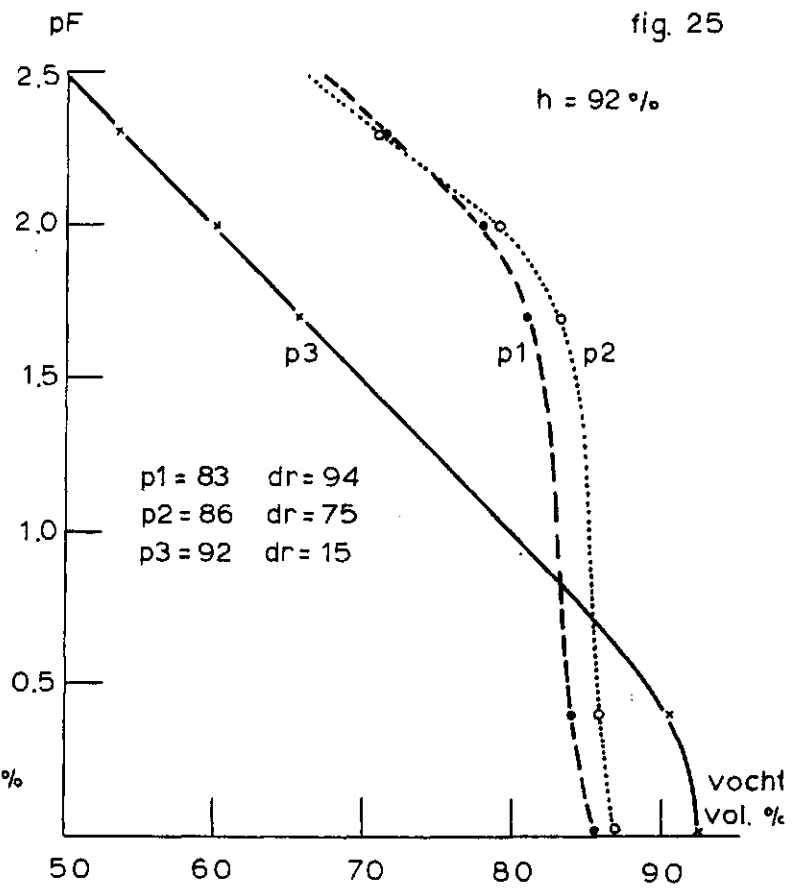
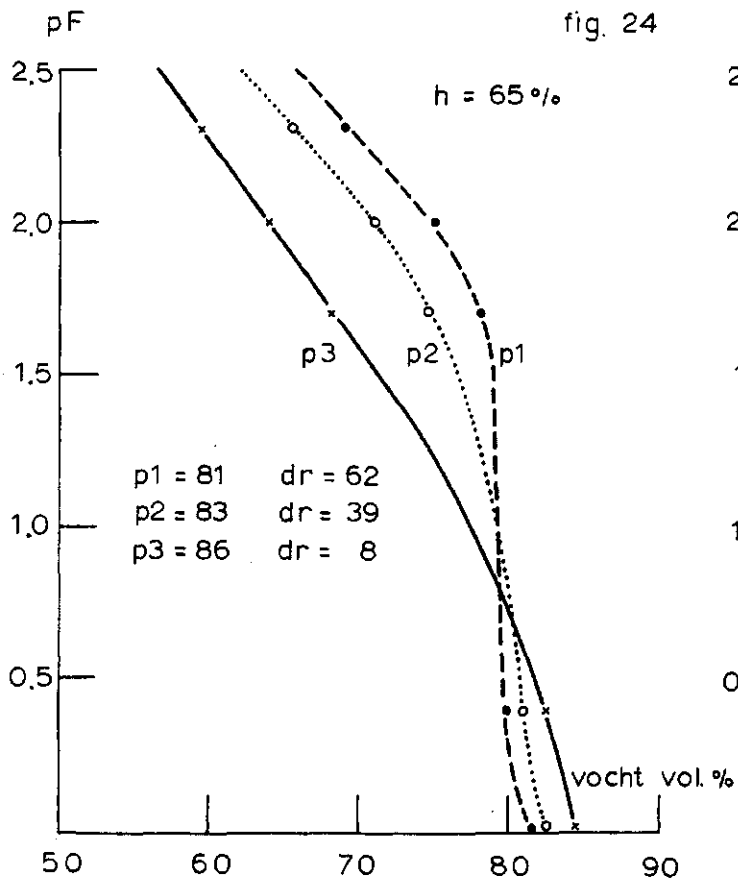


fig.17  
h = 65%





Vocht vol. % bij pF 2.0

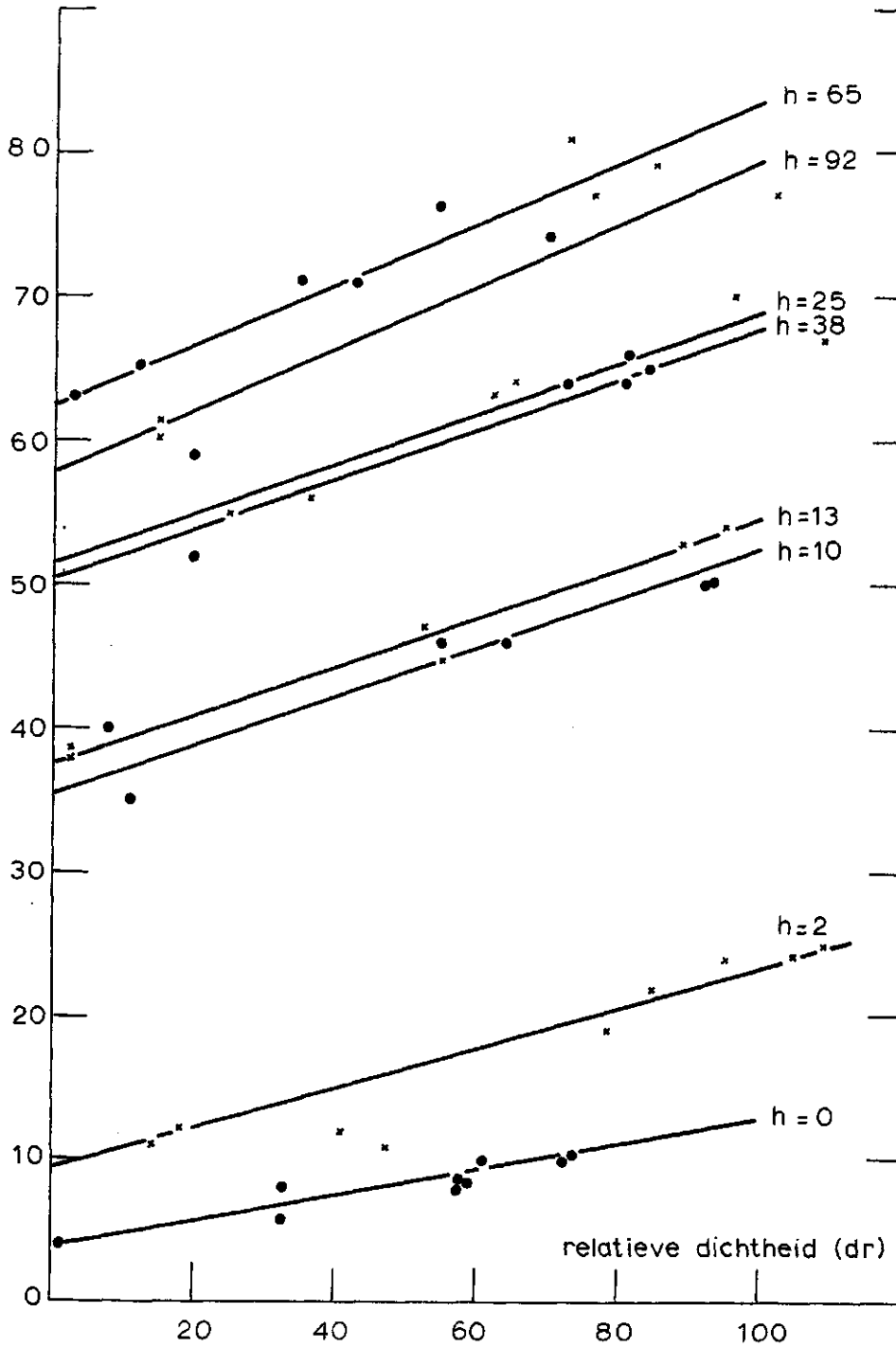


fig. 26

Vocht vol. % bij pF 2.0

fig. 27

