

NN31545.0254

INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING

NOTA 254, d. d. 4 mei 1964

De bepaling van de vochtspanning en het vochtgehalte van
gronden door middel van dampspanningsevenwichten

ir. W. P. Stakman

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemid-
delen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onder-
zoek nog niet is afgesloten.

Aan gebruikers buiten het Instituut wordt verzocht ze niet in pu-
blikaties te vermelden.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking.



0000 0271 5049

191166

De bepaling van de vochtspanning en het vochtgehalte van
gronden door middel van dampspanningsevenwichten

ir. W. P. Stakman

Inleiding

In 1874 werd door HILGARD het begrip hygroscopiciteitscoëfficiënt naar voren gebracht. Hieronder werd verstaan het vochtpercentage dat een droge grond bevat in een ruimte met een verzadigde atmosfeer en met constante temperatuur na in evenwicht te zijn gekomen met die verzadigde atmosfeer.

De hygroscopiciteitscoëfficiënt zou een maat zijn voor de fijnheid van de grond en voor de maximale hoeveelheid water, welke uitgedrukt als verschil tussen de totale hoeveelheid water, welke de grond kan bevatten en de hygroscopiciteitscoëfficiënt, beschikbaar is voor de groei van gewassen.

De methode van het wegzetten van grond in een met waterdamp verzadigde atmosfeer werd al sinds 1830 toegepast door SCHUEBLER. Deze gebruikte echter een te dikke laag grond om betrouwbare resultaten te verkrijgen. HILGARD verfijnde in 1859 de methode Schübler, onder andere door te werken met een dunne laag grond, het handhaven van een hoge verzadigingsgraad en het vermijden van temperatuurschommelingen, welke laatste aanleiding kunnen geven tot condensatieverschijnselen.

Van 1830 tot 1880 werd deze methode veelvuldig toegepast; hoe hoger de gevonden waarde, des te vruchtbaarder zou de grond zijn. Deze opvatting werd na 1875 echter weerlegd door SACHS en MAYER en anderen, wat tot gevolg had, dat aan de bepaling van de hygroscopiciteitscoëfficiënt weinig waarde meer werd gehecht. Sindsdien is alleen door HILGARD en LOUGHRIDGE nog vastgehouden aan de betekenis van de hygroscopiciteitscoëfficiënt. HILGARD plaatste zijn monsters in een laag van 1 mm dikte in een doos, waarin hij door middel van bedekking van de wanden met steeds natgehouden vloeipapier de atmosfeer verzadigd hield; de temperatuur van de omgevende kelderruimte was 60° F ($\pm 15^{\circ}\text{ C}$). Na 8 à 12 uur werden de monsters gedroogd in een droge luchtstroom van 110° C . De 'instel'-tijd van 8 à 12 uur voor luchtdroge grond werd ook door een onderzoek van LIPMAN en SHARP (1911) als voldoende gekenschetst en later nog eens

door proeven van ALWAY en anderen (1917) bevestigd.

Latere proeven van PURI (1925) wezen echter uit dat het vochtevenwicht pas na veel langere tijd of in het geheel niet werd bereikt.

In Europa werd in het begin van de twintigste eeuw de hygroscopiciteit door MITSCHERLICH en RODEWALD op een andere manier bepaald en wel boven een 10% zwavelzuuroplossing; zij achtten dit betrouwbaarder dan de Amerikaanse methode boven water, waarbij gemakkelijk condensatieverschijnselen konden optreden. Tijdens de adsorptie van water aan een droge grond komt warmte vrij, de zogenaamde bevochtigingswarmte; de hygroscopiciteit werd nu door hen gedefinieerd als dat watergehalte van de grond waarbij geen warmte meer vrijkomt. Deze waarde zou evenredig zijn met de kracht waarmee watermoleculen aan de oppervlakte worden vastgehouden. Zij stelden van een aantal gronden bevochtigingswarmtecurven vast en bepaalden tevens de waterhoeveelheid, welke deze gronden boven verschillende concentraties zwavelzuur opnamen. Overeenstemmende vochtwaarden als bij een bevochtigingswarmte = 0 werden verkregen boven een zwavelzuur-watremengsel van 10%, wat overeenkomt met een relatieve vochtigheid van 94,3% bij 25° C.

Aan de beschouwingen van MITSCHERLICH en RODEWALD werd buiten Duitsland in het begin weinig aandacht besteed. Toch won het inzicht veld, dat de hoeveelheid geadsorbeerd water bij een bepaalde dampspanning een maat moest zijn voor de totale actieve oppervlakte van de beschouwde materie.

Behalve het 10% zwavelzuurmengsel dat MITSCHERLICH en zijn medewerkers gebruikten, werd door ROBINSON (1911) de geadsorbeerde hoeveelheid water boven 3,3% zwavelzuur bepaald, terwijl ANDERSON en MATTSON (1926) in Amerika 30% zwavelzuur gebruikten, hetgeen overeenkwam met relatieve luchtvochtigheden van respectievelijk 99,8% en 74,9%. PURI en anderen (1925) stelden het gebruik van een 50% zwavelzuurmengsel voor.

Later is in het laboratorium van het Rothamsted Experimental Station in Engeland gebruik gemaakt van een 47% zwavelzuurmengsel om aldus een relatieve vochtigheid van 50% te realiseren.

Het bezwaar van het gebruik van zwavelzuur lag, behalve het lastig hanteren van deze bijtende vloeistof, vooral in het feit dat door het opnemen of afstaan van water aan het object van onderzoek de concentratie en de daarmee corresponderende dampspanning zich wijzigde. Bij de zich

veelal langzaam instellende evenwichten tussen de dampspanning van het water in grondmonsters en dat van het zwavelzuur-watermengsel moest het zwavelzuur dientengevolge één- of meermalen gedurende de bepaling worden vernieuwd. Door het gebruik van oververzadigde zoutoplossingen waar onder andere door BEUTELSPACHER (1954) en DAVIDSON en SCHOFIELD (1942) op werd gewezen, kon steeds eenzelfde dampspanning boven de vloeistof gehandhaafd blijven, zolang zich daarin nog onopgeloste zoutkristallen bevonden.

Pas na 1920 kwam men er toe meer aandacht te besteden aan het verband tussen dampspanning en vochtgehalte van verschillende materialen.

In 1925 kwam PURI, die onder andere bij vier temperaturen en drie grondsoorten proeven nam ter bepaling van de hygroscopiciteitscoëfficiënt boven water (niet te verwarren met de hygroscopiciteit van MITSCHERLICH boven zwavelzuur) tot de volgende kritische conclusie:

'One is driven inevitably to the conclusion that the determination of the 'Hygroscopic Coefficient' as defined by earlier workers is not possible in any rigid or quantitative sense'.

Wat de temperatuurinvloed op de vochtadsorptie betreft vermelden PURI en anderen (1925) bij proeven boven zwavelzuur-watermengsels dat bij hoge relatieve vochtigheden de vochtadsorptie in het traject van 20° tot 40° C onafhankelijk is van de temperatuur, doch dat bij lage relatieve vochtigheden bij stijgende temperatuur een afname in de adsorptie valt te constateren.

Dit laatste wordt geïllustreerd door tabel 1, ontleend aan PURI (1949).

Tabel 1. Evenwichtsvochtgehalte van een drietal gronden bij lagere relatieve vochtigheden en twee temperaturen

Relatieve vochtigheid in %	Grond I		Grond II		Grond III	
	16°	96°	16°	96°	16°	96°
74	1,3	0,3	3,1	1,1	11,2	6,7
49	-	-	2,1	0,9	8,9	6,5
27	0,7	0,2	1,4	0,6	6,7	4,3
16	-	-	1,1	0,5	5,0	3,0
4	0,3	0,1	0,5	0,3	2,5	1,1

BAVER en WINTERKORN (1935) constateerden, dat bij een dampspanning van 30 mm kwik (dat is 94% relatieve vochtigheid bij 30° C), welke bij hogere temperaturen constant werd gehouden door de concentratie van het zwavelzuur te verhogen, een temperatuurstijging van 30° tot 40° de geadsorbeerde waterhoeveelheid aan verschillende aluminium-silicaten tot de helft deed afnemen; bij 80° C was deze hoeveelheid slechts 10% van die bij 30° C.

LIPMAN en SHARP (1911) vonden echter als algemene regel, dat grond meer water adsorbeerde naarmate de temperatuur hoger was. Ook WADSWORTH (1944) constateerde dat bij een lage relatieve vochtigheid meer water werd gebonden bij 32,7° C dan bij 17,2° C, welk verschil echter minder werd bij hogere relatieve vochtigheden.

Meer voorbeelden van niet-gelijklopende resultaten zijn aan te halen die in het algemeen zijn toe te schrijven aan verschillen in toegepaste techniek en aan het onvolledig in de hand gehad hebben van de vereiste condities betreffende temperatuur en dampspanning.

De samenhang tussen pF, relatieve vochtigheid en temperatuur

De relatie tussen zuigspanning, relatieve vochtigheid en temperatuur kan als volgt worden aangegeven:

$$h = - \frac{R \theta}{Mg} e_{10} \log \frac{H}{100} \quad (1)$$

waarin h	zuigspanning (cm waterkolom)
H	relatieve vochtigheid (%)
R	universele gasconstante ($8,315 \times 10^{-7}$ erg per molecuul per graad Celsius)
M	moleculair gewicht van water (18,0 gram per molecuul)
θ	absolute temperatuur (° Kelvin)
g	versnelling van de zwaartekracht (981 cm/sec^2)

Indien nu de zuigspanning wordt uitgedrukt als pF, dat wil zeggen als de 10^{e} logarithme van de zuigspanning in centimeters waterkolom, dan is:

$$pF = 10^{\text{e}} \log \left(2,3026 \frac{R \theta}{Mg} \right) + 10^{\text{e}} \log (2 - 10^{\text{e}} \log H) \quad (2)$$

Substitueren we hierin de bovengenoemde waarden van R, M en g,

dan volgt hieruit:

$$pF = 6,502 + {}^{10}\log (2 - {}^{10}\log H) \quad \text{voor } t = 20^{\circ} \text{ C} \quad (3)$$

Dit verband wordt in figuur 1 nader aangegeven (CRONEY e. a. 1952).

Uit deze figuur blijkt, dat het verband tussen $H = 10\%$ en $H = 75\%$ vrijwel rechtlijnig is en steil verloopt, dat wil zeggen dat een afwijking van een bepaalde relatieve vochtigheid in dat traject een relatief geringe verandering in pF ten gevolge heeft.

Dit geldt dus echter slechts voor het traject tussen pF 6,5 en pF 5,5. Het voor de plant belangrijke traject tussen verwelkingspunt (pF 4,2, relatieve vochtigheid circa 98,85%) en veldcapaciteit (pF 2,0, relatieve vochtigheid circa 99,99%), omvat dus het asymptotisch tot een horizontale lijn naderende bovenste gedeelte van de curve.

Een zeer geringe verandering in dampspanning (relatieve vochtigheid) zal hier een relatief grote verandering in vochtspanning (pF) geven. Bij hygroscopiciteitsbepalingen in dit traject zullen strenge temperatuurcondities moeten gelden.

Teneinde een nauwkeurige aflezing van de pF -waarden bij hoge relatieve luchtvochtigheden mogelijk te maken, is figuur 1 getransformeerd tot figuur 2, waarbij de indeling van de abscis dezelfde is gebleven en de ordinaat dubbel logaritmisch is ingedeeld.

De invloed van de temperatuur op de verzadigde dampspanning van water

Het verband tussen de verzadigde dampspanning van water en de temperatuur wordt weergegeven door een kromme (figuur 3); bij een logaritmische verdeling van de dampspanningsschaal kan bij benadering worden gesteld, dat dit verband tussen 15° en 25° C rechtlijnig is, zoals figuur 4 aangeeft. Deze lijn voldoet aan de volgende vergelijking:

$$\log P_x = 0,026 t_x + 0,72 \quad (4)$$

waarin P_x = verzadigde dampspanning van water in mm kwik en t_x = temperatuur in $^{\circ} \text{ C}$.

Is de dampspanning bij t_x niet verzadigd, maar heerst er een relatieve vochtigheid van $H\%$, dan is:

$$P_y = \frac{H}{100} P_x \quad (5)$$

waarin P_y de dampdruk is bij temperatuur t_x en relatieve vochtigheid $H\%$ en tevens de verzadigingsdampdruk bij een temperatuur t_y ($t_y < t_x$).

Daar nu $\log P_y = 0,026 t_y + 0,72$, volgt door substitutie van $\log P_x$ uit (4) in (5):

$$t_y = 38,46 \log \frac{H}{100} + t_x \quad (6)$$

Nemen we nu als voorbeeld $t_x = 20^\circ$, dan kan t_y voor verschillende relatieve vochtigheden H worden berekend, zoals in tabel 2 staat aangegeven.

Tabel 2.

pF	Relatieve vochtigh. H (%)	t_y in $^\circ\text{C}$	pF	Relatieve vochtigh. H (%)	t_y in $^\circ\text{C}$
$-\infty$	100	20,0	3,92	99,40	19,90
1,80	99,995	19,999	3,99	99,30	19,88
2,10	99,99	19,998	4,04	99,20	19,87
2,46	99,98	19,997	4,10	99,10	19,85
2,62	99,97	19,995	4,14	99,00	19,83
2,73	99,96	19,993	4,18	98,90	19,82
2,84	99,95	19,992	4,20	98,85	19,81
2,92	99,94	19,990	4,32	98,50	19,75
2,98	99,93	19,988	4,45	98,00	19,66
3,05	99,92	19,987	4,54	97,5	19,58
3,09	99,91	19,985	4,85	95,00	19,14
3,14	99,90	19,983	5,03	92,5	18,70
3,31	99,85	19,975	5,16	90,00	18,24
3,44	99,80	19,967	5,35	85,00	17,29
3,54	99,75	19,958	5,49	80,00	16,27
3,62	99,70	19,950	5,60	75,00	15,19
3,68	99,65	19,94	5,69	70,00	14,04
3,74	99,60	19,93	5,85	60,00	11,47
3,79	99,55	19,92	5,98	50,00	8,42
3,84	99,50	19,92			

In figuur 5 is de temperatuurdaling ($t_x - t_y$) = Δt logarithmisch uitgezet tegen de relatieve vochtigheid H , waarbij ook de uit formule (3) berekende

pF-waarden staan aangegeven (20° C).

Voor het gevonden rechtlijnig verband geldt:

$$\log \Delta t = \log \left(- {}^{10}\log \frac{H}{100} \right) + 1,585 \quad \text{of} \quad \Delta t = 10^{pF-4,9} \quad (7)$$

Uit de tabel en uit de figuur blijkt, dat bij pF 5,0 bij een temperatuu-
daling van 1,2° C onder 20° C condensatie van waterdamp optreedt, doch
dat dit bij pF 3,9 en pF 2,0 al bij een daling van 0,1° C, respectievelijk
0,001° C het geval is.

Hetzelfde rechtlijnige verband geldt ook voor bijvoorbeeld 15° en
25° C met dien verstande dat bij eenzelfde relatieve vochtigheid een an-
dere pF-waarde behoort; uit formule (2) valt te berekenen dat voor 15° C
geldt:

$$pF = 6,495 + {}^{10}\log (2 - {}^{10}\log H) \quad (3^a)$$

en voor 25° C:

$$pF = 6,509 + {}^{10}\log (2 - {}^{10}\log H) \quad (3^b)$$

De temperatuurverandering, waarbij condensatie optreedt, zal echter
niet als criterium voor de te realiseren en te handhaven temperatuurcon-
dities kunnen gelden, daar over het gehele traject hiermee een verande-
ring van circa 0,44 pF-eenheden gepaard gaat (figuur 5 en blz. 10).

Het is in de eerste plaats van belang de verandering in pF-eenheden
per graad temperatuurverandering te kennen, daar enerzijds bij een be-
paalde pF de nog toelaatbaar geachte verandering in pF-eenheden, even-
tueel gekoppeld aan de nog aanvaardbare verandering in vochtgehalte van
het monster, de vereiste constantheid in temperatuur bepaalt, anderzijds
bepaalde voorwaarden inzake pF- en temperatuurveranderingen de mini-
mum pF-waarde, waarbij nog aan deze voorwaarden wordt voldaan, be-
palen.

De te stellen temperatuureisen in afhankelijkheid van de toelaatbare fluctuatie in pF-eenheden

Wordt uitgegaan van de reeds eerder genoemde formule

$$h = - \frac{R\theta}{Mg} e \log \frac{H}{100} \quad (1)$$

dan kan deze ook worden geschreven als:

$$h = - \frac{R\theta}{Mg} \cdot e_{\log} \frac{P}{P_s} \quad (8)$$

waarin P de heersende dampspanning bij een bepaalde temperatuur en P_s de verzadigde dampspanning bij die temperatuur is.

De verandering in zuigspanning met de temperatuur wordt gevonden door differentiëring:

$$\frac{dh}{d\theta} = - \frac{R\theta}{Mg} \cdot \frac{1}{P} \cdot \frac{dP}{d\theta} - \frac{R}{Mg} e_{\log} P + \frac{R\theta}{Mg} \cdot \frac{1}{P_s} \cdot \frac{dP_s}{d\theta} + \frac{R}{Mg} e_{\log} P_s \quad (9)$$

Volgens CRONEY en anderen dient bij het onderzoek naar de invloed van de temperatuur op de zuigspanning bij toepassing van de vacuum-exsiccatormethode een tweetal invloeden te worden onderscheiden, namelijk:

- a. de invloed van temperatuurverschillen tussen het monster en de vloeistof, die wordt gebruikt om een bepaalde dampspanning te realiseren
- b. de invloed van temperatuurschommelingen, die de gehele apparatuur beïnvloeden, doch geen temperatuurgradiënt tussen monster en vloeistof opwekken.

Deze laatste invloed is te verwaarlozen klein: tussen pF 4,0 en pF 6,8 is de verandering in zuigspanning slechts 0,002 pF -eenheden per graad temperatuurverandering.

Wat de eerstgenoemde temperatuurinvloed betreft, kan worden gesteld dat de heersende dampspanning (P) van het water in het monster niet verandert, doch steeds gelijk blijft aan de dampspanning van de vloeistof, waarvan het volume dat van het monster vele malen overtreft.

Een verandering in de temperatuur θ van het monster met $d\theta$ gaat gepaard met een vochtuitwisseling tussen monster en vloeistof, waarbij $dP = 0$.

Uit formule (9) volgt dan:

$$\frac{dh}{d\theta} = - \frac{R}{Mg} (e_{\log} P - e_{\log} P_s) + \frac{R\theta}{Mg} \cdot \frac{1}{P_s} \cdot \frac{dP_s}{d\theta} \quad (10)$$

Uit formule (8) en (10) kan nu worden afgeleid:

$$\frac{dh}{d\theta} = \frac{h}{\theta} + \frac{R\theta}{Mg} \cdot \frac{1}{P_s} \cdot \frac{dP_s}{d\theta} \quad (11)$$

Uit $10 \log h = \frac{e \log h}{2,303}$ volgt dat $\frac{d^{10} \log h}{dh} = \frac{1}{2,303 h}$ dus:

$$dh = 2,303 h d^{10} \log h = 2,303 h d(pF) \quad (12)$$

Invullen van (12) in (11) geeft:

$$\frac{d(pF)}{d\theta} = \frac{1}{2,303 \theta} + \frac{R\theta}{Mg} \cdot \frac{1}{2,303 P_s} \cdot \frac{dP_s}{d\theta} \cdot \frac{1}{h} \quad (13)$$

of

$$\frac{d(pF)}{d\theta} = \frac{1}{2,303 \theta} - \frac{1}{2,303 P_s e^{\log \frac{H}{100}}} \cdot \frac{dP_s}{d\theta} \quad (14)$$

(zie ook CRONEY e. a., 1952).

In tabel 3 is de waarde van $\frac{d(pF)}{d\theta}$ nader uitgewerkt voor verschillende temperaturen en relatieve vochtigheden; de betreffende cijfers hebben betrekking op respectievelijk de eerste en tweede term van het tweede lid van formule (13) en (14).

Tabel 3.

$t(^{\circ}C)$	Relatieve vochtigheid H	$\frac{d(pF)}{d\theta}$	pF
0	1	0,00159 + 0,00686	6,80
20	1	0,00148 + 0,00584	
40	1	0,00139 + 0,00504	
0	10	0,00159 + 0,01372	6,50
20	10	0,00148 + 0,01168	
40	10	0,00139 + 0,01007	
0	50	0,00159 + 0,04560	5,98
20	50	0,00148 + 0,03882	
40	50	0,00139 + 0,03348	
0	90	0,00159 + 0,30095	5,16
20	90	0,00148 + 0,25619	
40	90	0,00139 + 0,22095	
0	99	0,00159 + 3,16000	4,14
20	99	0,00148 + 2,69000	
40	99	0,00139 + 2,32000	

Uit deze cijfers blijkt dat voor relatieve vochtigheden boven $H = 10$ de eerste term van het tweede lid in de formules (13) en (14) verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de tweede term van het tweede lid.

Voor formule (13) mag dus worden geschreven:

$$\frac{d(pF)}{d\theta} = \frac{R\theta}{Mg} \cdot \frac{1}{2,303 P_s} \cdot \frac{dP_s}{d\theta} \cdot \frac{1}{h} \quad (15)$$

Nu is

$${}^{10}\log \frac{d(pF)}{d\theta} = {}^{10}\log \left(\frac{R\theta}{Mg} \cdot \frac{1}{2,303 P_s} \cdot \frac{dP_s}{d\theta} \right) - pF \quad (16)$$

Voor verschillende temperaturen kunnen nu de volgende vergelijkingen worden opgesteld:

$$t = 10^\circ \text{ C} \quad \log \frac{d(pF)}{d\theta} = 4,588 - pF$$

$$t = 15^\circ \text{ C} \quad \log \frac{d(pF)}{d\theta} = 4,579 - pF$$

$$t = 20^\circ \text{ C} \quad \log \frac{d(pF)}{d\theta} = 4,570 - pF$$

$$t = 25^\circ \text{ C} \quad \log \frac{d(pF)}{d\theta} = 4,560 - pF$$

$$t = 30^\circ \text{ C} \quad \log \frac{d(pF)}{d\theta} = 4,551 - pF$$

Het verband tussen $\log \frac{d(pF)}{d\theta}$ en pF voor 20° C is uitgezet in figuur 6.

In onderstaande tabel 4 staan de minimum pF -waarden vermeld, waarbij de dampspanningsbepaling onder gegeven voorwaarden ten aanzien van de toelaatbare pF -schommeling ($d(pF)$) en de verandering in temperatuur ($d\theta$) van het monster ten opzichte van de temperatuur van de vloeistof mag worden toegepast (temperatuur 20° C).

Tabel 4. Minimum pF -waarden bij 20° C , waarbij de toelaatbare pF -fluctuatie niet wordt overschreden

$d(pF) \backslash d\theta$	$0,01^\circ \text{ C}$	$0,005^\circ \text{ C}$	$0,002^\circ \text{ C}$	$0,001^\circ \text{ C}$
0,1	3,57	3,27	2,87	2,57
0,05	3,87	3,57	3,17	2,87
0,01	4,57	4,27	3,87	3,57

De verandering van het vochtgehalte van het monster in afhankelijkheid van de verandering van de dampspanning

Het verband tussen dampspanning (relatieve vochtigheid) en vochtgehalte van verschillende grondsoorten werd nagegaan door THOMAS (1921, 1924) en PURI e. a. (1925).

In figuur 7 geven PURI e. a. dit nader aan. Voor de lichtere gronden geeft bij relatieve vochtigheden beneden 80% een verandering in relatieve vochtigheid slechts een relatief zeer geringe verandering in vochtgehalte te zien, bij zwaardere gronden neemt deze verandering echter toe. Uit het bovenste gedeelte van de curven blijkt duidelijk dat de oude Amerikaanse methode, waarbij het materiaal in een door waterdamp geheel of nagenoeg verzadigde atmosfeer werd gebracht aan vrijwel niet te realiseren voorwaarden wat de constantheid van die verzadigingsdampspanning (i. c. temperatuur) moet voldoen.

Een uiterst geringe verandering van de vlak bij verzadiging liggende relatieve vochtigheid heeft een belangrijke verandering in vochtgehalte van het monster ten gevolge.

De toelaatbare fluctuatie in relatieve vochtigheid (pF) kan worden gebaseerd op de al of niet toelaatbare schommeling in vochtgehalte van het monster.

Wanneer in figuur 8, waarin de pF-curven van drie grondsoorten zijn getekend de lijnsecties tussen pF 2 en 3, 3 en 4, 4 en 5, en 5 en 6 als rechtlijnig worden beschouwd, kan uit de helling van de lijn de verandering in vochtgehalte in volumeprocenten (Δv) met de verandering in pF (ΔpF) worden berekend.

Voor een verandering van 0,05 pF-eenheden staan in tabel 5 de veranderingen in volumeprocenten vocht voor de drie grondsoorten vermeld.

Tabel 5. Verandering in volumeprocenten vocht van een grondmonster bij een verandering van 0,05 pF-eenheden

Traject	Grondsoort	Duinzand	Zavel	Komklei
pF 2 - 3		0,25	0,65	0,30
pF 3 - 4		0,13	0,50	0,45
pF 4 - 5		0,08	0,30	0,65
pF 5 - 6		0,03	0,15	0,75

Wordt een verandering in volumeprocenten vocht van 0,75 vol. % nog aanvaardbaar geacht, dan kan, doordat de huidige techniek het mogelijk maakt thermostatisch geregelde waterbaden tot op $0,001^{\circ}\text{C}$ constant te houden, uit tabel 4 worden afgeleid dat een dampspanningsbepaling aan de vereiste voorwaarden zal voldoen bij $pF \geq 2,9$.

Het instellen en handhaven van dampspanningen

Voor het realiseren van een bepaalde dampspanning wordt veelal gebruik gemaakt van:

- a. een mengsel van zwavelzuur of glycerine met water
- b. een niet-verzadigde oplossing van een vaste stof in water
- c. een verzadigde oplossing van een vaste stof in water

ad a. Het verband tussen de concentratie van een zwavelzuur - respectievelijk glycerine - watermengsel en de relatieve vochtigheid wordt weergegeven in figuur 9, waarvoor de gegevens zijn ontleend aan 'Commentaar op de Nederlandsche Pharmacopee' (SCHOORL, 1957). Het voordeel van het gebruik van deze mengsels is, dat de dampdruk slechts weinig afhankelijk is van de temperatuur en dat iedere willekeurige waterdampdruk er mee kan worden ingesteld. Zoals reeds werd opgemerkt, moet om de ingestelde dampdruk te handhaven een relatief grote hoeveelheid van het mengsel ten opzichte van het object, waarvan men het evenwichtsvochtgehalte wil weten, worden gebruikt, teneinde concentratie veranderingen door wateropname of -afgifte en de daarmee gepaard gaande dampdrukveranderingen zoveel mogelijk tegen te gaan,

Daar deze verandering vooral aan de oppervlakte optreedt, zal zo nu en dan moeten worden geroerd en zal zo nodig bij een lange evenwichtsinsteltijd het mengsel moeten worden vernieuwd.

Een verandering in concentratie van het zwavelzuur (glycerine) - watermengsel zal in het gedeelte van de curve, waar de helling het grootst is, ook de grootste verandering in relatieve vochtigheid veroorzaken. Uit de vorm van de curven blijkt, dat voor een zo goed mogelijk handhaven van hogere relatieve vochtigheden een glycerine-watermengsel de voorkeur verdient.

Teneinde een nauwkeuriger aflezing in het traject van de hoge rela-

tieve vochtigheden mogelijk te maken, is in de figuren 10 en 11 de ordinaat weer dubbel logaritmisch ingedeeld, waarbij tevens het verband tussen gewichtsprocenten zwavelzuur in een zwavelzuur-watermengsel en van glycerine in een glycerine-watermengsel met de respectievelijke bijbehorende soortelijke gewichten is aangegeven. Het gehalte van de mengsels is te controleren door bepaling van het soortelijk gewicht, door titratie (zwavelzuur-watermengsels) en door bepaling van de brekingsindex met een refractometer (glycerine-watermengsels).

ad b. Om dezelfde reden als hierboven genoemd zal om een concentratieverloop van de oplossing tegen te gaan, de hoeveelheid oplossing ten opzichte van de massa van het monster groot dienen te zijn. In tabel 6 staat de samenhang tussen de molaliteit van een NaCl-oplossing en de daarmee corresponderende relatieve vochtigheid en zuigspanning (cm water en pF) vermeld.

ad c. Indien in een verzadigde oplossing van bijvoorbeeld een zout steeds een deel als vaste stof en een deel als vloeistof aanwezig is, zal bij wateropname of -afgifte de concentratie zich door het in oplossing gaan van de vaste stof of door overgang van de vloeibare naar de vaste fase automatisch handhaven. Dit is een voordeel ten opzichte van zwavelzuur- of glycerine-watermengsels of van molaire zoutoplossingen.

Een nadeel ten opzichte van deze beide is echter, dat de dampdruk van verzadigde zoutoplossingen meer afhankelijk is van de temperatuur, omdat de oplosbaarheid van het zout daarmee samenhangt.

In het algemeen zal de concentratie van de verzadigde oplossing groter worden naarmate de temperatuur stijgt, waarmee een daling van de overeenkomstige dampdruk optreedt.

De dampspanning van een verzadigde oplossing zal des te hoger zijn naarmate de oplosbaarheid van de opgeloste stof kleiner is; tevens is de dampspanning hoger naarmate het moleculair gewicht groter is: de dampspanning van het zeer goed oplosbare saccharose is betrekkelijk hoog (85%), omdat het moleculair gewicht groot is (342).

Tabel 6. Verband tussen molaliteit* NaCl, relatieve vochtigheid, pF en zuigspanning in cm H₂O t = 25° C

m	H	pF	cm H ₂ O	m	H	pF	cm H ₂ O
0,01	99,9665	2,67	465	1,15	96,179	4,74	54 800
0,02	99,9329	2,97	934	1,20	96,010	4,76	57 100
0,03	99,8994	3,15	1 400	1,30	95,665	4,79	62 200
0,04	99,8658	3,27	1 880	1,40	95,320	4,83	67 300
0,05	99,8323	3,37	2 360	1,50	94,965	4,86	72 500
0,06	99,7988	3,45	2 830	1,60	94,610	4,89	77 800
0,07	99,7652	3,51	3 270	1,70	94,250	4,92	83 100
0,08	99,7317	3,57	3 760	1,80	93,890	4,95	88 500
0,09	99,6981	3,63	4 220	1,90	93,525	4,97	93 900
0,10	99,6646	3,67	4 720	2,00	93,160	5,00	99 400
0,15	99,5003	3,85	7 050	2,20	92,42	5,04	110 600
0,20	99,3360	3,97	9 360	2,40	91,66	5,09	122 200
0,25	99,1725	4,07	11 700	2,60	90,89	5,13	134 000
0,30	99,0090	4,14	14 000	2,80	90,11	5,16	146 200
0,35	98,8455	4,21	16 300	3,00	89,32	5,20	158 500
0,40	98,6820	4,27	18 600	3,20	88,51	5,23	171 300
0,45	98,5185	4,32	21 000	3,40	87,69	5,27	184 400
0,50	98,3550	4,36	23 100	3,60	86,86	5,30	197 700
0,55	98,1900	4,41	25 600	3,80	86,00	5,33	211 600
0,60	98,0250	4,45	28 000	4,00	85,15	5,35	225 500
0,65	97,8585	4,48	30 400	4,20	84,28	5,38	240 100
0,70	97,6920	4,52	32 800	4,40	83,39	5,41	254 900
0,75	97,5255	4,55	35 200	4,60	82,50	5,43	270 000
0,80	97,3590	4,57	37 500	4,80	81,60	5,46	285 400
0,85	97,1910	4,60	40 000	5,00	80,68	5,48	301 300
0,90	97,0230	4,63	42 400	5,20	79,76	5,50	317 400
0,95	96,8545	4,65	44 900	5,40	78,83	5,52	333 800
1,00	96,686	4,68	47 600	5,60	77,88	5,55	350 800
1,05	96,517	4,70	49 800	5,80	76,93	5,57	368 000
1,10	96,348	4,72	52 200	6,00	75,98	5,59	385 500

H ontleend aan Robinson and Stokes, 1955 - Electrolyte Solutions

pF berekend uit de formule: $pF = 6,5094 + 10 \log (2 - 10 \log H)$

cm H₂O berekend uit $pF = \log \text{ cm H}_2\text{O}$

Een gehele reeks dampspanningen is met verzadigde zoutoplossingen (of met vaste zouthydraten) te verwezenlijken. De gegevens in tabel 7 zijn ontleend aan LANGE, Handbook of Chemistry, 9e druk, 1956, pag. 1420 en volgende.

* Onder molaliteit wordt verstaan het aantal grammoleculen per 100 gram oplosmiddel. Voor verdunde waterige oplossingen is de molaliteit vrijwel gelijk aan de molariteit, waaronder het aantal grammoleculen per liter oplossing wordt verstaan. In tegenstelling tot de molariteit is de molaliteit onafhankelijk van de temperatuur.

Tabel 7. Relatieve vochtigheid van verzadigde zoutoplossingen bij temperaturen tussen 15° C en 30° C

Zout		t° C	Relatieve vochtigheid %
ZnCl ₂ ,	1½H ₂ O	20	10
LiCl,	H ₂ O	20	15
CaCl ₂ ,	6H ₂ O	24,5	31
CaCl ₂ ,	6H ₂ O	20	32,3
MgCl ₂ ,	6H ₂ O	25	33
CaCl ₂ ,	6H ₂ O	18,5	35
CaCl ₂ ,	6H ₂ O	10	38
KNO ₃		20	45
KCN		20	47
Ca(NO ₃) ₂ ,	4H ₂ O	24,5	51
Mg(NO ₃) ₂ ,	6H ₂ O	24,5	52
Na ₂ Cr ₂ O ₇ ,	2H ₂ O	20	52
Mg(NO ₃) ₂ ,	6H ₂ O	25	52,9
Ca(NO ₃) ₂ ,	4H ₂ O	18,5	56
NaBr,	2H ₂ O	25	57,7
NaBr,	2H ₂ O	20,3	57,9
NaBr,	2H ₂ O	20	66
NaNO ₂		20	66
NH ₄ Cl + KNO ₃		30	68,6
NH ₄ Cl + KNO ₃		25	71,2
NH ₄ Cl + KNO ₃		20	72,6
NaCl		30	74,9
NaCl		25	75,3
NaCl		20,7	75,7
NaCl		15,5	76,0
NH ₄ Cl		20	79,2
NH ₄ Cl		25	79,3
NH ₄ Cl		30	79,5
(NH ₄) ₂ SO ₄		20	81
(NH ₄) ₂ SO ₄		25	81,1
(NH ₄) ₂ SO ₄		30	81,1
KHSO ₄		20	86
BaCl ₂ ,	2H ₂ O	24,5	88
ZnSO ₄ ,	7H ₂ O	20	90
KNO ₃		25	92,5
Na ₂ SO ₄ ,	10H ₂ O	20	93
CaSO ₄ ,	5H ₂ O	20	98

Zoutoplossingen met een relatieve vochtigheid van 98% of meer (pF < 4,5) staan vermeld in tabel 8.

Tabel 8. Verzadigde zoutoplossingen met een hoge relatieve vochtigheid (volgens O'BRIEN, 1948)

	Temperatuur (° C)					
	10	15	20	25	100,1	100,3
K ₂ SO ₄	98,7 ^{f*} 98,2 ^{g*}	100 ^f	99,4 ^f 97,1 ^g	100		
Pb(NO ₃) ₂	99,0		98,0			
Na ₂ CO ₃ , 10H ₂ O	99,0					
CaHPO ₄ , 2H ₂ O		99,5				
KH ₂ PO ₄		99,4				
KClO ₃				98,0		
TlCl					99,7	
TlNO ₃						98,7

Het aantal zouten, dat als verzadigde oplossing een dampspanning heeft, welke overeenkomt met die van water, dat dusdanig in de grond is gebonden, dat het voor de plant beschikbaar is, namelijk met een lagere zuigspanning dan pF 4,2 (= hogere relatieve vochtigheid dan 98,85%), is dus zeer gering; daarbij komt, dat het gebruik van loodnitraat en thalliumchloride en -nitraat voor de bepaling van dampspanningsevenwichten vanwege hun giftigheid minder raadzaam is.

Een dampspanning, die nagenoeg overeenkomt met die van water in de grond bij het verwelkingspunt kan worden bereikt met een verzadigde oplossing van bariumnitraat (DAVIDSON-SCHOFIELD, 1942) of van ammoniumoxalaat (JANSE, 1959) bij 20° C.

Voor de bepaling van dampspanningsevenwichten in ruimten, waarin het niet mogelijk is de temperatuur binnen zeer strenge normen constant te houden, komen vooral die zouten in aanmerking, waarvan de oplosbaarheid weinig afhankelijk is van de temperatuur.

In tabel 9 wordt van enige van deze verzadigde oplossingen het verloop van de relatieve vochtigheid in het traject 10-30° C aangegeven.

* Voor verklaring van f en g zie onder tabel 9.

Tabel 9. Verzadigde zoutoplossingen met een vrijwel constante relatieve vochtigheid in het temperatuurtraject 15 tot 30° C

Verzadigde oplossing	Relatieve vochtigheid in procenten					Bronvermelding
	10°	15°	20°	25°	30°	
KNO ₃	95	95	95	95	94	e
				92,5		b
	96,7	96,2	93,0	93,0	91,5	f
	95,1		94,2		92,5	g
				95,0		h
				91,0		
				92,48		j
NH ₄ H ₂ PO ₄			93,1	93,0	92,9	c-d
C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	85	85	85	85	85	a-h
KCl			86	85	85	a
	88,0	86,7	86,5	84,5	84,6	f
	87,4		86,3		84,5	g
				89,0		h
				86,0		
			85,0 (20,2° C)		84,5 (30,3° C)	i
				84,26		j
(NH ₄) ₂ SO ₄			81	81,1	81,1	b-c-d
		79	79	80	80	a
	79,4	80	81,7	83,0	81,0	f
NH ₄ Cl			79	79	79	a
			79,5	79,3	77,5	c
			79,2	79,3	79,5	b-d
	79,2	80,0	80,0	77,0	78,2	f
				79,0		h
NaCl	74	74	74	75	75	a
				75,3	74,9	b
	76,3	77,5	78,3	76,5	75,9	f
	76,9		76,5	75,5	75,5	g
			75,8		75,1	h
				75,0		e
	76	76	75	75	75	e
		75,9 (15,5° C)	75,7 (20,7° C)		74,9 (30,2° C)	i
				75,28		j
MgNO ₃ · 6H ₂ O	53	53	53	52	52	e
			56 (18,5° C)			d
				52,9		b
				52,86		j
MgCl ₂ · 6H ₂ O	31	31	32	32	33	e
				33		b
			34,0	33,0		f
			33,1		31,7	g
				33,00		j

- a Commentaar op de Nederlandsche Pharmacopee 5e ed. deel I, 1927, pagina 31
- b Handbook of Chemistry 9e ed. 1956, pagina 1420 - LANGE e. a.
- c Handbook of Chemistry and Physics, 1954, pagina 2310 - HODGMAN e. a.
- d International Critical Tables 1927 - I, pagina 67
- e Smithsonian Meteorological Tables 6e ed. 1951, pagina 380
- f Handbuch biologischer Arbeitsmethoden Bd.10, 1933 - JANISCH
- g Monograph B-986, The Bell Telephone System
- h Pharmaceutisch Weekblad nr.76, 1939 - SCHOORL
- i Industrial and Engineering Chemistry Vol.41, 1949 - CARR and HARRIS
- j Industrial and Engineering Chemistry Vol.41, 1949 - STOKES and ROBINSON

Het Handbook of Chemistry heeft zijn gegevens voornamelijk ontleend aan de onder d, i en j genoemde publikaties, terwijl Smithsonian Meteorological Tables onder andere te rade is gegaan bij het uitgebreide overzicht van O'BRIEN.

Uit deze tabel blijkt, dat de uitkomsten van verschillende onderzoekers vaak niet gelijk zijn. De oorzaak hiervan kan zijn, dat een nauwkeurig instellen en handhaven van de gewenste relatieve vochtigheid en temperatuur niet eenvoudig is en/of dat het exact meten van luchtvochtigheid en temperatuur moeilijkheden heeft opgeleverd.

Methodiek voor de bepaling van het vochtgehalte bij een bepaalde dampspanning

a. De statische methode (of exsiccatormethode)

Hierbij wordt in een exsiccator het monster onder een bepaalde dampspanning gebracht, welke wordt bewerkstelligd door een zwavelzuur-watermengsel (BEUTELSPACHER, 1954; LEHANE en STAPLE, 1951; MITSCHERLICH, 1939; PURI e. a., 1925) of door een verzadigde zoutoplossing (BEUTELSPACHER, 1954 en DAVIDSON-SCHOFIELD, 1942).

De monsters worden elke dag of om de andere dag gewogen en wel zolang tot geen gewichtsvermeerdering of -vermindering meer optreedt.

Deze evenwichtsinstelling zal sneller gaan, naarmate de begin-dampspanning van het vocht in het monster dichter bij ligt bij de aangelegde dampspanning.

De evenwichtsinstelling tussen een grond en zijn omgeving verloopt sneller als men de lucht tussen deze beide wegzuigt. Zowel PURI e. a. als MITSCHERLICH en LEHANE en STAPLE evacueren dan ook de exsiccatoren; de eersten geven echter een tijdsduur van 3 à 5 dagen, de laatsten van 14 dagen aan voordat het evenwicht wordt bereikt.

De exsiccatoren worden door deze onderzoekers opgesteld in een donkere kelderruimte, waarin de temperatuurfluctuaties zo gering mogelijk zijn.

Een moeilijk punt is de overbrenging van het monster naar de balans, welke zo mogelijk in dezelfde ruimte moet staan om gewichtstoename of -afname van het monster door temperatuur- en vochtigheidsverschillen te vermijden.

Dit probleem kan worden omzeild door het monster in een Erlenmeijer of glazen cylinder aan een veerbalans te hangen (CRONEY e. a., 1952).

In een laboratoriumruimte, waar zo gering mogelijke schommelingen in temperatuur en luchtvochtigheid optreden, is het mogelijk in een dunne laag uitgespreide monsters in evenwicht te laten komen met de atmosferische luchtvochtigheid.

De monsters worden vooraf bevochtigd, zodat er een uitdrogingsproces plaatsvindt. Temperatuur en luchtvochtigheid worden continu geregistreerd door middel van een thermohygrograaf, terwijl eenmaal per dag een nauwkeurige luchtvochtigheidsbepaling wordt verricht met een psychrometer. Door weging wordt nagegaan of de monsters het vochtevenwicht hebben bereikt.

Op deze wijze wordt in het laboratorium van het Instituut voor Bodemvruchtbaarheid te Groningen en van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding te Wageningen een punt van de pF-curve bepaald, waarvan de pF-waarde in het algemeen varieert van 5,8 tot 6,1 (relatieve vochtigheid 60 tot 40%).

b. De dynamische of luchtstroommethode

Een luchtstroom wordt geleid over zwavelzuur of een zoutoplossing van bekende concentratie, waarna ze door buisjes gevuld met grond (THOMAS, 1921, 1924) wordt geblazen. Door weging en bepaling van het drooggewicht kan de hoeveelheid geadsorbeerd water aan het monster worden bepaald.

Ook kan het volume van de doorstromende lucht, waarvan temperatuur en vochtigheid bekend zijn, worden bepaald en kan deze lucht, na over het monster te zijn gestreken, worden opgevangen in een buisje met een absorberende materie (bijvoorbeeld P_2O_5), dat voor en na de proef wordt gewogen. Uit de gaswetten kan dan de hoeveelheid geadsorbeerd of afgestaan water van het monster worden berekend (ALEXANDER-HARING, 1936).

De statische methode is minder bewerkelijk dan de dynamische methode, terwijl bij de eerste methode met kleinere monsters en gemakkelijker met een groot aantal monsters tegelijk kan worden gewerkt.

Beide methoden geven overeenkomstige uitkomsten (PURI e. a., 1925; THOMAS, 1921, 1924) (figuur 7).

De bepaling van de heersende dampspanning van het bodemvocht

In principe kunnen hiervoor de bovengenoemde methoden a en b worden gebruikt. Door een grondmonster in aanraking te brengen met een reeks media met bekende dampspanning kan uit de gewichtstoename of -afname van het monster de dampspanning bij gewichtsverandering = 0 worden bepaald.

BARGER (1904) heeft een methodiek ontwikkeld om de concentratie van plantensappen te bepalen. Daartoe vulde hij capillair buisjes met achtereenvolgens een druppel sucrose-oplossing van een bepaalde concentratie en een druppel van het te onderzoeken sap en wel zodanig dat de volgorde in het capillair werd: sap-lucht-sucrose enz; het capillair werd daarna dichtgesmolten. Door middel van een binoculair microscoop en een micrometer werd de lengteverandering van de druppel sap gemeten; bij een lengteverandering = 0 is de concentratie van het sap isotonisch met de concentratie van de betreffende sucrosedruppel.

De lucht tussen de druppels in het capillair fungeert als semi-permeabel membraan voor de diffusie van waterdamp, waarbij geen waterverplaatsing langs de wand van het capillair mag optreden. Deze laatste eis maakt deze methode moeilijk hanteerbaar.

In 1930 plaatsten URSPRUNG en BLUM capillairen, welke aan één zijde open waren, onder het dekglas van een vochtdoosje, waarin zich het te onderzoeken sap bevond. In de capillairen kon een standaardoplossing van bekende sterkte worden aangebracht; verdere meting geschiedde als door BARGER.

In het voormalige Landbouwproefstation te Groningen is deze methode wel toegepast om de dampspanning van het water in grondmonsters te bepalen. Vooral de tijd, die het preparatieve werk voor de uitvoering van deze bepaling in beslag nam, is er echter oorzaak van geweest, dat de methode URSPRUNG-BLUM niet in aanmerking is gekomen voor toepassing op meer uitgebreide schaal (PEERLKAMP, 1959).

In het laboratorium van het Rothamsted Experimental Station werd in 1942 door DAVIDSON en SCHOFIELD een dampspanningsbepaling (voor dampspanningen in de buurt van verzadiging) ontwikkeld met behulp van tabaksblikjes (10,8 cm doorsnede, 2,5 cm hoogte), welke door middel van een deksel luchtdicht konden worden afgesloten. Onder de deksel werden watten aangebracht, gedrenkt in een keukenzoutoplossing van bekende sterkte.

Van een blikje met watten (zonder grond) en een blikje grond (zonder watten) werd het gewicht bepaald. Na verwisseling van de deksels werden de blikjes nogmaals gewogen en gedurende 24 uur in een ruimte met vrijwel constante temperatuur (17°C) geplaatst. Hierna werden de blikjes gewogen, de deksels werden weer verwisseld, zodat de begintoestand weer ontstond en tenslotte werd nog eens gewogen. Indien geen verdamping is opgetreden bij het snel verwisselen van de deksels, dan moet de gewichtstoename van het ene blikje gelijk zijn aan de gewichtsafname van het andere blikje. De in de praktijk gevonden fout van ± 10 mgr verschil kon door middelen worden geëlimineerd. Door in deze opzet de concentraties van de zoutoplossing zo te kiezen, dat van het grondmonster zowel de toe- als afname in gewicht kon worden bepaald, kon ook hier, daar de tijdsduur (24 uur) en de afstand tussen grond en watten (1,5 cm) steeds gelijk waren, worden geïnterpoleerd naar gewichtsverandering = 0.

De met de 'tabaksblikjesmethode' in Rothamsted verkregen uitkomsten gaven voor een $pF = 3$ (relatieve dampdruk 99,9% bij $25^{\circ} C$) een goede overeenkomst met de vochtcijfers verkregen met een afzuigwaarde van 1 atmosfeer. Voor hogere pF -waarden was er een goede overeenkomst tussen de tabaksblikmethode en de bepaling door meting van de vriespuntsdaling.

Bij een herhaling van deze proef een aantal jaren later konden deze gunstige resultaten niet worden bevestigd (MONTEITH, 1958), zodat de waarde van deze methode nog problematisch is.

Het hysteresiseffect

Onder hysteresis wordt verstaan het verschijnsel dat een poreus medium, waarin het water in evenwicht is met een bepaalde zuigspanning of dampspanning, een lager vochtgehalte heeft, wanneer het medium de evenwichtstoestand bereikt tijdens het adsorptieproces (droog $\rightarrow$ nat) dan tijdens het desorptieproces (nat $\rightarrow$ droog). Het hysteresiseffect treedt sterker op bij slib- en humusrijke gronden dan bij lichtere gronden.

Zowel THOMAS als PURI (zie figuur 12) konden bij de door hen gebruikte dampspanningsmethodieken bij kleigronden een hysteresiseffect aantonen.

Uiterst doelmatig kan de hysteresis worden bepaald door twee of meerdere monsters in dezelfde ruimten boven een zoutoplossing of een zwavelzuur- of glycerine-watermengsel van bepaalde concentratie te hangen, waarbij het ene monster het evenwichtsvochtgehalte vanaf de droge kant en het andere dit vanaf de natte kant nadert.

Vooraf indien de aanvangsvochtgehalten van de monsters zo worden gekozen dat het ene monster ongeveer evenveel water opneemt als het andere afstaat, heeft deze methode het voordeel dat de concentratie van de oplossing of van het mengsel nagenoeg dezelfde blijft.

In figuur 13 is aangegeven hoe groot het hysteresiseffect van een lössgrond bij $pF 5,0$ is. Wel wordt door de zoutoplossing ($Na_2SO_4, 10H_2O$) aanzienlijk meer water van het natte monster opgenomen dan aan het droge monster wordt afgestaan, doch aangezien het hier een verzadigde oplossing betreft, waarin zowel de vaste als de vloeibare fase zijn vertegenwoordigd, heeft dit geen invloed op de concentratie ervan.

Door het beginvochtgehalte van beide monsters dicht bij de eindwaarde te kiezen, zal de insteltijd kunnen worden verkort.

De invloed van colloïden en kationen op de wateradsorptie van gronden

Hoewel ROBINSON (1922) concludeerde, dat de adsorptie van water aan een groot aantal bodemcolloïden boven zwavelzuur van 3,3% (relatieve vochtigheid 99,8%) voor bijna alle colloïden gelijk was, toonden ANDERSON en MATTSON in 1926 aan, dat de geadsorbeerde hoeveelheid bij lagere relatieve vochtigheden (74,9%) sterk afhankelijk was van de aard van het colloïd. BAVER (1956) toonde later ook aan, dat de montmorillonietcolloïden een grotere adsorptie-activiteit vertoonden dan de laterietcolloïden, terwijl organische colloïden een zeer grote activiteit bleken te bezitten.

Dat een toename van het kleigehalte de hoeveelheid geadsorbeerd water bij eenzelfde dampspanning deed stijgen, kon door THOMAS, PURI e.a. en BAVER worden aangetoond, waarbij de eerste echter slechts een geringe invloed van het organische stofgehalte op de helling van de dampspanning-vochtgehalte curve constateerde.

Een bepaalde hypothese voor de adsorptie is beschreven door WADSWORTH (1944). Hij onderscheidde de zogenaamde chemo-adsorptie, waarbij het water onder andere wordt gebonden door oppervlakte-adsorptie, door hydratatie van ionen op actieve oppervlakken en door adsorptie aan organische bestanddelen en de zogenaamde capillaire condensatie, waarbij het water condenseert in de fijne poriën van het materiaal.

Zolang alleen chemo-adsorptie optreedt, bestaat het rechtlijnige verband $\log \frac{x_1}{p} = K_1 - K_2 x_1$, waarin x_1 = gram vocht gebonden door chemo-adsorptie aan 1 gram materiaal, p = evenwichtsdampspanning, K_1 en K_2 zijn constanten. Empirisch werd nu de dampspannings-vochtgehalte curve bij nauwkeurige temperatuurregeling ($0,01^\circ \text{C}$) bepaald, waarin zowel x_1 als x_2 (adsorptie door condensatie) tot uiting kwam. Na aftrek van de hypothetische chemo-adsorptie (x_1) kon de capillaire condensatiecurve worden geconstrueerd.

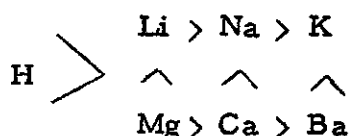
De aard van de kationenbezetting van een bodemcomplex is van invloed op de waterdampadsorptie.

THOMAS kon aantonen, dat een met H^+ en Ca^{++} verzadigde grond bij lage dampspanningen meer water adsorbeert dan een met K^+ , Na^+ of NH_4^+ verzadigde grond, terwijl bij hoge dampspanningen de met Na-ionen verzadigde grond het meeste water adsorbeert, wat onder andere zou kunnen worden verklaard door een grotere dispersie en zwelling van deze gronden bij hoge vochtgehalten. KURON (1932) bevestigde deze zienswijze: bij hoge relatieve vochtigheden adsorbeert een met Na-ionen bezette grond het sterkst, terwijl bij lage dampspanningen de volgorde wat betreft de adsorptie is: $H > Mg > Ba > Ca > Na > K$. De gehydrateerde Na-kleien zouden een te groot aantal poriën bevatten, die te klein zijn voor het binnendringen van de watermoleculen, terwijl een Ca-klei een meer open structuur vertoont.

Bovengenoemde opvattingen worden gesteund door BAVER (1956): de hygroscopiciteit neemt bij 99,8% relatieve vochtigheid toe in de volgorde $Li > Na > Ba > Ca > K$, terwijl deze volgorde bij 74,9% relatieve vochtigheid als volgt is: $H > Ca > Li > Na > Ba > K$.

Opgemerkt wordt, dat op basis van zuivere hydratatie moeilijk te verklaren is, waarom de bivalente Ca- en Mg-kleien meer water bevatten dan de Li- en Na-kleien. Volgens een verklaring van JENNY (1932) zou voor een bepaald kristalrooster het aantal watermoleculen dat in de holten kan worden vastgehouden afhangen van aantal en grootte van de uitwisselbare ionen. Hoe kleiner deze beide laatste zijn in grootte en aantal, hoe meer watermoleculen kunnen worden geadsorbeerd.

Het volgende schema van wateradsorptie aan kleien zou dan gelden:



H-kleien vertonen dus de grootste wateradsorptie. Het Mg- en het Li-ion hebben wel dezelfde grootte, maar Mg-systemen kunnen meer water adsorberen dan Li-systemen, omdat in de eerste slechts het halve aantal ionen aanwezig is vanwege de dubbele lading. Vandaar ook $Ca > Na$ en $Ba > K$.

Gedeeltelijk in tegenstelling hiermede meldt BEUTELSPACHER (1954) dat het bij toepassing van de hygroscopiciteitsbepaling volgens MITSCHERLICH (relatieve vochtigheid 94,1%) geen verschil maakt of het bodemcom-

plex met H-, Mg- of Ca-ionen bezet is, terwijl ook de verschillen ten aanzien van een bezetting met twee- of éénwaardige kationen klein zijn.

De relatieve verschillen nemen toe met afnemende dampspanning; bij de éénwaardige ionen meer dan bij de tweewaardige.

Volgens ORCHISTON (1954) en BAYER (1956) neemt de hygroscopiciteit toe met de totale uitwisselingscapaciteit van de bodemcolloïden, waarbij de eerste nog een hoge correlatie aantoonde tussen de hygroscopiciteit en de totale hoeveelheid voor de plant beschikbaar water welke in een grond kan worden opgeslagen; de bepaling van de waterdampadsorptie zou een betrouwbaarder basis zijn voor de textuurbepaling van een grond dan een mechanische analyse.

Ook BEUTELSPACHER (1954) kon een nauwe correlatie van de hygroscopiciteit met de totale adsorptiecapaciteit (T-waarde) vaststellen.

Het meten van de heersende dampspanning

De meest gebruikelijke methode is die met de psychrometer, waarbij uit het verschil tussen natte en droge bol thermometer de relatieve vochtigheid kan worden bepaald.

Wordt met een hermetisch gesloten vat gewerkt, dan kan met een kwikmanometer de dampspanning worden gemeten. Aanzienlijk nauwkeuriger kan dit geschieden door als vloeistof in de manometer bijvoorbeeld een lichte olie te gebruiken; worden de aflezingen van de manometer dan nog verricht door middel van een cathetometer, dan kunnen dampdrukveranderingen overeenkomend met 0,01 à 0,02 mm kwik worden afgelezen (WADSWORTH, 1944).

Eenzelfde nauwkeurige registratie van de dampspanning is door EDLEFSEN (1934) ontwikkeld. Over een luchtdroog monster in vacuum wordt luchtvrije waterdamp geleid, welke op de grond condenseert; de damp wordt dan geleidelijk weggepompt en de evenwichtsinstellingswaarden worden gemeten met een weerstandsbrug.

ORCHISTON (1953, 1954) bepaalde de geadsorbeerde hoeveelheid water aan droge grond volgens de methode ROBINSON-SINCLAIR, waarbij naast een geconcentreerde zoutoplossing om een bepaalde dampspanning te bewerkstelligen een schaalte met een zwavelzuur-watarmengsel werd gebruikt, teneinde de dampspanningsveranderingen, waarbij dit mengsel in samenstelling verandert, door middel van titratie met een standaardloog

te kunnen meten.

Door Philips is een apparaat ontwikkeld, waarbij evenwichts-dampspanningen kunnen worden gemeten in een thermostaatje, waarin zich een lithiumchloride-cel bevindt, welke door elektrische verhitting een dusdanige temperatuur verkrijgt, dat de verzadigde dampspanning van LiCl in evenwicht is met de dampspanning van de omgeving (i. c. van het monster). Deze methode, welke in de voedingsindustrie onder andere is toegepast om de dampspanningsgrenswaarde voor de ontwikkeling van bacteriën in bepaalde voedingsmiddelen te leren kennen (MOSSEL-VAN KUYK, 1955) zou wellicht bruikbaar kunnen zijn voor het meten van dampspanningsevenwichten aan grondmonsters, voor zover het althans pF-waarden groter dan 4,5 betreft.

De bovengenoemde metingen zijn niet geschikt voor het bepalen van hoge relatieve vochtigheden, die sterk variëren met geringe temperatuurf fluctuaties. SPANNER (1951) ontwikkelde een nieuwe meettechniek, waarbij hij gebruik maakte van een thermokoppel, bestaande uit de metalen bismuth en bismuth met 5% tin. In het algemeen ontstaat bij contact tussen twee verschillende metalen een elektromotorische kracht als tussen beide metalen een verschil in temperatuur optreedt. PELTIER ontdekte nu in 1834, dat indien een stroomstoot door een dergelijke verbinding wordt geleid er, al naar gelang de stroomrichting, een temperatuurstijging of -daling optreedt. Treedt nu een daling van de temperatuur op tot onder het dauwpunt van de atmosfeer, waarin wordt gemeten, dan zal condensatie van waterdamp optreden en zal het thermokoppel fungeren als een natte bol thermometer. Wordt nu de stroom verbroken, dan zal het water weer verdampen en een zeer geringe elektromotorische kracht zal ontstaan, welke evenredig is met het verschil tussen droge bol-temperatuur (droog thermokoppel) en natte bol-temperatuur (nat thermokoppel) en dus met de relatieve vochtigheid. Door nu het thermokoppel te verbinden met een zeer gevoelige galvanometer, kunnen temperatuurverschillen van circa $0,0004^{\circ}\text{C}$ worden gemeten. Thermokoppel en galvanometeruitslag kunnen worden geijkt door metingen in een gesloten ruimte, waarin zoutoplossingen (KCl of NaCl) van verschillende bekende osmotische waarden worden gebracht; alle metingen dienen te worden uitgevoerd door dompeling van het te meten object in een waterthermostaat met een uiterst kleine temperatuurf fluctuatie ($0,001^{\circ}\text{C}$).

Vrijwel gelijktijdig verschenen in 1958 publikaties over metingen van

hoge relatieve vochtigheden, welke werden uitgevoerd in het Rothamsted Experimental Station (MONTEITH, OWEN) waarbij gebruik werd gemaakt van het Peltiereffect, en in het U. S. Salinity Laboratory te Riverside (RICHARDS en OGATA), waarbij de natte bol werd gecreëerd door onderdompeling van de thermokoppellamp in water.

MONTEITH en OWEN baseerden zich op de door SPANNER uitgewerkte methode, waarbij nu gebruik werd gemaakt van een chroom-constantaan thermokoppel. Een stroom van 30 mA wordt gedurende 1 minuut door het thermokoppel geleid, waarna dit wordt verbonden met een galvanometer en de 'natte bol'-temperatuur na 60 seconden wordt afgelezen. De temperatuurdaling van de natte bol is maximaal na 1 minuut voor relatieve vochtigheden van 97-100% en blijft gedurende 10 seconden constant. In dit traject kunnen veranderingen in relatieve vochtigheid worden gemeten van 0,01%. Bij 96-95% relatieve vochtigheid treedt direct na het bereiken van de maximale temperatuurdepressie een zeer snelle afname daarvan op door snelle verdamping van het water om de natte bol, hetgeen het nauwkeurig aflezen van de maximale galvanometeruitslag bemoeilijkt. Bij nog lagere relatieve vochtigheden wordt de maximale temperatuurdepressie niet bereikt en is deze methode dus niet bruikbaar.

Bij relatieve vochtigheden vlak tegen het verzadigingspunt aan kan een uiterst kleine temperatuurdaling door invloeden van de omgeving in de orde van duizendsten van graden al condensatie veroorzaken binnen de ruimte, waarin het te meten object zich bevindt, zodat de temperatuurdaling van de natte bol tot foutieve conclusies aanleiding zou geven.

In verband met de bovenstaande beperkingen wordt deze methode dan ook bruikbaar geacht in het relatieve vochtigheidstraject van 95-99,98%, dat wil zeggen in het pF-traject van circa 4,8-2,5.

Zowel door KORVEN en TAYLOR (1958) als door EERKENS (1964) zijn dampspanningsmetingen door middel van het Peltiereffect met succes toegepast, waarbij de eersten gebruik maakten van een galvanometer en de laatste van een zelfregistrerende micro-voltmeter.

De voornaamste moeilijkheden werden ondervonden bij het lassen van de uiterst dunne thermokoppeldraden en ten aanzien van het elimineren van netspanningsschommelingen en optredende inductiepotentialen.

Nabeschouwing

Tal van factoren oefenen invloed uit op de hoeveelheid geadsorbeerd water aan grond bij verschillende dampspanningen. Het uitgangsvochtgehalte van de monsters, de ionenbezetting, de aangewende techniek met de daarbij optredende al of niet toelaatbare temperatuurschommelingen zijn veelal bij de proeven, door diverse onderzoekers genomen, verschillend geweest, zodat geen gelijkwaardige resultaten werden verkregen.

De uitkomsten van de 'oude' bepaling van de hygroscopiciteitscoëfficiënt in een met waterdamp verzadigde atmosfeer boven vrij water (relatieve vochtigheid > 99%) zijn onbetrouwbaar, omdat aan de strenge eisen, gesteld aan het handhaven van een zo volledig mogelijke verzadiging en van een uiterst constante temperatuur en aan de nauwkeurige meting van deze grootheden niet kon worden voldaan.

Betere uitkomsten werden verkregen met monsters boven een zwavelzuur-watermengsel (Duitsland 10% H_2SO_4 , Engeland 47% H_2SO_4 , U. S. A. 3,3% en 30% H_2SO_4 , respectievelijk overeenkomende met circa 94%, 50%, 99,8% en 75% relatieve vochtigheid). Het bezwaar van de door de lange evenwichtsinsteltijd noodzakelijke vernieuwing van het mengsel om de juiste zwavelzuurconcentratie te handhaven kan worden voorkomen door boven het mengsel monsters, waarvan de dampspanning zowel groter als ongeveer evenveel kleiner is dan de dampspanning van het mengsel zelf, daarmede in evenwicht te laten komen. Deze werkwijze leent zich ook in het bijzonder voor de bepaling van het hysteresiseffect, hetgeen met andere methodieken veel moeilijker valt te verwezenlijken.

Het bovenstaande geldt ook bij het gebruik van verzadigde zoutoplossingen, die boven zwavelzuur het voordeel hebben, dat ze gemakkelijker hanteerbaar zijn en waarbij een constante concentratie (dampspanning) is gewaarborgd, zolang de vaste fase naast de vloeibare fase aanwezig is en aan de vereiste temperatuurcondities is voldaan.

Uit onderzoek naar de invloed van temperatuurschommelingen op de betrouwbaarheid van dampspanningsevenwichtsbepalingen dat werd verricht op het wegebouwlaboratorium in Engeland, kwam naar voren dat in het pF-traject van 4,5 tot 5,0 werken in een kamer met constante temperatuur was vereist, terwijl voor pF-waarden kleiner dan 4,5 strenge temperatuurcondities (circa $0,01^{\circ}C$) golden.

Het zijn voornamelijk de optredende temperatuurgradienten tussen de vloeistof, die een bepaalde dampspanning bewerkstelligt en het daarboven hangende monster, die bij lager wordende pF-waarden een steeds stringenter temperatuurconstantheid vereisen.

In het voor de plant belangrijke traject tussen pF 2,0 ($\approx$ veldcapaciteit) en pF 4,2 ($\approx$ verwelkingspunt) worden dus juist zeer hoge eisen gesteld aan de constantheid van de temperatuur, waarbij zowel aan de handhaving als de meting ervan speciale eisen worden gesteld. Dit moge nog blijken uit een citaat van RICHARDS en WADLEIGH in Soil Physical Conditions and Plant Growth (SHAW: Vol. II of Agronomy 1952, pag. 93):

'Unfortunately, also, vapor pressure measurement in the range of soil moisture that plant can grow in, cannot yet be made with acceptable ease and precision. The vapor pressure range, that is of interest in this case extends only from about 98 till 100% relative humidity'.

Het recente onderzoek van MONTEITH en OWEN alsmede van RICHARDS en OGATA heeft echter nieuwe perspectieven geopend voor het meten van dampspanningsevenwichten bij hoge relatieve vochtigheden. Zij maken gebruik van een door SPANNER ontwikkelde methode, waarbij het zogenaamde Peltiereffect water doet condenseren op een thermokoppel, dat in een ruimte hangt, waarvan de relatieve dampdruk moet worden gemeten en dat fungeert als 'natte bol' van een psychrometer.

Door koppeling van deze natte bol aan een gevoelige galvanometer of aan een micro-voltmeter (EERKENS) is het mogelijk een temperatuurdaling van circa $0,001^{\circ}$ C te meten, waarbij de uitslag van de galvanometer of micro-voltmeter kan worden gecalibreerd door het Peltiereffect te meten boven KCl- of NaCl-oplossingen van bekende sterkte.

Aangezien de moderne techniek in staat stelt waterthermostaten door middel van bijvoorbeeld een tolueen-kwik temperatuurregulator, die door middel van een thyatron-elektronisch relais een verwarmingselement van laag vermogen (bijvoorbeeld 50 Watt) regelt, op $0,001^{\circ}$ C constant te houden (waarbij uiteraard een goede isolatie essentieel is, wat onder meer kan worden bereikt door toepassing van een 'dubbel' bad), is het nu mogelijk dampspanningsevenwichtsbepalingen te verrichten in althans een gedeelte van het voor de plant belangrijke traject van hoge relatieve dampdrukken.

Uit de verandering van pF-eenheden per temperatuureenheid (figuur 6) kan bij aanname van een realiseerbare constantheid van temperatuur en een nog toelaatbare verandering in dampspanning (pF) de minimum pF-waarde waarvoor deze voorwaarden opgaan, worden berekend (tabel 4).

De dampspanningsmethode, waarbij dus de totale potentiaal (vocht-potentiaal en osmotische potentiaal) van het water in een monster wordt gemeten, leent zich zeer goed voor de bepaling van het hysteresiseffect.

De geadsorbeerde hoeveelheid water aan een grond bij een bepaalde relatieve vochtigheid is sterk gecorreleerd met het actieve oppervlak van de fijne bodemfracties.

Omtrent de invloed van de ionenbezetting van het bodemcomplex zijn de onderzoeksresultaten niet gelijklopend.

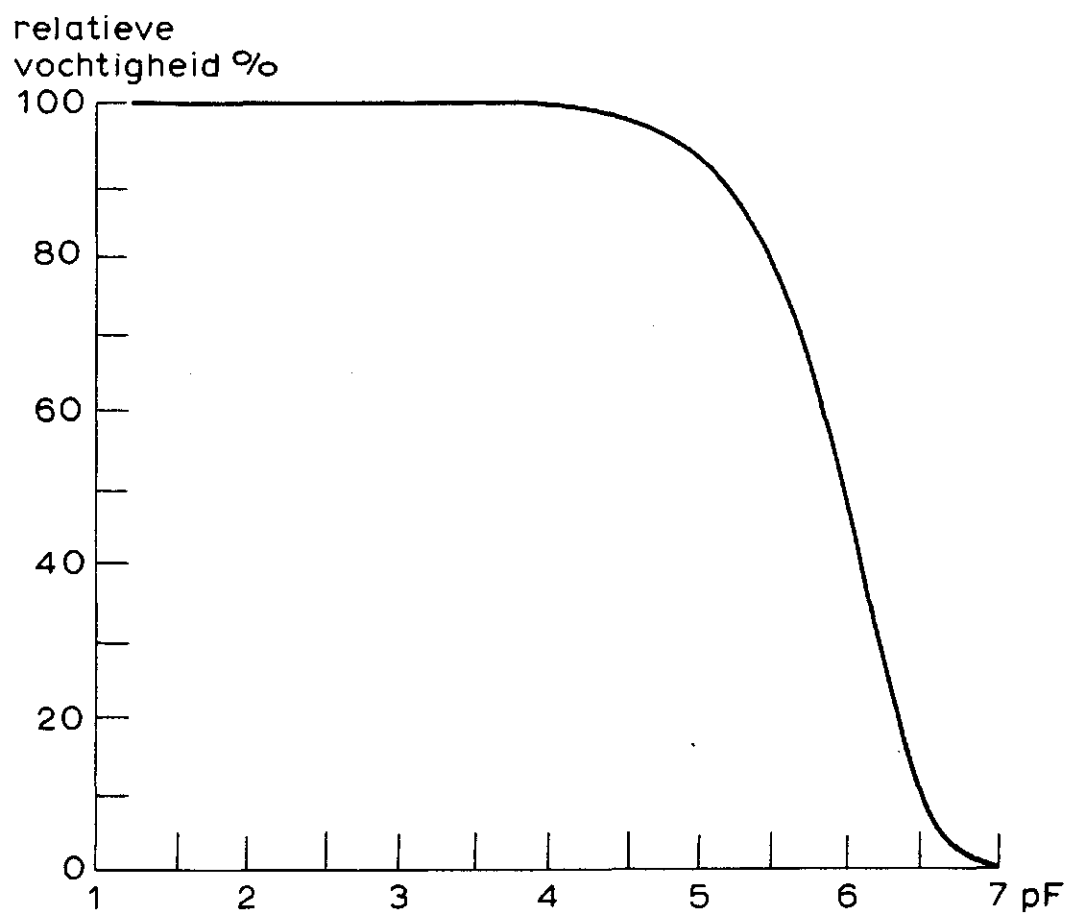
Literatuur

- ALEXANDER, L. T. en M. M. HARING, 1936 - Vapor pressure content relations for certain typical soil colloids. J. Phys. Chem. Vol. 40: 195-206.
- ALWAY, F. J. en V. L. CLARKE, 1916 - Use of two indirect methods for the determination of the hygroscopic coefficient of soils. J. Agr. Res. Vol. 7: 345-360.
- en M. A. KLINE en G. R. McDOLLE, 1917 - Some notes on the direct determination of the hygroscopic coefficient. J. Agr. Res. Vol. 11: 147-166.
- ANDERSON, M. S. en S. MATTSON, 1926 - Properties of soil colloidal material. U. S. Dep. Agr. Bull. 1452.
- BARGER, G., 1904 - A microscopical method of determining molecular weights. J. Chem. Soc. 85: 286-324.
- , 1924 - Eine mikroskopische Methode zur Bestimmung des Molekulargewichtes. E. Abderhalden, Handbuch d. Biolog. Arb. Meth., Abt. III, Teil aI, Heft 4: 729.
- BAVER, L. D., 1956 - Soil Physics 3rd Ed. pp. 34-47, p. 283.
- en H. WINTERKORN, 1935 - Sorption of liquids by soil colloids II - Surface behavior in the hydration of clays. Soil Science Vol. 40: 403-419.
- BEUTELSPACHER, H., 1954 - Ueber die Wasserdampfadsorption an Bodenkolloiden und ihre Beziehung zu der Hygroskapazität nach Mitscherlich. Zeitschr. f. Acker u. Pflanzenbau Bd. 98: 187-210.
- CRONEY, D., J. D. COLEMAN en P. M. BRIDGE, 1952 - The suction of moisture held in soil and other porous materials. Road Res. Techn. Paper 24.
- DAVIDSON, Ph. D. en R. K. SCHOFIELD, 1942 - Measurement of the suction of soil water by Portland stone adsorbers, calibrated by a new method for determining vapor pressure near to saturation. J. Agr. Sci. Vol. 32: 413-427.
- EDLEFSEN, N. E., 1934 - A new method of measuring the aqueous vapor pressure of soils. Soil Sci. Vol. 38: 29-35.

- EERKENS, C., 1964 - Een apparaat om met gebruik van het Peltiereffect hoge relatieve vochtigheden te meten. Nota no. 234 - Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding.
- JANSE, A.R.P., 1959 - Practicumvoorschrift Landbouwscheikunde.
- JENNY, H., 1932 - Studies on the mechanism of ionic exchange in colloidal aluminium silicates. J. Phys. Chem. Vol. 36: 2217-2258.
- KEEN, B.A., 1920 - The relations existing between the soil and its water-content, J. Agr. Sci. Vol. 10: 56-59.
- en J.R.H. COUTTS, 1928 - Single value soil properties: a study of the significance of certain soil constants. J. Agr. Sci. Vol. XVIII: 740-765.
- KORVEN, H.C. en S.A. TAYLOR, 1959 - The Peltier-effect and its use for determining relative activity of soil water. Can. J. Soil Sci. Vol. 39: 76-85.
- KURON, H., 1932 - Adsorption von Dämpfen und Gasen an Böden und Tonen und ihre Verwendung zur Oberflächenermittlung dieser Stoffe. Kolloidchem. Beihefte Bd. 36: 178-256.
- LEHANE, J.J. en W.J. STAPLE, 1951 - Desiccator method for determining wilting percentages of soils. Soil Sci. Vol. 72: 429-435.
- LIPMAN, C.B. en L.T. SHARP, 1911 - A contribution to the subject of the hygroscopic moisture of soils. J. Phys. Chem. Vol. 15-8: 709-722.
- MITSCHERLICH, E.A., 1950 - Bodenkunde für Landwirte, Forstwirte und Gärtner, 6 dr.: pag. 32 e.v., 76 e.v.
- , 1939 - Weitere physikalische Bodeneigenschaften in ihrer Beziehung zu den Pflanzenerträgen. Transactions of the IVth Commission of the I. S. S. S. Stockholm: 42-50.
- MONTEITH, J.L., 1958 - Persoonlijke mededeling.
- en P.C. OWEN, 1958 - A thermocouple method for measuring relative humidity in the range 95-100%, J. Sci. Instr. Vol. 35: 443-446.
- MOSSEL, D.A.A. en H.J.L. VAN KUYK, 1955 - A new simple technique for the direct determination of the equilibrium relative humidity. Food Research Vol. 20-5: 415-423.
- O'BRIEN, F.E.M., 1948 - The control of humidity by saturated salt solutions. J. Sci. Instr. Vol. 25: 73-76.

- ORCHISTON, H. D., 1953, 1954 - Adsorption of water vapor I. Soils at 25° C. Soil Sci. 76: 453-465. Clays at 25° C. Soil Sci. 78: 463-480.
- PEERLKAMP, P. K., 1959 - Persoonlijke mededeling.
- PHILIPS NEDERLAND N. V., 1957 - Het meten van de relatieve evenwichtsvochtigheid. Philips voor de Industrie 2e jg. no. 2.
- PURI, A. N., 1925 - A critical study of the hygroscopic coefficient of the soil. J. Agr. Sci. 15: 272-283.
- , 1949 - Soils, their Physics and Chemistry.
- , E. M. GROWTHER en B. A. KEEN, 1925 - The relation between the vapor pressure and watercontent of soil, J. Agr. Sci. Vol. 15: 68-88.
- RICHARDS, L. A. en G. OGATA, 1958 - Thermocouple for vapour pressure measurement in biological and soil systems at high humidity. Science, Vol. 128-1331: 1089-1090.
- ROBINSON, W. O., 1922 - The adsorption of water by soil colloids. J. Phys. Chem. Vol. 26: 647-653.
- SCHOORL, N., 1957 - De invloed van lucht en vochtigheid op de geneesmiddelen. Commentaar op de Nederlandsche Pharmacopee, deel I - Algemeen gedeelte: 23-47.
- SPANNER, D. C., 1951 - The Peltier-effect and its use in the measurement of suction pressure. J. Exp. Bot. Vol. II-5: 145-168.
- THOMAS, M. D., 1921, 1924 - Aqueous vapor pressure of soils. Soil Sci. Vol. 11: 409-434. Soil Sci. Vol. 17: 1-18.
- URSPRUNG, A. en G. BLUM, 1930 - Zwei neue Saugkraft Messmethoden. Jhrb. Wiss. f. Bot. 72: 254-334.
- WADSWORTH, H. A., 1944 - An interpretation of the moisture content surface force curve for soils. Soil Sci. Vol. 58: 425-443.

VERBAND pF_REL. VOCHTIGHEID BIJ 20° C
(NAAR CRONEY e.a. 1952)



$-\log(-\log \frac{H}{100})$ Verband tussen pF en relatieve luchtvochtigheid

fig. 2

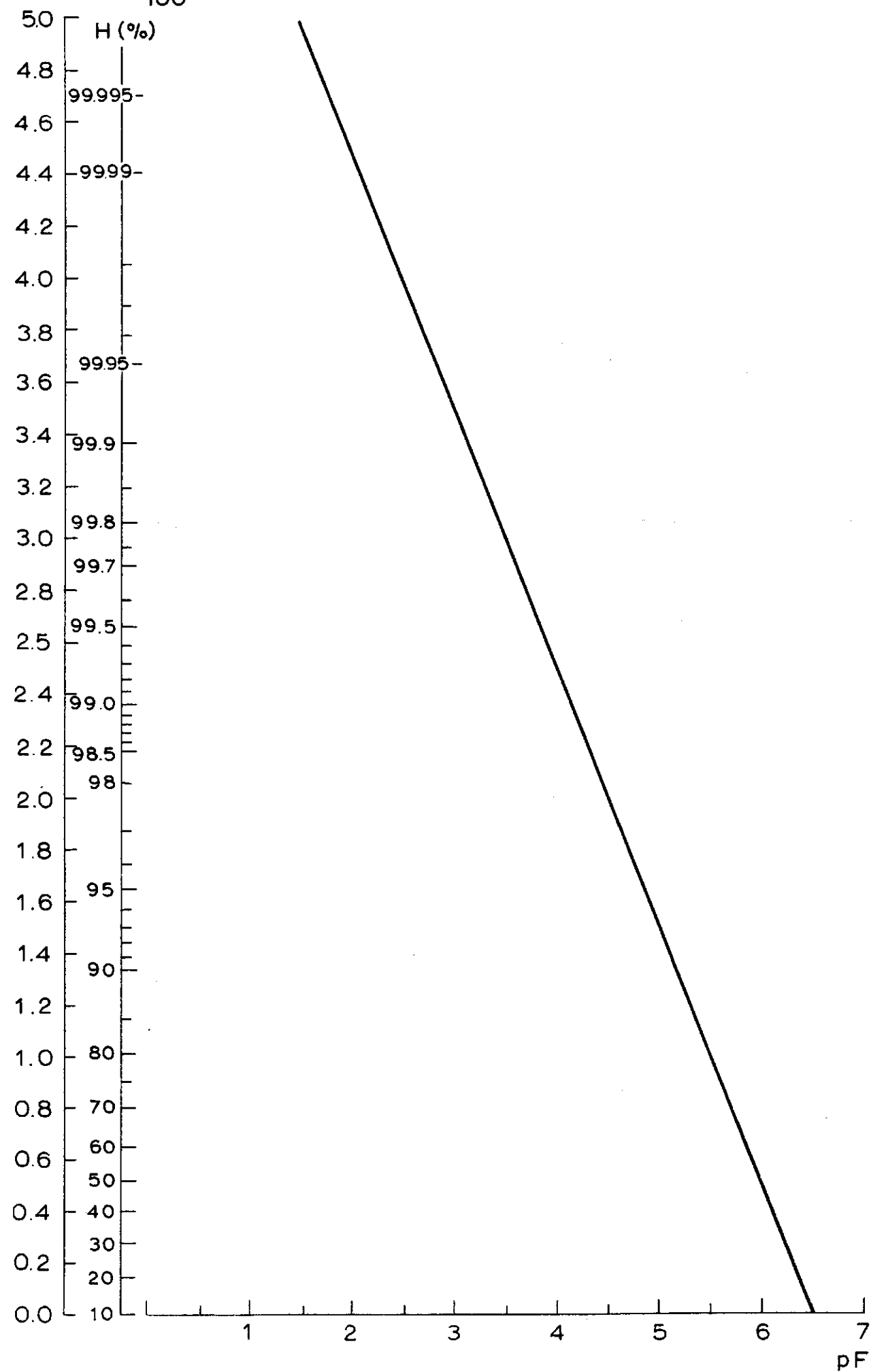


fig. 3

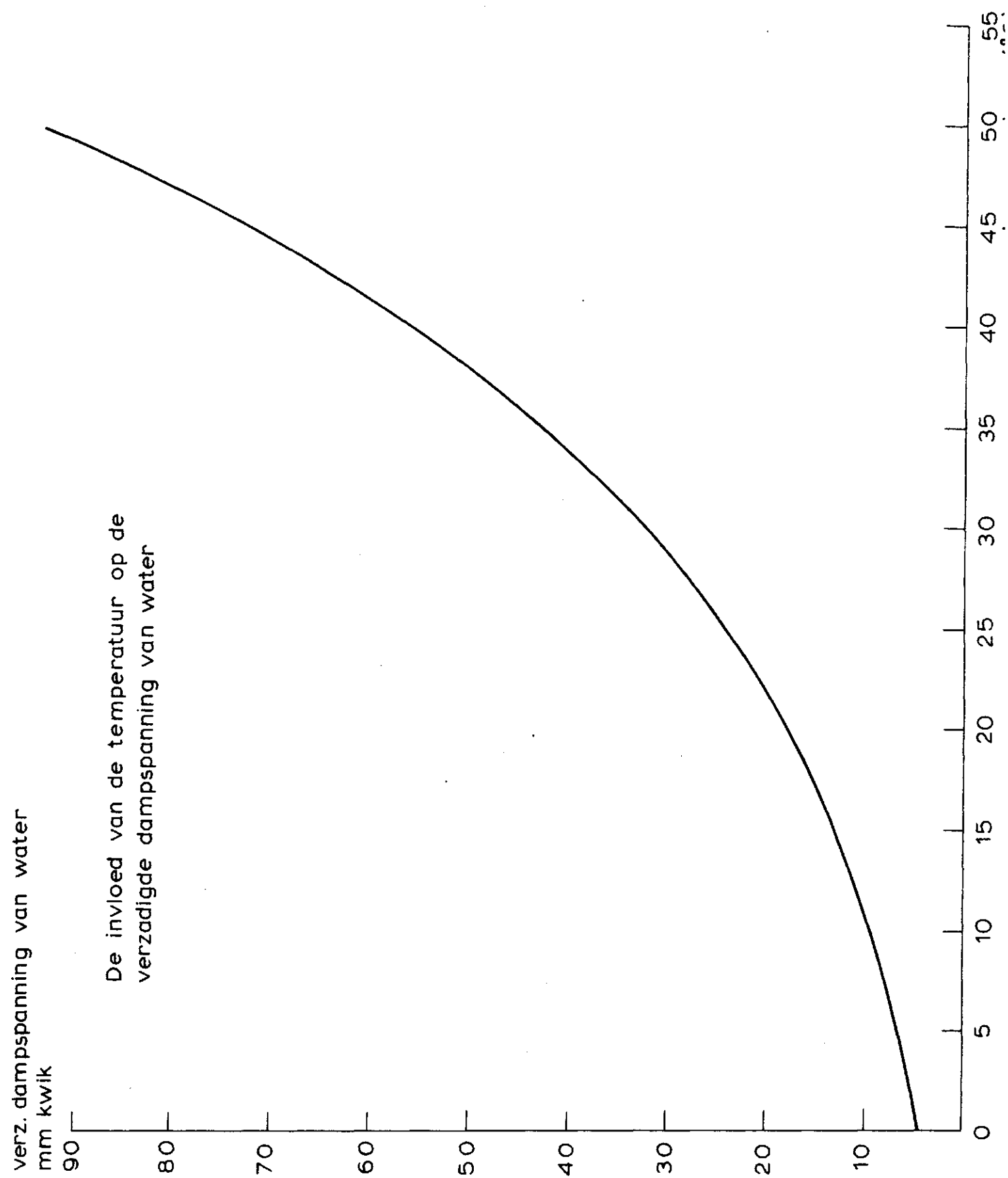


fig. 4

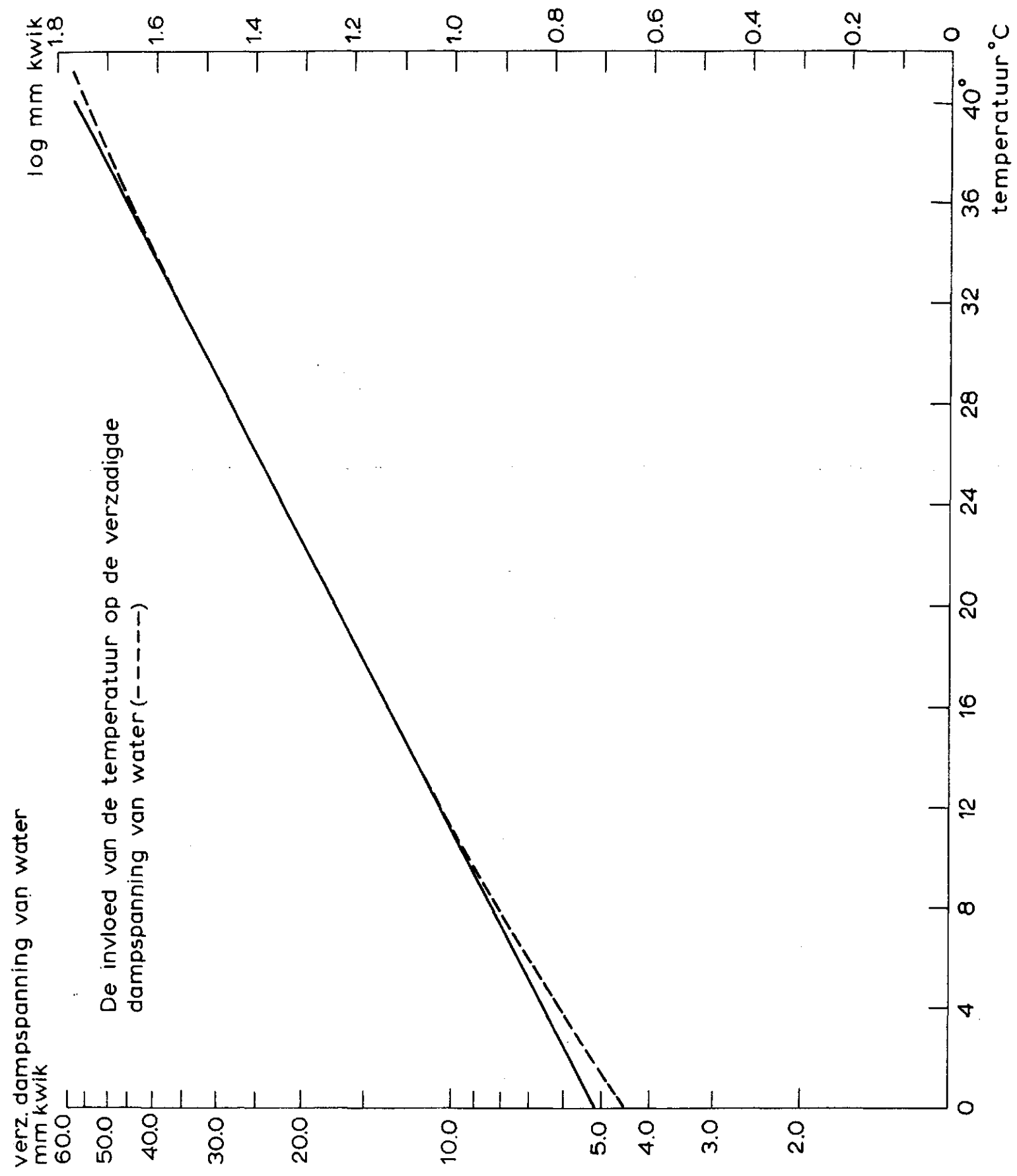


fig. 5

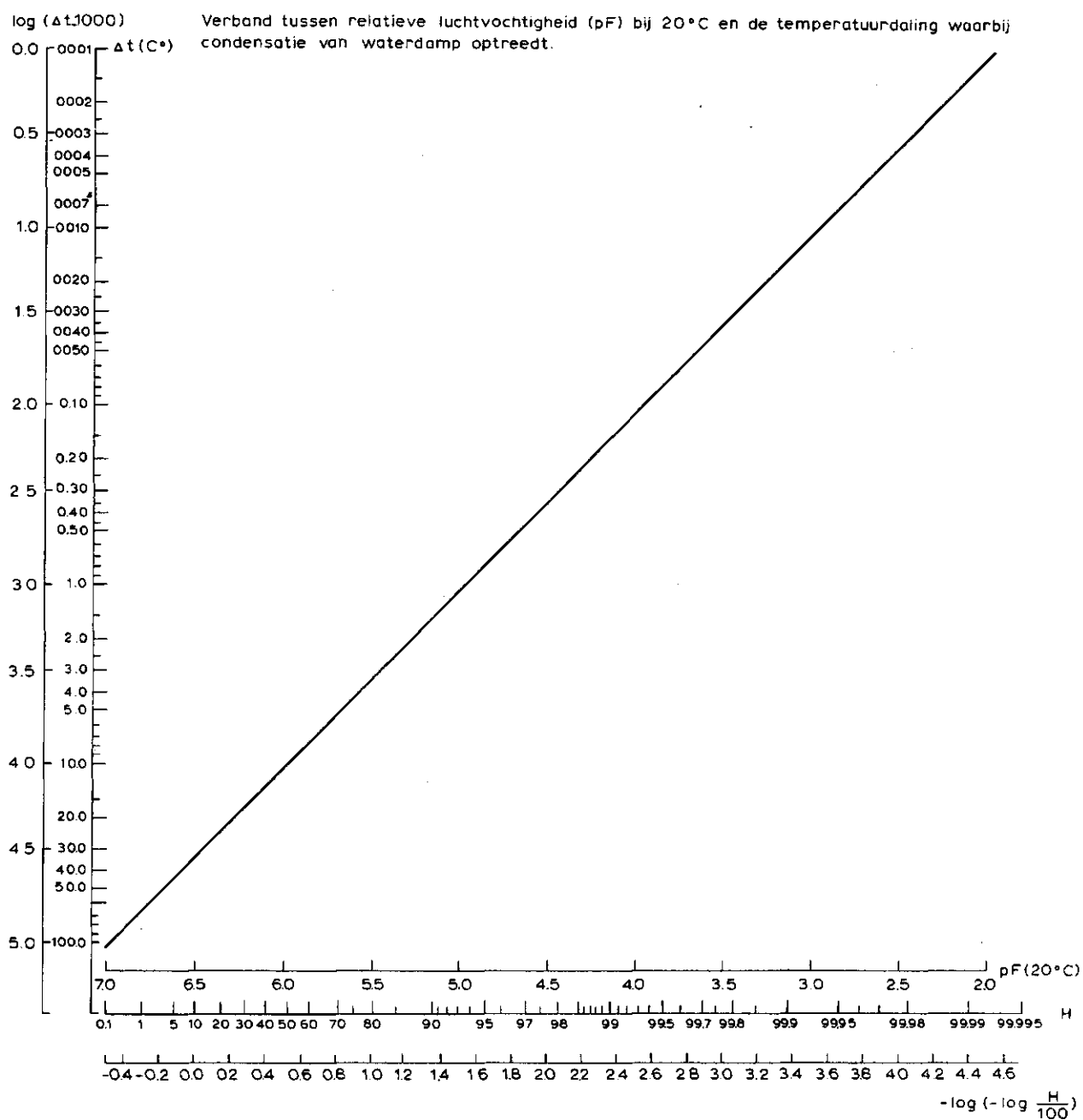


fig. 6

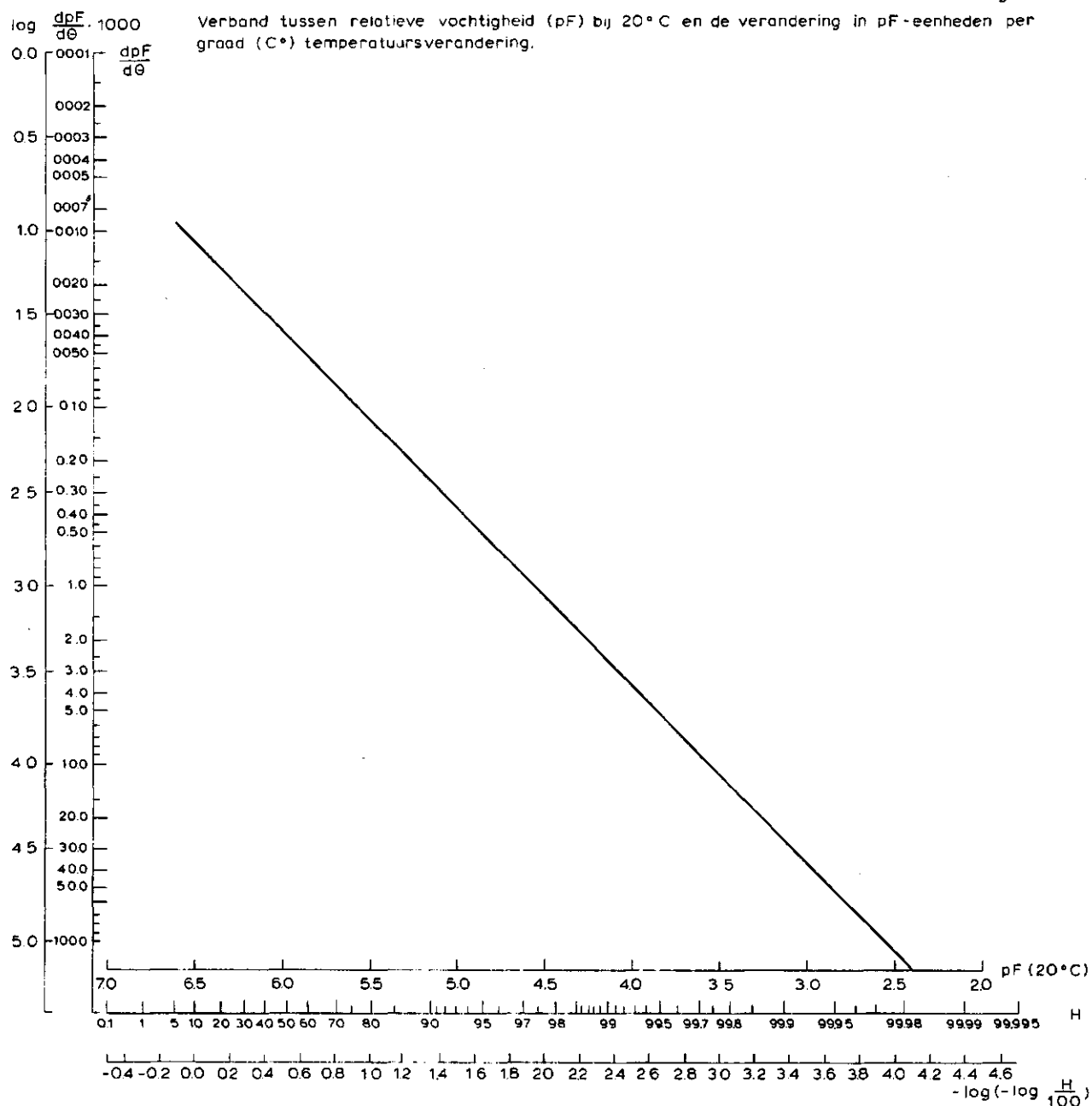


fig. 7

Verband tussen relatieve luchtvochtigheid en
vochtgehalte van „light sand” (A), „heavy loam” (B,C)
heavy acid soil” (D) en „heavy clay” (E) (naar Puri e.a.
1925)

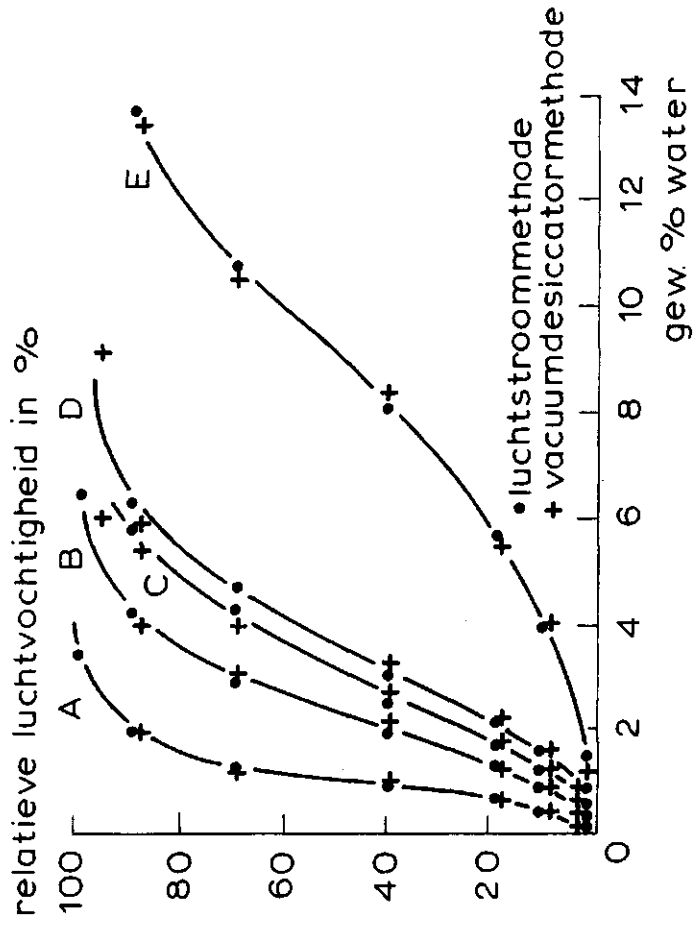


fig. 8.

pF curve van 3 grondsoorten

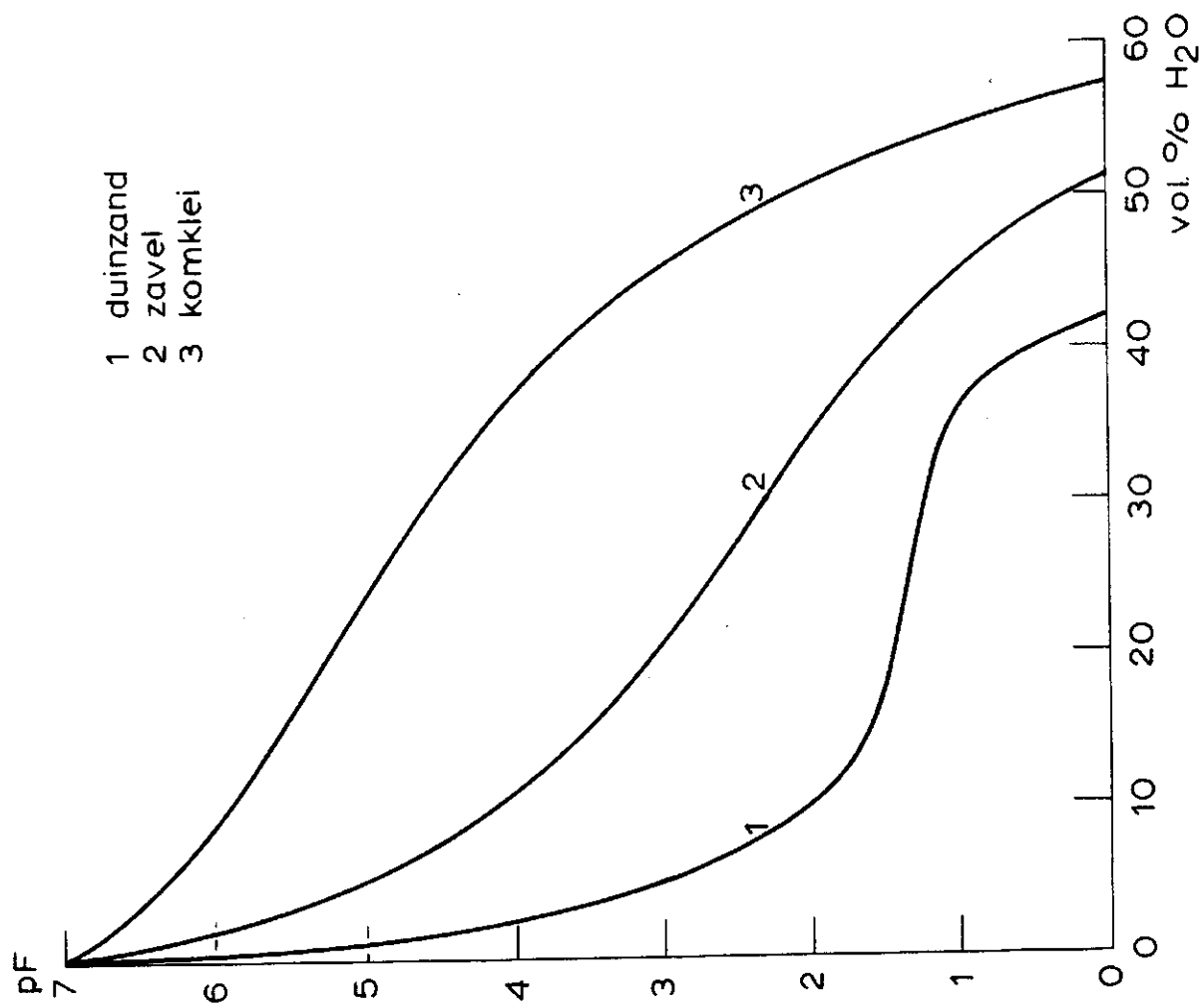


fig 9

Verband tussen de relatieve luchtvochtigheid en de concentratie van een zwavelzuur-resp glycerine-watermengsel bij 10-30°C (naar Schoorl, 1957)

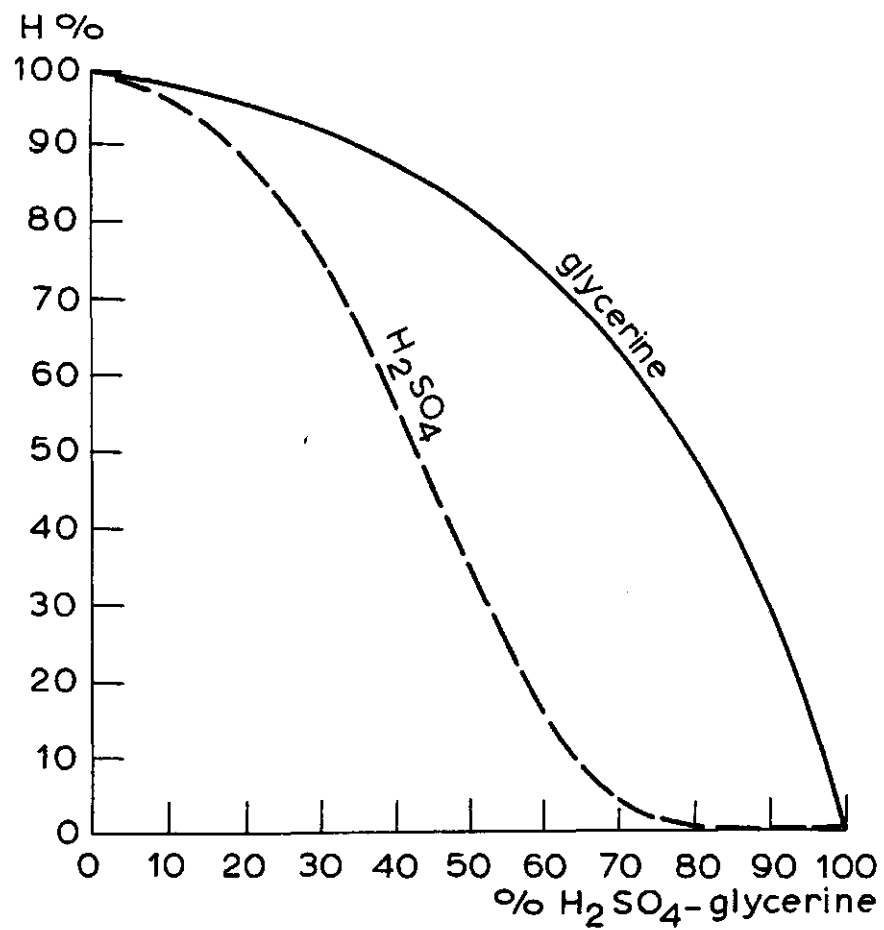


fig. 10

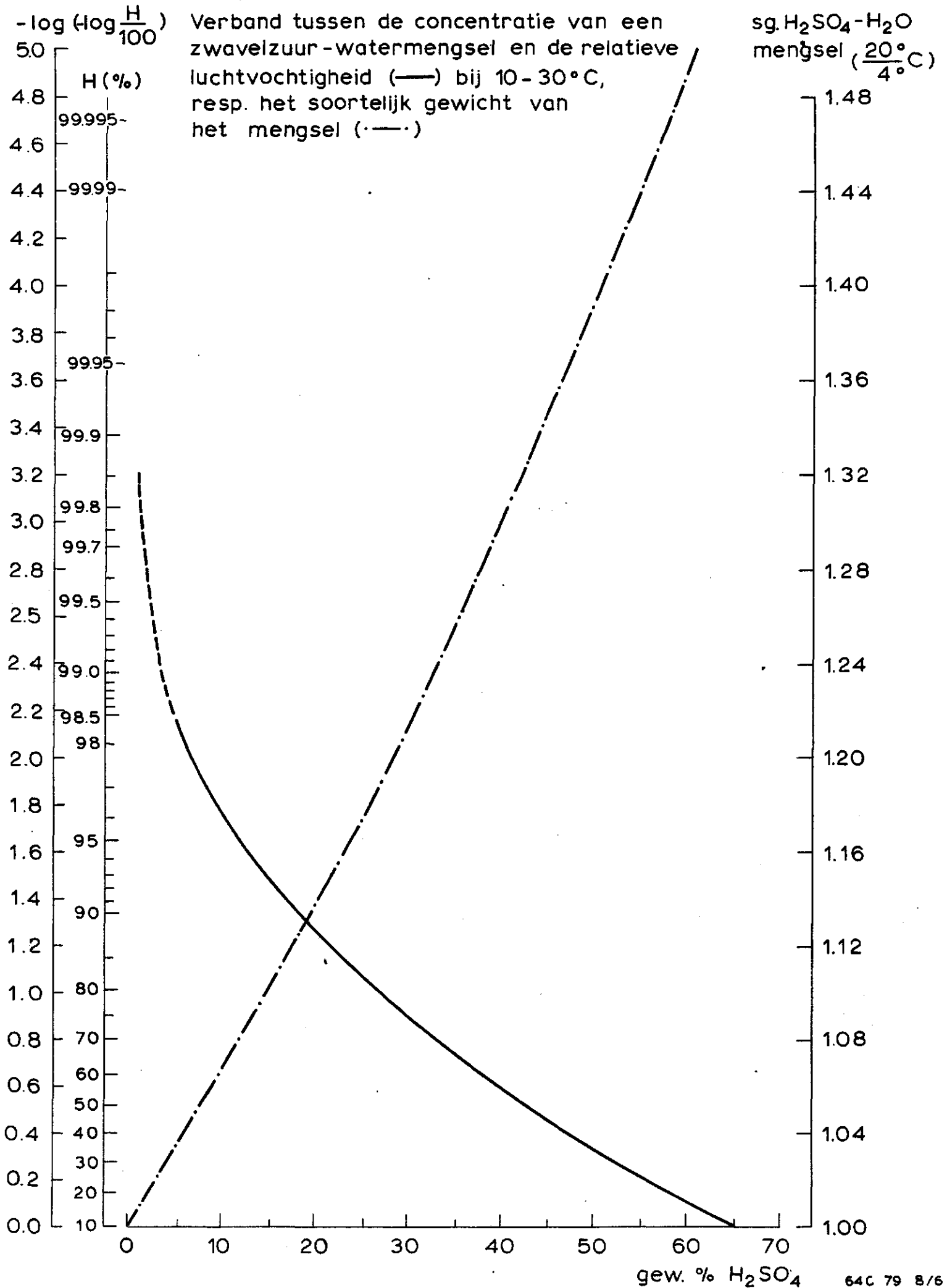


fig. 11

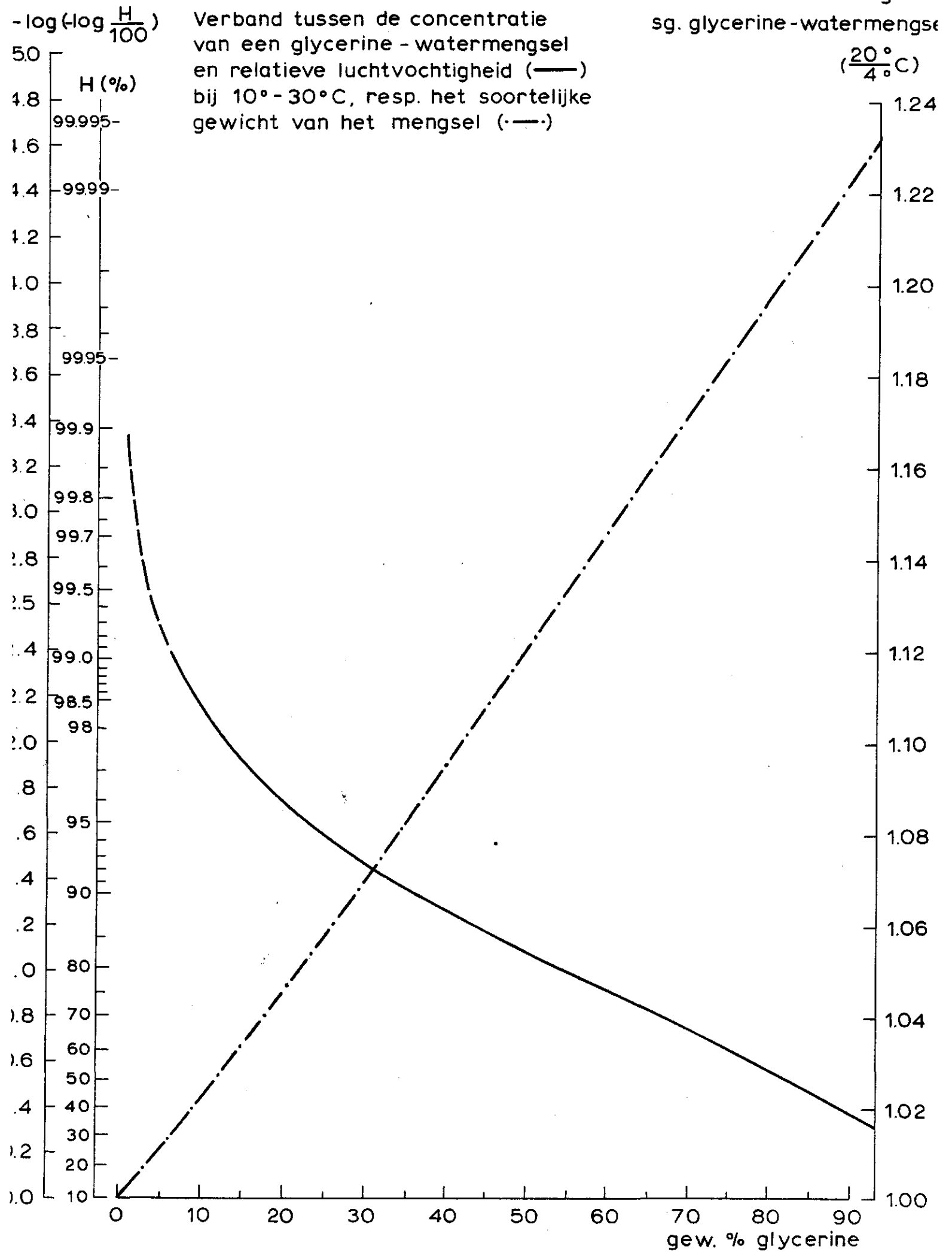


fig. 12

Ad- en desorptiecurven van een onbehandelde
en een overdroge kleigrond (naar Puri ea.1925)

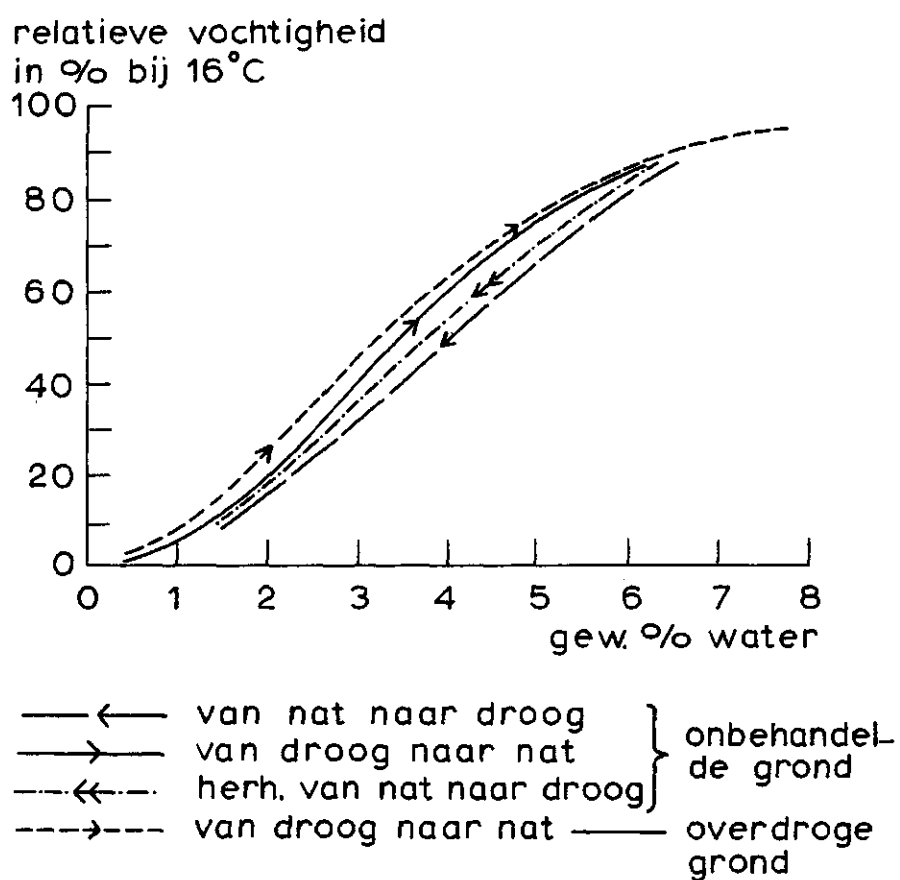


fig.13

LOESS BOVEN EEN VERZADIGDE $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ OPLOSSING 93 % REL. VOCHTIGHEID = pF 5.0

