

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding  
Wageningen

HL 98

VERGELIJKING VAN DE VOCHTSPANNINGEN, GEMETEN IN  
SITU MET BEHULP VAN DE PRESSURE TRANSDUCER,  
MET DE UIT DE pF-CURVE AFGELEIDE WAARDEN

W. Silva

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.

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

## I N H O U D

	blz.
INLEIDING	
1. KARAKTERISTIEKEN VAN DE MEETAPPARATUUR	1
1.1. De tensiometer	1
1.1.1. Instelsnelheid	2
1.1.2. Stromingsweerstand van de tensiometer	3
1.1.3. Capaciteit	5
1.2. De pressure transducer	6
1.2.1. Capaciteit van de pressure transducer	9
1.3. Tijdconstante	10
1.4. Weerstand in de grond	11
1.5. Insteltijd	13
1.6. Waterverlies van de verbindingsslangen	14
2. LABORATORIUMMETINGEN	16
2.1. Inleiding	16
2.2. Invloed van de methode van verzadiging	17
2.3. Metingen in grofzand	20
2.4. Metingen in komklei	22
2.4.1. Invloed van het omhullingsmateriaal	26
2.4.2. Hysteresis	26
2.4.3. Analyse van het vochtspanningsverloop	27
2.4.4. Oorzaken van een te hoog gemeten vochtspanning	31
2.4.5. Metingen met de permanent ingestoken prikten- siometer	32
2.5. Vergelijking van gemeten en berekende insteltijd	32
2.6. Vochtspanningsmetingen in de zodelaag	34

	blz.
3. VELDMETINGEN	35
3.1. Inleiding	35
3.2. Vochtspanningsmetingen bij enkele punten van de pF-curve	37
3.3. Vochtspanningsmetingen in fijn zand	42
3.4. Vochtspanningsmetingen in zware zavel	49
3.5. Vochtspanningsmetingen in komklei	52
SAMENVATTING	58
LITERATUUR	61
BIJLAGEN	

## INLEIDING

Vochtspanningsmetingen in onverzadigde grond verricht men over het algemeen met tensiometers. Met behulp van een manometer worden de drukveranderingen, die in de tensiometer optreden geregistreerd. Het Instituut van Cultuurtechniek en Waterhuishouding maakt voor het meten van deze drukveranderingen sedert enige jaren gebruik van de pressure transducer. De nauwkeurigheid van deze apparatuur is in een aantal laboratoriumproeven onderzocht. Daarnaast zijn vochtspanningsmetingen verricht in zandgrond, zware zavel en komkleigrond. Uit de meetgegevens is het verband tussen vochtspanning en vochtgehalte, karakteristiek voor een bepaalde laag in de grond, afgeleid en vergeleken met de in het laboratorium bepaalde pF-curve. Tenslotte is, voorzover mogelijk, de onverzadigde doorlatendheid van de grondsoort berekend.

## 1. KARAKTERISTIEKEN VAN DE MEETAPPARATUUR

### 1.1. D e t e n s i o m e t e r

De tensiometer bestaat uit een poreuze, dunwandige, met water gevulde cel. Het water in de cel staat via de poriën van de celwand in verbinding met het bodemwater en is via een slang rechtstreeks verbonden met de meetapparatuur. Plaatst men deze poreuze cel in onverzadigde grond, dan zal er water door de celwand stromen tot er evenwicht is bereikt tussen de waterdruk in de grond en die in de tensiometer. Het afgelezen drukverschil is een maat voor de vochtspanning in de grond en kan uitgedrukt worden in mbar, cm H<sub>2</sub>O, atm, enz.

Men kan met de tensiometer onderdruk meten tot een bepaalde waarde, de air entry value. Dit is de druk waarbij lucht intreedt, terwijl de cupwand is verzadigd met water. Deze waarde is afhankelijk van de diameter van de poriën in de tensiometerwand en moet groter zijn dan de maximaal te meten vochtspanning. Men kan met de gebruikte tensiometers een onderdruk meten tot ca. 800 mbar; bij hogere waarden ontstaan luchtbellens in het systeem als gevolg van het doorslaan van de menisci in de poriën van de tensiometerwand.

Er is gebruik gemaakt van twee soorten tensiometers:

- de tensiometercup, een aardewerken buisje van 5 à 10 cm lang met een inwendige straal ( $r_i$ ) van 7 mm en een uitwendige straal ( $r_u$ ) van 9,5 mm.
- de priktensiometer, een filterpijp van 3 à 5 cm lang met een inwendige straal van 0,25 mm en een uitwendige straal van 0,75 mm.

De tensiometercup wordt afgesloten met een op twee plaatsen doorboorde kurk, waarin twee nylon slangetjes van 3 x 1,5 mm (buiten- en binnendiameter) bevestigd zijn. Over het schuinafgesneden uiteinde van een van de slangen schuift men een stuk zacht plastic slang van ca. 5 cm (fig. 1).

Afgesloten



tensiometer



druk één eenheid te doen veranderen, wordt gedefinieerd als capaciteit of:

$$C = \frac{dV}{dh} (\text{cm}^2) \quad (6)$$

De capaciteit wordt bepaald door de druk te wijzigen met behulp van een injectiespuit en de volumeverandering te meten aan de hand van de verplaatsing van een luchtbel. De capaciteit van een meetstelsel kan men berekenen door de capaciteiten van de onderdelen waaruit het meetstelsel bestaat te sommeren.

Tabel 1. Capaciteit van tensiometer en slang

Tensiometercup	$4 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$
Priktensiometer	$< 10^{-8} \text{ cm}^2$
Nylon slang 3 x 1,5 mm per meter	$1,2 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$
Idem 1,5 x 1 mm per meter	$> 10^{-8} \text{ cm}^2$

Luchtballen in het systeem veroorzaken een capaciteitsverhoging.

## 1.2. De pressure transducer

De drukveranderingen, die in de tensiometer optreden worden geregistreerd met een pressure transducer. In de transducer bevindt zich een membraan, gekoppeld aan een samenstel van weerstanden

- een weerstandscombinatie voor de nulpunscorrectie (c).  
 $R_1 = 12 \text{ K}\Omega$ ;  $R_2 = 1 \text{ K}\Omega$ ;  $R_3 = 50 \text{ K}\Omega$
- een slangenstelsel, waarmee de tensiometer aangesloten wordt op de transducer (d). De slangen hebben een inwendige en uitwendige diameter van 1,5 en 1 mm
- de transducer, type Statham P856 (e)
- de voltmeter, waarmee het uitgangssignaal van de transducer geregistreerd en versterkt kan worden (f)
- eventueel een recorder, aangesloten op de voltmeter of direct op de uitgang van de transducer.

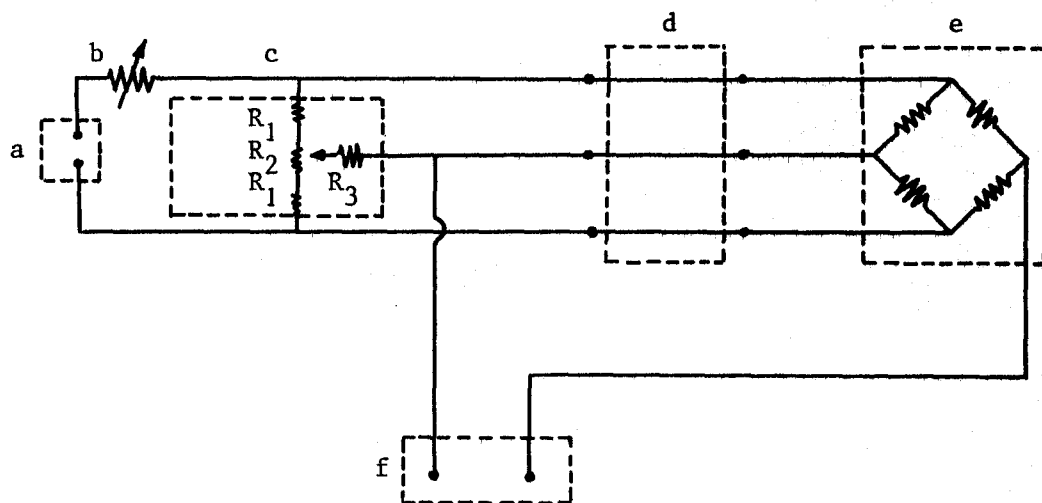


Fig. 3. Meetapparatuur

De transducer heeft een meetbereik tot ca. 1 atm. onderdruk en heeft dan een uitgangssignaal van 3,2 m.Volt per Volt voeding. Gebruikt men twee kwikbatterijen van 1,35 Volt, dan bedraagt het uitgangssignaal bij 100 cm  $\text{H}_2\text{O}$  onderdruk  $2,7 \times 3,2 \times 0,1 = 0,86$  m.Volt, bij 1000 cm  $\text{H}_2\text{O}$ , 8,6 m.Volt. De versterking van het uitgangssignaal kan men regelen met de verschillende schaalbereiken van de voltmeter.

De pressure transducer wordt geijkt met behulp van een standaardkolom water. Men moet de daarbij behorende uitslag tijdens de metingen regelmatig controleren en zonodig corrigeren.

De transducer kan in combinatie met meerdere tensiometers gebruikt worden (fig. 4).

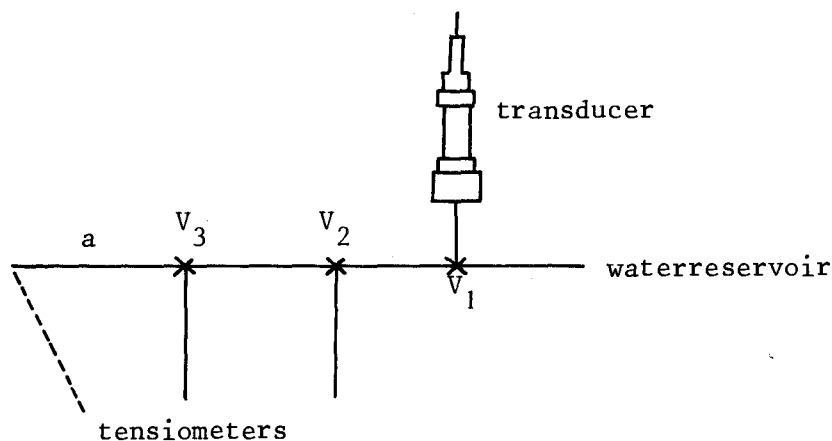


Fig. 4. Combinatie van transducer met meerdere tensiometers

Het gehele systeem dient gevuld te worden met ontlucht water. Bij aansluiting van de tensiometers op de transducer kan men lucht die zich in de uiteinden van de verbindingsslangen bevindt verwijderen door deze slangen aan te sluiten op het waterreservoir met behulp van kraantje  $V_1$ .  $V_2$  en  $V_3$  zijn de kraantjes, waarmee de tensiometers in verbinding komen te staan met de transducer. Het gebruik van deze kraantjes heeft als nadeel dat de kans op lekken toeneemt. De slangen en kraantjes kunnen met behulp van een injectiespuit op het voorkomen van lekken en luchtballen gecontroleerd worden.  $V_1$  dient men dan dicht te draaien om te voorkomen dat door een te grote onderdruk de transducer beschadigd wordt. Men plaatst de injectiespuit op slangetje a en draait  $V_3$  dicht. De aangebrachte onderdruk heeft een geringe constante verplaatsing van de watermeniscus in de slang tot gevolg. De grootte van de verplaatsing is afhankelijk van de capaciteit van de slang en de kraantjes. Als de meniscus in beweging blijft, is er een lek aanwezig. Een te grote verplaatsing duidt op de aanwezigheid van luchtballen. Vervolgens wordt  $V_2$  dichtgedraaid en  $V_3$  geopend en verricht men dezelfde handelingen. Op deze manier kan het hele systeem gecontroleerd worden.



Bij aansluiting van de cuptensiometer doet zich het volgende voor:

- a. onderdrukverlaging in de tensiometer en onderdrukverhoging in de pressure transducer doordat men het kogeltje in de richting van de tensiometer verplaatst (fig. 1).
- b. onderdrukverhoging in de tensiometer en de pressure transducer door volumevergroting. Deze volumevergroting ontstaat doordat men het kogeltje op het schuine uiteinde van de slang schuift.

Het effect van de drukveranderingen binnen de tensiometer op de vochtspanning in de omringende grond is afhankelijk van de onverzadigde doorlatendheid. Zo zal een slecht doorlatende grond nauwelijks op deze drukvariaties reageren. In het meetsysteem is onmiddellijk na aansluiting een verhoogde onderdruk aanwezig. Deze verhoging kan men opheffen door het meetsysteem op de watervoorraad aan te sluiten (fig. 4). In een goed doorlatende grond wordt de verhoging van onderdruk in het meetsysteem vrijwel direct opgeheven doordat watertransport van de grond naar de tensiometer plaatsvindt. In het veld zal men verhoging van onderdruk nauwelijks waarnemen, aangezien de meetslang van de tensiometer een grotere lengte heeft en verplaatsing van het kogeltje een relatief kleine volumeverandering tot gevolg heeft.

#### 1.2.1. Capaciteit van de pressure transducer

De capaciteit van de pressure transducer is vele malen kleiner dan die van de kwikmanometer, dat wil zeggen dat om de druk in het systeem één eenheid te doen veranderen, een kleinere hoeveelheid water verplaatst hoeft te worden.

Tabel 2. Capaciteit van de meetapparatuur

Pressure transducer, type Statham P856	$6,2 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$
Kwikmanometer, U model, $\emptyset = 0,15 \text{ cm}$	$6,8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$
Watermanometer, enkel, $\emptyset = 0,15 \text{ cm}$	$17,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$

De capaciteit van de pressure transducer bedraagt  $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$ . Onder invloed van de kraantjes en slangen vindt echter een vergroting van de capaciteit plaats. Het is deze waarde die vermeld is in tabel 2.

### 1.3. T i j d c o n s t a n t e

De tijdconstante ( $\tau$ ) is een maat voor de algemene reactie van het tensiometer-meetsysteem op vochtspanningsveranderingen aan het oppervlak van de tensiometer en wordt gedefinieerd als:

$$\tau = C.W. (\text{sec})$$

waarin:

C = capaciteit van het meetsysteem ( $\text{cm}^2$ )

W = stromingsweerstand van de tensiometer ( $\text{sec.cm}^2$ )

De capaciteit van het meetsysteem is gelijk aan de som van de capaciteiten van de onderdelen (tabel 1 en 2) waaruit het meetsysteem is opgebouwd.

Tabel 3. Tijdconstanten ( $\tau$ )

Combinatie	Capaciteit $\text{cm}^2$	$W_c$ $\text{sec.cm}^{-2}$	$\tau$ sec.
a. P.T.-cup 1	$47,4 \cdot 10^{-6}$	13524	0,6
b. P.T.-cup 2	$7,4 \cdot 10^{-6}$	6000	0,1
c. Kwikm.-cup 1	$721,2 \cdot 10^{-6}$	13524	9,8
d. Kwikm.-cup 2	$681,2 \cdot 10^{-6}$	6000	4,1
e. Waterm.-cup 1	$17741,2 \cdot 10^{-6}$	13524	240,0
f. Waterm.-cup 2	$17701,2 \cdot 10^{-6}$	6000	106,1

P.T.=pressure transducer; cup 1=cuptensiometer; cup 2=priktensiometer, elk 4 cm lang; bij de capaciteitsberekening is 1 m slang inbegrepen.

Uit de gegevens blijkt duidelijk de invloed van de capaciteit op de tijdconstante. De tijdconstante is afhankelijk van de gebruikte apparatuur: de insteltijd bovendien nog van de weerstand die bij het watertransport in de grond ondervonden wordt.

#### 1.4. Weerstand in de grond

Bij vochtspanningsmetingen vindt enig watertransport plaats tussen de tensiometer en de grond tot er evenwicht is bereikt. De weerstand die bij dit transport optreedt, wordt bepaald door de doorlatendheid van de grond en is daarnaast afhankelijk van een goed contact tussen tensiometer en grond. Het volume grond waarover men de weerstand moet berekenen, is moeilijk te bepalen.

Men meent ter vereenvoudiging aan dat het water, dat getransporteerd moet worden om evenwicht te verkrijgen tussen tensiometer en grond op grotere afstand wordt opgenomen of afgegeven. Dit impliceert dat al het water de grond rondom de tensiometer moet passeren en dat het vochtgehalte voor en na de meting gelijk is.

Indien men het volume grond (cilindervormig) schat op 1000 x de waterverplaatsing, nodig om de drukverandering in het meetsysteem aan te geven dan geldt (BAKKER, 1975):

$$(h_o - h_t) \cdot 1000 \cdot C = \text{volume grond} = l\pi (r_{ug}^2 - r_{ig}^2)$$

waarin:

- $h_o$  = drukverschil tussen tensiometer en grond op  $t=0$  (cm)
- $h_t$  = drukverschil, waarbij  $t$  de tijd is, verstreken sinds het begin van de meting (cm)
- $C$  = capaciteit van het meetsysteem ( $\text{cm}^2$ )
- $l$  = lengte tensiometer (cm)
- $r_{ug}, r_{ig}$  = uitwendige resp. inwendige straal van de grond.
- $r_{ig} = r_u$  tensiometer (cm)

zodat:

$$r_{ug} = \sqrt{(h_o - h_t) \frac{1000C}{\pi l} + r_{ig}^2}$$

De weerstand is dan:

$$W_g = \frac{A_g}{K} \quad (3)$$

waarin:

$$A_g = \frac{1}{2\pi l} \ln \frac{r_{ug}}{r_{ig}} \text{ (cm}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

$$K = \text{onverzadigde doorlatendheid (cm.sec}^{-1}\text{)}$$

De onverzadigde doorlatendheid K is afhankelijk van de grondsoort en de vochtspanning (tabel 4)

Tabel 4. Onverzadigde doorlatendheid\* (cm.sec<sup>-1</sup>)

Grondsoort	Vochtspanning	
	- 30 cm	- 200 cm
Grofzand (1)	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-10}$
Zware zavel (13)	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$
Komklei (19)	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$

\*Volgens RIJTEMA (1969)

In tabel 5 zijn de bijbehorende waarden van  $r_{ug}$  en  $A_g$  berekend.

Tabel 5.  $r_{ug}$  - en  $A_g$ -waarden

Combinatie	Capaciteit cm <sup>2</sup>	Vochtspanning				$W_c$ sec.cm <sup>-2</sup>
		-30 cm		-200 cm		
		$r_{ug}$ cm	$A_g$ cm <sup>-1</sup>	$r_{ug}$ cm	$A_g$ cm <sup>-1</sup>	
P.T.-cup 1	$47,4 \cdot 10^{-6}$	0,994	0,0014	1,228	0,0082	13524
P.T.-cup 2	$7,4 \cdot 10^{-6}$	0,151	0,0277	0,351	0,0614	6000

cup 1=cuptensiometer, cup 2=priktensiometer, elk 4 cm lang. Op t=0 bevinden de prik- en cuptensiometer zich in de verzadigde toestand.

### 1.5. I n s t e l t i j d

Onder insteltijd verstaat men de tijd die nodig is voor evenwichtsinstelling tussen het meetsysteem en de grond. Uit formule (2) en (6) volgt:

$$dt = -CW \frac{dh}{h} \quad (7)$$

waarin:

C = capaciteit van het hele meetsysteem (cm<sup>2</sup>)

W = som van tensiometerweerstand en de weerstand (Wg) in de grond (sec.cm<sup>-2</sup>)

Integratie geeft:

$$t_t - t_o = CW \ln \frac{h_o}{h_t} \quad (8)$$

Bij evenwicht is h=0; dit geldt wanneer h<sub>o</sub> ≠ 0 voor t<sub>t</sub> - t<sub>o</sub> = ∞

Wanneer h<sub>t</sub> is 1% van het begindrukverschil h<sub>o</sub> dan is:

$$t_t - t_o = CW \ln 100 = 4,606 CW \quad (9)$$

In tabel 6 zijn de insteltijden van cup- en priktensiometer met formule (9) berekend voor de K- en Ag-waarden die zijn vermeld in tabel 4 en 5.

Tabel 6. Insteltijd (sec)

	Vochtspanning (cm)	Combinatie		Combinatie	
		P.T.-cup 1	P.T.-cup 2	K.M.-cup 1	K.M.-cup 2
Water	0	2,9	0,2	45	19
Grofzand	- 30	3,0	0,2	45	21
Idem	-200	3453	4010	246745	911019
Zware zavel	- 30	3,0	0,2	76	25
Idem	-200	6,1	3,9	270	850
Komklei	- 30	3,4	1,4	104	449
Idem	-200	57,3	63,6	3935	14369

P.T.=pressure transducer; K.M.=kwikmanometer; cup 1=cuptensiometer; cup 2=priktensiometer

Metingen uitgevoerd met de kwik- en watermanometer hebben ten gevolge van de hogere capaciteit (tabel 2) aanmerkelijk grotere insteltijden. In tabel 6 zijn tevens de insteltijden voor de kwikmanometer weergegeven. Bij lage k-waarden wordt de insteltijd grotendeels bepaald door de weerstand die bij het watertransport in de grond ondervonden wordt. De kwikmanometer heeft vooral bij lage k-waarden en in combinatie met de priktensiometer grote insteltijden.

#### 1.6. W a t e r v e r l i e s v a n d e v e r b i n d i n g s - s l a n g e n

Men ging er aanvankelijk van uit dat de kunststof verbindingsslangen tussen pressure transducer en tensiometer voldoende gas- en waterdicht zijn en geen invloed uitoefenen op het verloop van drukveranderingen. Vochtspanningsmetingen, geregistreerd met behulp van een recorder, geven echter een onregelmatig verloop van de vochtspanning te zien. Bovendien wordt er geen evenwicht bereikt tussen de waterdruk in het meetsysteem en de vochtspanning in de grond. Om na te gaan of de oorzaak hiervan bij waterverlies ten gevolge van verdamping door de wand van de verbindingsslang ligt, zijn een aantal slangen (1,5 x 1 mm) met een lengte van 1 m, gevuld met ontlucht water en aan beide zijden afgesloten. Eventueel waterverlies kan men dan aan de hand van de verplaatsing van de watermeniscus constateren.

Waterverlies blijkt inderdaad plaats te vinden en bedraagt bij 20°C en 50% relatieve vochtigheid ca.  $3,6 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ . Als men de slang op de pressure transducer met een capaciteit van  $6,2 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$  aansluit zal de onderdruk per minuut toenemen met;

$$\frac{60 \cdot 3,6 \cdot 10^{-7}}{6,2 \cdot 10^{-6}} = 3,5 \text{ cm H}_2\text{O}$$

In fig. 5 is de gemeten onderdruk in 8 minuten 26 cm H<sub>2</sub>O gestegen, d.w.z. per minuut 3,3 cm H<sub>2</sub>O. Dit komt goed overeen met de berekende waarde.

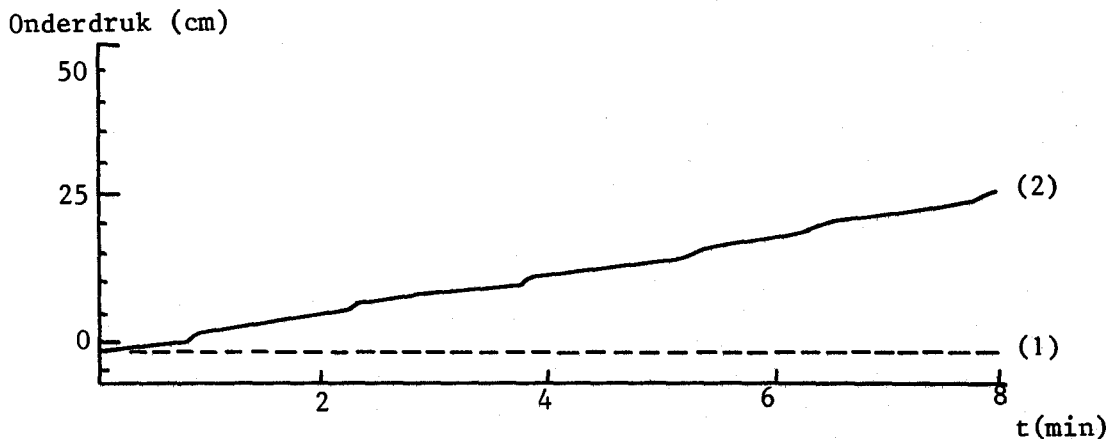


Fig. 5. Verloop van de onderdruk in kunststofslang (1) en koperen buis (2), gevuld met ontlucht water en aangesloten op de pressure transducer

Waterverlies zal dus, vooral bij metingen met een lange instel-tijd, wel degelijk invloed uitoefenen op het verloop van de vochtspanningsmeting. Voorbeeld:

Op de pF-bak bevinden zich monsterringen bij een onderdruk van 100 cm. De vochtspanning wordt gemeten met een priktensiometer. Wanneer 50% van de uiteindelijke waarde (=100 cm) in 4 min. wordt bereikt dan is  $240 = CW \ln 2$  (formule 8). Als  $C = 7,4 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$  dan is de weerstand  $W$  gelijk aan  $46,9 \cdot 10^6 \text{ sec. cm}^2$ . Bij een waterverlies van  $3,6 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ , is de toename van de gemeten vochtspanning ten gevolge van dit waterverlies gelijk aan  $3,6 \cdot 10^{-7} \cdot 46,9 \cdot 10^6 = 16 \text{ cm}$ .

Een ander nadeel van kunststofslangen is de temperatuurgevoeligheid. In het laboratorium is dit nauwelijks merkbaar, aangezien er bij een vrijwel constante temperatuur gewerkt wordt. In het veld daarentegen is de invloed van temperatuursveranderingen duidelijk waarneembaar. Temperatuursverhoging heeft tot gevolg dat de leidingen en het water uitzetten, waardoor een volume- en drukverandering optreedt. De waargenomen drukvariatie ten gevolge van temperatuursveranderingen in het veld bedraagt 5-10 cm.

In het vervolg is om deze redenen gebruik gemaakt van koperen

buis met een inwendige resp. uitwendige diameter van 0,1 en 0,2 cm. Indien men een koperen buis, gevuld met ontlucht water, aansluit op de pressure transducer ziet men dat er geen verandering in waterdruk optreedt (fig. 5). Hieruit mag men concluderen dat er geen waterverlies door de wand van de buis plaatsvindt. Een nadeel van deze koperen buis is echter de geringe flexibiliteit; ook kan men eventueel aanwezige luchtbelllen niet waarnemen.

## 2. LABORATORIUMMETINGEN

### 2.1. I n l e i d i n g

Om enerzijds de pressure transducer en de tensiometer en anderzijds de invloed van de grondsoort op de insteltijd te kunnen testen zijn in het laboratorium een aantal metingen verricht. De metingen zijn uitgevoerd in grofzand en komklei. Onderzocht is:

- De invloed van de weerstand die ondervonden wordt bij het watertransport tussen tensiometer en omringende grond. In een aantal komkleimonsters is rondom de tensiometer een materiaal met grotere doorlatendheid (löss) aangebracht.
- De invloed van de onderdruk in de tensiometer bij de aanvang van de meting op de gemeten eindwaarde. Indien men uitgaat van een lagere en hogere onderdruk dan de te verwachten eindwaarde - de vochtspanning van de grond - kunnen zich hysteresse verschijnselen voordoen.
- De invloed van de verzadiging op het verloop van vochtspanning en vochtgehalte.

Bij een op de pF-bak aangelegde onderdruk van 31,6,50 en 100 cm wordt de vochtspanning met cup- en priktensiometer in combinatie met de pressure transducer gemeten. Tijdens de meting wordt het monster afgedekt met plastic om verdamping tegen te gaan. Men kiest het referentieniveau halverwege de monsterring, Na elke meting wordt dit nul-punt gecontroleerd en zonodig gecorrigeerd.



## 2.2. Invloed van de methode van verzadiging

De metingen zijn uitgevoerd in Spaarnewouder grofzand en komklei. De monsterringen hebben een diameter van 10 cm en een hoogte van 5 cm. In de monsters is een tensiometercup (1=3 cm) aangebracht. De zandmonsters zijn met een trilmachine tot de dichtheden  $r_d$  1,30 en 1,53 g.cm<sup>-3</sup> verdicht. De komkleimonsters zijn in het veld gestoken. Het komkleiprofiel (bijl. 1) is bemonsterd op 0,10 en 0,35 m - maaiveld.

De invloed van de verzadiging op het verloop van vochtspanning en vochtgehalte wordt onderzocht door de monsters op de volgende manieren voor te behandelen:

- verzadiging op de pF-bak (zandbad) waarbij de watertoevoer van onderaf plaatsvindt.
- verzadiging onder vacuum in een exsiccator. Nadat het water ontlucht is, worden de monsterringen in exsiccator geplaatst. Vervolgens wordt onder vacuum ontlucht water uit een erlenmeyer toegevoegd tot het waterniveau zich ongeveer halverwege de monsterringen bevindt.
- berekening met behulp van een plantenspuit tot een bepaalde vochtspanning is bereikt.

Vervolgens wordt een onderdruk van 31,6 cm (pF=1,5), 50 cm (pF=1,7) en 100 cm (pF=2,0) aangelegd: het resterende vochtgehalte bij deze onderdruk wordt bepaald (tabel 7).

Verzadiging onder vacuum van de zandmonsters met lage dichtheid is niet mogelijk aangezien de monsters ten gevolge van de grote hoeveelheid opgenomen water ineenzakken.

Het verband tussen vochtgehalte en vochtspanning van grof zand is weergegeven in fig. 6a en 6b.

Tabel 7. Vochtgehalten

grof zand									komklei							
ring- V nr.		$r_d$ g.cm <sup>-3</sup>	vol.% H <sub>2</sub> O bij Pv				Pv-start cm	vol. % H <sub>2</sub> O	ring- V nr.		$r_d$ g.cm <sup>-3</sup>	vol. % H <sub>2</sub> O bij Pv			Pv-start cm	vol. % H <sub>2</sub> O
			-2,5	-31,6	-50	-100	cm				-2,5	-31,6	-100	cm		
72	V1	1,30	40,2	33,4	10,8	4,5	-	-	B1 26	V1	1,35	46,5	43,6	41,6	-	-
85	V1	1,33	39,2	33,2	10,8	4,6	-	-	57	V1	1,38	47,0	45,4	43,1	-	-
19	V2	1,30	-	20,8	9,0	4,7	-16	30,8	73	V2	1,42	-	46,9	45,3	-16	47,7
22	V2	1,30	-	21,6	9,0	4,8	-39	14,2	20	V2	1,33	-	47,9	45,6	-10	49,4
-	V3	-	-	-	-	-	-	-	44	V3	1,35	51,6	47,3	44,7	-	-
-	V3	-	-	-	-	-	-	-	74	V3	1,40	51,2	47,6	45,5	-	-
18	V1	1,51	38,8	32,5	15,3	5,7	-	-	B2 49	V1	1,33	50,1	48,3	46,9	-	-
43	V1	1,54	38,6	33,9	15,3	5,8	-	-	25	V1	1,34	50,1	48,5	47,0	-	-
52	V2	1,52	-	29,2	14,4	5,5	-2	34,4	87	V2	1,32	-	47,9	46,5	-8	49,8
69	V2	1,53	-	29,8	14,6	5,6	-10	33,3	30	V2	1,34	-	48,5	47,1	-3	50,2
70	V3	1,53	45,2	39,8	26,2	6,0	-	-	45	V3	1,33	52,2	50,2	48,8	-	-
71	V3	1,52	45,6	39,6	25,4	5,8	-	-	66	V3	1,34	50,7	46,6	43,1	-	-

V1: Verzadiging op zandbad

V2: Berekening (Pv-start is de Pv-waarde waarbij de monsters op de pF-bak geplaatst zijn)

V3: Verzadiging onder vacuüm

$r_d$ : Droog volumegewicht

B1: Bemonsteringsdiepte: 0,10-0,15 m-mv

B2: Bemonsteringsdiepte: 0,35-0,40 m-mv

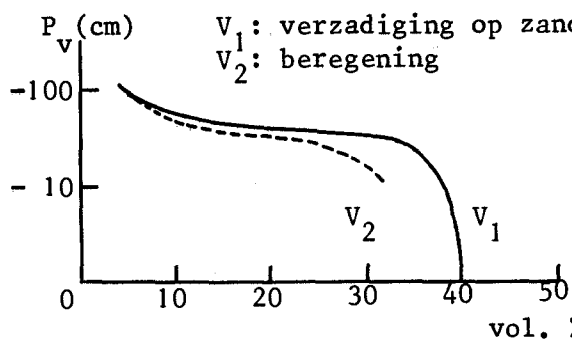


Fig. 6a. Vochtkarakteristieken van grof zand met een droog volumegewicht van  $1,30 \text{ g.cm}^{-3}$

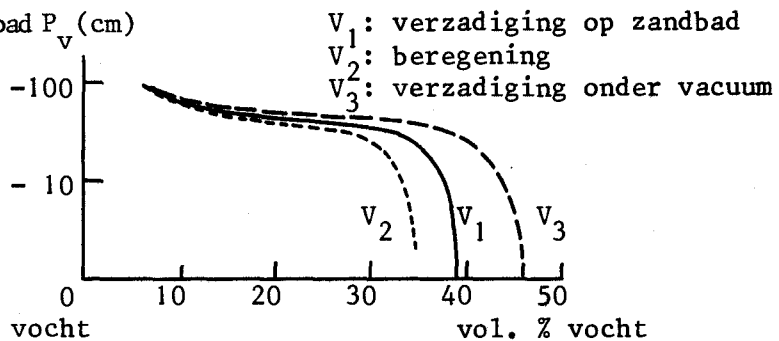


Fig. 6b. Vochtkarakteristieken van grof zand met een droog volumegewicht van  $1,53 \text{ g.cm}^{-3}$

De wijze van verzadiging heeft een duidelijke invloed op het verloop van het vochtgehalte. Het verschil tussen vochtkarakteristieken V1 en V2 is het grootst voor de monsters met lage dichtheid. Het verloop van vochtkarakteristiek V2 is mogelijk afhankelijk van de vochtspanning, waarbij de curve aanvangt ( $P_v$ -start). Verzadiging onder vacuüm heeft over het hele traject tot  $P_v = -100 \text{ cm}$  een hoger vochtgehalte tot gevolg. Bij  $P_v = -100 \text{ cm}$  zijn de verschillen vrijwel opgeheven.

Verzadiging in vacuüm van de komkleimonsters geeft in vergelijking met verzadiging op het zandbad, met uitzondering van monsternr. 66, een hoger vochtgehalte te zien.

De verschillen in vochtgehalten tussen de monsters die verzadigd zijn op het zandbad en de monsters die berekend worden zijn zeer gering. Voor de monsters 0,10-0,15 m-mv heeft berekening zelfs een hoger vochtgehalte tot gevolg. Dit kan als oorzaken hebben:

- op het zandbad heeft nog geen volledige verzadiging plaatsgevonden
- de monsters zijn te lang berekend.

### 2.3. Metingen in grofzand

De cuptensiometer blijft gedurende het gehele experiment in de monsters en wordt op de pressure transducer aangesloten zolang als nodig is voor de meting.

De priktensiometer wordt bij een op de pF-bak aangelegde onderdruk van 31,6 en 50 cm vrijwel verzadigd ingestoken. Bij een onderdruk van 100 cm wordt de priktensiometer voor het insteken op een bepaalde onderdruk gebracht door de tensiometer in een doek te houden, wat waterafgifte van de tensiometer tot gevolg heeft.

De vochtspanningsmeting wordt beëindigd zodra een constante waarde, de eindwaarde, is bereikt.

Bij een aangelegde onderdruk van 31,6 en 50 cm  $H_2O$  wordt de eindwaarde, gemeten met de priktensiometer, in de monsters met  $r_d=1,53 \text{ g.cm}^{-3}$  vrijwel direct bereikt, de monsters met  $r_d=1,30$  na ca. 1 en 2 minuten (fig. 7).

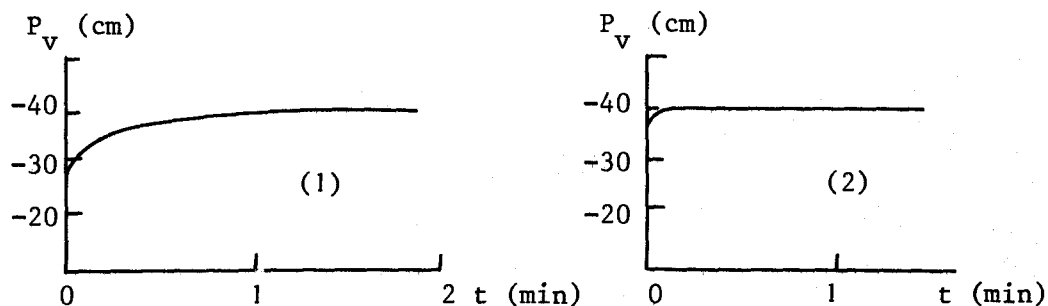


Fig. 7. Vochtspanning ( $P_v$ ), gemeten met de priktensiometer in grofzand met  $r_d=1,30$  (1) en  $r_d=1,53 \text{ g.cm}^{-3}$  (2) bij een aangelegde onderdruk van 31,6 cm

Het verschil in insteltijd kan een gevolg zijn van de grotere onverzadigde doorlatendheid van de monsters met  $r_d=1,53 \text{ g.cm}^{-3}$ . Ook kan dilatatie een rol spelen. Bij dichtgepakte zanden treden door het insteken van de priktensiometer schuifspanningen op waardoor een volumevergroting ontstaat en daardoor een verhoging van de onder-

druk, die door het toevloeien van water echter snel wordt opgeheven.

De gemeten vochtspanning is gelijk aan de ingestelde onderdruk. Dit geldt eveneens voor de tensiometercup, de eindwaarde wordt voor de monsters met  $r_d = 1,53 \text{ g.cm}^{-3}$  vrijwel onmiddellijk bereikt, voor de monsters met  $r_d = 1,30 \text{ g.cm}^{-3}$  bij  $P_v = -31,6 \text{ cm}$  na ca. 1 min, bij  $P_v = -50 \text{ cm}$  na ca. 2 min. Onderdrukverhoging ten gevolge van de aansluiting op de pressure transducer (1.2) is niet geconstateerd.

De wijze van verzadiging heeft geen invloed op de gemeten insteltijd.

Bij een aangelegde onderdruk van 100 cm  $\text{H}_2\text{O}$  komen door een toename van de weerstand in de grond grotere insteltijden voor (tabel 8).

Tabel 8. Insteltijd (t in min.) en gemeten vochtspanning ( $P_v$  in cm) in grofzand bij een aangelegde onderdruk van 100 cm

ring- nr.	$r_d$ $\text{g.cm}^{-3}$	prik tensiometer			cu ptensiometer				
		t	$P_v$ -begin	$P_v$ - $\frac{1}{2}$ t	$P_v$ -eind	t	$P_v$ -begin	$P_v$ - $\frac{1}{2}$ t	$P_v$ -eind
72	1,20	29	-51	-92	-100	10	-125	-112	-107
85	1,33	4	-122	-103	-101	12	-125	-114	-105
"	"	25	-56	-90	-99	-	-	-	-
19	1,30	6	-156	-162	-100	-	-	-	-
22	1,30	5	-131	-110	-105	-	-100	-100	-100
18	1,51	5	-122	-98	-96	5	-125	-110	-106
43	1,54	5	-117	-96	-94	12	-88	-94	-98
52	1,52	5	-130	-103	-100	20	-200	-121	-111
69	1,53	16	-70	-92	-96	8	-130	-117	-109
70	1,53	2	-100	-96	-95	6	-128	-112	-109
"	"	13	-63	-91	-93	-	-	-	-
71	1,52	7	-141	-101	-97	4	-76	-95	-100

$P_v$ -begin (prik tensiometer): de vochtspanning van de prik tensiometer voor het inbrengen in de grond

$P_v$ -begin (cu ptensiometer) : de vochtspanning van de cu ptensiometer onmiddellijk na aansluiting op de pressure transducer

$P_v$ - $\frac{1}{2}$ t: vochtspanning, gemeten na de halve insteltijd

Uit de tabel blijkt dat de insteltijd afhankelijk is van de onderdruk waarmee de priktensiometer wordt ingestoken (Pv-begin). De monsters met  $r_d=1,53$  hebben in vergelijking met de monsters met  $r_d = 1,30 \text{ g.cm}^{-3}$  bij een laag Pv-begin van de priktensiometer een kortere insteltijd. Dit is een gevolg van het feit dat de monsters met een hoge dichtheid onmiddellijk na het insteken een grotere toename van de gemeten vochtspanning vertonen. Ook heeft het Pv-begin van de priktensiometer, waarbij geen onmiddellijke toename van de vochtspanning optreedt voor de monsters met grote dichtheid een hogere waarde (fig. 8). Bij een nog hogere Pv-beginwaarde neemt de gemeten vochtspanning eerst af om vervolgens, indien de eindwaarde nog niet bereikt is, weer toe te nemen (fig. 9). De insteltijd wordt aanmerkelijk verkort door aan de priktensiometer voor het insteken een Pv-begin-waarde te geven die hoger is dan de eindwaarde (tabel 8, fig. 9). Uit de gegevens van tabel 9 is af te leiden dat de vochtspanning na de halve insteltijd zeer traag verloopt en dat de eindwaarde van de meeste monsters op enkele centimeters na bereikt is. De metingen verricht in de monsters nr. 70 en 85 tonen aan dat er nauwelijks van hysteresis sprake is: het verschil tussen de gemeten eindwaarde bedraagt slechts  $2 \text{ cm H}_2\text{O}$ .

De hysteresis invloed doet zich bij de tensiometercup duidelijk gelden. Wanneer men de tensiometer op de pressure transducer aansluit, ontstaat in het meetsysteem een onderdrukverhoging (1.2), die door aansluiting op de watervoorraad ten dele opgeheven kan worden. De gemeten eindwaarde en de insteltijd blijken afhankelijk te zijn van de onderdruk in het meetsysteem bij het begin van de meting (tabel 8).

#### 2.4. M e t i n g e n i n k o m k l e i

De komkleimonsters zijn in het veld gestoken. In een aantal monsters is naast de tensiometercup een priktensiometer aangebracht. De priktensiometer wordt afgesloten door een kraantje om drukveranderingen in de tensiometer, ten gevolge van aansluiting op de pressure transducer, te voorkomen. Men opent het kraantje alleen als de priktensiometer en de pressure transducer op elkaar zijn

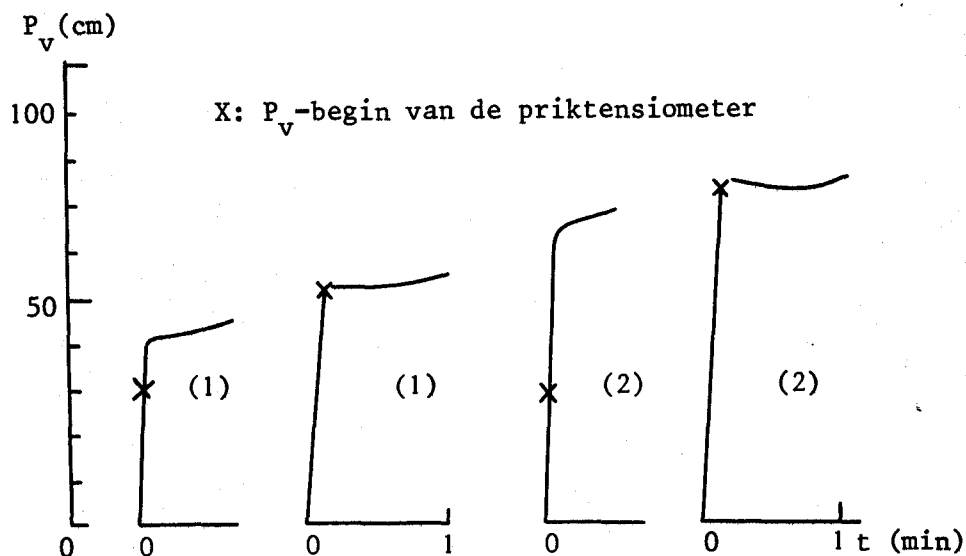


Fig. 8. Gemeten vochtspanning ( $P_v$  in cm) bij verschillende  $P_v$ -beginwaarden van de priktensiometer in grofzand met  $r_d=1,30$  (1) en  $r_d=1,53 \text{ g.cm}^{-3}$  (2) bij een aangelegde onderdruk van 100 cm

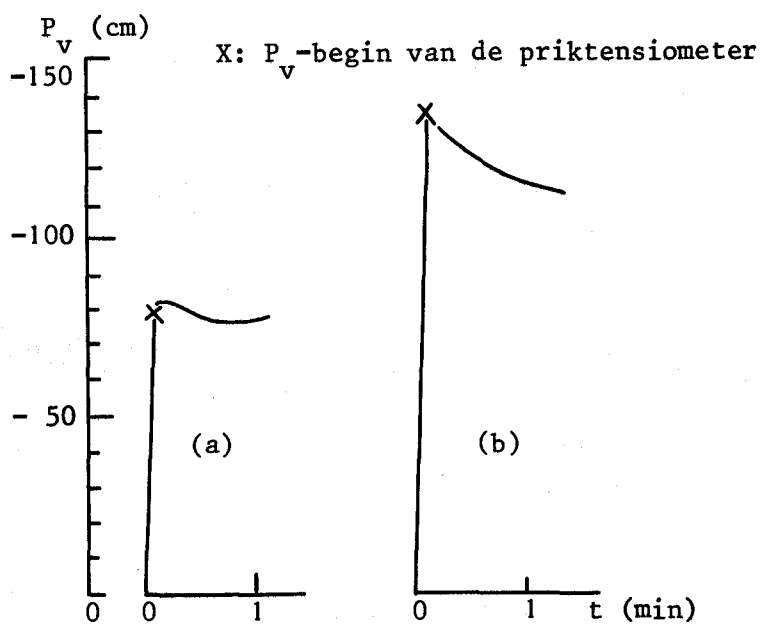


Fig. 9. Gemeten vochtspanning ( $P_v$  in cm) in grofzand bij lagere (a) en hogere (b)  $P_v$ -beginwaarden van de priktensiometer dan de te verwachten eindwaarde (=100 cm)

aangesloten. Het breken van de priktensiometer bij het inbrengen in de komkleigrond wordt voorkomen door met een pennetje dat een iets kleinere diameter dan de tensiometer zelf heeft, voor te prikken.

De invloed van de weerstand die ondervonden wordt bij het watertransport van de tensiometer naar de omringende grond wordt onderzocht door in een aantal monsters rondom de cup- en priktensiometer löss aan te brengen en vervolgens de insteltijden te vergelijken.

De vochtspanningsmetingen zijn verricht bij een op de pF-bak aangelegde onderdruk van 31,6 en 100 cm. De meetresultaten staan vermeld in tabel 9.

Bij vergelijking van de insteltijden wordt ervan uitgegaan dat de doorlatendheid van de priktensiometer en de capaciteit van het meetsysteem tijdens de metingen niet van grootte veranderen, waardoor de insteltijd bij een zekere waarde van de vochtspanning bepaald wordt door de onverzadigde doorlatendheid van de grond. Dit heeft de toename van de insteltijd bij een verhoging van de aangelegde onderdruk tot gevolg.

De onderdrukverhoging ( $P_v$ -begin) in het meetsysteem treedt op onder invloed van het aansluiten van de cup-tensiometer op de pressure transducer (zie 1.2). De met de cup-tensiometer gemeten vochtspanning heeft over het algemeen een te hoge waarde (niet overeenkomend met de aangelegde onderdruk). Na de halve insteltijd ( $P_v - \frac{1}{2}t$ ) is de eindwaarde in de meeste gevallen op enkele cm na bereikt.

De vochtspanningsmetingen, verricht met de priktensiometer, geven een aanmerkelijk grotere insteltijd te zien en de insteltijden kunnen onderling sterk verschillen. Bovendien treedt een grotere afwijking van de aangelegde onderdruk op. Opvallend is het feit dat bij de monsters die onder vacuum verzadigd zijn een eindwaarde wordt gemeten die redelijk overeenkomt met de aangelegde onderdruk. Als mogelijke oorzaak kan worden aangewezen dat door verzadiging onder vacuum alle ingesloten lucht wordt verwijderd, wat een toename van de doorlatendheid tot gevolg heeft.



Tabel 9. Insteltijd (t in min.) en gemeten vochtspanning (Pv in cm) in komklei

ring- nr.	V	aangelegde onderdruk 31,6 cm						aangelegde onderdruk 100 cm						
		cuptensiometer			prik tensiometer			cuptensiometer			prik tensiometer			
		t	Pv-begin	Pv- $\frac{1}{2}$ t	Pv-eind	t	Pv- $\frac{1}{2}$ t	Pv-eind	t	Pv- $\frac{1}{2}$ t	Pv-eind	t	Pv- $\frac{1}{2}$ t	Pv-eind
B1 26	V1	12	-54	-40	-37	25	-47	-41	34	-106	-103	44	-121	-110
57	V1 L	1	-28	-31	-32	19	-46	-40	11	-108	-106	29	-122	-116
73	V2	6	-45	-38	-36	8	-45	-44	36	-113	-110	12	-122	-119
20	V2 L	2	-34	-33	-32	-	-	-	10	-109	-106	14	-105	-109
44	V3	10	-61	-40	-35	5	-36	-33	18	-112	-109	15	-107	-110
74	V3 L	1	-29	-30	-31	6	-27	-30	9	-107	-104	10	-96	-100
B2 49	V1	5	-39	-37	-35	-	-	-	14	-109	-104	60	-100	-116
25	V1 L	1	-28	-29	-32	20	-45	-40	15	-104	-102	28	-101	-111
87	V2	8	-67	-36	-34	7	-30	-35	21	-107	-104	10	-113	-118
30	V2 L	3	-39	-35	-31	7	-39	-41	19	-113	-109	60	-98	-112
45	V3	4	-36	-35	-34	28	-25	-30	23	-106	-106	51	-89	-98
66	V3 L	1	-29	-31	-32	25	-39	-34	14	-103	-105	21	-102	-109

B1: bemonsteringsdiepte 0,10-0,15 m-mv. B2: idem, 0,35-0,40 m-mv

V1: verzadiging op zandbad. V2: beregening. V3: verzadiging onder vacuum

L : löss rondom de tensiometercup

Pv-begin enz.: zie tabel 8

#### 2.4.1. Invloed van het omhullingsmateriaal

De onderdrukverhoging (Pv-begin) in het meetsysteem, die onmiddellijk na aansluiting van de tensiometercup op de P.T. optreedt, is afhankelijk van de doorlatendheid van de omringende grond (zie 1.2). Zoals uit tabel 9 blijkt is deze Pv-begin-waarde voor de tensiometercup omgeven met löss aanmerkelijk lager. Door het omhullingsmateriaal wordt mogelijk ook een beter contact tussen grond en tensiometerwand bewerkstelligd. De insteltijd wordt aanzienlijk verkort en de gemeten eindwaarde komt overeen met de aangelegde onderdruk (31,6 cm).

Bij een onderdruk van 100 cm wordt met beide cuptensiometers een te hoge vochtspanning gemeten. Dit wordt o.a. veroorzaakt door hysteresis.

#### 2.4.2. Hysterese

Hysterese kan optreden als een vochtspanningsmeting gestart wordt met lagere en hogere onderdrukken in het meetsysteem dan de te verwachten eindwaarde (de vochtspanning van de grond). Het verschil tussen de waarden, gemeten in water, bedraagt uitgaande van een lagere en hogere onderdruk ca. 1% van het schaalbereik. In tabel 10 staan de gegevens vermeld van een aantal vochtspanningsmetingen in komklei bij verschillende Pv-beginwaarden van de cuptensiometer.

Tabel 10. Gemeten vochtspanning (Pv in cm) en insteltijd (t in min.) in komklei bij verschillende Pv-beginwaarden van de cuptensiometer (aangelegde onderdruk 31,6 cm en 100 cm)

ringnr.	t	Pv-begin	Pv- $\frac{1}{2}$ t	Pv-eind
44	9	0	-28	-32
	10	-61	-40	-35
73	33	0	-91	-100
	36	-123	-113	-110
44	23	0	-96	-105
	18	-214	-112	-109
30	23	0	-92	-103
	19	-135	-113	-109
45	20	0	-94	-100
	23	-177	-109	-107

Pv-begin enz.: zie tabel 8

De verhoogde onderdruk (Pv-begin) in het meetsysteem treedt op onder invloed van het aansluiten van de cup-tensiometer op de P.T. en kan door aansluiting van het meetsysteem op de watervoorraad - ten-dele - opgeheven worden.

De priktensiometer kan vóór het insteken op een bepaalde onderdruk (Pv-begin) gebracht worden door deze in een doek te houden, wat waterafgifte van de tensiometer tot gevolg heeft. Bij een aangelegde onderdruk van 31,6 cm is de priktensiometer verzadigd ingestoken, bij een onderdruk van 100 cm is de priktensiometer voor het insteken steeds op een bepaalde vochtspanning gebracht (tabel 11).

Tabel 11. Gemeten vochtspanning (Pv in cm) en insteltijd (t in min.) in komklei bij verschillende Pv-beginwaarden van de priktensiometer (aangelegde onderdruk = 100 cm)

ringnr.	t	Pv-begin	Pv- $\frac{1}{2}$ t	Pv-eind
44	15	-31	-107	-116
	43	-137	-119	-114
74	10	-46	-96	-100
	33	-148	-119	-110

Indien de priktensiometer wordt ingestoken met een onderdruk lager (minder negatief) dan de eindwaarde wordt tijdens de evenwichtsinstelling de grond rondom de priktensiometer iets vochtiger, waardoor de onverzadigde doorlatendheid en de instelsnelheid toenemen. Bij de metingen, vermeld in tabel 9, is de priktensiometer steeds met een lage Pv-begin-waarde ingebracht.

Naast hysteresis kan ook versmering van de grond rondom de priktensiometer de te hoog gemeten vochtspanning veroorzaken.

#### 2.4.3. Analyse van het vochtspanningsverloop

De priktensiometer is bij een aangelegde onderdruk van 31,6 cm steeds verzadigd ingestoken. Het inbrengen van de priktensiometer kan gepaard gaan met: (fig. 10)

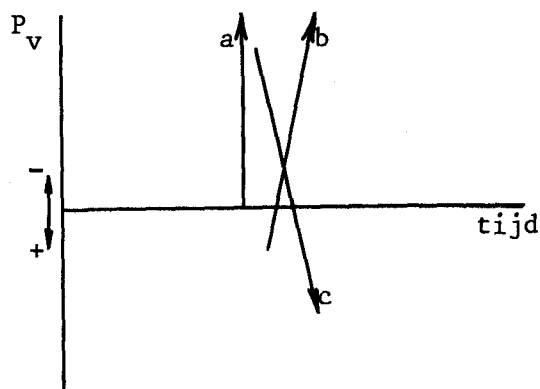


Fig. 10. Vochtspanning ( $P_v$ ) tijdens het inbrengen van de prik-  
tensiometer in komklei

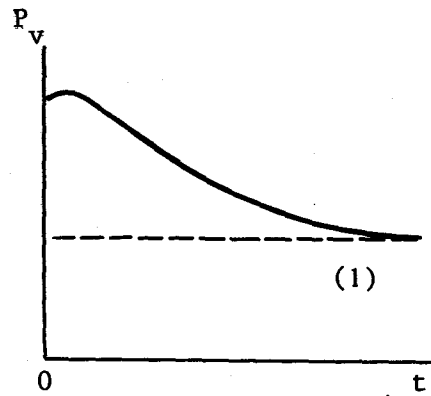
- a. toename (meer negatief) van de gemeten vochtspanning onder invloed van de onderdrukgradiënt tussen tensiometer en grond.
- b. toename van de vochtspanning ten gevolge van dilatatie in de grond rondom de tensiometer.
- c. afname van de vochtspanning. Door het samendrukken van poriën ontstaat een verhoogde waterdruk. De snelheid waarmee deze verhoogde waterdruk wordt opgeheven is afhankelijk van de onverzadigde doorlatendheid van de grond.

Het inbrengen van de priktensiometer kan daarnaast verdichting en versmering van de grond rondom de tensiometer tot gevolg hebben, wat de doorlatendheid negatief beïnvloedt.

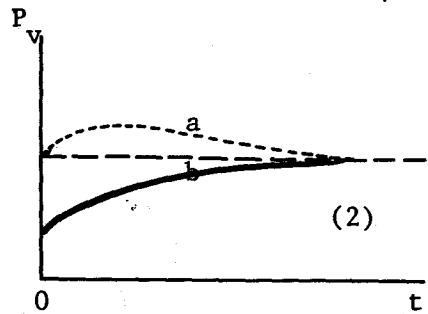
De vochtspanning, gemeten door de pressure transducer, wordt geregistreerd met behulp van een recorder.

Met betrekking tot het vochtspanningsverloop kunnen onderscheiden worden: (fig. 11)

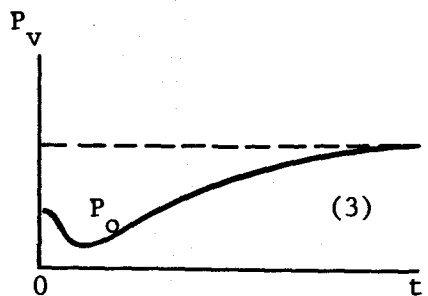
1. Onmiddellijke toename van de gemeten vochtspanning onder invloed van de onderdrukgradiënt (a) en dilatatie (b). Vervolgens neemt de vochtspanning af tot de eindwaarde is bereikt.
2. Door (c) een minder grote toename van de vochtspanning.
3. Er vindt aanvankelijk nog enig watertransport plaats van prik-  
tensiometer naar omringende grond. Door het samendrukken van poriën



ringnr	diepte(m)	$P_o$ (cm)	t(min)	vol.% vocht
26	0,10-0,15	-100	25	43,6
57	0,10-0,15	- 68	19	45,4
66	0,35-0,40	- 67	25	46,6



a	25	0,35-0,40	- 40	20	48,5
	44	0,10-0,15	- 24	5	47,3
	73	0,10-0,15	- 22	8	46,9
b	30	0,35-0,40	- 23	7	48,5
	74	0,10-0,15	- 20	6	47,6



87	0,35-0,40	- 16	7	47,9
45	0,35-0,40	- 4	28	50,2

$P_o$  gemeten vochtspanning, onmiddellijk na het insteken van de priktensiometer (cm eindwaarde)

Fig. 11. Vochtspanningsverloop ( $P_v$  in cm) en gegevens van metingen, verricht met de priktensiometer in komklei bij een aangelegde onderdruk van 31,6 cm

ontstaat echter rondom de tensiometer een verhoogde waterdruk waardoor de vochtspanning sterk afneemt om vervolgens weer toe te nemen tot de eindwaarde is bereikt.

In de figuur is naast het monster, waarbij het vochtspanningsverloop is waargenomen, de vochtspanning onmiddellijk na het insteken van de priktensiometer ( $P_0$ ), de insteltijd ( $t$ ) en het vochtgehalte ( $\theta$ ) vermeld.

Uit de gegevens, vermeld in fig. 11, is af te leiden:

- bij monsters 0,10-0,15 m-mv treedt vochtspanningsverloop (1) op bij een relatief laag vochtgehalte. Vochtspanningsverloop (3) komt niet voor. Dit is een gevolg van het feit dat deze monsters in vergelijking met de monsters van 0,35-0,40 m-mv een grotere doorlatendheid hebben
- bij monsters 0,35-0,40 m-mv treedt vochtspanningsverloop (1) op bij een relatief laag en (3) bij een relatief hoog vochtgehalte
- de insteltijd is afhankelijk van de vochtspanningstoename, die onmiddellijk na het insteken van de priktensiometer optreedt. Vochtspanningsverloop (1) gaat gepaard met lange insteltijden.

Met betrekking tot het vochtspanningsverloop (fig. 11) bij een aangelegde onderdruk van 100 cm kan men stellen dat vochtspanningsverloop (1) en (2) bij de monsters 0,10-0,15 m-mv en vochtspanningsverloop (2) en (3) bij de monsters 0,35-0,40 m-mv optreedt.

Bij de monsters nr. 49 en 30 (bemonsteringsdiepte 0,35-0,40 m-mv vindt onmiddellijk na het insteken van de priktensiometer, mogelijk ten gevolge van een zeer geringe doorlatendheid, een grote afname van de vochtspanning plaats. Indien de priktensiometer verzadigd wordt ingestoken geeft dit aanvankelijk zelfs een positieve vochtspanning te zien. In tabel 12 is de vochtspanning vermeld die gemeten is na vijf minuten.

Tabel 12. Vochtspanning, gemeten na 5 min. (Pv.t=5 in cm) in klei bij verschillende Pv-begin-waarden van de priktensiometer (aangelegde onderdruk = 100 cm)

ringnr.	Pv-begin	Pv.t=5
49	0	-27
	-148	-62
30	0	-26
	-133	-52

Uit de tabel blijkt dat het evenwicht tussen priktensiometer en omringende grond zich zeer langzaam instelt, wat zeer grote insteltijden tot gevolg heeft (zie tabel 9).

#### 2.4.4. Oorzaken van een te hoog gemeten vochtspanning

Als oorzaken van een te hoog gemeten vochtspanning (niet overeenkomend met de aangelegde onderdruk) zijn aan te wijzen:

- hysteresis. Met een lagere en hogere Pv-begin-waarde wordt een verschillende eindwaarde gemeten (tabel 10 en 11)
- evenwicht tussen tensiometer en omringende grond is nog niet bereikt. Uit de gemeten vochtspanning bij de helft van de insteltijd ( $P_{\frac{1}{2}t}$ -waarde) blijkt dat de evenwichtsinstelling aan het eind van de meting zeer traag (logaritmisch) verloopt. Het is ook mogelijk, dat bij kleine vochtspanningsgradiënten tussen tensiometer en grond de watermoleculen door elektrische krachten van de kleideeltjes vastgehouden worden
- versmering van de grond rondom de tensiometer, veroorzaakt een verhoging (meer negatief) van de vochtspanning. Indien geen evenwicht is bereikt tussen versmeerde en omringende grond kan dat aanleiding geven tot een te hoog gemeten vochtspanning.

De factor evenwichtsinstelling lijkt van minder groot belang aangezien de eindwaarde (=110 cm) bij monsternr. 26 ruim 30 min. constant bleef.

#### 2.4.5. Metingen met de permanent ingestoken priktensiometer

De gegevens van de metingen, verricht met de permanent ingestoken priktensiometer, zijn weergegeven in tabel 13.

Tabel 13. Meetgegevens van permanent ingebrachte priktensimeters (A) en priktensimeters omgeven door löss (B) in komklei

ring- nr.	t min.	Pv-begin cm	Pv- $\frac{1}{2}$ t cm	Pv-eind cm	ring- nr.	t min.	Pv-begin cm	Pv- $\frac{1}{2}$ t cm	Pv-eind cm
A 26	5	0	-32	-35	26	11	-50	-103	-107
25	9	0	-30	-35	25	18	-88	-108	-112
87	7	0	-31	-35	74	16	-37	-105	-112
87	9	-76	-51	-38	87	16	-50	-108	-112
B 74	11	0	-28	-31	74	16	0	-102	-107
25	6	0	-30	-33	25	18	-29	-109	-114
45	2	0	-31	-34	45	28	-25	-89	-96
45	8	-78	-39	-37	-	-	-	-	-

Pv-begin enz.: zie tabel 8

Vergelijking met de in tabel 9 vermelde insteltijden laat zien dat de vochtspanningsveranderingen die bij het insteken van de priktensiometer optreden over het algemeen een vergroting van de insteltijd tot gevolg hebben. Door het aanbrengen van een omhullingsmateriaal neemt de instelsnelheid toe.

#### 2.5. Vergelijking van gemeten en berekende insteltijd

Vergelijking van de insteltijden gemeten in grofzand met de in tabel 6 berekende insteltijden laat zien dat bij een aangelegde onderdruk van 31,6 cm de gemeten insteltijden in de monsters met een hoge dichtheid overeenkomen met de berekende insteltijden.

Bij een aangelegde onderdruk van 100 cm bedraagt de onverzadigde doorlatendheid (RIJTEMA, 1969) in grofzand  $1,46 \cdot 10^{-9}$  cm.sec<sup>-1</sup>.



Indien het drukverschil tussen tensiometer en grond op  $t=0$  gelijk is aan  $h_0=30$  cm en na tijd  $t$   $h_t=1$  cm dan is de insteltijd (formule 9)

voor de cuptensiometer:  $t_0-t = 209$  sec.

voor de priktensiometer:  $t_0-t = 650$  sec.

De insteltijden, gemeten met de cuptensiometer en vermeld in tabel 8 zijn in vergelijking met de berekende insteltijden aanmerkelijk groter. Mogelijk is het volume grond dat bij het watertransport tijdens de evenwichtsinstelling betrokken is, groter. Het kan ook zijn dat de aangenomen  $k$ -waarde onjuist is.

De insteltijden, gemeten met de priktensiometer (tabel 8) bij lage  $P_v$ -begin-waarden, lijken redelijk overeen te komen met de berekende insteltijden (monsternr. 70). Dit geldt althans voor de monsters met hoge dichtheid.

Vergelijking van de insteltijden, gemeten in *k o m k l e i* met de in tabel 6 berekende insteltijden, laat zien dat zowel bij een onderdruk van 31,6 cm als van 100 cm in de praktijk aanmerkelijk grotere insteltijden voorkomen. Dit kan een gevolg zijn van:

- de vochtspanningsveranderingen die optreden onmiddellijk na het insteken van de priktensiometer
- versmering en verdichting van de grond rondom de tensiometer, wat een afname van de onverzadigde doorlatendheid veroorzaakt
- het volume grond waarover de weerstand berekend is (1,4).

Het is mogelijk dat het volume te klein geschat is. Vergroting van dit volume geeft echter een relatief kleine toename van de insteltijd te zien, zoals blijkt uit onderstaande berekening:

Indien het volume grond gelijk is aan  $10^5(h_0-h_t) C$  en de meting uitgevoerd wordt met de priktensiometer ( $P_v$ -begin=0) dan is bij een heersende vochtspanning van -30 cm:  $r_{ug}=1,31$  cm;  $A_g=0,114$   $cm^{-1}$ ! De insteltijd ( $t$ ) bedraagt dan 4,9 sec. Bij een vochtspanning van -200 cm geldt:  $r_{ug}=3,42$  cm;  $A_g=0,152$   $cm^{-1}$ ;  $t=157$  sec.

Tenslotte kan - en dit geldt vooral voor de cuptensiometer - een slecht contact tussen tensiometer en omringende grond van invloed zijn op de grootte van de insteltijd.

## 2.6. Vochtspanningsmetingen in de zodelaag

De vochtspanningsmetingen zijn uitgevoerd in een zand-, zware zavel- en komkleigrond (hfdst. 3). Op een diepte van 0,10 en 0,20 m-mv is de vochtspanning, behalve met de cuptensiometer, ook regelmatig met de priktensiometer bepaald. De meetresultaten zijn vermeld in tabel 14.

Tabel 14. Vochtspanning (cm) gemeten met de cuptensiometer (A) en de priktensiometer (B) op 0,10 en 0,20 m-mv

Diepte m-mv	A		B	
	0,10	0,20	0,10	0,20
Zandgrond	-30	-50	-31	-54
	-46	-61	-46	-71
	-58	-65	-65	-79
	-68	-84	-80	-90
Zware zavel	-46	-24	-52	-32
	-49	-43	-57	-53
	-53	-50	-67	-62
Komklei	-26	-11	-45	-27
	-46	-32	-60	-46
	-54	-34	-62	-50

In het voorafgaande is gebleken dat in komklei met de priktensiometer over het algemeen een te hoge eindwaarde wordt gemeten. Dit geldt in mindere mate ook voor de zware zavel (zie tabel 15). Daarnaast heeft een te snelle aflezing, d.w.z. wanneer zich geen evenwicht heeft ingesteld tussen tensiometer en grond, bij een vochtspanningsverloop als in fig. 12 een te hoog gemeten vochtspanning tot gevolg.

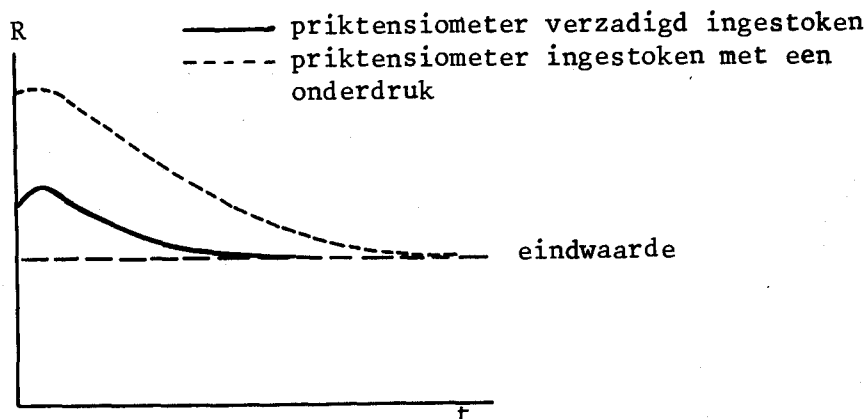


Fig. 12. Vochtspanningsverloop (Pv) van meting met prik tensiometer

Indien aan de prik tensiometer voor het insteken een onderdruk wordt gegeven, vindt een versterking van dit effect plaats (fig. 12).

Andere oorzaken van een met de prik tensiometer te hoog gemeten vochtspanning kunnen zijn: temperatuurgevoeligheid van het meet-systeem, waterverlies ten gevolge van verdamping door de verbindingsslangen en plaatselijke verschillen in vochtspanning in de bovengrond.

### 3. VELDMETINGEN

#### 3.1. Inleiding

De vochtspanningsmetingen zijn verricht in zand- zware zavel- en komkleigrond (voor profielbeschrijving zie bijlage 1). De gebruikte tensiometercups hebben een lengte van 7 cm en een inwendige resp. uitwendige diameter van 1,4 en 1,9 cm. De cups zijn op ca. 1 m afstand van elkaar, in twee series ingegraven op een diepte van 10, 20, 40, 60, 80 en 100 cm. Het freatisch niveau wordt met behulp van een grondwaterstandsbuis gemeten.

Van iedere laag is ter hoogte van de tensiometercup het droog volumegewicht voor omrekening van gewichtspercentages in volumepercentages en het verband tussen vochtspanning en vochtgehalte (pF-curve) bepaald. Voor deze bepalingen is in drievoud bemonsterd.

Bij enkele punten van de pF-curve zijn in de monsters met de priktensiometer vochtspanningsmetingen verricht.

In het veld worden gelijktijdig met de vochtspanningsmetingen in tweevoud gewichtsmonsters genomen voor de bepaling van het vochtgehalte. Bovendien zijn regelmatig volumemonsters gestoken. De metingen zijn in de periode van februari tot april wekelijks verricht. Het proefveld is in de maand april (na een regenperiode) met een stuk plastic (15 x 15 m) afgedekt om indringing van neerslag en verdamping uit te sluiten. In deze periode zijn de vochtspanningsmetingen en vochtgehaltebepalingen regelmatig uitgevoerd.

Bij de verwerking van de meetresultaten is steeds het gemiddelde van de twee series genomen. Uit deze meetgegevens valt af te leiden:

- het verband tussen vochtspanning en vochtgehalte, karakteristiek voor een bepaalde laag. Dit wordt vergeleken met de in het laboratorium bepaalde pF-curve
- de vochtspanningsprofielen die met betrekking tot de stromingsrichting geanalyseerd kunnen worden
- de onverzadigde doorlatendheid voor de periode waarin het proefveld is afgedekt. In deze periode onttrekt het op de drie proefvelden aanwezige gras nauwelijks of geen water aan de grond.

Bij de vochtspanningsmetingen fungeert het maaiveld als referentieniveau. Om de vochtspanning op een bepaalde diepte te kunnen vaststellen moet de aflezing (van de voltmeter) op de afstand tussen tensiometer en referentieniveau gecorrigeerd worden. Voor de instelling op het referentieniveau gebruikt men een van de verbindingsslagen van de pressure transducer. Het uiteinde van deze slang plaatst men in een reageerbuis, gevuld met water. De watermeniscus bevindt zich op gelijke hoogte met het maaiveld. Na elke meting wordt de instelling op het referentieniveau gecontroleerd en eventueel gecorrigeerd. De standaarduitslag van de pressure transducer dient eveneens regelmatig gecontroleerd te worden.

Het verdient aanbeveling om, indien zich lucht in de slangen van de tensiometer bevindt en die daarom moeten worden doorgespoeld, de metingen pas na enkele dagen te hervatten, zodat het evenwicht tussen tensiometer en grond zich opnieuw kan instellen.

### 3.2. V o c h t s p a n n i n g s m e t i n g e n b i j e n k e l e p u n t e n v a n d e p F - c u r v e

Van een aantal ringmonsters is bij evenwicht met de aangelegde onderdruk naast het vochtgehalte (pF-curve) ook de vochtspanning bepaald. De vochtspanningsmetingen zijn uitgevoerd met de priktensiometer bij een aangelegde onderdruk van 31,6, 100 en 200 cm H<sub>2</sub>O.

In tabel 15 zijn de eindwaarde, de insteltijd en de gemeten vochtspanning na vijf minuten en na de halve insteltijd vermeld.

Uit de tabel blijkt het volgende:

- bij een aangelegde onderdruk van 31,5 en 100 cm worden de grootste insteltijden bij komklei aangetroffen
- voor de komkleimonsters, en in mindere mate ook voor de zware zavelmonsters, meet men te hoge eindwaarden
- bij een aangelegde onderdruk van 200 cm wordt in alle monsters een hogere eindwaarde gemeten
- door verhoging van de onderdruk van 100 naar 200 cm treedt bij de zandige monsters een zeer grote toename van de insteltijd op
- bij Pv=-200 cm hebben de zandige monsters over het algemeen een hogere Pv.t=5-waarde
- na het bereiken van de halve insteltijd verloopt de evenwichtsinstelling tussen tensiometer en grond zeer traag.

Aangenomen dat de capaciteit van het meetsysteem en de doorlatendheid van de priktensiometer tijdens de metingen niet van grootte veranderen, dan wordt de insteltijd bij een zekere waarde van de vochtspanning bepaald door de onverzadigde doorlatendheid van de grond. Dit heeft bij lage vochtspanningen de grotere insteltijden van de komkleimonsters tot gevolg, evenals de toename van de insteltijd bij verhoging van de aangelegde onderdruk.

Zoals verwacht kan worden zal de onverzadigde doorlatendheid van de zandgrond aanvankelijk sneller dalen (bij verhoging van de onderdruk) dan van de zware zavel en de komklei. Dit komt duidelijk tot uitdrukking in de gemeten insteltijden. Van monsternr. 2815 (fijn zand) is de onverzadigde doorlatendheid bij Pv=-100 cm reeds aanmerkelijk afgenomen.

Tabel 15. Metingen in monsterringen met fijn zand, zware zavel en komklei, verricht met de priktensiometer bij een aangelegde onderdruk van 31,6, 100 en 200 cm H<sub>2</sub>O

grondsoort	ringnr.	bemonsterings- diepte	$r_d$	31,6 cm			100 cm			200 cm			
				$t$	Pv-eind	$t$	Pv-t=5	Pv- $\frac{1}{2}t$	Pv-eind	$t$	Pv-t=5	Pv- $\frac{1}{2}t$	Pv-eind
				m-mv	$g.cm^{-3}$	min.	cm	min.	cm	cm	cm	min.	cm
fijn zand	2454	0,10	1,48	< 1	-31	3	-	-97	-99	35	-190	-224	-240
	2707	0,20	1,32	< 1	-31	3	-	-94	-96	27	-204	-234	-252
	2702	0,40	1,27	< 1	-26	3	-	-96	-98	20	-234	-245	-260
	2876	0,60	1,38	< 1	-30	3	-	-94	-100	39	-187	-237	-256
	2815	1,00	1,61	< 1	-31	9	-92	-91	-99	57	-147	-234	-269
zware klei	2733	0,10	1,35	8	-38	15	-94	-99	-110	33	-170	-215	-236
	2739	0,40	1,41	5	-35	13	-93	-98	-107	34	-126	-195	-222
	2778	0,60	1,36	4	-35	11	-93	-95	-101	25	-165	-207	-225
	2737	0,80	1,29	5	-34	21	-76	-88	-100	20	-182	-217	-234
komklei	1933	0,10	1,11	15	-42	21	-92	-104	-122	21	-183	-212	-228
	1991	0,20	1,22	-	-	28	-18	-70	-105	-	-	-	-
	1983	0,40	1,31	20	-45	-	> 0	-	-	-	> 0	-	-
	2729	1,00	1,24	-	-	24	-10	-81	-109	-	-98	-	-
	2790	1,00	1,25	16	-42	-	-	-	-	50	-148	-210	-243

Profielbeschrijvingen zijn weergegeven in bijlage 1

$t$  : insteltijd

Pv-t=5 : vochtspanning, gemeten na vijf minuten

Pv- $\frac{1}{2}t$  : vochtspanning, gemeten na de halve insteltijd

Pv-eind: eindwaarde vochtspanning

$r_d$  : droog volumegewicht

De grotere insteltijden van de zware zavel- en komkleimonsters worden veroorzaakt door verdichting en versmering van de grond rondom de priktensiometer (2.5). Verdichting van de grond door het insteken van de priktensiometer kan aanvankelijk een afname (minder negatief) van de gemeten vochtspanning tot gevolg hebben. In een aantal monsters ontstaat zelfs een positieve vochtspanning. De invloed van de verdichting op het vochtspanningsverloop is afhankelijk van de dichtheid van de monsters (zie Pv.t=5-waarde).

Het feit, dat voor komklei een te hoge eindwaarde wordt gemeten, is reeds behandeld (2.4.4). Dit geldt waarschijnlijk in mindere mate ook voor de zware zavel.

Bij  $pF=2,3$  meet men voor alle monsters een te hoge eindwaarde. Een oorzaak kan zijn dat de afvoerslang van de kaolienbak (STAKMAN, 1969) niet onder het waterniveau in de verzamelfles uitmondt, waardoor waterverlies door verdamping van de monsters en het kaolien niet aangevuld kan worden. Het bleek dat de afvoerslang na enige tijd niet meer geheel met water gevuld was.

De onderdruk, aangelegd met de waterstraalpomp, wordt geregistreerd door een open kwikmanometer. Op de vereiste onderdruk wordt hierbij een correctie toegepast voor de afstand tussen de halve hoogte van de monsterring en de drainuitlaat. Is de afvoerslang met water gevuld, dan dient hiervoor ook een correctie te worden toegepast.

Aansluiting van de kwikmanometer op de afvoerslang aan de onderzijde van de kaolienbak geeft inderdaad een hogere waarde te zien dan de waarde die door de kwikmanometer, aangesloten op de verzamelfles. Een betere constructie toont fig. 13. De afvoerslang mondt uit onder het waterniveau in de verzamelfles.

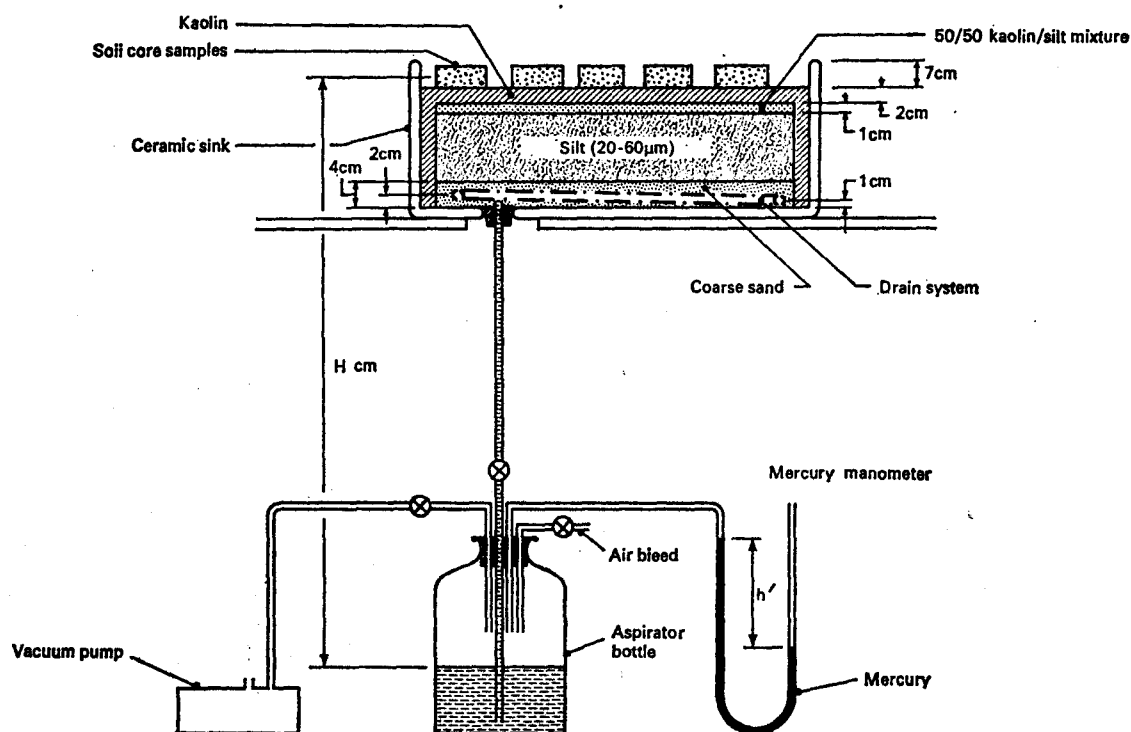


Fig. 13. Kaolien pF-bak

Hier geldt: Aangelegde onderdruk =  $13,6 h^1 + H$  (cm  $H_2O$ ). De vocht karakteristieken van een aantal monsters zijn weergegeven in bijlage 2, waarin ook de gemeten vochtspanning is uitgezet. De figuur laat duidelijk zien dat door de punten, die de gemeten vochtspanning voorstellen, een betere curve getrokken kan worden.

In tabel 16 zijn de  $P_v.t=5$ -waarden vermeld van een aantal metingen bij hogere en lagere  $P_v$ -begin-waarden van de priktensiometer.

Zoals uit de tabel blijkt heeft verhoging van de  $P_v$ -begin-waarde van de priktensiometer geen of een geringe toename van de  $P_v.t=5$ -waarde tot gevolg. Afname van de gemeten vochtspanning onmiddellijk na het insteken, treedt ook op bij hoge  $P_v$ -begin-waarden van de priktensiometer (nr. 1983, nr. 2790).



Tabel 16. Vochtspanning gemeten na 5 min. ( $P_v-t=5$  in cm) bij verschillende  $P_v$ -begin-waarden van de priktensiometer (aangelegde onderdruk = 200 cm)

Grondsoort	Ringnr.	$P_v$ -begin	$P_v.t=5$
Zand	2762	-60	-234
		-177	-231
	2815	-50	-147
		-189	-200
Zware zavel	2778	-37	-165
		-171	-160
	2737	0	-182
		-202	-220
Komklei	1933	-49	-183
		-152	-177
	1983	-40	>0
		-262	-92
		-35	-148
2790	-245	-159	

Tenslotte zijn in tabel 17 de meetgegevens van een aantal monsters bij een aangelegde onderdruk van 500 cm vermeld.

Tabel 17. Gemeten vochtspanning ( $P_v$  in cm) en insteltijd ( $t$  in min.) voor de priktensiometer bij een aangelegde onderdruk van 500 cm

Grondsoort	ringnr.	$t$	$P_v-t=5$	$P_v-\frac{1}{2}t$	$P_v$ -eind
Fijn zand	2762	48	-339	-463	-500
	2876	66	-265	-425	-490
Zware zavel	2737	96	-300	-425	-469
Komklei	1933	-	-200	-	-

$P_v-\frac{1}{2}t$  enz: zie tabel 15

Ondanks de te verwachten grotere doorlatendheid van de zware zavel en komklei bij  $P_v=-500$  cm geven de zandmonsters een kleinere insteltijd te zien. De evenwichtsinstelling tussen tensiometer en omringende grond verloopt langzaam, zoals uit de  $P_v-\frac{1}{2}t$ -waarde blijkt.

De vraag is echter of het evenwicht tijdens de meting inderdaad al bereikt is (zie Pv-eindwaarde). Zoals blijkt uit de Pv.t=5-waarde is de instelsnelheid van de meting in het komkleimonster zeer gering.

### 3.3. V o c h t s p a n n i n g s m e t i n g e n i n f i j n z a n d

Het betreft hier een dekzandafzetting op een stroomruggrond. Deze bruine enkeerdgrond is gekenmerkt door een donkere humeuze bovengrond, die dikker dan 50 cm is. Het bodemprofiel staat afgebeeld in bijlage 1, waarin ook de droogvolumegegewichten zijn vermeld.

De pF-curves van de lagen ter hoogte van de ingegraven tensiometercup zijn weergegeven in bijlage 3. Het vochthoudend vermogen neemt met groter wordende diepte af. Uit de vorm van de pF-curve van 0,80 m-, 100 m- en in mindere mate ook van 0,60 m-mv is af te leiden dat deze lagen uit een uniform gepakte, homogene zandfractie bestaan.

Het verband tussen de gemeten vochtspanning en het bepaalde vochtgehalte is weergegeven in een figuur waarin ook de in het laboratorium bepaalde pF-curve staat afgebeeld. Dit geschiedt voor elke laag afzonderlijk (bijl. 4).

Bij het bepalen van de vochtgehalten kunnen de volgende foutenbronnen optreden:

- oneffenheden in het maaiveld, waardoor plaatselijk het vochtgehalte kan variëren (bv. door concentratie van regenwater). Dit geldt vooral voor de zodelaag
- hoogteverschillen van het maaiveld, waardoor monsternamen op verschillende diepten plaatsvindt
- plaatselijke verschillen in droogvolumegegewicht van een bepaalde laag waardoor, indien gewichtsmonsters worden genomen, bij het omrekenen naar volumepercentages water, fouten worden gemaakt.

Uit de figuren, afgebeeld in bijlage 4, blijkt dat de curve, die het verband weergeeft tussen de in het veld bepaalde vochtspanning en het vochtgehalte, een aanmerkelijke afwijking van de pF-curve vertoont. Deze afwijking is een gevolg van:

X 1. het hysteresis-effect. Bij het proces van waterafgifte en opname treedt hysteresis op, waardoor het evenwichtsvochtgehalte afhankelijk is van de wijze waarop dit bereikt wordt en groter is in het geval van vochtafgifte dan in het geval van vochtopname (fig. 14).

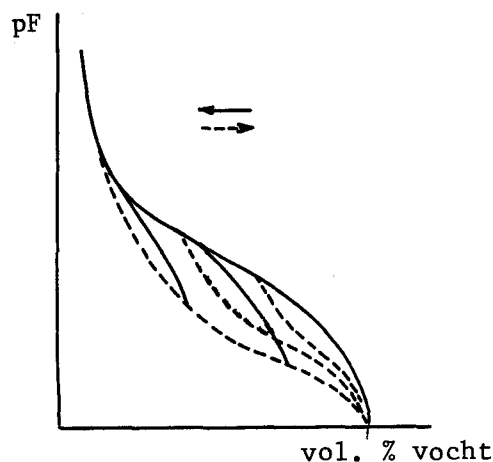


Fig. 14. Hysteresis

Het verschil tussen onttrekkingscurve en bevochtigingscurve is afhankelijk van de vochtspanning waarbij de retourcurve aanvangt. Bij de bepaling van de pF-curve in het laboratorium wordt alleen de vochtgevendende curve, uitgaande van volledige verzadiging, bepaald.

X 2. effect behandeld in 2.2 waar blijkt dat het verband tussen vochtspanning en vochtgehalte afhankelijk is van de manier van bevochtiging (fig. 15). De verzadiging die bij de bepaling van de pF-curve wordt toegepast is niet in overeenstemming met de wijze van bevochtiging zoals deze in het veld plaatsvindt.

De figuur laat zien dat het evenwichtsvochtgehalte afhankelijk is van de manier waarop de grond bevochtigd wordt en kleiner is bij berekening dan bij verzadiging op de pF-bak.

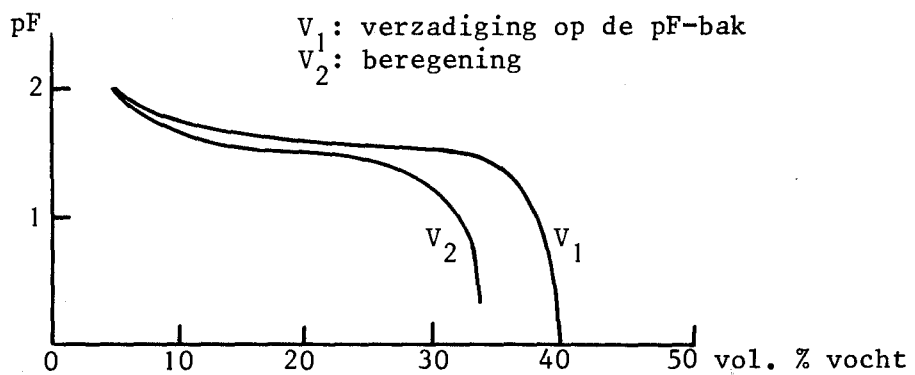


Fig. 15. Vochtkarakteristieken van grofzand

De mate waarin deze effecten optreden is afhankelijk van de grondsoort en de dichtheid. Uit de figuren in bijlage 4 blijkt dat de afwijkingen van de pF-curve in de bovengrond aanmerkelijk groter zijn dan die op een diepte van 0,80 en 1,00 m-mv. Daarnaast heeft de vochtspanning, waarbij de in het veld bepaalde curve overgaat in de pF-curve, een hogere waarde (voor de bovengrond bij pF 2,8, voor 0,80 en 1,00 m-mv bij pF 1,8 en pF 1,7).

De pF-curve kan dienen om vochtgehalteprofielen om te zetten in vochtspanningsprofielen. Uit de figuur in bijlage 4 blijkt, dat indien deze bewerking, omzetting van vochtgehalte- in vochtspanningsprofielen, wordt toegepast een te hoge vochtspanning wordt afgeleid.

De vochtspanningen en grondwaterstanden, die gemeten zijn tijdens de periode dat het proefveld is afgedekt, staan vermeld in tabel 18. De in duplo verrichte vochtspanningsmetingen geven nagenoeg identieke uitkomsten.

Tabel 18. Gemeten vochtspanning ( $P_v$  in cm) en grondwaterstand in zandgrond tijdens de periode waarin het proefveld is afgedekt

Datum	Volgnr.	diepte in m-mv						gr.wst. m-mv
		0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	
14-4-'75	1	-30	-50	-66	-70	-53	-34	1,32
16-4-'75	2	-36	-51	-63	-63	-50	-26	1,31
18-4-'75	3	-41	-53	-62	-60	-46	-28	1,28
22-4-'75	4	-46	-58	-66	-65	-47	-25	1,31
25-4-'75	5	-58	-68	-71	-70	-54	-32	1,34
29-4-'75	6	-68	-79	-80	-76	-58	-40	1,40

De gegevens van deze tabel zijn weergegeven in fig. 16.

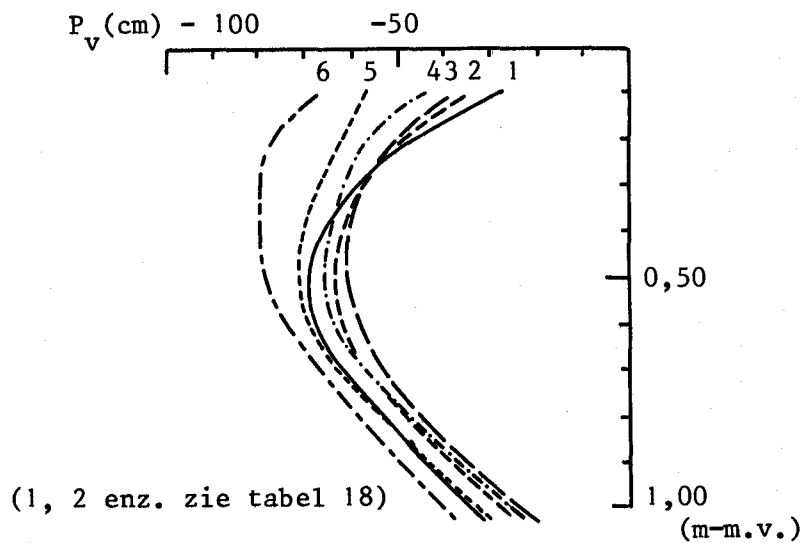


Fig. 16. Vochtspanningsprofielen in fijn zand

Uit de tabel en de figuur is af te leiden dat het uit de bovengrond wegzakkende water aanvankelijk een verlaging van de vochtspanning in de ondergrond en een stijging van de grondwaterspiegel veroorzaakt. De evenwichtstoestand wordt in de beschouwde periode niet bereikt. Uit het vochtspanningsprofiel kan men afleiden, dat de onverzadigde doorlatendheid van de bovengrond aanmerkelijk klei-

ner is dan die van de ondergrond.

De gemeten Pv-profielen nr. 1, 3 en 5 (tabel 18) zijn getransformeed in  $P^*$ -profielen (bijlage 5) volgens:

$$P^* = P_v + \frac{\psi g}{V}$$

waarin:

$P_v$  = vochtspanning (cm  $H_2O$ )

$\psi g$  = zwaartekratchpotentiaal = g.z.

$g$  = versnelling van de zwaartekracht (  $10^3$  cm.sec.)

$z$  = hoogte boven grondwater (cm)

$v$  = soortelijk volume van water (  $1 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  )

$$\frac{\psi g}{V} = \frac{gz}{V} \text{ (} 10^3 \text{ dyne cm}^{-2} = 1 \text{ mbar } 1 \text{ cm } H_2O \text{)}$$

Als referentieniveau fungeert de grondwaterspiegel. Daarbij wordt aangenomen dat het grondwater zich in de periode van 14-25 april 1975 op een constant peil (1,31 m-mv) bevindt.

Vervolgens wordt het verloop van  $P^*$  geanalyseerd op de stromingsrichting. Hiervoor geldt:

$$\frac{dP^*}{dz} = 0 : \text{ geen stroming}$$

$$\frac{dP^*}{dz} > 0 : \text{ transport naar beneden}$$

$$\frac{dP^*}{dz} < 0 : \text{ transport naar boven}$$

Uit de figuur in bijlage 5 blijkt:

- voor  $P^*$ -profiel 1 (14 april 1975): transport naar beneden

- voor  $P^*$ -profiel 3 (18 april 1975) en 5 (25 april 1975):

$z > 50$  cm: transport naar beneden

$z < 50$  cm: nagenoeg geen verticaal transport.

Uit het  $P^*$ -profiel kan men afleiden dat er enige watertransport in opwaartse richting plaatsvindt onder invloed van een kleine gradiënt. Mogelijk is er enige horizontale stroming.

Met de gegevens van vochtspanning en vochtgehalte kan men de onverzadigde doorlatendheid berekenen. De vochtspanningswaarden en vochtgehalten, bepaald in de periode van 14-25 april, zijn uitgezet

tegen de tijd (bijl. 6). De onverzadigde doorlatendheid  $k$  wordt berekend met:

$$V = k \left( \frac{d\psi}{dz} + 1 \right) \quad (10)$$

waarin:

- $V$  = flux ( $\text{cm} \cdot \text{etm}^{-1}$ ), positief naar beneden
- $k$  = onverzadigde doorlatendheid ( $\text{cm} \cdot \text{etm}^{-1}$ )
- $\psi$  = capillaire potentiaal =  $P_v$  (cm), negatief
- $z$  = hoogte boven grondwater (cm)

De berekening van de  $k$ -waarden voor de periode van 18-25 april 1975 is uitgevoerd in tabel 19. De overige berekende  $k$ -waarden staan vermeld in tabel 20.

Tabel 20.  $K$ -waarden ( $\text{cm} \cdot \text{etm}^{-1}$ ) van fijn zand

Diepte m-mv	Periode			$k_{\text{gem.}}^{-1}$ $\text{cm} \cdot \text{etm}^{-1}$	$\psi$ cm
	18-25 apr.	18-22 apr.	22-25 apr.		
0,15	0,031	0,025	0,031	0,029	-53
0,30	0,058	0,055	0,058	0,057	-62
0,50	0,117	0,113	0,115	0,115	-66
0,70	0,598	0,665	0,121	0,795	-57

$\psi$  : capillaire potentiaal

Uit de tabel blijkt dat met groter wordende diepte de onverzadigde doorlatendheid aanmerkelijk toeneemt.

Volgens de indeling in grondsoorten (RIJTEMA, 1969) komt de bovengrond overeen met lemig fijn zand en de ondergrond met fijn zand. De onverzadigde doorlatendheid die voor deze grondsoorten is berekend bedraagt bij  $P_v = -60$  cm, 2,34 en 2,49  $\text{cm} \cdot \text{etm}^{-1}$ . Deze waarden zijn groter dan de in tabel 20 vermelde  $k$ -waarden.

Tabel 19. Bepaling van de onverzadigde doorlatendheid (k) met gegevens over vochtspanning en vochtgehalte in fijn zand.  
Periode van 18-25 april 1975

Diepte cm	Hoogte boven grondwater(z) cm	$\theta$	$\theta$	$\Delta\theta$	-	-	V	$\bar{V}$	$\psi$	$\psi$	$\bar{\psi}$	$\frac{d\psi+1}{dz}$	k	$\psi$
		18-4-'75 vol.%	25-4-'75 vol.%	vol.%	mm	mm.etm <sup>-1</sup>	mm.etm <sup>-1</sup>	cm.etm <sup>-1</sup>	18-4-'75 cm	25-4-'75 cm	cm	-	cm.etm <sup>-1</sup>	cm
10	123	24,2	21,0	3,2	3,2	0,45	0,45	0,057	-41	-58	-49,5	+1,85	0,031	-54
20	113	19,4	18,3	1,1	1,65	0,23	0,68	0,082	-53	-63	-58	+1,43	0,058	-62
40	93	19,8	18,8	1,0	2,0	0,28	0,96	0,108	-62	-71	-66,5	+0,93	0,117	-66
60	73	11,8	11,0	0,8	1,6	0,23	1,19	0,149	-60	-70	-65	+0,25	0,598	-58
80	53	13,8	11,7	2,1	4,2	0,59	1,78	0,229	-46	-54	-50			
100	33	25,5	21,9	3,6	7,2	1,02	2,80		-23	-32	-27,5			

$\bar{V}$  = gemiddelde flux;  $\bar{\psi}$  = gemiddelde capillaire potentiaal



### 3.4. V o c h t s p a n n i n g s m e t i n g e n i n z w a r e z a v e l

Het betreft hier een stroomruggrond, die volgens het pedogenetisch classificatiesysteem van de Stichting van Bodemkartering behoort tot de poldervaaggronden. Het belangrijkste kenmerk van deze gronden is dat boven 0,50 m-mv roestverschijnselen voorkomen. De grond bestaat uit een gelijkmatig afgezette, goed gehomogeniseerde zware zavel, die op 0,80 m-mv overgaat in een lichte klei. De profielbeschrijving en droogvolumegegewichten zijn weergegeven in bijlage 1, de pF-curves in bijlage 7.

Het verband tussen de gemeten vochtspanning en het vochtgehalte van de verschillende lagen staat afgebeeld in bijlage 8. Ook hier ziet men een aanmerkelijk verschil tussen de in het veld bepaalde curve en de pF-curve. De grote variatie van punten (0,10 m-mv) is een gevolg van plaatselijke verschillen in vochtgehalte. De vochtspanning, waarbij de in het veld bepaalde curve overgaat in de pF-curve, laat zich moeilijk schatten.

De vochtspanningen en grondwaterstanden, die gemeten zijn tijdens de periode dat het proefgebied is afgedekt staan vermeld in tabel 21. De in duplo verrichte metingen geven nagenoeg identieke uitkomsten.

Tabel 21. Gemeten vochtspanning (Pv in cm) en grondwaterstand in zware zavel tijdens de periode waarin het proefveld is afgedekt

Datum	Volgnr.	Diepte in m-mv						gr.wst.	
		0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	m-mv	
16-4-'75	1	-21	-17	-13	- 4	+ 8	+25	0,73	
17-4-'75	2	-24	-23	-19	- 7	+ 6	+24	0,74	
21-4-'75	3	-33	-30	-24	-11	+ 3	+22	0,77	
23-4-'75	4	-43	-35	-25	-11	+ 3	+22	0,78	
25-4-'75	5	-49	-43	-25	-11	+ 5	+27	0,77	
28-4-'75	6	-53	-50	-29	-10	+11	+30	0,70	

De gegevens van deze tabel zijn weergegeven in fig. 17.

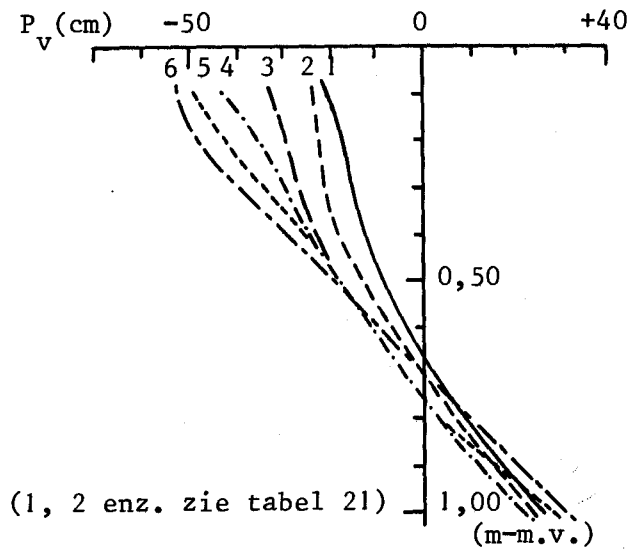


Fig. 17. Vochtspanningsprofielen in zware zavel

Uit de tabel is af te leiden dat er aanvankelijk een daling van de grondwaterstand optreedt, waaruit geconcludeerd mag worden dat er enige grondwaterstroming in horizontale richting plaatsvindt. De tensiometers op 0,80 en 1,00 m-mv volgen nauwkeurig de grondwaterstandsfluctuaties. Het is daarbij opvallend dat op 25 april de tensiometer op 1,00 m-mv een grondwaterstijging aangeeft, terwijl deze aan de hand van de grondwaterstandsbuis nog niet geconstateerd kan worden. Mogelijk bevindt het water in de grondwaterstandsbuis zich op dat tijdstip nog niet in evenwicht met het omringende grondwater. Op 28 april (na 12 dagen) is de evenwichtstoestand vrijwel bereikt.

De gemeten  $P_v$ -profielen in de periode van 16 tot 25 april zijn getransformeerd in  $P^*$ -profielen (bijl. 5). Men gaat ervan uit dat het grondwater zich in deze periode op een constant peil (0,76 m-mv) bevindt. Uit het verloop van het  $P^*$ -profiel kan men afleiden dat over het gehele profiel een neerwaarts gerichte stroming optreedt.

In bijlage 6 zijn de vochtspanningswaarden en vochtgehalten uitgezet tegen de tijd. Vervolgens is de onverzadigde doorlatendheid (form. 10) berekend voor de periode  $t=0$  tot  $t=200$  uur (tabel 22).

Tabel 22. Bepaling van de onverzadigde doorlatendheid (k) met gegevens van vochtspanning en vochtgehalte in zware zavel. Periode t=0-t=200 uur

Diepte cm	Hoogte boven grondwater cm	$\theta$ t=0 vol%	$\theta$ t=200 vol. %	$\Delta\theta$ vol. %	- mm	- mm.etm <sup>-1</sup>	V mm.etm <sup>-1</sup>	$\bar{V}$ cm.etm <sup>-1</sup>	$\psi$ t=0 cm	$\psi$ t=200 cm	$\bar{\psi}$ cm	$\frac{d\psi+1}{dz}$	k cm.etm <sup>-1</sup>	$\psi$ cm
10	66	43,5	41,5	2,0	2,0	0,24	0,24	0,040	-21	-47	-34	+0,50	0,080	-32
20	56	39,2	37,5	1,7	2,6	0,31	0,55	0,072	-17	-41	-29	+0,50	0,144	-24
40	36	36,2	34,9	1,4	2,8	0,34	0,89	0,100	-13	-25	-19	+0,425	0,236	-13
60	16	86,3	35,4	0,9	1,8	0,22	1,11	0,111	- 4	-11	- 7,5	+0,425	0,262	- 2
80	-4	49	49	0	0	0	1,11		+ 4	+ 4	+ 4			

$\bar{V}$  = gemiddelde flux;  $\bar{\psi}$  = gemiddelde capillaire potentiaal

De overige berekende k-waarden zijn vermeld in tabel 23.

Tabel 23. K-waarden ( $\text{cm. etm}^{-1}$ ) van zware zavel

Diepte m-mv	t=0-t=200	t=0-t=100	t=100-t=200 uur	$k_{\text{gem}}^{-1}$ cm.etm	$\psi$ cm
0,15	0,080	0,074	0,056	0,070	-31
0,30	0,144	0,126	0,085	0,122	-24
0,50	0,236	0,320	0,169	0,242	-14
0,70	0,262	0,358	0,267	0,296	- 2

$\psi$  = capillaire potentiaal

Volgens de indeling in grondsoorten (RIJTEMA, 1969) komt de grond waarvoor de onverzadigde doorlatendheid is bepaald overeen met lichte klei. De berekende k-waarden voor deze grondsoort bedraagt bij  $P_v = -30$  cm en  $P_v = -10$  cm resp. 2,08 en 3,42  $\text{cm. etm}^{-1}$ . Deze waarden zijn groter dan de in tabel 23 vermelde k-waarden.

### 3.5. V o c h t s p a n n i n g s m e t i n g e n i n k o m k l e i

De komkleigrond bestaat uit een zware, kalkloze, overwegend grijze rivierklei met een lutumgehalte van meer dan 45% en met roest tot in de zodelaag. Het bodemprofiel van deze poldervaaggrond en de droogvolume gewichten zijn weergegeven in bijlage 1, de pF-curves in bijlage 9.

In het bodemprofiel kunnen duidelijk drie lagen onderscheiden worden:

- een humeuze bovengrond (zodelaag) met een lutumgehalte van 45-50%
- een scherp begrensde compacte laag op 0,35 m-mv bestaande uit een zeer zware klei (lutumgehalte 60-65%). De laag wordt gekenmerkt door een donkergrijze kleur en het vrijwel ontbreken van roestvlekken.
- een vaag begrensde laag (0,80-1,00 m-mv) met 55-60% lutum, gekenmerkt door het voorkomen van veel roest en houtresten.

De twee laatstgenoemde lagen vertegenwoordigen fasen tijdens de afzetting van sterk verminderde of soms zelfs geheel opgehouden opslibbing. Tijdens deze rustfasen ontwikkelde zich op de meeste plaatsen een donkergrijze horizont (laklaag) onder invloed van de vegetatie. Aan de hand van het bodemprofiel kan men met betrekking tot de doorlatendheid onderscheiden: een relatief goed doorlatende bovenlaag, een slecht doorlatende tussenlaag en een goed doorlatende ondergrond.

In een dergelijk profiel zijn er bij de afvoer van neerslag verschillende mogelijkheden. De snelheid waarmee de neerslag in de slecht doorlatende laag kan dringen, wordt de indringingssnelheid genoemd. Indien de neerslagintensiteit kleiner is dan of gelijk is aan de indringingssnelheid, zakt de neerslag verticaal naar beneden en voegt zich bij het grondwater, zoals is weergegeven in fig. 18 A en B. In fig. A ligt de grondwaterstand in de goed doorlatende laag, in fig. B in de slecht doorlatende laag. In de goed doorlatende laag vindt vervolgens grondwaterstroming in horizontale richting plaats. Wanneer de neerslagintensiteit groter wordt dan de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag, stagneert de neerslag ten dele boven deze laag, met het gevolg dat een tweede grondwaterzone ontstaat in de goed doorlatende bovenlaag. Daarbij bestaat de mogelijkheid dat het grondwater in de slecht doorlatende laag tot in de bovenlaag stijgt, afhankelijk van de afvoersnelheid in de goed doorlatende laag. In de goed doorlatende bovenlaag kan nu tevens horizontale stroming plaatsvinden (fig. 18C).

Eenzelfde opeenvolging van mogelijkheden kan zich voordoen, wanneer men uitgaande van situatie C het proefveld afdekt om daarmee verdamping en indringing van neerslag uit te sluiten, waardoor uitzakking van het bodemwater plaatsvindt. Na verloop van tijd zal dan situatie A optreden.

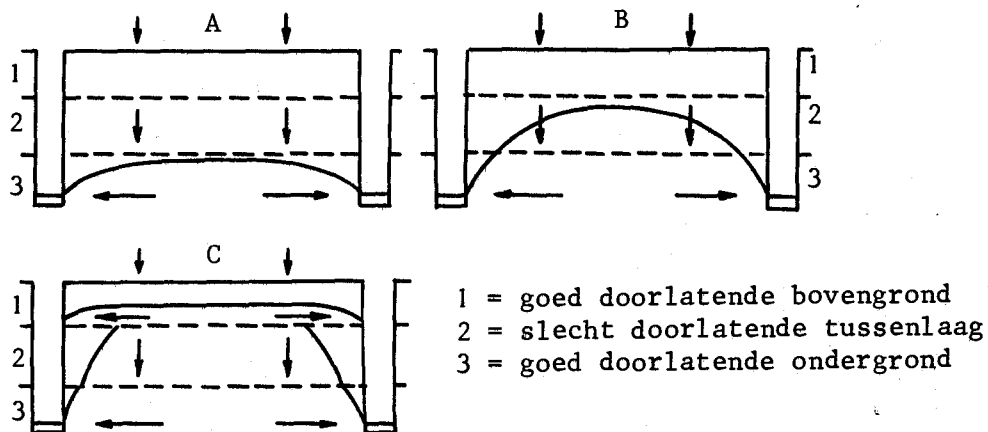


Fig. 18. De afvoer van neerslag in een komkleiprofiel

De vochtspanningswaarden en grondwaterstanden, die zijn gemeten tijdens de periode waarin het proefveld is afgedekt zijn vermeld in tabel 24.

Tabel 24. Gemeten vochtspanning (Pv in cm) en grondwaterstand in komklei tijdens de periode, waarin het proefveld is afgedekt

Datum	Volgnr.	Diepte in m-mv						gr.wst.
		0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	m-mv
16-4-'75	1	-14	- 9	+13	+15	+9	+21	0,93
17-4-'75	2	-16	- 9	+14	+14	+7	+24	0,88
21-4-'75	3	-26	-11	+12	+13	+5	+27	0,87
22-4-'75	4	-41	-20	+ 4	+ 9	+1	+19	0,94
25-4-'75	5	-46	-32	- 6	+ 6	+2	+21	0,96
28-4-'75	6	-54	-34	- 7	0	+1	+20	0,98
22-5*-'75	7	-116	-51	-31	- 9	-4	+12	1,00

\*Na de meting op 28 april is het afdekkingsmateriaal verwijderd

De gegevens van deze tabel zijn weergegeven in fig. 19.

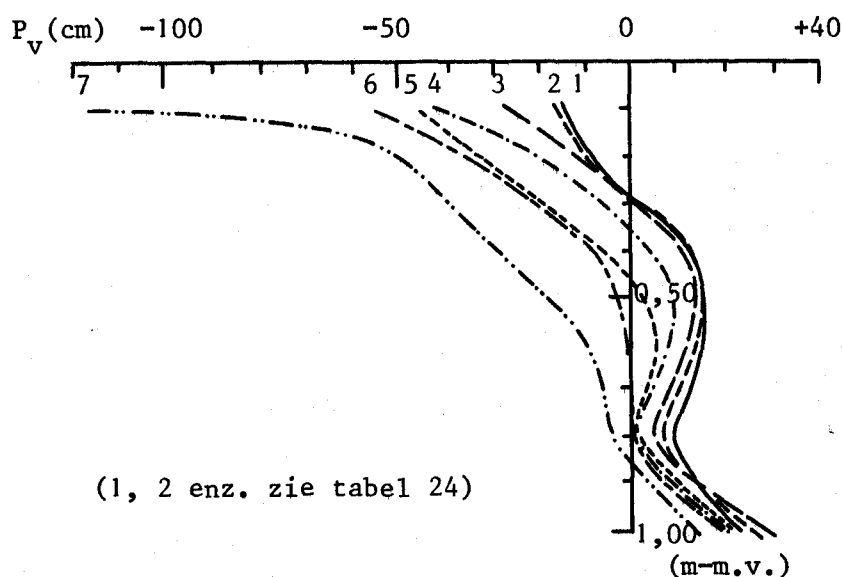


Fig. 19. Vochtspanningsprofielen in komklei

Het vochtspanningsprofiel op 16 april komt overeen met de situatie zoals deze is weergegeven in fig. 18C, het vochtspanningsprofiel op 28 april (bijna) en op 22 mei met de situatie in fig. 18A. De tussenliggende zijn overgangssituaties tussen fig. C en A.

In de  $P_v$ -profielen in fig. 19 kan men duidelijk de slecht doorlatende laag op 0,35 m-mv en de goed doorlatende laag op 0,80 m-mv onderkennen. In tabel 25 zijn het poriënvolume en de volumefrakties lucht bij verschillende pF-waarden vermeld.

Tabel 25. Poriënvolume en volumefractie lucht in komklei bij verschillende pF-waarden

Diepte m-mv	Poriënvolume vol. %	Volumefractie lucht in vol.% bij Pf			
		1,0	1,5	2,0	2,3
0,10	56,3	1,7	4,2	7,3	9,6
0,20	50,8	1,1	2,5	4,6	6,3
0,40	51,4	0,6	0,8	1,5	2,2
0,60	47,7	0,8	1,5	2,7	3,6
0,80	52,0	1,3	2,1	3,2	4,5
1,00	53,3	1,1	2,0	3,3	5,0

Ook bij deze waarden kan men de opeenvolging van zodelaag, slecht doorlatende laag en goed doorlatende ondergrond onderscheiden.

De grondwaterstanden, vermeld in tabel 24, zijn gemeten met een grondwaterstandsbuis, waarvan het filter zich in de goed doorlatende ondergrond bevindt. Gegevens over de grondwaterzone in de bovengrond ontbreken. De gemeten grondwaterstand komt niet overeen met de waarde die men zou kunnen afleiden uit het Pv-profiel; zo bevindt het grondwater zich op 22 mei volgens het Pv-profiel op ca. 0,90 m-mv, terwijl de grondwaterstandsbuis 1,00 m-mv aangeeft. De tensiometer op 1,00 m-mv volgt daarentegen wel de grondwaterstandsveranderingen.

De vochtspanningsprofielen nr. 1, 4 en 6 (tabel 24) zijn getransformeerd in  $P^*$ -profielen (bijl. 5). De keuze van het referentieniveau is willekeurig; in dit geval is de bovenzijde van de goed doorlatende grond (0,80 m-mv) genomen. Uit het  $P^*$ -verloop blijkt dat boven de 0,40 m-mv overwegend een opwaarts gerichte en beneden de 0,40 m-mv een neerwaarts gerichte stroming optreedt. Voor  $P^*$ -profiel nr. 4 en 6 is beneden de 0,80 m-mv vrijwel de evenwichtstoestand bereikt, wat inhoudt dat er in verticale richting geen stroming plaatsvindt. Door het complexe stromingsbeeld is bepaling van de doorlatendheid, zoals in de vorige paragrafen, niet mogelijk.

Het verband tussen de gemeten vochtspanning en het vochtgehalte in vergelijking met de in het laboratorium bepaalde pF-curve is weergegeven in bijlage 10. Van de lagen op 0,40, 0,60 en 0,80 m-mv zijn slechts enkele punten bekend, bij pF=0 is het gemiddelde van de vochtgehalten uitgezet, die bij vochtspanningen  $\geq 0$  zijn bepaald. In 3.3 is reeds behandeld door welke effecten het verschil tussen de in het veld bepaalde curve en de pF-curve veroorzaakt wordt. Opvallend is het relatief geringe verschil van de compacte laag op 0,40 m-mv.

In vergelijking met de bovengrond van de zware zavel wordt bij komklei, bij lage vochtspanningen een grotere afwijking van de pF-curve geconstateerd.

De monsterringen, die gebruikt zijn bij de bepaling van de pF-curve, hebben een diameter van 5 cm. In hoofdstuk 2.2 is een gedeelte van de vocht karakteristiek (tot pF=2,0) bepaald, waarbij ringen met



een grotere diameter (10 cm) gebruikt zijn. Deze curve blijkt onder de pF-curve te liggen (bijl. 11). Dientengevolge is er ook een geringer verschil tussen deze curve en de in het veld bepaalde curve.

! Mogelijk wordt met grotere ringen een juister verband (zoals dat zich in het veld voordoet) tussen vochtspanning en vochtgehalte bepaald.

## SAMENVATTING

Vochtspanningsmetingen in overzadigde grond verricht men over het algemeen met een tensiometer. Het instrument bestaat uit een poreuze, dunwandige cel, gevuld met water dat via een slang in verbinding staat met de meetapparatuur. Bij het onderzoek is gebruik gemaakt van de tensiometercup ( $r_i=0,70$ ,  $r_u=0,95$  cm) en de priktensiometer ( $r_i=0,025$ ,  $r_u=0,075$  cm). De tensiometercup wordt blijvend in de grond ingegraven, de priktensiometer wordt voor elke meting steeds opnieuw ingebracht.

De drukveranderingen in de tensiometer worden geregistreerd met de pressure transducer. Het apparaat transformeert een drukverandering in een weerstandsverandering, die een wijziging in het uitgangsvoltage tot gevolg heeft. Het instrument is in staat zeer geringe drukverschillen te meten, kan op een recorder worden aangesloten en is eenvoudig te hanteren. De insteltijd, d.i. de tijd die nodig is voor evenwichtsinstelling tussen meetsysteem en grond, is een functie van:

- het drukverschil tussen tensiometer en grond (h)
- de hoeveelheid water, die nodig is om de druk in het meetsysteem een eenheid te doen veranderen (capaciteit C); voor de pressure transducer  $C=6,2 \cdot 10^{-6}$ , voor de kwikmanometer  $C=6,8 \cdot 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>
- de stromingsweerstand in de tensiometerwand en de grond (W)

Dit wordt weergegeven in de formule:

$$t_t - t_o = CW \ln \frac{h_o}{h_t}$$

Ten gevolge van de geringe capaciteit van de P.T. geven vochtspanningsmetingen met de P.T. in vergelijking met die met de kwikmanometer aanmerkelijk kortere insteltijden te zien.

Tijdens metingen in het laboratorium is gebleken dat in de kunststofverbindingsslangen waterverlies optreedt (evenwicht wordt niet bereikt). Dit waterverlies bedraagt bij 20°C en 50% relatieve vochtigheid ca.  $3,6 \cdot 10^{-7}$  cm<sup>3</sup>.sec.<sup>-1</sup>. In het vervolg is van koperen buis gebruik gemaakt.

De vochtspanningsmetingen zijn uitgevoerd in grofzand en komkleimonsters bij verschillende waarden van de aangelegde onderdruk op de pF-bak. De monsters zijn op verschillende wijzen bevochtigd (verzadiging op de pF-bak, onder vacuum en beregening) om na te kunnen gaan in welke mate de verzadiging van invloed is op het verloop van vochtspanning en vochtgehalte.

De insteltijden, gemeten met de priktensiometer in g r o f - z a n d komen redelijk overeen met de berekende insteltijden. De insteltijd wordt, bij hoge vochtspanningen, verkort door aan de priktensiometer voor het insteken een onderdruk te geven, die hoger (meer negatief) is dan de te verwachten eindwaarde. De gemeten vochtspanning is in overeenstemming met de aangelegde onderdruk. Indien men bij een meting met de tensiometer uitgaat van een lagere en hogere onderdruk dan de te verwachten eindwaarde, treedt hysteresis op. Bij metingen met de priktensiometer is dit slechts enkele cm, bij metingen met de cuptensiometer 5 à 10 cm. Het evenwichtsvochtgehalte is afhankelijk van de wijze waarop de grond bevochtigd wordt en is kleiner bij beregening dan bij verzadiging op de pF-bak. De priktensiometer is door de grote insteltijden voor metingen in k o m k l e i minder geschikt. De gemeten eindwaarde is over het algemeen hoger dan de aangelegde onderdruk. Door rondom de cuptensiometer een materiaal aan te brengen met een grotere doorlatendheid wordt de insteltijd aanmerkelijk verkort. De metingen met de cuptensiometer geven over het algemeen de juiste vochtspanning.

Bij  $pF=2,3$  wordt in alle monsters een te hoge eindwaarde gemeten, mogelijk als een gevolg van de konstruktie van de kaolienbak (volgens Stakman).

In de bovengrond van een aantal bodemprofielen (zandgrond, zware zavel en komkleigrond) is de vochtspanning behalve met de cuptensiometer ook regelmatig met de priktensiometer bepaald. Daarbij blijkt dat in komklei en zware zavel en in mindere mate ook in zandgrond met de priktensiometer te hoge eindwaarden worden gemeten.

De in het veld bepaalde vocht karakteristiek komt niet overeen met de in het laboratorium bepaalde pF-curve (na verzadiging). Dit kan een gevolg zijn van:

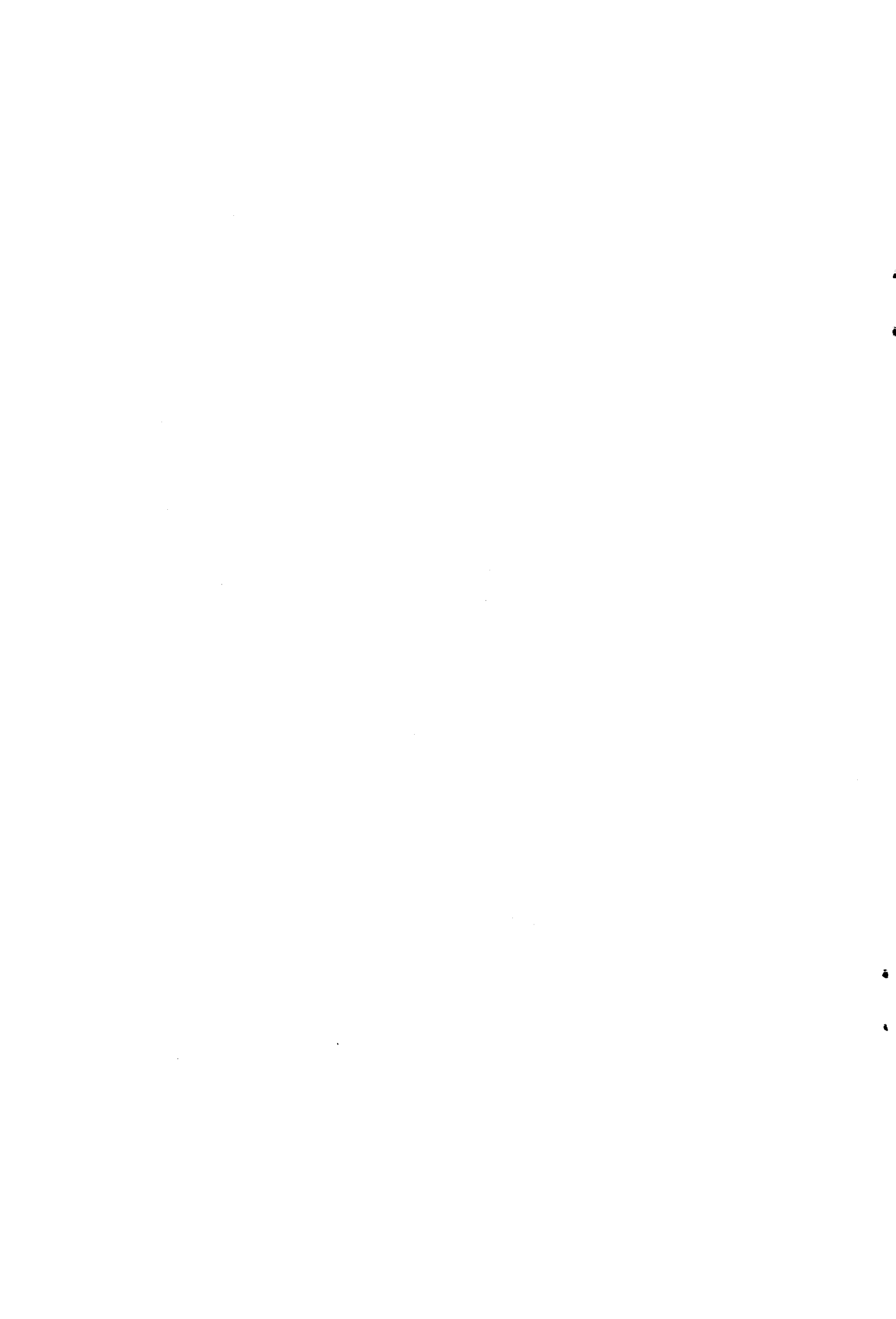
- hysteresis. In het laboratorium wordt alleen de vochtafgeevende tak van de pF-curve bepaald
- de wijze van verzadiging. Het evenwichtsvochtgehalte blijkt afhankelijk te zijn van de wijze van bevochtiging en is kleiner bij berekening dan bij verzadiging op de pF-bak.

Het verschil tussen de in het veld bepaalde curve en de pF-curve is afhankelijk van de grondsoort en de dichtheid. Bij lage vochtspanningen treedt in de bovengrond van de onderzochte grondsoorten het grootste verschil op in de zandgrond. De pF-waarde, waarbij de in het veld bepaalde curve overgaat in de pF-curve wordt tijdens de metingen niet bereikt, met uitzondering van de ondergrond van de zandgrond, waar dit bij pF 1,9 plaats vindt.

Gedurende ca. 2 weken in april is het proefveld na een regenperiode afgedekt om eventuele indringing van neerslag en verdamping tegen te gaan. De evenwichtstoestand wordt in de komklei en zandgrond in deze periode niet bereikt, in de zware zavel na 12 dagen.

## LITERATUUR

- BAKKER, J.W., 1975. Tensiometers, materialen en reactiesnelheden van systemen, Nota 847, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
- CRONEY, D and J.D. COLEMAN. Soil structure in relation to soil suction (Pf), The Journal of Soil Science, volume 5 (1954), 75-85.
- HAVINGA, A.J. en A. OP 't HOF. De Neder-Betuwe, opbouw en ontstaan van een rivierkleigebied, K.N.A.G. Geografisch Tijdschrift IX nr. 4 (1975) 261-277.
- HOORN, J.W. VAN, 1960. Grondwaterstroming in komgrond en de bepaling van enige hydrologische grootheden in verband met het ontwateringssysteem, Wageningen, Centrum voor Landbouwpublikatie en landbouwdokumentatie.
- KLUTE, A. en D.B. PETERS. Hydraulic and pressure head measurement with strain gauge pressure transducers, Proc. Wageningen Symp. "Water in the unsaturated zone". Vol. I Publ. No. 82 A.I.H.S. (1968) 156-165.
- RIJTEMA, P.E., 1969. Soil moisture forecasting, Nota 513, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
- SMITH, P.D. and A.J. THOMASSEN. Density and waterrelease characteristics, Soil Survey Laboratory Methods, Harpenden (1974), 42-56.
- STAKMAN, W.P., G.A. VALK and G.G. VAN DER HORST, 1969. Determination of soil moisture retention curves, Institute for Land and Water Management Research, Wageningen.
- WATSON, K.K. Some operating characteristics of a rapid response tensiometer system, Water Resaurc. Res. 1, (1965) 577-586.



## BIJLAGEN

- Bijlage 1. Profielbeschrijving
- Bijlage 2. Vochtkarakteristiek, waarin de bij  $pF=2,3$  met de prik-tensiometer gemeten waarde is uitgezet
- Bijlage 3. Fijn zand
- Bijlage 4.  $pF$ -curve en de met de pressure transducer in situ be-paalde waarden in fijn zand
- Bijlage 5. Transformatie van  $P_v$ - in  $P^*$ -profielen in fijn zand, zware zavel en komklei
- Bijlage 6. Verloop van vochtgehalte en vochtspanning in fijn zand en zware zavel tijdens de periode, waarin het proefveld in afgedekt
- Bijlage 7. Zware zavel
- Bijlage 8.  $pF$ -curve en de met de pressure transducer in situ be-paalde waarden in zware zavel
- Bijlage 9. Komklei
- Bijlage 10.  $pF$ -curve en de met de pressure transducer in situ be-paalde waarde in komklei
- Bijlage 11.  $pF$ -curves van komklei bij verschillende diameter van de monsterring

## Profielbeschrijving

## A. Zwaklemige zandgrond

Plaats: Bennekom

diepte	$r_{d-3}$	
m-mv	g.cm <sup>-3</sup>	
0,10	1,43	donkerbruin, zwaklemig fijn zand, aflopend
0,20	1,38	humusgehalte van ca. 6% tot ca. 1%
0,40	1,29	korrelgrootte 150-120 $\mu$
0,60	1,42	bruin fijn zand
0,80	1,53	
1,00	1,60	geel-blond zand, korrelgrootte 210-300 $\mu$

## B. Zware zavel

Plaats: Opheusden

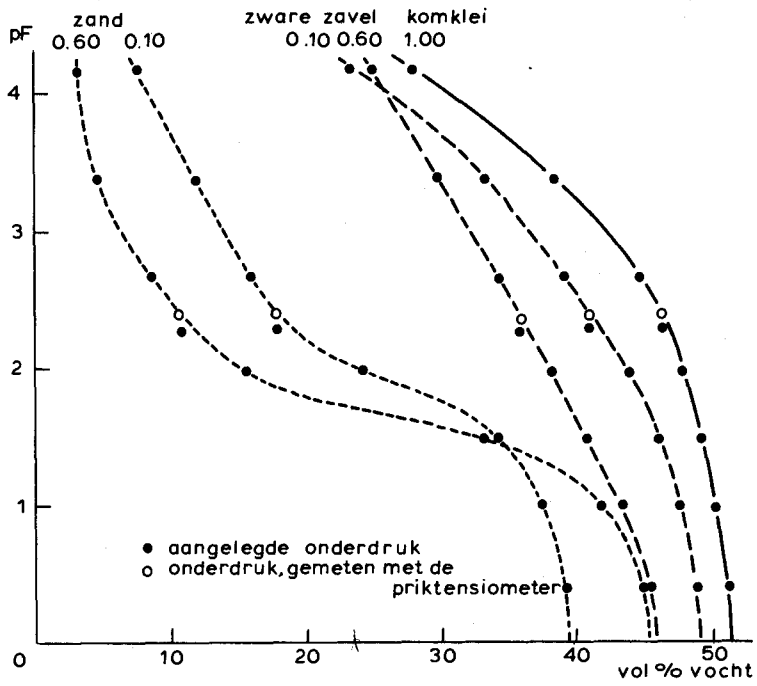
diepte	$r_{d-3}$	
m-mv	g.cm <sup>-3</sup>	
0,10	1,40	gelijkmatig afgezette, goed gehomogeniseerde
0,20	1,37	zware zavel, ca. 25% lutum
0,40	1,41	humusgehalte ca. 6%, aflopend tot ca. 1%
0,60	1,41	op 0,60 m-mv
0,80	1,28	roest en mangaan, kalkhoudend
1,00	-	lichte klei, ca. 30% lutum, kalkrijk met schelpresten

## C. Komklei

Plaats: Zetten

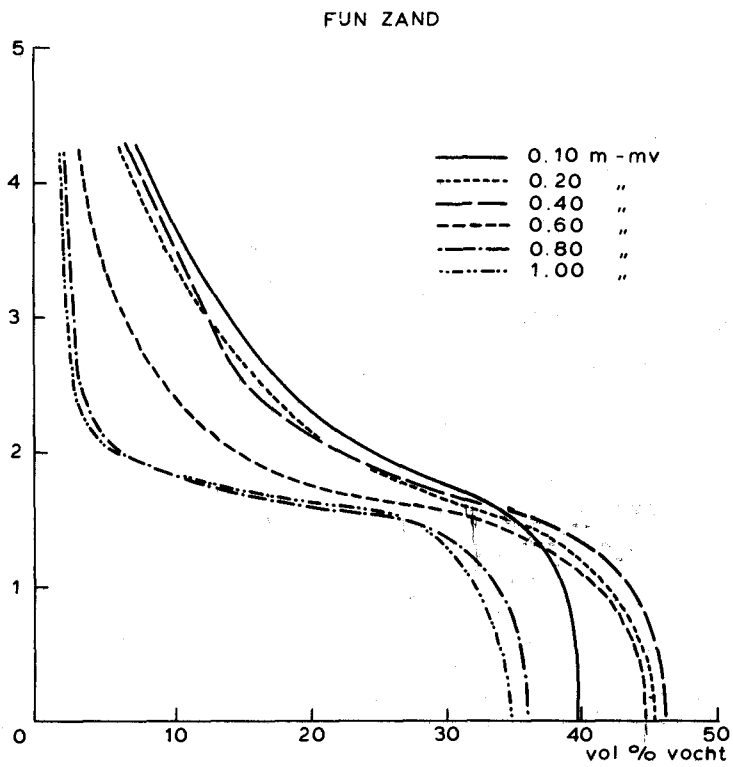
diepte	$r_{d-3}$	
m-mv	g.cm <sup>-3</sup>	
0,10	1,07	humeuze zodelaag, ca. 8% humus, 45-50% lutum
0,20	1,31	roest en mangaan, kalkarm
0,40	1,33	donkergrijze komklei (laklaag), 60-65% lutum
0,60	1,38	kompakt, scherp begrensd, weinig roest
0,80	1,29	komklei, 45-50% lutum, mangaan en roest
1,00	1,23	komklei, 55-60% lutum, vaag begrensd, veel roest en houtresten, mangaan
		komklei, 50-55% lutum, roest, mangaan





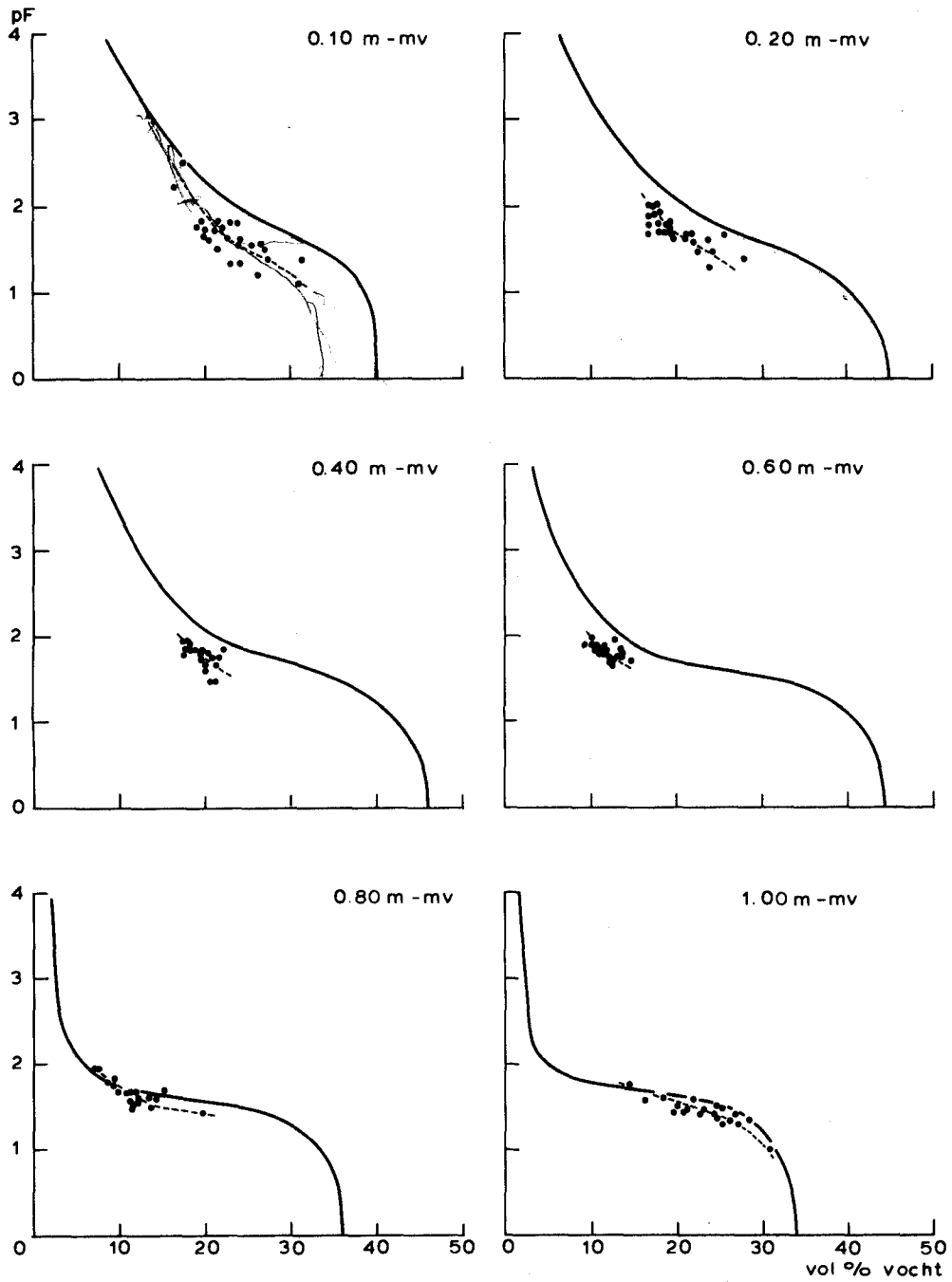
Bijlage 2.

Vochtkarakteristiek, waarin de bij pF = 2,3 met de priktensiometer gemeten waarde is uitgezet

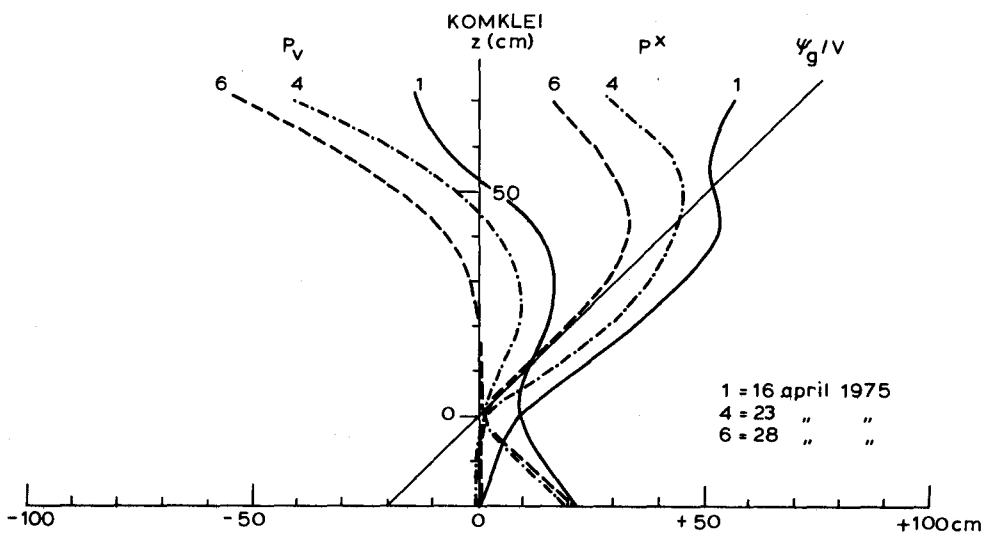
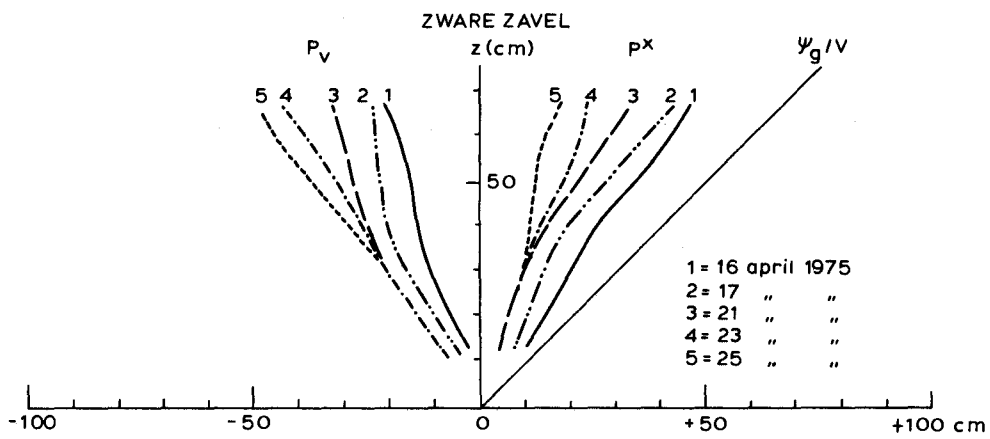
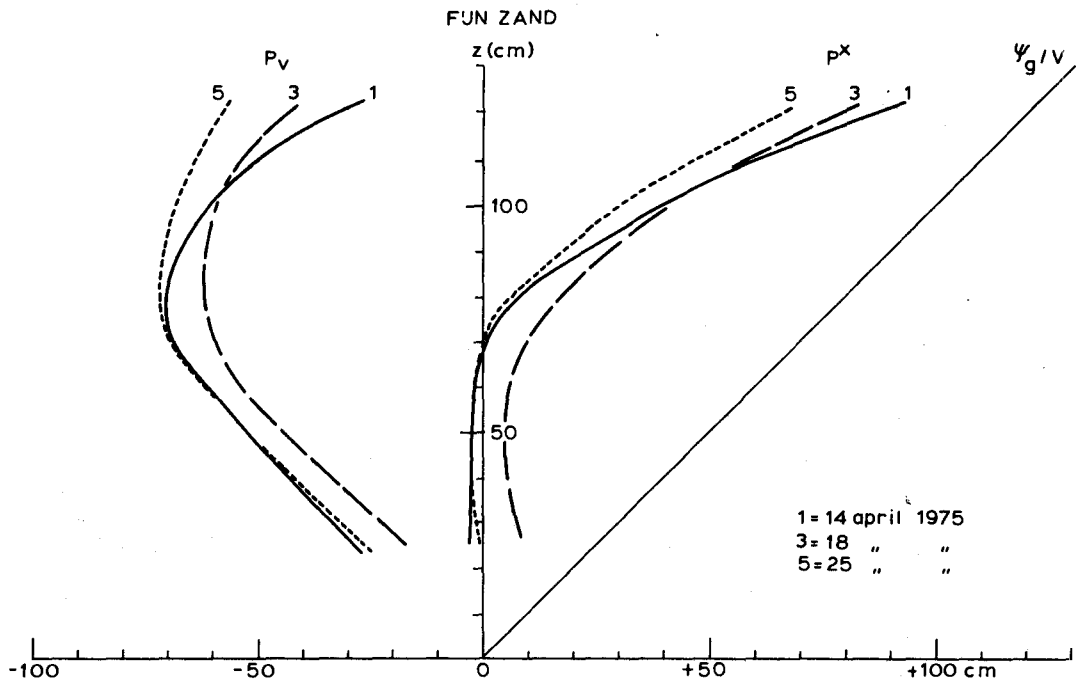


Bijlage 3. Fijn zand

Bijlage 4.



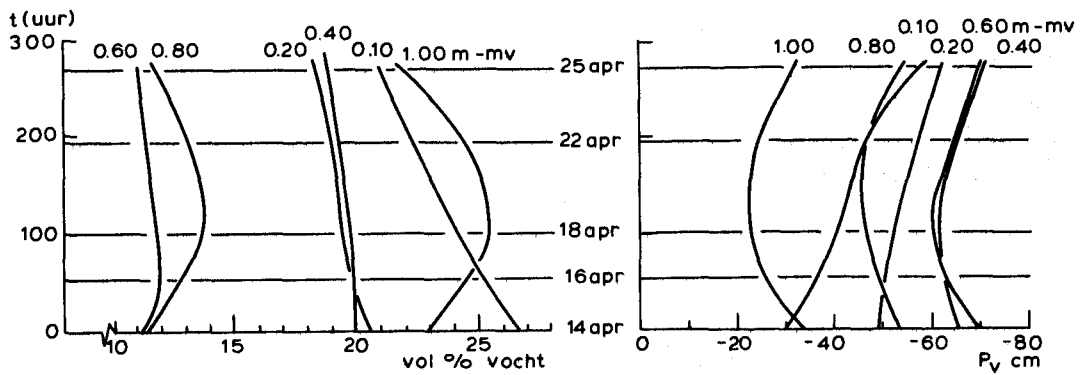
pF-curve en de met de pressure transducer in situ bepaalde waarden  
in fijn zand



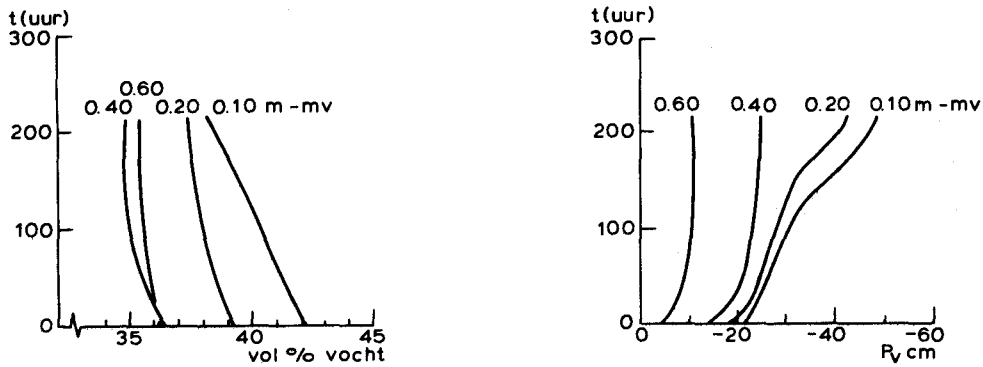
Transformatie van  $P_v$ - in  $P^*$ -profielen in fijn zand,  
zware zavel en komklei

Bijlage 6.

FIJN ZAND

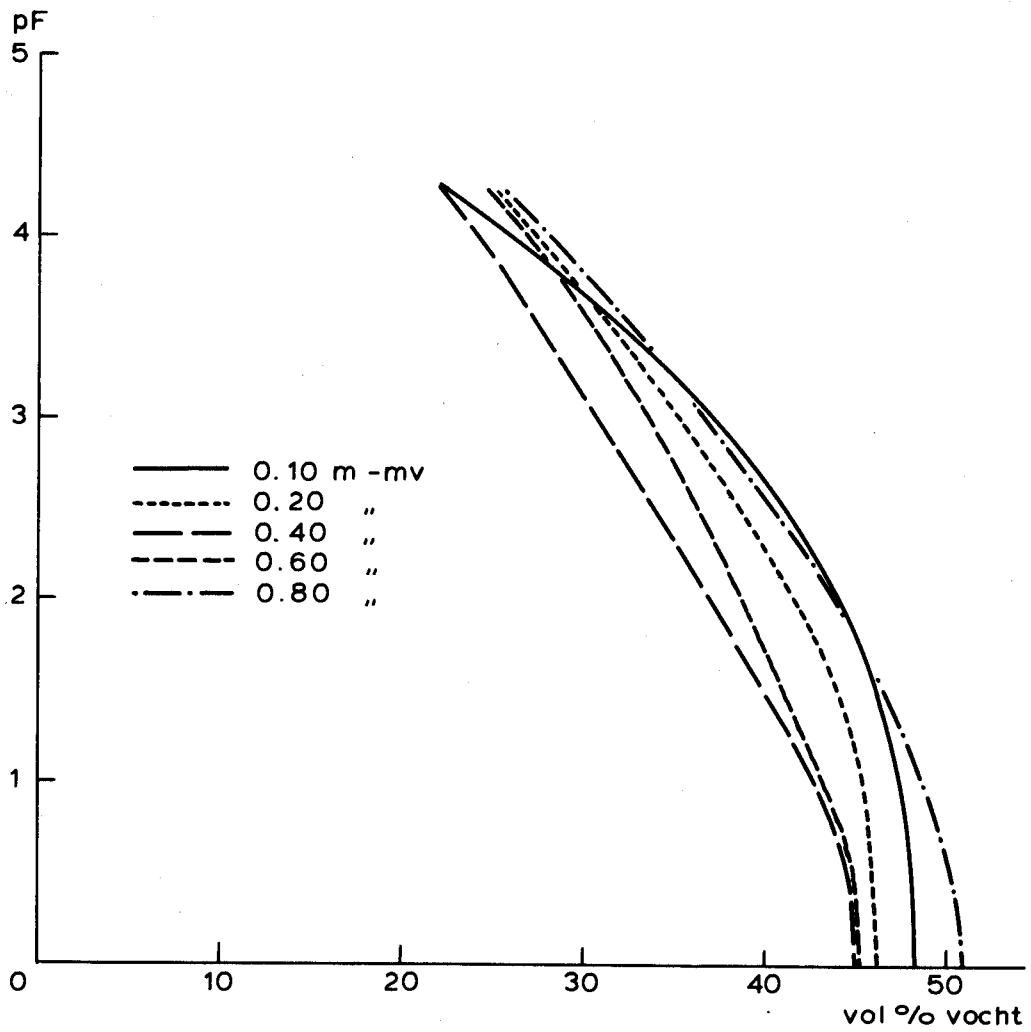


ZWARE ZAVEL

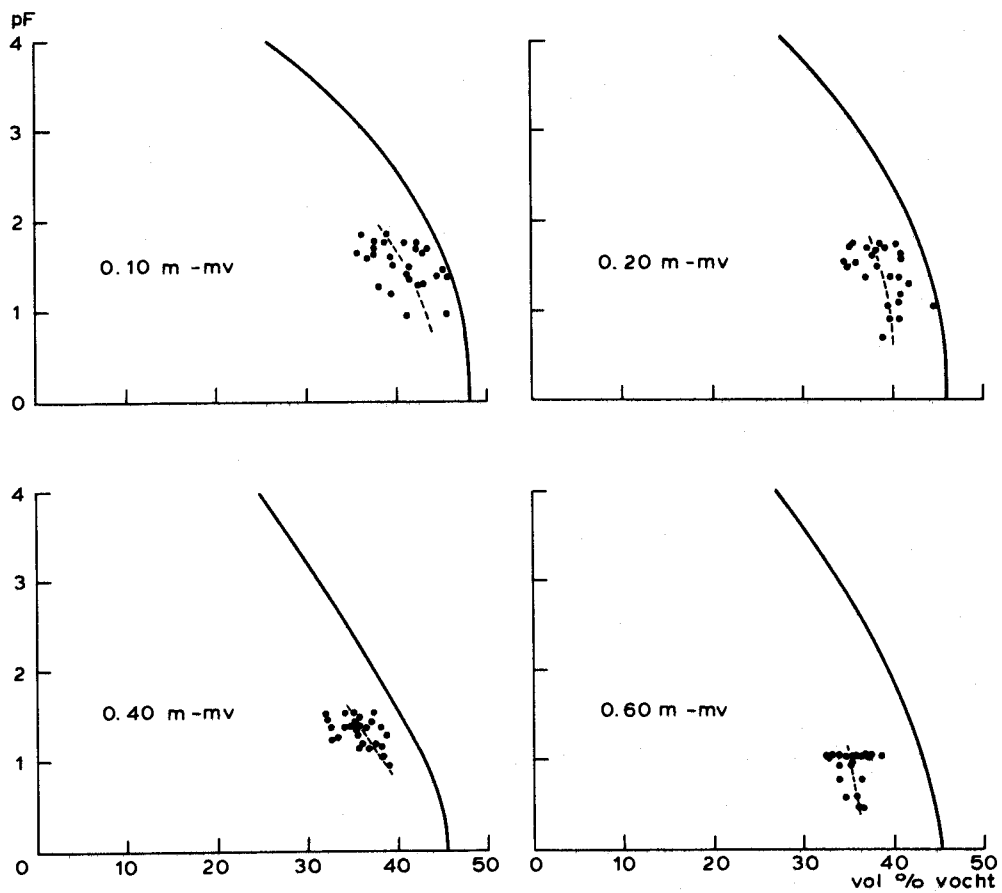


Verloop van vochtgehalte en vochtspanning in fijn zand en zware zavel tijdens de periode, waarin het proefveld was afgedekt

ZWARE ZAVEL

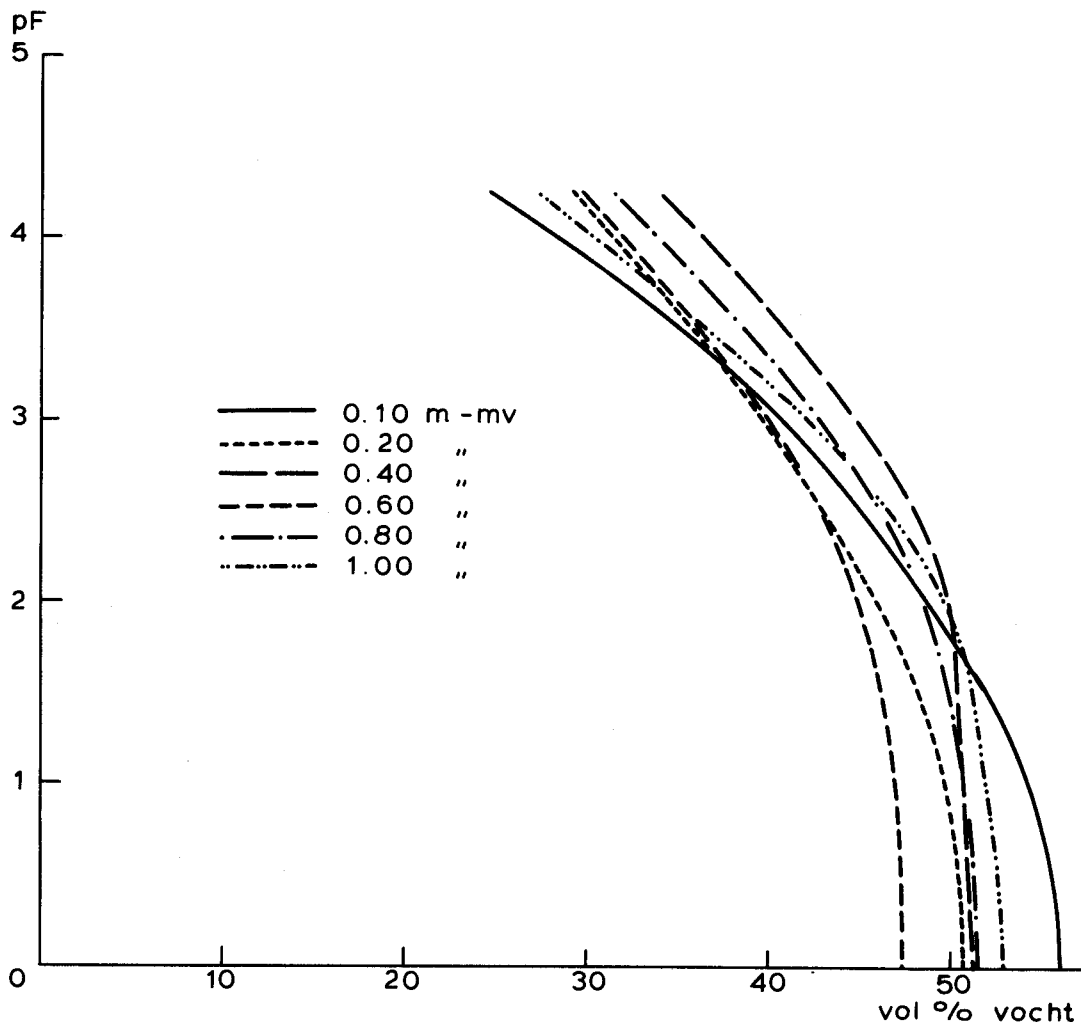


Bijlage 8.

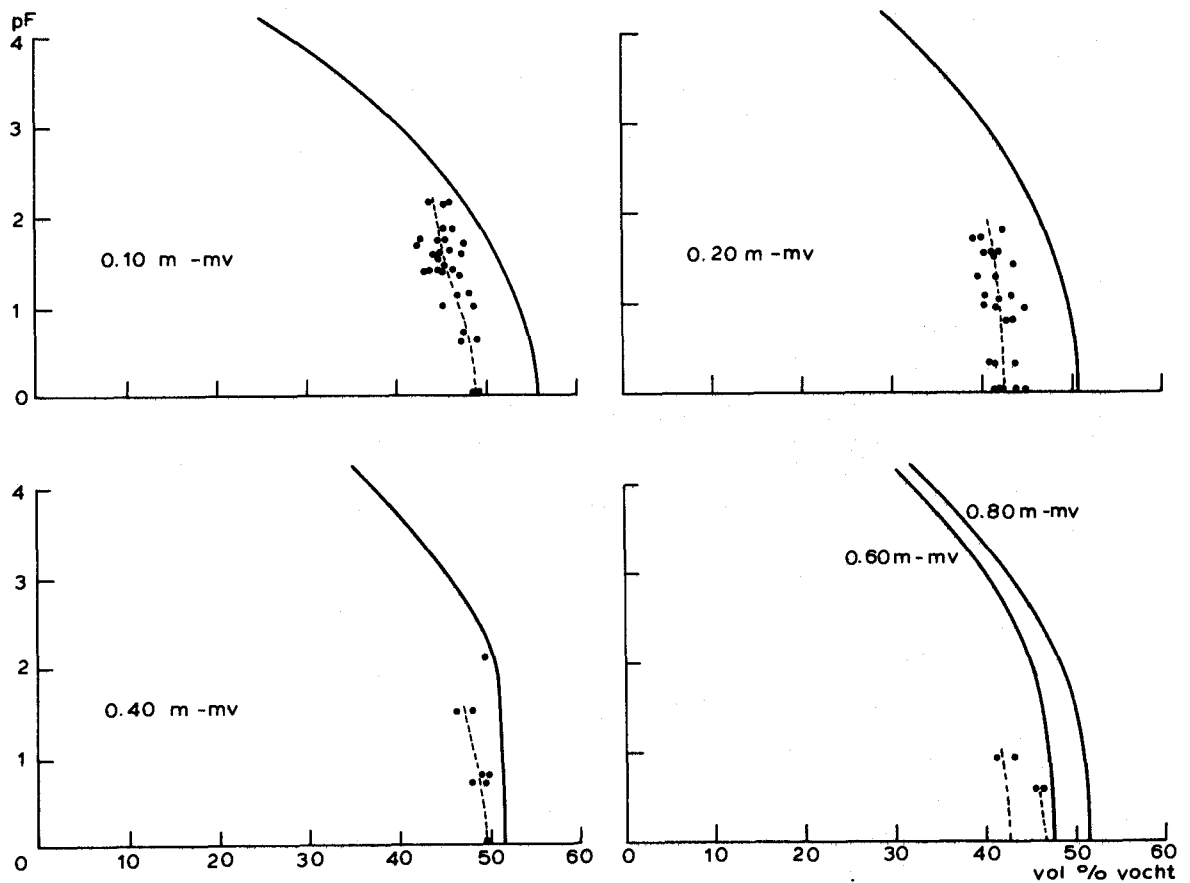


pF-curve en de met de pressure transducer in situ bepaalde waarden in zware zavel

KOMKLEI

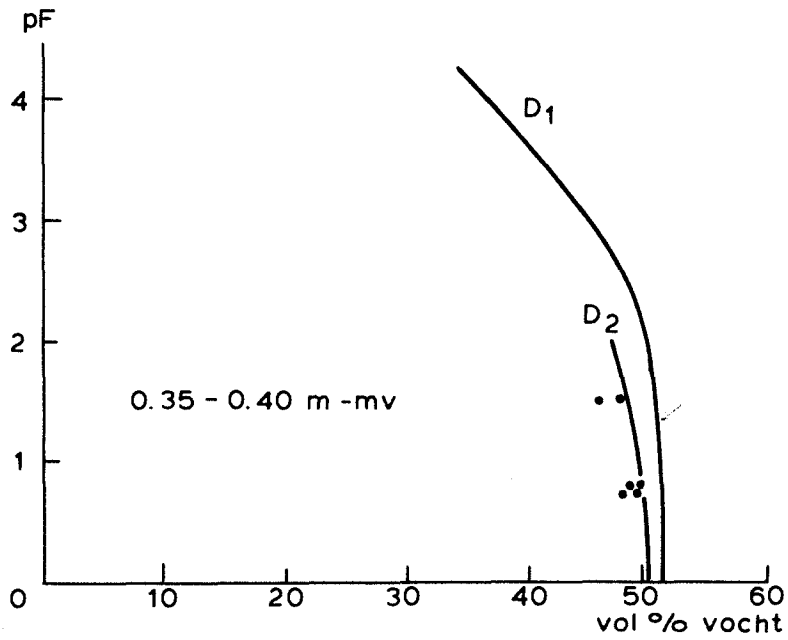
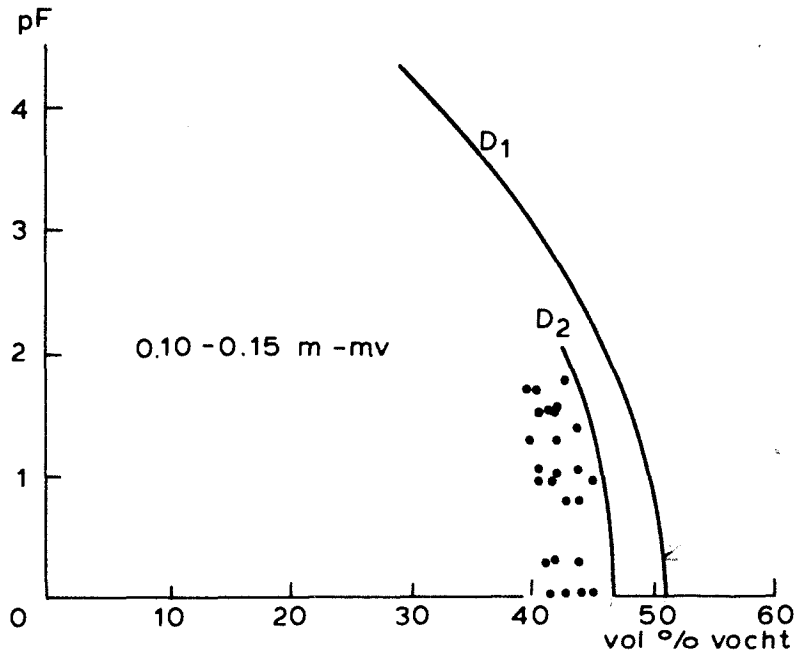


Bijlage 10.



pF-curve en de met de pressure transducer in situ bepaalde waarden in komlei





pF-curve van komlei bij verschillende grootte van de monsterring

$D_1$  : diameter monsterringen = 5 cm

$D_2$  : diameter monsterringen = 10 cm

• : in situ bepaalde waarde