

NN31545.1087

NOTA 1087

I

november 1979

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding  
Wageningen

BEPALING VAN HET BODEMVOCHTGEHALTE DOOR METING

VAN DE DIELECTRISCHE CAPACITEIT

ir. W.P. Stakman

**BIBLIOTHEEK  
STARINGGEBOUW**

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-  
middelen, 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



ISBN 09280-02

## I N H O U D

	Blz.
1. INLEIDING	1
2. METING VAN DIELEKTRISCHE CAPACITEIT	3
2.1. Enige begrippen	3
2.2. Basisprincipe	4
2.3. Indirecte meting aan grondextract	6
3. FACTOREN DIE DE METING KUNNEN BEÏNVLOEDEN	6
3.1. Frequentie	6
3.2. Vochtgehalte	7
3.3. Temperatuur	8
3.4. Opgeloste bestanddelen	10
3.5. Colloïden	10
3.6. Pakkingsgraad (dichtheid)	11
3.7. Contact meetelement - grond	11
4. MEETMETHODEN	12
4.1. Meetelementen	12
4.2. Meetcircuits	14
5. PROEFMETINGEN	16
5.1. Meetapparatuur	16
5.2. Grondmonsters	17
5.3. Meetprocedure	17
5.4. Meetresultaten	18
6. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	22
LITERATUUR	24

## 1. INLEIDING

In de loop der jaren zijn talrijke methoden ontwikkeld om te komen tot een snelle en nauwkeurige bepaling van het bodemvochtgehalte ter vervanging van de gravimetrische vochtbepaling. De laatstgenoemde die nog altijd als standaardmethode geldt en waarbij het vochtgehalte wordt bepaald door middel van drogen en wegen heeft een aantal nadelen waarvan de voornaamste zijn: de grote bemonsteringsfout, de niet-reproduceerbaarheid, de bewerkelijkheid en de daarmee samengaande benodigde tijdsduur. Van de vele andere ontwikkelde methoden hebben echter om diverse redenen slechts een klein aantal praktische toepassing verkregen (BAVER, 1956; SLATYER en Mc.ILROY, 1961; GARDNER, 1965; HOLMES et al, 1967).

Zo wordt de vochtbepaling door middel van het elektrisch geleidingsvermogen of de elektrische weerstand tussen twee in de grond gebrachte elektroden, die later ingebed werden in poreus materiaal (gips, hydrophiel nylondoek of beide) vaak aangewend voor irrigatiedoeleinden. Dit werd vooral bereikt door de goede reproduceerbaarheid in het vochtspanningstraject tussen veldcapaciteit en verwelkingspercentage en doordat de meetapparatuur gemakkelijk industrieel gefabriceerd kon worden tegen relatief lage kosten. Nadelen waren onder andere de gevoeligheid voor elektrolyten (zouten) en het bij uitdroging onvoldoende worden van het contact tussen meetelement en grond. Van recentere datum zijn de stralingsmethoden, waarbij gebruik wordt gemaakt van een neutronen- of gammastralingsbron. Voordelen van deze stralingsmethoden zijn de meting over het gehele bodemvochttraject, de reproduceerbaarheid en de afwezigheid van zout- en temperatuurinvloeden. Nadelen van de neutronemethode zijn het niet kunnen meten in dunne lagen, waardoor in gelaagde gronden

op de laaggrenzen geen nauwkeurige vochtbepaling mogelijk is en de onnauwkeurigheid bij hoge gehalten aan organische stof, borium, chloor of ijzer. Bij gebruik van gammastralen kan een verandering in dichtheid (droog volumegewicht) van de grond de meting beïnvloeden. Voor beide stralingsmethoden geldt dat het plaatsen van meetbuizen noodzakelijk is (bewerkelijk), dat de apparatuur kwetsbaar is en een relatief hoge aanschaffingsprijs heeft en dat de afscherming tegen gevaarlijke straling veelvuldig gecontroleerd dient te worden.

De methode van vochtgehaltebepaling door meting van de diëlektrische capaciteit, waarnaar vanaf omstreeks 1930 onderzoek is verricht en die vooral na 1940 te samen met de elektrische weerstandsmeting in de belangstelling kwam, is nauwelijks voor bodemkundige doeleinden toegepast. Dit werd veroorzaakt door de snelle ontwikkeling van goedkope weerstandsmeting-apparatuur waarbij de ontwikkeling van apparatuur voor diëlektrische capaciteitsmetingen met constante hoge frequentie en met uitschakeling van storende elektrische geleidingsverliezen duidelijk achterbleef (CHERNYAK, 1964; GARDNER, 1965).

Wel vond de diëlektrische capaciteitsmethode toepassing voor vochtmetingen in textielweefsels, granen, hout, papier, gedehydrateerde voedselprodukten enz. waar het ging om relatief geringe vochtgehalten, die vooral betrekking hadden op hygroscopisch geadsorbeerd water (PANDE en PANDE, 1962; GREEN, 1965; KRAMER, 1969 en NORMAND, 1970).

Door de snelle technische ontwikkeling in de laatste jaren waardoor de vervaardiging van betrouwbare hoogfrequente meetapparatuur mogelijk werd kwam het capacitieve bodemvocht onderzoek weer in de belangstelling. De voordelen van deze methode zijn de snelle meting, het uitgestrekte meetbare vochttraject, het relatief onafhankelijk zijn van zoutinvloeden en de geschiktheid voor 'in situ' metingen.

Bij de meting van de relatie doorlatendheid-vochtspanning-vochtgehalte zoals deze in het laboratorium van het ICW geschiedt wordt - in tegenstelling tot de vochtspanning die op verschillende hoogten door middel van tensiometers in een grondkolom wordt gemeten - de verandering in vochtgehalte geregistreerd door weging van de gehele kolom (VEERMAN, 1978, BOELS et al, 1978). Hierbij wordt dus aangeno-

men dat de grondkolom geheel met homogeen materiaal gevuld is, hetgeen met praktijkmonsters zelden het geval zal zijn.

De ontwikkeling van een capacitieve grondvochtmeter met weinig volume innemende meetelementen zou meting van het vochtgehalte op die hoogten in de grondkolom waar ook de vochtspanning wordt gemeten mogelijk maken.

In het volgende zal, na een kort algemeen overzicht van de meetprincipes en de invloed van enkele fysische omstandigheden op de metingen, een proef met loessgrond besproken worden waarbij gebruik is gemaakt van een door de TFDL geconstrueerd prototype hoogfrequente meetapparatuur.

## 2. METING VAN DE DIËLEKTRISCHE CAPACITEIT

### 2.1. Enige begrippen

De diëlektrische constante ( $\epsilon$ ) is een materiaalconstante die de invloed aangeeft van het diëlektricum op de capaciteit van een condensator.

Een condensator bestaat uit 2 geleiders die gescheiden zijn door isolerend materiaal (het diëlektricum) en die daardoor elektrische lading kunnen bevatten. De hoeveelheid lading  $Q$  is afhankelijk van het potentiaalverschil  $V$  tussen de geleiders en de capaciteit  $C$  van de condensator ( $Q = CV$ ). De capaciteit wordt bepaald door de geometrische constructie van de condensator en is afhankelijk van de afmetingen van de geleiders en van de afmetingen en diëlektrische eigenschappen van het diëlektricum.

Als algemene formule gebaseerd op de wet van Coulomb geldt:

$$K = \frac{q_1 q_2}{\epsilon a^2}$$
, waarin  $K$  de aantrekkingskracht is tussen de ladingen  $q_1$  en  $q_2$  die over een afstand  $a$  gescheiden zijn door een uniform medium (diëlektricum) met diëlektriciteitsconstante  $\epsilon$ .

Diëlektrica zijn elektrisch slecht geleidende materialen; de elektronen zijn vast aan de atomen gebonden en kunnen niet vrij bewegen zoals in een geleider. Wel kan onder invloed van een elektrisch veld de verzameling elektronen als geheel een kleine ver-

plaatsing ondergaan ten opzichte van de positieve deeltjes: dit geeft aanleiding tot polarisatie van het medium.

De diëlektrische constante ( $\epsilon$ ) kan gedefinieerd worden als de factor waarmee de capaciteit van een plaatcondensator toeneemt wanneer zich in de ruimte tussen de platen in plaats van vacuüm een diëlektricum bevindt.

Diëlektrische verliezen komen al voor in een slecht geleidend materiaal in een constant elektrisch veld, daar 100% isolatie nooit bereikt wordt.

In een wisselend elektrisch veld nemen de verliezen toe doordat de toevoer van energie benodigd voor de opbouw van een elektrisch veld niet reversibel is. De vrijkomende energie bij verzwakking van het elektrisch veld is kleiner; het verschil tussen toegevoerde en vrijkomende energie is materiaal-afhankelijk en wordt als verliesfactor gekarakteriseerd door  $\tan \delta$ , waarbij  $\delta$  de zogenaamde verlieshoek is: het complement van de fasehoek tussen de stroom door en de spanning voor de condensator met het diëlektricum, gemeten met een frequentie van 50 Hz.

## 2.2. Basisprincipe

De meting van het vochtgehalte in grond is mogelijk doordat de diëlektrische constante van water (d.c.) ca. 81 (bij 20°C) en die van de in de grond aanwezige vaste bestanddelen in droge toestand slechts 4 tot 12 bedraagt. De grootte en variatie van de diëlektrische constante zal afhangen van de volumetrische verhouding vaste bestanddelen-water-lucht, waarbij de d.c. van lucht 1,000 bedraagt.

In tabel 1 worden de diëlektrische constanten van een aantal gesteenten en in de grond voorkomende vaste stoffen aangegeven.

De meeste niet-metalen in droge toestand hebben een vrij lage d.c. door hun zwak-polaire eigenschappen. In een wisselend elektrisch veld vormen zich dipolen die trillen met de veldsterkte: er ontstaat een 'elektrische polarisatie' (verlenging van de atoombanen) of een 'ionische polarisatie' (relatieve verplaatsing van positieve en negatieve ionen). De hierbij optredende energieverliezen zijn gering.

Tabel 1. Diëlektrische constanten van gesteenten en vaste stoffen in de bodem

CaCO <sub>3</sub>	6,14	Chalk	8,0- 9,0	Kwarts	4,2- 5,0
Kwarts	4,3	(middle Devonian)		K-veldspaten	4,5- 6,2
KNO <sub>3</sub>	5,0	Coral dolomite	8,0- 9,0	Anhydriet	5,7- 6,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,2(15°C)	Granite	7,0- 9,0	Muscoviet	6,2- 8,0
KCl	5,03	Limestone	8,0-12,0	Gips	5,0-11,6
NaCl	6,12	Sandstone	4,0-11,0	Dolomiet	6,8- 8,0
CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	5,66			Calciet	7,8- 8,5
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5,9			Augiet	6,9-10,3
Temp. 17-22°C				Bariet	7,0-12,2
Bron: Handbook of Chemistry and Physics, Weast, 48 <sup>th</sup> ed. 1967-1968		Bron: Smithsonian Physical Tables, Forsythe, 9 <sup>th</sup> rev. ed. 1969		Bron: Chernyak 1964	

Geplaatst in een elektrisch veld, plaatsen de dipolen van stoffen met een sterk polair karakter (water) zich in de richting van het elektrisch veld met een hoek die afhangt van de intensiteit ('dipolaire polarisatie'). Hierbij zijn de energieverliezen belangrijk. Moleculaire krachten kunnen de draaiing van de dipolen tegenwerken, waardoor een vermindering van de d.c. optreedt.

In een complex materiaal als grond zijn alle genoemde typen polarisatie aanwezig; de dipolaire polarisatie wordt echter bij toenemend vochtgehalte erg belangrijk en veroorzaakt een toename in d.c.

Omdat de energie, waarmee het water in de grond gebonden is, invloed heeft op de diëlektrische eigenschappen kan geen algemene wiskundige relatie tussen vochtgehalte en d.c. gevonden worden en zijn aparte ijkcurven nodig voor ieder soort materiaal.

Indien het vocht voornamelijk bestaat uit hygroscopisch gebonden water (granen, weefsels) dan is de draaiing van de dipolen geremd en neemt de d.c. slechts langzaam toe met het vochtgehalte.

De helling van de d.c.-vochtgehaltecurve is niet constant maar neemt toe bij hoger wordende vochtgehalten, waarbij de dipolen vrij kunnen draaien in het elektrisch veld (NORMAND, 1970).

### 2.3. Indirecte meting aan grondextract

In plaats van een directe meting van de d.c. in grond, kan ook indirect gemeten worden in een grondextract. De grond wordt dan ge-extraheerd met een vloeistof, die een sterk adsorberend vermogen voor water en een lage d.c. heeft.

SPAUSZUS (1955) gebruikt als extractiemiddel Eluan (dioxane + 10% azijnzuur, d.c. 2.2). Meting geschiedt in het filtraat, waarbij een ijkcurve gebruikt wordt, verkregen uit grond met verschillende vochtgehalten. Voor minerale gronden werd een goede overeenstemming gevonden met de via de oven-droog methoden bepaalde vochtgehalten; bij humeuze gronden lossen humusstoffen in Eluan op, waardoor te lage vochtgehalten werden gevonden.

VAN DER MAREL (1959) gebruikt dioxane (d.c. = 2.3) als extractiemiddel en vergelijkt de uitkomsten in de gedecanteerde vloeistof boven de grond-dioxane suspensie met een standaardreeks dioxane-water oplossingen. Het quotiënt  $\frac{\% \text{ water oven-droog methode}}{\% \text{ water dioxane methode}}$  bedroeg voor zand- en leemgrond, kleigronden, zoute gronden en ongerijpte zee-afzettingen, en voor veen en venige kleigronden respectievelijk 1.013, 1.056, 1.020 en 1.108-1.230. De auteur wijst op de veel grotere snelheid van de extractiebepaling ten opzichte van de oven-droog methode.

## 3. FACTOREN DIE DE METING KUNNEN BEÏNVLOEDEN

### 3.1. Frequentie

Bij lage frequenties kunnen verliezen ( $\tan \delta$ ) optreden door ionische geleiding, bij zeer hoge frequentie zijn de verliezen voornamelijk toe te schrijven aan het dipolaire karakter van het watermolecuul. Het frequentiebereik met de geringste verliezen ligt tussen  $10^7$  en  $10^8$  Hz (CHERNYAK, 1964) (fig. 1, tabel 2). Deze orde van grootte wordt door diverse onderzoekers min of meer bevestigd: CHILDS (1943:  $> 10^7$  Hz; NORMAND (1964):  $10^5 - 5 \times 10^6$  Hz; LEROY (1965):  $10^6 - 10^8$  Hz; KURÁŽ e.a. (1970):  $10^8$  Hz en TURSKI en MALICKI (1974):  $> 10^6$  Hz. Door PANDE en PANDE (1962) wordt vermeld dat toename van de frequentie boven  $10^9$  Hz de d.c. aanzienlijk doet dalen.



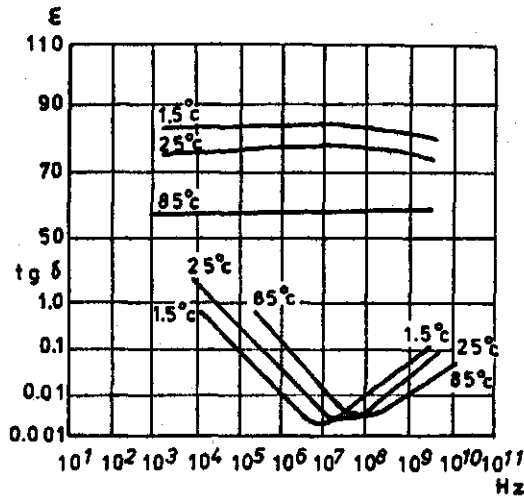


Fig. 1. Diëlektrische constante ( $\epsilon$ ) en verliestangens ( $\text{tg } \delta$ ) van water bij verschillende frequenties en temperaturen (CHERNYAK, 1964)

Tabel 2. Diëlektrische constante ( $\epsilon$ ) en verliestangens ( $\tan \delta$ ) van water bij verschillende frequenties en temperaturen

Temp. °C	Frequentie (Hz)					
	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	3 x 10 <sup>8</sup>	3 x 10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>	
1.5	$\epsilon$	87,0	87,0	86,5	80,5	38
	$\tan \delta \times 10^4$	1900	190	320	3100	10 300
25	$\epsilon$	78,2	78,2	77,5	76,7	55
	$\tan \delta \times 10^4$	4000	400	160	1570	5 400
45	$\epsilon$		71,5	71,0	70,7	59
	$\tan \delta \times 10^4$		590	105	1060	4 000

Bron: Smithsonian Physical Tables 9<sup>th</sup> rev. ed.; 4<sup>th</sup> reprint, 1969

### 3.2. V o c h t g e h a l t e

Bij sterk aan de grond gebonden (hygroscopisch) water valt een sterke toename van de d.c. te constateren met een stijging van het vochtgehalte tot ca. 10 gew. % water; bij hoger wordende vochtgehal-

ten neemt de d.c. minder sterk toe (NORMAND, 1964; FREDRICH, 1975). Voor laagsgewijze opgebouwde materialen als papier en textielweefsel zou bij lage frequentie ( $5 \times 10^3$  Hz) tot 10 gew. % vocht en bij hoge frequentie ( $1,6 \times 10^6$  Hz) tot 35 gew. % vocht het verband tussen vochtgehalte en d.c. lineair zijn (GREEN, 1965).

Voor grond werd een dergelijke rechtlijnige tendens aangetoond voor vochtpercentages beneden ca. 35 gew. % bij een viertal lemige gronden (FLETCHER, 1939) en bij een drietal zandfracties (PERSON, 1952) en voor het vochttraject tussen moisture equivalent (ca. 1/3 atmosfeer vochtspanning) en verwelkingspercentage (15 atmosfeerpercentage) (ANDERSON en EDLEFSEN, 1942). Een niet-lineair verband tussen vochtgehalte en d.c. wordt aangetoond door SKINNER (1975), die een grotere betrouwbaarheid van de metingen over het drogere vochttraject vermeld.

### 3.3. T e m p e r a t u u r

De temperatuur beïnvloedt de verschillende vormen van polarisatie, waardoor de diëlectrische constante en de diëlectrische verliezen temperatuurafhankelijk zijn (NORMAND, 1970).

De d.c. van water neemt af bij stijging van de temperatuur (fig. 2, curve 1). Tussen  $10^{\circ}$  en  $30^{\circ}\text{C}$  bedraagt de afname van de d.c. voor water ca. 0,37 per graad temperatuurstijging. Bij met water verzadigde gronden is de afname van de d.c. bij hoger wordende temperaturen gering en vrijwel rechtlijnig (fig. 2, curve 2). Bij gronden en gesteenten met een gering vochtgehalte neemt de d.c. al of niet rechtlijnig toe bij oplopende temperatuur (fig. 2, curven 3 t/m 6) (CHERNYAK, 1964).

Volgens SLATYER en Mc.ILROY (1961), COPE EN TRICKETT (1965) en KRAMER (1969) zijn correcties voor optredende temperatuurverschillen noodzakelijk. Eventueel aan te brengen correcties beperken zich echter volgens NORMAND (1970) tot 0,05-0,1 vochtgehalte-eenheden per  $^{\circ}\text{C}$ , wat vrijwel overeenkomt met de door BÄHN (1975) geconstateerde afwijking van 0,03-0,3 vol. %/ $^{\circ}\text{C}$  en de door FREDRICH (1975) vermelde 1% verandering bij een temperatuurwijziging van  $10^{\circ}\text{C}$ , waarbij de eerste vond dat de grotere fouten te verwachten zijn bij de lichtere

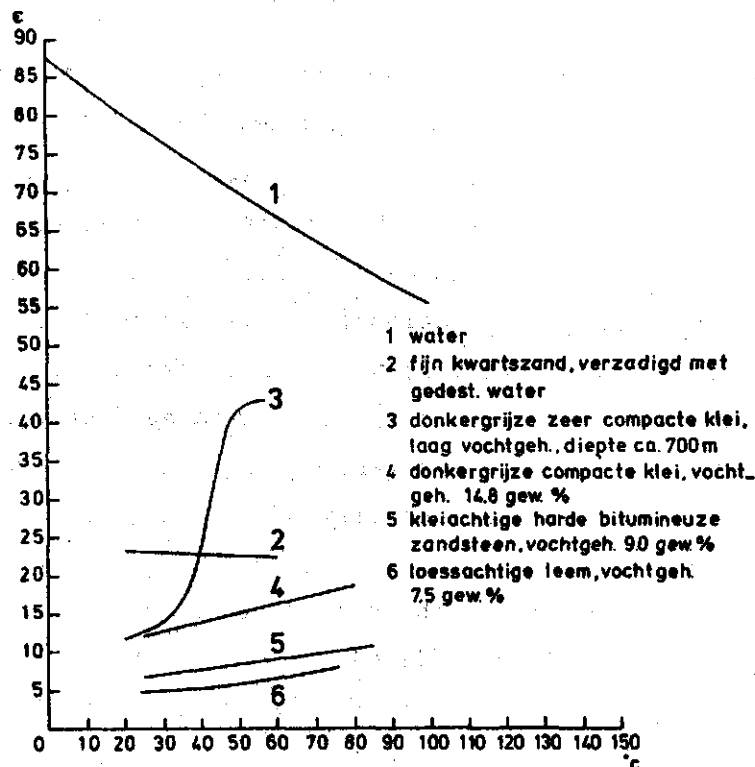


Fig. 2. De invloed van de temperatuur op de diëlektrische constante ( $\epsilon$ ) van water en van een aantal gronden:

- 1 : Hdb. Chem. Phys., 48 ed. 1967-68, Ed. R.C. Weast  
 2 t/m 6: naar CHERNYAK (1969)

gronden en de hoge vochtgehalten. Ook LINDNER (1972) vond in het temperatuurtraject tussen  $10,3^{\circ}\text{C}$  en  $28,3^{\circ}\text{C}$  voor lemig zand slechts een temperatuursinvloed op de capaciteitsmeetwaarde tussen 0,3 en 0,8% per  $^{\circ}\text{C}$  en tussen 0,7 en 1,4% per  $^{\circ}\text{C}$  voor respectievelijk lagere en hogere vochtgehalten. Een maximale verandering in de diëlektrische capaciteit van 0,02 eenheden per  $^{\circ}\text{C}$  in het traject van  $-40^{\circ}\text{C}$  tot  $+40^{\circ}\text{C}$  werd geconstateerd door JUMIKIS (1978) bij een achttal droge vorstgevoelige gronden.

Aangezien extreem sterke temperatuurfluctuaties zelden zullen voorkomen kan correctie van de meetresultaten in de meeste gevallen achterwege blijven (CHERNYAK, 1964), tenzij er een sterke afwijking optreedt van de temperatuur waarbij geijkt is (PANDE en PANDE, 1962).

### 3.4. O p g e l o s t e b e s t a n d d e l e n

Omtrent de invloed van in de bodemoplossing aanwezige elektrolyten zijn de onderzoeksresultaten niet eenduidig. Zo wijst BAIER (1952) op het gevaar dat het elektrisch geleidingsvermogen van de bodemoplossing de meting sterk kan beïnvloeden en constateren THORNE en RUSSELL (1947) een toename in de diëlektrische capaciteit bij toevoeging van elektrolytische oplossingen aan grondmonsters met een laag vochtgehalte. Ook BÄHN (1975) vond een sterke invloed van onder andere stikstof- en kalikunstmest op de meetwaarde door verandering van het elektrisch geleidingsvermogen; dit kwam het sterkst tot uiting bij gronden met een geringe uitwisselingscapaciteit en een hoog vochtgehalte.

Andere onderzoekers wijze echter op de geringe invloed van opgeloste zouten. Volgens CHERNYAK (1964) bedraagt de relatieve toename van de diëlektrische capaciteit slechts 0,15; 0,48 en 1,5% bij concentraties van respectievelijk 0,001; 0,01 en 0,1 mole per liter.

Alleen bij zeer hoge electrolytconcentraties (PANDE en PANDE, 1962) en bijvoorbeeld bij NaCl-concentraties van meer dan 0,7 mole per liter (NORMAND, 1970) zouden afwijkingen in de d.c.-metingen ontstaan.

Ook FLETCHER (1939), SLATYER en McILROY (1961), KRAMER (1969), SKINNER (1975) en FREDRICH (1975) wijzen erop dat de invloed van de zoutconcentratie in de bodemoplossing op de d.c. meting zeer gering is.

### 3.5. C o l l o ï d e n

Hierover is weinig bekend. FLETCHER (1939) vermeldt een hogere d.c. bij een hoger colloïdgehalte, daarentegen constateert JUMIKIS (1978) een afname van de d.c. bij groter worden van het specifieke oppervlak van bodemdeeltjes. THORNE en RUSSELL (1947) geven aan dat de variatie in kleigehalte dezelfde moeilijkheden oplevert als de variatie in oplosbaar zoutgehalte.

Volgens CHERNYAK (1964) veroorzaakt een toename van het aantal kleideeltjes twee tegengestelde effecten:

- a. een toename van de hoeveelheid sterk gebonden water (afname van de totale d.c. van de grond) en
- b. een ontwikkeling van elektrische dubbellen en polarisatie daarvan (toename van de totale d.c.).

### 3.6. P a k k i n g s g r a a d (dichtheid)

Hoewel PANDE en PANDE (1962) de pakkingsfactor voor capaciteitsmetingen minder belangrijk achten dan voor geleidbaarheidsmetingen, wijzen zowel zij als andere onderzoekers (PERSON, 1952; SLATYER en Mc.ILROY, 1961; SKINNER, 1975) op de afhankelijkheid van de d.c. van de pakkingsgraad.

HUGHES e.a. (1965) vonden voor meelmonsters dat deze afhankelijkheid sterker werd bij toename van het vochtgehalte van 9,5 tot 14%, waarbij de relatie capaciteit-dichtheid niet rechtlijnig was. Zij raden een correctie op een standaarddichtheid aan.

Bij toename van de dichtheid wordt door THORNE en RUSSELL (1947) een afname, door JUMIKIS (1978) echter een toename van de d.c. vermeld. GREEN (1965) noemt de pakkingsfactor bij granulair materiaal het grootste probleem en geeft als oplossingen:

- a. meten van de dichtheid (b.v. met gammastraling) en compensatie voor variabele pakking of
- b. het bewerkstelligen van een constante pakking (b.v. door vrije val of trilling).

LINDNER (1972) en BÄHN (1975) beoordelen de invloed van de dichtheid op de diëlektrische capaciteit als relatief gering en stellen eventueel een compensatie voor door het gebruik van verschillende ijkcurven.

### 3.7. C o n t a c t m e e t e l e m e n t - g r o n d

Of de contactomstandigheden tussen 'elektroden' en grond een belangrijke rol spelen wordt verschillend beoordeeld.

CHILDS (1943) benadrukt de onbetrouwbaarheid van de capaciteitsmeting bij slecht contact, vooral als het diëlektricum bij lage frequenties veel elektrische verliezen veroorzaakt. Aangezien de variaties in de capaciteit van een grondcondensator onder andere sterk afhankelijk zijn van contactomstandigheden die zich aan de controle van de onderzoeker onttrekken dient volgens Childs de voorkeur gegeven te worden aan weerstandsmetingen boven capaciteitsmetingen.

Ook KRAMER (1969) vermeldt de onbetrouwbaarheid van capaciteits-

bepalingen tengevolge van onvoldoende contact met de grond. Om de invloed hiervan te verminderen gebruiken zowel ANDERSON en EDLEFSEN (1942) als WALLIHAN (1945) gips als omhullingsmateriaal van de meetelementen.

In tegenstelling tot Childs oordeelt de PLATER (1955) dat de meetvariatiës door onvoldoende contact aanmerkelijk minder zijn bij capaciteitsmetingen dan bij weerstandsmetingen.

PANDE en PANDE (1962) achten het niet noodzakelijk dat het te meten materiaal in contact is met de 'electroden', wat gesteund wordt door FLETCHER (1965) en door LEROY (1965), welke laatste stelt dat een laag lucht tussen meetelement en materiaal de storende geleidingsstromen (-verliezen) vrijwel elimineert.

#### 4. MEETMETHODEN

In het kort zullen enige meetprincipes beschreven worden die gebaseerd zijn op door variaties in vochtgehalte veroorzaakte capaciteitsveranderingen en die in hoofdzaak ontleend zijn aan NORMAND (1970) en FLETCHER (1965).

##### 4.1. Meetelementen

In principe kan onderscheid gemaakt worden tussen twee typen: een condensator en een (inductie) spoel of solenoïde.

##### 4.1.1. Condensator

Het diëlektricum bestaat hierbij uit het materiaal waarvan het vochtgehalte moet worden gemeten. De condensator kan bestaan uit 2 vlakke parallelle metalen platen, waar tussen het materiaal (b.v. grond) wordt aangebracht (fig. 3). De condensator kan ook zijn opgebouwd uit een metalen plaat met parallel daaraan een metalen cylinder, uit 2 parallelle cylinders, of uit twee concentrische of excentrische cylinders, die al of niet ingebed zijn in of omhuld door gips. Voor speciale doeleinden kunnen aangepaste condensatoren worden aangewend zoals bijvoorbeeld voor dieptemetingen (fig. 4).

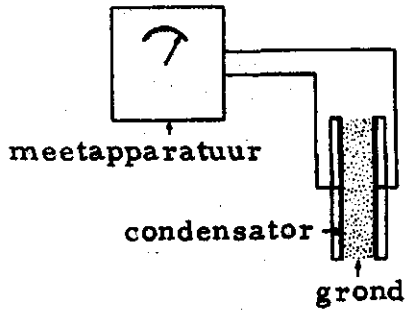


Fig. 3.

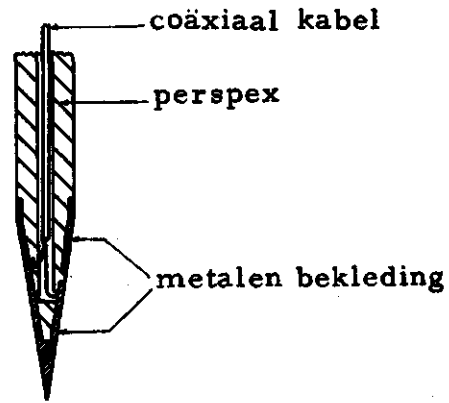


Fig. 4. capacatieve sonde

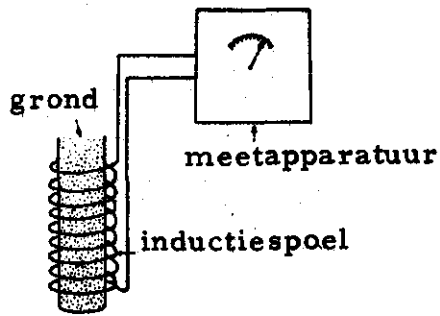


Fig. 5.

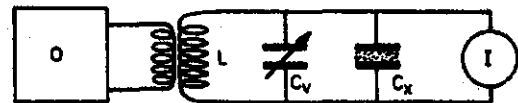


Fig. 6. circuit gebaseerd op resonantie

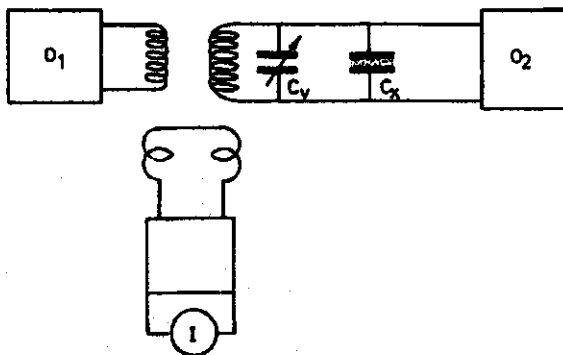


Fig. 7. circuit gebaseerd op vergelijking van twee frequenties

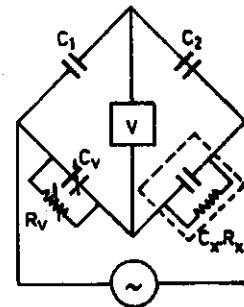


Fig. 8. brugcircuit

Fig. 3 t/m 8. Meetprincipes (NORMAND, 1970)

#### 4.1.2. Inductiespoel

De grond wordt hier gebracht binnenin een spoel, die een zelf-inductie heeft (fig. 5). Verandering in vochtgehalte veroorzaakt een wijziging in deze zelfinductie waardoor de resonantie-frequentie van het meetcircuit waarin de spoel is opgenomen verandert. De invloed van het vochtgehalte is dezelfde als de grond een spoel omringt in plaats van er de kern van te vormen.

#### 4.2. Meetcircuits

Onderscheiden kunnen worden circuits, gebaseerd op resonantie; circuits waarbij twee frequenties worden vergeleken en brugcircuits.

##### 4.2.1. Circuits gebaseerd op resonantie (fig. 6)

Een spoel  $L$  is parallel geschakeld met een variabele capaciteit  $C_v$  en met de capaciteit  $C_x$  van het meetelement dat de grond bevat, waarbij door een oscillator  $O$  een constante wisselstroom met hoge en stabiele frequentie wordt opgewekt.

De resonantie, die gemeten kan worden met een elektronische voltmeter of met een oscilloscoop of electronenstraalbuis wordt verkregen met behulp van de variabele condensator  $C_v$  op maximale capaciteit en de daaraan parallel geschakelde lege condensator  $C_x$ . Als de capaciteit van  $C_x$  toeneemt door het inbrengen van vochtige grond wordt het circuit ontregeld; de resonantie wordt hersteld door de capaciteit van  $C_v$  te verminderen. De verandering  $\Delta C_v$  is gelijk aan de verandering  $\Delta C_x$ ;  $\Delta C_v$  kan geijkt worden tegen de verandering in vochtgehalte.

Voordeel: eenvoudige meting, onafhankelijk van de amplitude.

Nadeel : weinig gevoelig bij hogere vochtgehalten door diëlektrische verliezen; de frequentie van de oscillator moet zeer stabiel zijn.

##### 4.2.2. Circuits gebaseerd op vergelijking van twee frequenties

(fig. 7)

Hierbij wordt het verschil in frequentie van een oscillator met constante frequentie  $F_1$  en een oscillator met veranderlijke frequen-



tie  $F_2$  gemeten.

De toename in capaciteit teweeggebracht door een toename van het vochtgehalte brengt een verlaging van de frequentie teweeg. Indien nu de constante frequentie  $F_1$  'gemengd' wordt met de variabele frequentie  $F_2$  ontstaat een nieuwe frequentie  $F_3 = F_1 - F_2$ .

Oscillator  $O_2$  wordt dusdanig ingesteld dat een stroom met frequentie  $F_2 = F_1$  (oscillator  $O_1$ ) ontstaat als de condensator  $C_x$  leeg is en de variabele condensator  $C_v$  op maximale waarde is ingesteld: de resulterende frequentie  $F_3$  is dan = 0. Als  $C_x$  toeneemt, neemt  $F_2$  af en  $F_3$  krijgt een zekere waarde, die wordt gemeten met indicator I.

Met behulp van  $C_v$  wordt nu de verandering in  $C_x$  dusdanig gecompenseerd dat de resulterende frequentie  $F_3$  weer = 0 wordt.

Ook kan meetapparatuur gebruikt worden die een verandering in frequentie  $F_3$  lineair transformeert in een stroomverandering. In dat geval blijft de waarde van  $C_v$  constant.

Voordeel: grote gevoeligheid.

Nadeel : goede stabiliteit is moeilijk bereikbaar; ook hier kunnen diëlektrische verliezen de meting beïnvloeden.

#### 4.2.3. Brugcircuits (fig. 8)

Het gebruik van brugcircuits, gevoed met wisselstroom maakt het in bepaalde gevallen mogelijk het effect van de diëlektrische verliezen te compenseren. De meetbrug wordt in evenwicht gesteld door manipulatie van de variabelen  $C_v$  en  $R_v$  als functie van de capaciteit  $C_x$  van het te meten materiaal en van de weerstand  $R_x$  overeenkomend met de diëlektrische verliezen.

De evenwichtsinstelling is echter moeilijk te realiseren en dit type metingen blijft voornamelijk voorbehouden aan laboratoriummetingen van monsters.

## 5. PROEFMETINGEN

In het laboratorium is een aantal metingen verricht met een door de TFDL vervaardigd prototype capacitieve grondvochtmeter, waarbij gebruik gemaakt werd van twee verschillende meetelementen. De proeven werden uitgevoerd met een loessgrond als diëlektricum, waarbij de temperatuur vrijwel constant gehouden werd ( $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ).

### 5.1. Meetapparatuur

#### 5.1.1. Grondvochtmeter (TFDL, 1977)

De op 220 V. netspanning aansluitbare vochtmeter levert een frequentie-output van 1,17-1,25 MHz en een recorder-output van 0 tot 1 Volt. Beide outputs hebben een inwendige weerstand van 1 K $\Omega$ .

De mogelijkheid tot aansluiting van een frequentieteller met een gevoeligheid < 10 Volt en een bereik > 2 MHz werd niet gebruikt.

Op de coaxiale aansluiting voor het meetelement kan ook een ijk-unit met twee omschakelbare referentiecapaciteiten worden aangesloten. Op stand C-nul en C-maximaal van deze unit moet de uitgangsspanning respectievelijk 0,00 Volt en 1,00 Volt zijn; met behulp van een in de grondvochtmeter ingebouwde instelpotentiometer kan naar deze spanningen gecorrigeerd worden.

De temperatuurgevoeligheid van de vochtmeter is < 0,05%/ $^{\circ}\text{C}$ .

#### 5.1.2. Meetelementen

Twee typen werden aangewend:

- a. open meetelement (fig. 9a), lengte coaxiaal kabel 91 cm,
- b. meetelement met zilverzandvulling waarin de cilindrische buitenwand bestaat uit fijn-poreuze nikkelplaat (fig. 9b). Van dit type werden 2 exemplaren gebruikt met coaxiaal kabellengten van 83 en 85 cm.

#### 5.1.3. Recorder

De outputspanning van de grondvochtmeter werd geregistreerd door een Servogor-lijnschrijver, type RE 511 (Goerz-Oostenrijk).

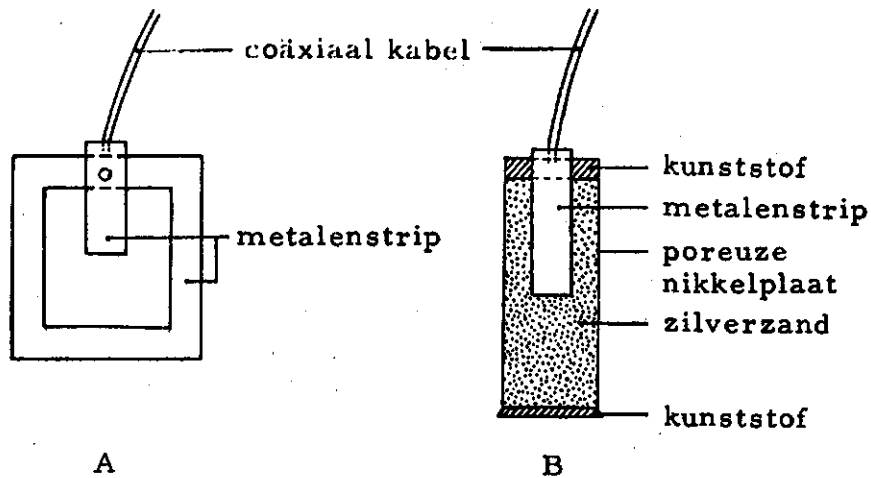


Fig. 9a. Open meetelement

Fig. 9b. Met zilverzand omhuld meetelement

## 5.2. G r o n d m o n s t e r s

Luchtdroge loessgrond werd in kunststofringen (inwendige doorsnede 8,00 cm, hoogte 4,97 cm, wanddikte 0,3 cm, inhoud  $250 \text{ cm}^3$ ) dusdanig ingevuld dat een volumegewicht van  $1400 \text{ kg/m}^3$  werd bereikt, waarbij de bodemzijde van de ringen was afgesloten door hydrophiel nylon-gaas dat werd gefixeerd door middel van een rubberband om de ring.

In een der ringen werd voor het invullen met grond het open meetelement ingebracht, waarvan de coëxiaal-kabel in een doorboorde en in de lengte half doorgesneden rubber kurk werd geklemd, passend in een opening (doorsnede 1,2 cm) op halve hoogte in de wand van de ring (monster 1). In twee andere ringen werd op dezelfde wijze een meetelement met zilverzand vulling aangebracht (monsters 2a en 2b). Tenslotte werd een vierde ring zonder meetelement met loess gevuld, die als 'blanco' in de proef werd meegenomen (monster 3).

## 5.3. M e e t p r o c e d u r e

De ringen met loessgrond werden, na op een zandbak met water te zijn verzadigd, onderhevig gesteld aan de volgende zuigspanningen: 3,2; 10,0; 31,6; 100, 200 en 500 cm waterkolom overeenkomend met respectievelijk pF 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,3 en 2,7 (STAKMAN et al,

1969). De afname in vochtgehalte werd bepaald door de monsters (incl. meetelement en kabel) elke dag te wegen (nauwkeurigheid 0,1 gram); direct voor elke weging werd de diëlektrische capaciteit gemeten, waarbij steeds vooraf de uitgangsspanningen van 0 en 1 Volt zonodig met de instelpotentiometer werden gecorrigeerd.

Monster 1 werd hierna in een perspex-pers op een cellophaan-membraan geplaatst, waarop een druk van  $294,2 \times 10^3$  Pa ( $3 \text{ kg/cm}^2$ , pF 3,5) werd ingesteld. Na bereiken van het vochtevenwicht (geen afgifte van water meer) werd het monster gewogen en werd de diëlektrische capaciteit gemeten.

Monsters 2a en 4 werden na de bepaling van pF 2,7 en monster 1 na de bepaling van pF 3,5 in evenwicht gebracht met de in de laboratoriumtuimte heersende constant gehouden relatieve vochtigheid van 47% (+ 3%), overeenkomend met een zuigspanning van pF 6,0 (STAKMAN, 1968).

Hierna werden de monsters (monster 2b direct na de pF 2,7-bepaling) bij  $105^\circ \text{C}$  gedroogd, waarna voor elke verrichte weging het gewichts- en volumepercentage water werd berekend, waarbij gecorrigeerd werd op gewicht en volume van meetelement en kabel.

#### 5.4. M e e t r e s u l t a t e n

De geregistreerde gegevens van de loessgrond zijn vermeld in tabel 3, waarbij ook de meetwaarden van de gebruikte meetelementen in water, respectievelijk lucht zijn opgenomen.

Het verschil in dichtheid (volumegewicht) voor en na de proef kan toegeschreven worden aan het verlies van zeer fijne bodemdeeltjes door uitspoeling waardoor 2,2% van de uitgangswaarde verloren gaat.

De instelsnelheid van de meetwaarde bij het overbrengen van de meetelementen van lucht in water en omgekeerd (temperatuur  $20-21^\circ \text{C}$ , relatieve luchtvochtigheid 45-50%) is afhankelijk van de constructie van het meetelement zoals tabel 4 aangeeft.

Tabel 3. Output (mV) capacitieve grondvochtmeter (TFDL) bij evenwichtsvochtgehalten bij verschillende vochtspanningen in loessgrond, en meetwaarden in water en lucht

Zuigspanning		Monster 1		Monster 2a		Monster 2b		Monster 3	
cm water	pF	vochtgehalte Gew. % vol. %	output mV	vochtgehalte Gew. % vol. %	output mV	vochtgehalte Gew. % vol. %	output mV	vochtgehalte Gew. % vol. %	output mV
= luchtdroog		-	40	-	15	-	2	-	-
0	- ∞	-	510	-	906	-	625	-	-
3,2	0,51	36,9	50,5	38,7	52,8	37,4	51,3	37,8	52,0
10,0	1,00	34,1	46,7	35,5	48,4	34,1	46,8	34,7	47,8
31,6	1,50	32,1	44,0	32,8	44,8	32,1	44,0	32,5	44,8
100	2,00	29,8	40,8	30,1	41,1	29,6	40,6	30,0	41,3
200	2,30	27,5	37,6	27,8	37,9	27,3	37,4	27,8	38,2
501	2,70	20,4	27,9	20,7	28,3	(87)*	20,6	28,2	20,5
$3 \times 10^3$	3,48	15,2	20,8	-	-	-	-	-	-
$10^6$	6,00	2,5	3,5	2,6	3,6	*	-	2,4	3,3
Meetelement in water (20,5°C)			760		986		= 1000		
Meetelement in lucht (20,5°C)			12		10		= 0		
Dichtheid (kg/m <sup>3</sup> ) begin proef		1400		1400		1400		1400	
Dichtheid (kg/m <sup>3</sup> ) einde proef		1367		1364		1371		1376	
		open meetelement	omhuld meetelement	omhuld meetelement	omhuld meetelement				

\*meetelement defect

Tabel 4. Insteltijd eindmeetwaarde van meetelementen

		Lucht → water	Water → lucht
Open element	(1)	1 sec.	2 sec.
Element in zilverzand	(2a)	15 min.	5 à 6 uur
Idem	(2b)	10 min.	13 à 14 uur

In fig. 10 zijn de meetresultaten bij vochtgehalten tussen verzadiging en luchtdroog uitgezet, waarbij ook de samenhang tussen volumetrische vochtgehalten en vochtspanning zowel voor loess als voor het bij de meetelementen 2a en 2b gebruikte omhullingsmateriaal zilverzand is aangegeven.

Uit de figuur blijkt dat de zilverzandelementen slechts over een beperkt vochtgehalte- (40-48 vol. %) en vochtspanningstraject (pF 2,0-1,0) bruikbaar zijn. De relatie tussen capacatieve output-waarde en vochtgehalte lijkt hierbij overwegend te worden beïnvloed door de samenhang tussen vochtspanning en vochtgehalte in het zilverzand.

Het open meetelement laat een rechtlijnig verband zien tussen output-waarde en vochtgehalte volgens:

$$Y = 1,074 x - 3,127 \quad (\text{corr. coëff. } 0,99)$$

waarin:

Y = capacatieve meetwaarde (mV x 10<sup>-1</sup>)

x = vochtgehalte (vol. %)

Het open meetelement lijkt dus goed bruikbaar voor een diëlektrische bodemvochtbepaling. Wordt echter het betrouwbaarheidsinterval van het vochtgehalte bij een nieuwe meting berekend dan blijkt de breedte van het interval ongeveer 5 schaal eenheden te bedragen. Met andere woorden er is 95% kans dat een vochtgehalte van bijvoorbeeld 10 vol. % bij herhaling van de meting zal liggen tussen 7,5 en 12,5 vol. % vocht.

Verfijning van de meetapparatuur (o.a. nulpuntsstabilisatie?) zal de breedte van het betrouwbaarheidsinterval sterk kunnen beperken.

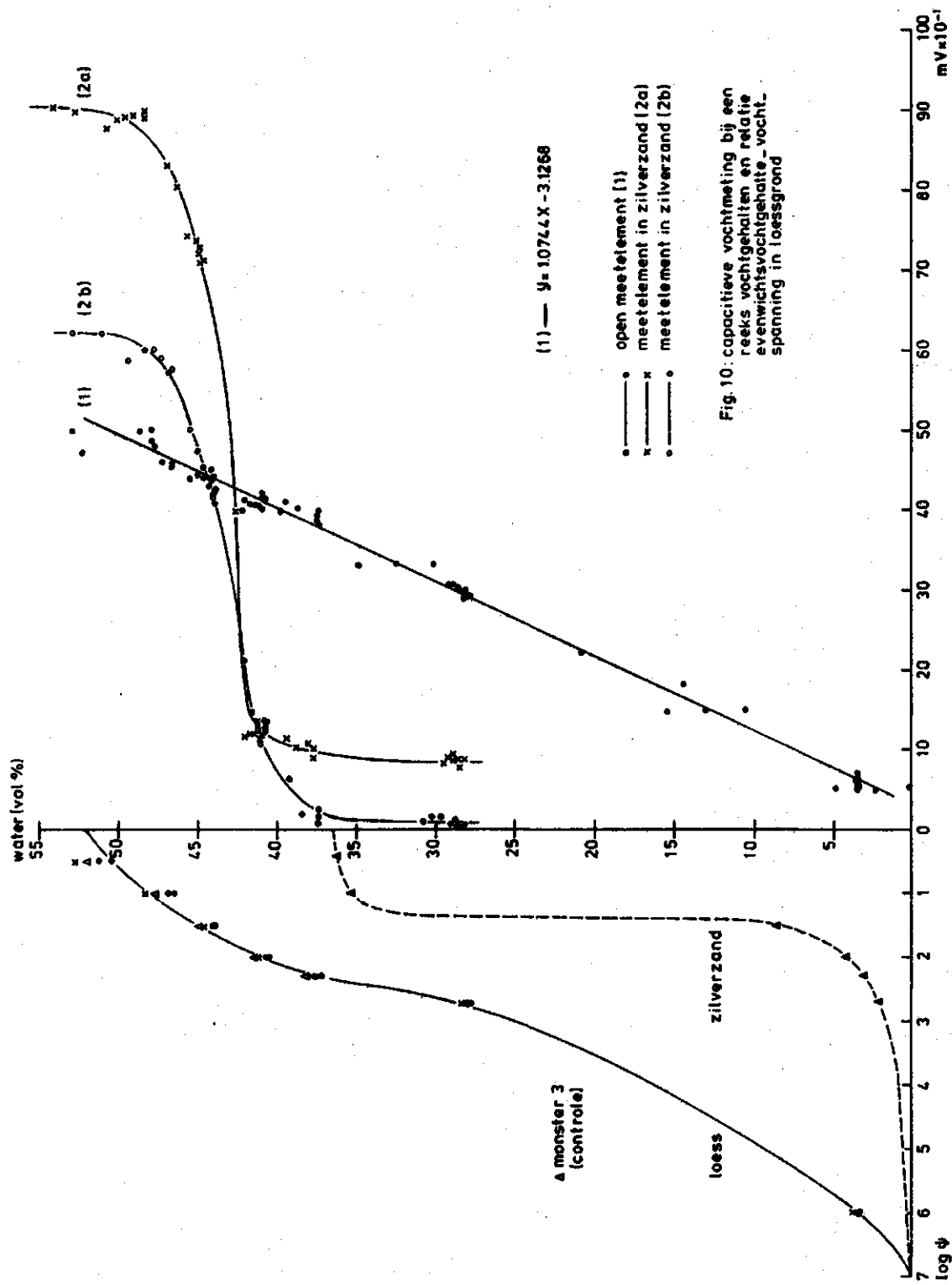


Fig. 10. Capacatieve vochtmeting bij een reeks vochtgehalten en relatieve evenwichtsvochtgehalte-vochtspanning in loessgrond

Onderzocht zou nog dienen te worden of een andersoortig omhul-  
lingsmateriaal dan zand, bijvoorbeeld dezelfde grond als waarvan de  
vochtcondities worden gemeten, betrouwbare resultaten kan opleveren.  
Tevens zou dan de invloed van aantal en grootte van de perforaties  
in de omhullende cilindrische metaalplaat (groter contactoppervlak)  
op de snelheid van evenwichtsinstelling kunnen worden nagegaan.

## 6. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Hoewel aan het onderzoek naar de mogelijkheid van een capaciti-  
ve grondvochtmeting als sinds ongeveer 1930 aandacht is besteed, is  
het nooit tot een praktische toepassing van enige betekenis gekomen.  
Dit was enerzijds toe te schrijven aan het feit dat de ontwikkeling  
van apparatuur met hoge frequentie, benodigd om de geleidingsverlie-  
zen tot een minimum te beperken (tabel 2, fig. 1) pas de laatste ja-  
ren grote vorderingen maakte en anderzijds aan de snelle ontwikkeling  
van geleidbaarheidsmeters en weerstandmeters, die al snel relatief  
goedkoop in de handel beschikbaar kwamen.

De allerminst eenduidige resultaten van capacitieve vochtme-  
tingen en de verschillende conclusies omtrent de invloed van onder  
andere temperatuur, dichtheid, opgelosten bestanddelen en contact  
meetelement-grond zoals deze in de literatuur vermeld worden, zijn  
voor een belangrijk deel terug te voeren op onvolmaakte meettechnie-  
ken en het gebruik van (te) lage frequenties, wat aanzienlijke ge-  
leidingsverliezen tengevolge had.

De geleidingsverliezen zijn minimaal bij frequenties van  $10^6$  tot  
 $10^8$  Hz. Opgeloste zouten beïnvloeden de meting slechts in zeer ge-  
ringe mate, dit in tegenstelling tot weerstandsmetingen.

De temperatuursinvloed op de metingen is gering en bedraagt glo-  
baal 0,05-0,1 volumeprocenten vochtverandering per grond tempera-  
tuurswijziging; slechts bij extreme afwijkingen van de ijkingsstempe-  
ratuur zal het gebruik van meerdere calibratiecurven of correctie-  
factoren noodzakelijk zijn.

Over de invloed van de pakkingsgraad en van het contact meetele-  
ment-grond bestaat geen eenduidigheid. Verder onderzoek zal moeten



uitwijzen in hoeverre calibratiecurven bij verschillende dichtheden noodzakelijk zijn.

De met de door de TFDL ontwikkelde hoogfrequente meetapparatuur (ca. 1,2 MHz) en open meetelement voor geringe afmetingen gaven voor een loessgrond onder constante temperatuurcondities een rechtlijnig verband tissen meetwaarde en vochtgehalte te zien over een vochttraject van 4 tot 53 volumeprocenten (vochtspanningstraject 3 tot  $10^b$  cm.waterkolom) (fig. 10).

De betrouwbaarheid van de metingen laat echter, gezien het betrouwbaarheidsinterval van 5 schaaleenheden (vol. % vocht, 95% kans) te wensen over. Het laat zich aanzien dat opvoering van de betrouwbaarheid vooral bereikt kan worden door technische vervolmaking van de meetapparatuur (b.v. nulpuntsstabilisatie, contactpunten coëxiaal kabel met apparatuur en meetelement).

De geringe, eventueel nog te verkleinen afmetingen van het meetelement maken de capacitieve methode bij uitstek geschikt voor vochtgehaltemetingen op verschillende diepten in grondkolommen. Bij de geautomatiseerde bepaling van de samenhang tussen vochtgehalte, vochtspanning en onverzadigde doorlatendheid kan dit een verbetering betekenen van het huidige meetsysteem, waarbij de vochtgehalteverandering van de gehele grondkolom door middel van weging wordt bepaald.

Concluderend kan gezegd worden dat - bij gebruik van adequate apparatuur - de voordelen van de diëlektrische capaciteitsmeting zijn: het grote meetbare vochttraject, de snelheid van de meting en de zeer geringe invloed van elektrolyten; als nadelen gelden de benodigde ijking voor verschillende grondsoorten en de vooralsnog onzekere invloed van de dichtheid van de grond en van het contact meetelement-grond.

## LITERATUUR

- ANDERSON, A.B.C. and N.E. EDLEFSEN (1942). The electrical capacity of the 2-electrode plate of Paris block as an indicator of soil moisture content. *Soil Sci.* 54, 35-46.
- BÄHN, W. (1975). Untersuchung über den Einfluss von Bodendichte, Temperatur und Düngung auf den Messwert bei einem dielektrischen Bodenfeuchtemessverfahren. *Arch. Acker- und Pfl. bau und Bodenkunde* 19-5, 355-364.
- BAIER, W. (1952). Über elektrische Messungen der Bodenfeuchte. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der U.S.-Zone* 32, 22-24.
- BAVER, L.D. (1956). *Soil physics* 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley - London.
- BOELS, D., J.B.H.M. VAN GILS, G.J. VEERMAN and K.E. WIT (1978). Theory and system of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivities. *Soil Sci* 126-4, 191-199.
- CHERNYAK, G. YA. (1964). Dielectric methods for investigating moist soils. State Geological Committee of the U.S.S.R., translated from Russian, Israel Program for Scientific Translations, 1967.
- CHILDS, E.C. (1943). A note on electrical methods of determining soil moisture. *Soil Sci.* 55, 219-223.
- COPE, F. and E.S. TRICKETT (1965). Measuring soil moisture. *Soils and Fertilizers* XXVIII-3, 201-208.
- FLETCHER, J.E. (1939). A dielectric method for determining soil moisture. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 4, 84-88.
- (1965). The use of capacitance methods for determining quantities of materials in mixtures. *Humidity and Moisture IV*, 113-117. Reinhold Publ. Corp. - New York.
- GARDNER, W.H. (1965). Water content. *Methods of Soil Analysis I*, 82-127. *Agronomy* 9, C.A. Black et al. (Ed.), Am. Soc. Agron.
- GREEN, R.M. (1965). Continuous moisture measurement in solids. *Humidity and Moisture IV*, 141-145. Reinhold Publ. Corp. - New York.
- HOLMES, J.W., S.A. TAYLOR and S.J. RICHARDS (1967). Measurement of soil water. *Irrigation of agricultural lands*, 15, 275-303, *Agronomy* 11, R.M. Hagan et al. (Ed.), Am. Soc. Agron.

- HUGHES, F.J., J.L. VAALA and R.B. KOCH (1965). Improvement of moisture determination by capacitance measurement through density correction. Humidity and Moisture IV, 95-98. Reinhold Publ. Corp. - New York.
- JUMIKIS, A.R. (1978). Dielectric constant and electroconductance of some dry frost-prone soils. Soil Sci. 125-3, 170-177.
- KRAMER, P.J. (1969). Plant and soil water relationships. Mc Graw-Hill Book Co., New York.
- KURÁZ, V., M. KUTILEK and I. KAŠPAR (1970). Resonance capacity soil moisture meter. Soil Sci. 110-4, 278-279.
- LEROY, R.P. (1965). Moisture measurements by high-frequency currents. Humidity and Moisture IV, 135-140. Reinhold Publ. Corp. - New York.
- LINDLER, H. (1972). Vergleichsprüfung verschiedener Bodenfeuchte sensoren. Arch. Acker- und Pfl. bau und Bodenkunde 16-12, 887-896
- MAREL, H.W. VAN DER (1959). Rapid determination of soil water by dielectric measurement of dioxane extract. Soil Sci. 87-2, 105-119.
- NORMAND, M. (1970). La mesure de l'humidité du sol; application aux problèmes d'hydraulique agricole. Bull. techn. de Génie Rural 103, 179-208.
- PANDE, A. and C.S. PANDE (1962). Physical methods of moisture measurement. Instrument Practice 16, I: 896-903 II: 988-995, IV: 1246-1250.
- PERSON, H. (1952). Über elektrische Messungen der Bodenfeuchte. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der U.S.-Zone 32, 22-24.
- PLATER, C.V. DE (1955). A portable capacitance-type soil moisture meter. Soil Sci 80-5, 391-395.
- SKINNER, R.J. (1975). Moisture determination in soil - soil physical conditions and crop production. Techn. Bull. 29, 218-227, Min. Agr., Fish. and Food, H.M. Stationary Office, London.
- SLATYER, R.O. and I.C. Mc ILROY (1961). Practical microclimatology with special reference to the water factor in soil-plant-atmosphere relationships. pp. 3-32. UNESCO - Paris.

- SPAUSZUS, S. (1955). Eine Schnellbestimmung der Bodenfeuchtigkeit durch Messung der Diëlektrizitätskonstante. Z.f. Pfl. Ernährung, Düngung und Bodenk. 70 (115) 1, 23-26.
- STAKMAN, W.P. (1968). Bepaling van vochtspanning en vochtgehalte in gronden door middel van dampspanningsevenwichten. Med. 111, I.C.W.; Versl. Landbouwk. Onderzoek 693, Pudoc.
- , G.A. VALK and G.G. VAN DER HARST (1969). Determination of soil moisture retention curves. I. Sand-box apparatus  
II. Pressure membrane apparatus. Inst. for Land and Water Management Research (I.C.W.)
- THORNE, M.D. and M.B. RUSSELL (1947). Dielectric properties of soil moisture and their measurement. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 12, 66-72.
- TURSKI, R. and M. MALICKI (1974). A precise laboratory meter of a dielectric constant of soil of a different moisture. Polish. J. Soil Sci. VII-1, 71-79
- VEERMAN, G.J. (1978). Onderzoek naar de mogelijkheden van automatisering van de bepaling van capillair geleidingsvermogen en pF-curve. Nota 955, I.C.W.
- WALLIHAN, E.F. (1945). Studies of the dielectric method of measuring soil moisture. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 10, 39-40.