

OTA 934 <sup>I</sup>

NN31545.0934

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding  
Wageningen

**BIBLIOTHEEK DE HAAFF**

Droevendaalsesteeg 3a  
Postbus 241  
6700 AE Wageningen

CONSTRUCTIE EN BEPROEVING VAN EEN  
TENSIO-METER-DRUKOPNEMER SYSTEEM VOOR  
VOCHTSPANNINGSMETINGEN IN KASGRONDEN

Ph. Hamaker

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemidde-  
len, 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 onderzoek nog  
niet is afgesloten.

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



703795 13 FEB. 1998

## I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. VOCHTSPANNINGSMETINGEN MET TENSIOMETERS	2
3. BESCHRIJVING VAN HET TENSIOMETER-DRUKOPNEMERSYSTEEM	3
4. ONDERDELEN VAN HET SYSTEEM	6
4.1. Pijpverbindingen	6
4.2. Slangverbindingen	6
4.3. Koppelstukken	6
4.4. Kranen	7
4.5. Tensiometers	7
4.6. Zuiger	8
4.7. Drukopnemer	8
4.8. Electriche gedeelte	9
5. TESTEN VAN DE ONDERDELEN	10
5.1. Bepaling van de capaciteit	10
5.2. Luchtlekkage	12
5.3. Waterverplaatsing bij kraanbediening	13
5.4. Invloed van temperatuursveranderingen	13
6. OPBOUW VAN HET SYSTEEM, CALIBRATIE EN MEETPROCEDURE	15
6.1. Opbouw van het stysteem	15
6.2. Calibratie van de drukopnemer	15
6.3. Vochtspanningsmetingen met de drukopnemer	16
6.4. Meetprocedure in het natte traject	18
6.5. Meetprocedure in het droge traject	18

	blz.
7. BEPROEVING VAN HET SYSTEEM	19
7.1. Metingen in groeisubstraat	19
7.2. Metingen in kasgrond	22
8. SAMENVATTING	23
LITERATUUR	24
BIJLAGE	25

## 1. INLEIDING

Gedurende de laatste jaren hebben een aantal ontwikkelingen plaatsgevonden op het gebied van de watervoorziening van onder glas geteelde gewassen. In het algemeen wordt er meer aandacht besteed aan de frequentie en de duur van de berekening. Daarnaast dient de introductie van strookberekening te worden genoemd, evenals de toepassing van apparatuur waarmee de berekening geheel automatisch plaatsvindt op basis van metingen van de globale straling.

Deze ontwikkelingen roepen vragen op ten aanzien van de vocht-huishouding van het bewortelde bodemprofiel. Voor een beantwoording van de vragen zijn onder meer betrouwbare metingen van de vochtspanning vereist. Deze Nota gaat over een daartoe ontwikkeld tensiometer-drukopnemer systeem.

Na een aantal algemene opmerkingen over vochtspanningsmetingen met tensiometers in Hoofdstuk 2 volgt een gedetailleerde beschrijving van het systeem en de onderdelen waaruit het is opgebouwd in de Hoofdstukken 3 en 4. Daarna worden de meetprocedure en de mogelijkheden en beperkingen van het systeem besproken aan de hand van een aantal onder kasomstandigheden verrichte metingen.

## 2. VOCHTSPANNINGSMETINGEN MET TENSIOMETERS

De tensiometer is een algemeen gebruikt instrument voor meting van de vochtspanning van het bodemvocht in het relatief natte traject. Een tensiometersysteem bestaat uit een voeler in de grond en een daarmee verbonden instrument om de druk van het water in de voeler te meten. De voeler is meestal een keramisch pijpje en wordt in deze Nota verder aangeduid als de tensiometer. Het water in de tensiometer staat via de poreuze wand in contact met het bodemvocht. De vochtspanning ter plaatse van de tensiometer kan uit de gemeten druk worden afgeleid wanneer aangenomen wordt dat de potentiaal van het bodemvocht en van het water in de tensiometer aan elkaar gelijk zijn.

De vochtspanning is een dynamische grootte welke onder invloed van beregening, drainage en wateronttrekking door de plantenwortels aan voortdurende veranderingen onderhevig is. Bestudering van de vochtthuishouding van het bodemprofiel vereist nauwkeurige metingen van veranderingen van de vochtspanning met de tijd. Bij verandering van de vochtspanning zal transport van water via de poreuze wand van de tensiometer plaatsvinden om een nieuwe evenwichtstoestand tussen de vochtspanning in de grond en de druk van het water in de tensiometer te bereiken. Een snelle evenwichtsinstelling bij verandering van de vochtspanning is vereist voor het doen van betrouwbare metingen. De snelheid van evenwichtsinstelling wordt door zowel bodemkundige factoren als door de eigenschappen van de tensiometer en de methode van drukmeting bepaald. Wat de bodemkundige factoren betreft is met name het watergeleidingsvermogen van de grond rondom de tensiometer van belang. De evenwichtsinstelling zal altijd trager verlopen naarmate het geleidingsvermogen daalt bij afname van het vochtgehalte van de grond. Ook de grootte van het contactoppervlak tussen tensiometer en grond en de doorlatendheid van de poreuze wand spelen een belangrijke rol. Onder overigens gelijke omstandigheden is de evenwichtsinstelling sneller naarmate het contactoppervlak groter is, dus bij gebruik van grote tensiometers.

Bij gebruik van tensiometersystemen voor onderzoekdoeleinden werd de druk voorheen meestal gemeten met kwikmanometers. Een nadeel

bij deze methode van drukmeting is de relatief grote waterverplaatsing nodig voor het bereiken van één eenheid drukverandering. Hierdoor wordt de reactiesnelheid ongunstig beïnvloed. In de loop der jaren is veel aandacht besteed aan de methode van drukmeting met het doel de waterverplaatsing per eenheid drukverandering te minimaliseren. De mogelijkheden van het gebruik van drukopnemers voor dit doel werden onderkend door Klute en Peters (1968).

De kleine waterverplaatsing bij het gebruik van drukopnemers en de daarmee samenhangende relatief snelle evenwichtsinstelling hebben de mogelijkheden tot gedetailleerde vochtspanningsmetingen vergroot. Zo kan bijvoorbeeld een aantal tensiometers door een systeem van kranen beurtelings met één en dezelfde drukopnemer worden verbonden. Ook is het mogelijk een meting met één bepaalde tensiometer direct te herhalen indien twijfel bestaat aan de juistheid van de eerste meting. Tenslotte kan het verloop van de vochtspanning bij het gebruik van een drukopnemer continu worden geregistreerd.

De waterverplaatsing bij drukverandering wordt behalve door de methode van drukmeting ook beïnvloed door het type slang waarmee de drukopnemer en de tensiometer zijn verbonden, door de eigenschappen van eventueel in het systeem opgenomen kranen en door de aanwezigheid van luchtbellens. Deze aspecten verdienen daarom bij de constructie van een tensiometer-drukopnemersysteem grote aandacht.

### 3. BESCHRIJVING VAN HET TENSIOMETER-DRUKOPNEMERSYSTEEM

Fig. 1 is een schematische tekening van het tensiometerdrukopnemersysteem. Een hydraulisch en een electrisch gedeelte kunnen worden onderscheiden. Het hydraulische gedeelte omvat een aantal kranen, slang- en pijpverbindingen, een met water gevulde fles en de tensiometers welke niet in de figuur zijn opgenomen. Het hydraulische gedeelte is volledig met water gevuld. Het electrische gedeelte bestaat uit een apparaat voor levering van gestabiliseerde gelijkspanning en een lijnschrijver voor meting van

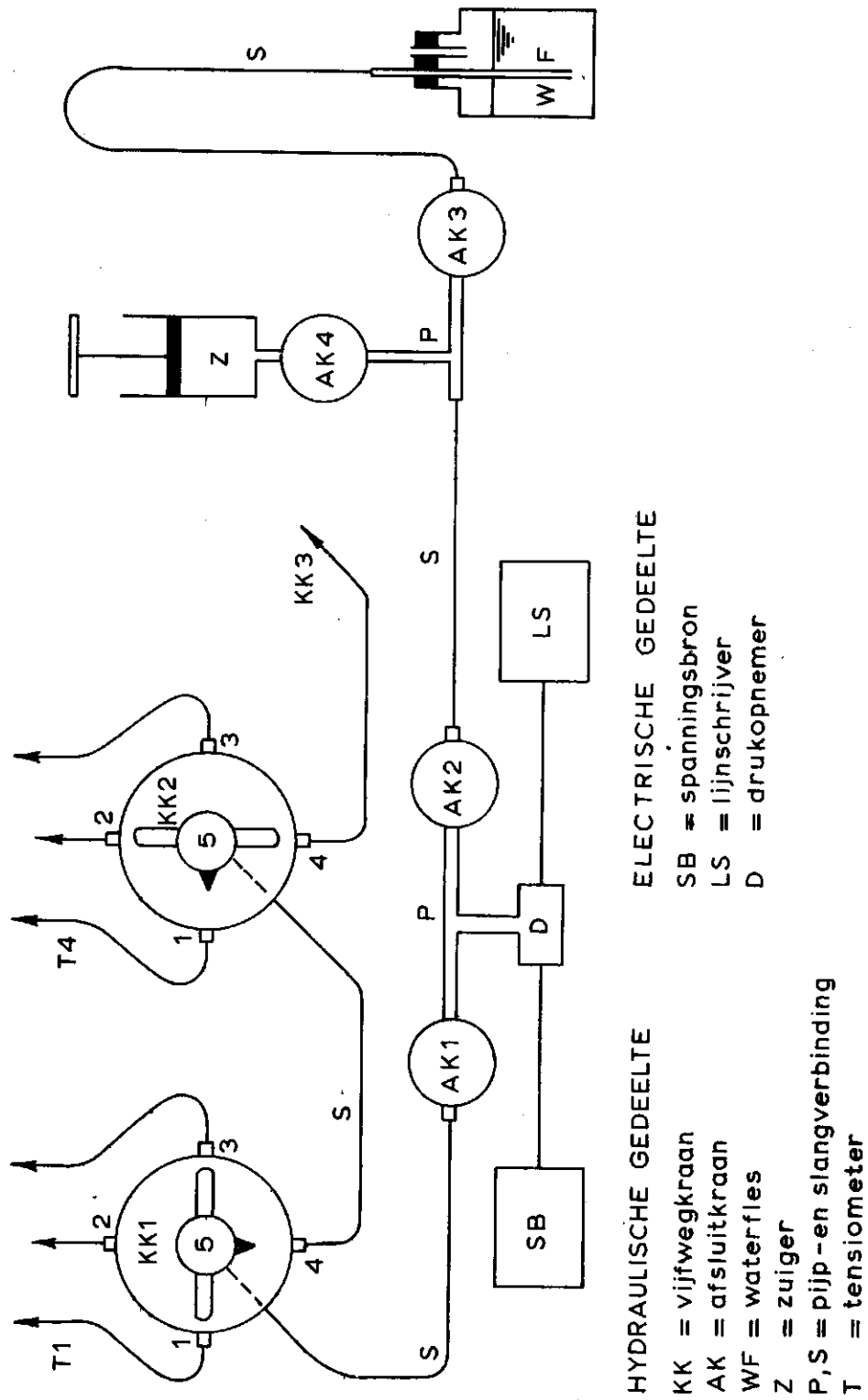


Fig. 1. Schematische tekening van het tensiometer-drukopnemersysteem

de door de drukopnemer afgegeven spanning. De drukopnemer is de schakel tussen het hydraulische en het elektrische gedeelte.

De kranen KK1 en KK2 zijn vijfwegkranen waarvan de centrale opening, aangeduid met het cijfer 5 in fig. 1, kan worden doorverbonden met elk van de vier zijdelingse openingen, aangeduid met de cijfers 1, 2, 3 en 4. Eén van de zijdelingse openingen van kraan KK1 is verbonden met de centrale opening van kraan KK2. Op dezelfde wijze zijn de kranen KK2 en KK3 doorverbonden met respectievelijk de kranen KK3 en KK4 welke niet in fig. 1 zijn opgenomen. De overige drie zijdelingse openingen van de vijfwegkranen zijn verbonden met tensiometers T welke beurtelings in contact kunnen worden gebracht met drukopnemer D : in fig. 1 bijvoorbeeld is de stand van de kranen KK1 en KK2 zodanig dat tensiometer T4 in contact met de drukopnemer is. In totaal kunnen dertien tensiometers op de vier vijfwegkranen worden aangesloten.

De kranen AK1 t/m AK4 zijn afsluiterkranen. Tijdens vochtspanningsmetingen is kraan AK1 open en kraan AK2 dicht. Met kraan AK1 dicht en de kranen AK2 en AK3 open is de drukopnemer verbonden met de fles WF. De fles kan verticaal worden verplaatst, waarbij de druk op het membraan van de opnemer verandert. Bij de calibratie wordt hiervan gebruik gemaakt.

Met behulp van het zuigertje Z kan een onderdruk op het hydraulische gedeelte van het systeem worden ingesteld. Het doel hiervan wordt nader besproken bij de beschrijving van de meetprocedure in Hoofdstuk 6.

De onderdelen van het hydraulische gedeelte zijn onderling verbonden door nylon slangen en messing pijpstukken, aangegeven door respectievelijk de letters S en P in fig.1. De kranen, de drukopnemer en het zuigertje zijn in een houten doos van 20 bij 25 bij 60 cm gemonteerd.



#### 4. ONDERDELEN VAN HET SYSTEEM

In dit hoofdstuk worden de onderdelen van het systeem besproken. Nadere gegevens betreffende de bronnen waaruit de onderdelen werden betrokken zijn in een bijlage opgenomen.

##### 4.1. P i j p v e r b i n d i n g e n

De in fig. 1 met de letter P aangeduide verbindingen zijn van messing hulpstukken gemaakt. De gebruikte pijp- en T-stukken (zie bijlage) zijn voorzien van een schroefdraad welke wordt aangeduid als 1/8-27 NPT (National Pipe Thread, gangbaar in de Verenigde Staten, conisch, met een nominale diameter van 1/8 inch, 27 gangen per inch), in deze Nota verder kortweg aangeduid als NPT-draad. De aan de pijpstukken gekoppelde afsluiterkranen AK en zuiger Z zijn eveneens van NPT-draad voorzien. De draaduiteinden worden voor het in elkaar schroeven met teflon lint omwikkeld.

##### 4.2. S l a n g v e r b i n d i n g e n

Nylon slang (zie bijlage) met een uitwendige diameter van 3.0 mm en een inwendige diameter van 1.5 mm werd gebruikt voor alle in fig. 1 met de letter S aangeduide verbindingen. Dit type slang is stug en laat zich uitstekend bevochtigen.

##### 4.3. K o p p e l s t u k k e n

De nylon slangen worden met de kranen verbonden door middel van de in fig. 2 weergegeven koppelstukken, bestaande uit een doorboorde messing plug met NPT-draad waarin een messing slangpilaartje (zie bijlage) is vastgesoldeerd. De diameter van het uiteinde van het slangpilaartje is omstreeks 2 mm. Alvorens de nylon slang over het pilaartje te schuiven wordt het slanguiteinde met een 2 mm boor over een lengte van omstreeks 8 mm uitgeboord.

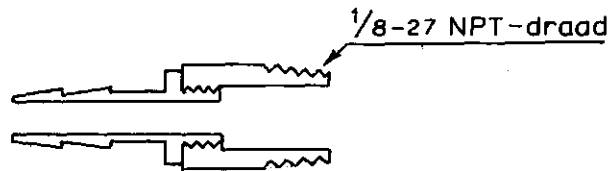


Fig. 2. Messing hulpstuk voor het koppelen van de nylon slangen aan de kranen; het hulpstuk bestaat uit een doorboorde plug met NPT-draad waarin een slangpilaartje is vastgesoldeerd

#### 4.4. K r a n e n

De in het systeem opgenomen vijfweg- en afsluiterkranen (zie bijlage) zijn kogelkranen. De openingen van het messing kraanhuis zijn voorzien van NPT-draad. De kranen kunnen in onderdelen uiteen worden genomen, maar dit wordt ontraden in verband met de gecompliceerde inwendige bouw. Gebleken is echter dat volledige ontluchting ook zonder demontage geen moeilijkheden oplevert.

#### 4.5. T e n s i o m e t e r s

Elk gewenst type tensiometer kan op de vijfwegkranen van het systeem worden aangesloten. Bij de in hoofdstuk 7 besproken metingen werd gebruik gemaakt van de volgende twee typen, aangeduid als respectievelijk kleine en grote tensiometer. Beide typen zijn weergegeven in fig. 3.

De kleine tensiometers zijn gemaakt van keramische pijpjes (zie bijlage) met een uitwendige diameter van 1.5 mm. Eén van de uiteinden van een stukje pijp van de gewenste lengte, in dit geval 4 cm, wordt met twee-componenten lijm gedicht. Het open uiteinde wordt vastgelijmd in een messing slangpilaartje van het eerder besproken type (zie onder 4.3), nadat de uitstekende delen op een draaibank zijn verwijderd.

Het keramische gedeelte van de grote tensiometers (zie bijlage) heeft een uitwendige diameter van 2 cm en een lengte van 10 cm. Het open uiteinde wordt afgesloten met een op twee plaatsen doorboorde

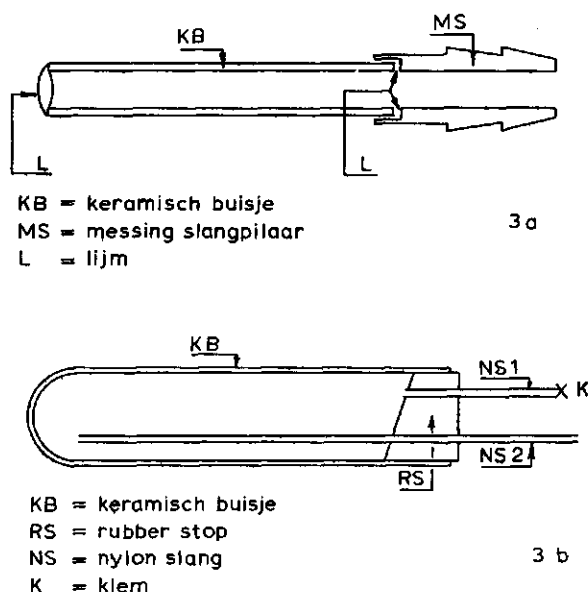


Fig. 3. Doorsnede van de kleine en de grote tensiometers, weergegeven in respectievelijk fig. 3a en 3b

rubber stop. De nylon slang NS2 in fig. 3 is verbonden met één van de vijfwegkranen. Slang NS1 is normaliter afgesloten met een slangklem en wordt alléén geopend bij het vullen en doorspoelen van de tensiometer.

#### 4.6. Z u i g e r

De in het systeem opgenomen zuiger (zie bijlage) is van messing en wordt afgedicht door middel van een rubber O-ring. De zuigerarm is voorzien van schroefdraad waardoor de positie van de zuiger - en daardoor van de druk - zeer nauwkeurig kan worden ingesteld. Het aansluitpunt is voorzien van NPT-draad.

#### 4.7. D r u k o p n e m e r

Fig. 4 is een schematische tekening van de gebruikte Bell en Howell drukopnemer (zie bijlage). Het is een membraantype opnemer waarmee zowel positieve als negatieve drukken ten opzichte van de als referentie fungerende druk van de omgevingslucht kunnen worden gemeten. De grootste toelaatbare positieve en negatieve drukken zijn respectievelijk + 1800 en - 1800 cm waterdruk. Bij toepassing van de

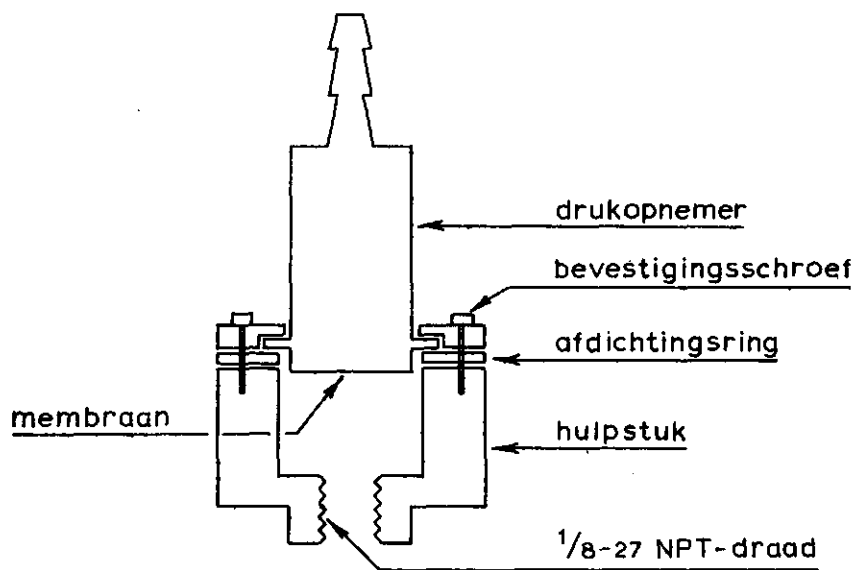


Fig. 4. Schematische doorsnede van de drukopnemer

aanbevolen gelijkspanning van 5 V is de verandering van het uitgangssignaal omstreeks 5mV per cm waterdruk.

De drukopnemer wordt op de in fig. 1 aangegeven positie bevestigd door middel van een bijgeleverd roestvrijstalen hulpstuk met NPT-draad.

#### 4.8. E l e c t r i s c h e g e d e e l t e

Het elektrische gedeelte omvat een spanningsbron voor gestabiliseerde gelijkspanning en een instrument waarmee de uitgangsspanning van de drukopnemer kan worden gemeten. De vereiste voedingsspanning en de grootte van de uitgangsspanning worden onder 4.7 vermeld en uiteraard moet de keuze van spanningsbron en meetinstrument daarop worden afgestemd.

De gebruikte spanningsbron levert een spanning van 5 V en heeft

verder geen uitwendige bedieningsknoppen. Het voordeel hiervan is dat overbelasting van de drukopnemer door foutieve manipulaties is uitgesloten.

Het uitgangssignaal van de drukopnemer wordt gemeten met een lijnschrijver waarvan het meetbereik voor volle schaaluitslag op elke waarde tussen  $40\mu\text{V}$  en  $100\text{ V}$  ingesteld kan worden.

Zowel de voedingsbron als de lijnschrijver worden aangesloten op  $220\text{ V}$  netspanning. Bij meting in kassen levert dit normaliter géén problemen op.

## 5. TESTEN VAN DE ONDERDELEN

De onderdelen van het hydraulische gedeelte van het systeem werden op hun bruikbaarheid getest. Bij de uitvoering van het testprogramma werd een aluminium drukpan met een inhoud van 25 liter als vacuüm tank gebruikt. Een 1.5 cm dikke aluminium plaat waarop een rubber plaat ter afdichting is vastgeplakt, dient als deksel. De deksel is voorzien van een onderdrukmeter en een aansluitpunt waarop de onder 4.2 beschreven nylon slang past. Onderdruk werd verkregen met behulp van een waterstraalpompe. Het vacuüm tankje werd tevens gebruikt om water te ontlichten en om de te testen onderdelen volledig te bevochtigen en met water te vullen.

### 5.1. B e p a l i n g v a n d e c a p a c i t e i t

In hoofdstuk 2 is gewezen op het belang van een minimale waterverplaatsing bij verandering van de op het hydraulische gedeelte van het systeem uitgeoefende druk. De daarbij optredende totale waterverplaatsing is gelijk aan de som van de waterverplaatsing van de individuele onderdelen. De capaciteit van de onderdelen, gedefiniëerd als de volumeverandering bij éénheid drukverandering, werd gemeten.

Eén en ander kan worden toegelicht aan de hand van fig. 5a waarin de opstelling voor het testen van de vijfwegkraan is weergegeven.

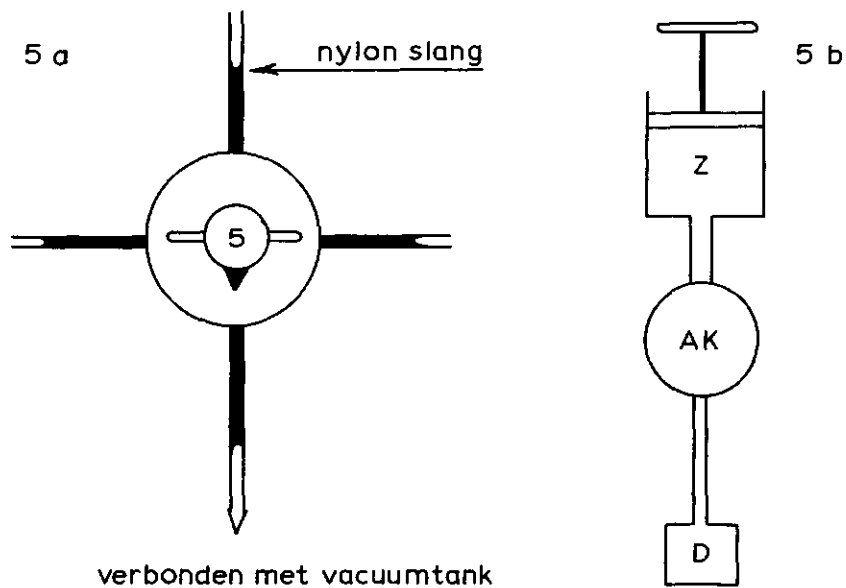


Fig. 5. Schematische weergave van de opstelling voor het testen van de vijfwegkraan (fig. 5a) en voor de bepaling van de waterverplaatsing bij bediening van de afsluitkraan AK (fig. 5b) met behulp van zuiger Z en drukopnemer D

De centrale opening (aangeduid met het cijfer 5) is afgesloten door een messing plug. Eén van de zijdelingse openingen is met een stuk nylonslang verbonden met de vacuumentank. De verplaatsing van de watermeniscus in de nylon slang bij plotselinge toepassing van -500 cm waterdruk werd gemeten. Hieruit wordt de capaciteit in  $\text{cm}^3$  water per cm waterdruk berekend.

De capaciteit van de andere onderdelen van het hydraulische gedeelte werd op dezelfde manier bepaald. De resultaten zijn opgenomen in tabel I.

Tabel 1. Samenvatting van de belangrijkste gegevens betreffende de onderdelen van het systeem

Capaciteiten, in $\text{cm}^3/\text{cm}$ waterdruk	
drukopnemer	$4 \times 10^{-6}$
vijfwegkraan	$10^{-5}$
afsluiterkraan	$10^{-5}$
nylon slang, per meter lengte*	$1.2 \times 10^{-6}$
kleine tensiometers (zie onder 4.5)*	$< 10^{-8}$
grote tensiometers (zie onder 4.5)*	$4 \times 10^{-5}$
Warmteuitzettingscoëfficiënten, in $^{\circ}\text{C}^{-1}$	
water, bij $20^{\circ}\text{C}$	$1.8 \times 10^{-4}$
nylon, lineair, $\alpha_n$	$10^{-4}$
messing, lineair, $\alpha_m$	$0.5 \times 10^{-4}$
Waterverlies door verdamping vanaf nylon slang	
$\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ per meter slang	$2.7 \times 10^{-7}$

\* ontleend aan Bakker (1975)

## 5.2. L u c h t l e k k a g e

De capaciteit van het systeem wordt ongunstig beïnvloed door lucht in het hydraulische gedeelte. Daarom is het niet alleen noodzakelijk het systeem volledig te ontlichten maar ook om het binnendringen van lucht tijdens het meten te voorkomen. Het binnendringen van lucht via de kranen, via de verbindingen tussen nylon slang en koppelstuk of op andere daarvoor in aanmerking komende punten werd nagegaan door meting van de capaciteit vóór en na toepassing van een onderdruk van 500 cm waterdruk gedurende één etmaal. Indien gedurende deze periode géén lucht is binnengedrongen is de capaciteit gelijk gebleven. Een toename van de capaciteit wijst op het binnendringen van lucht.

De resultaten wijzen uit dat noch via de kranen noch via de NPT-draadverbindingen lucht binnendringt. Problemen kunnen zich wel voordoen bij de verbinding tussen nylon slang en messing slangpilaartje indien het slangpilaartje beschadigd is, bijvoorbeeld ten gevolge van het lossnijden van de nylon slang met een mes.

### 5.3. W a t e r v e r p l a a t s i n g b i j k r a a n b e d i e - n i n g

De bepaling van de waterverplaatsing bij bediening van de kranen wordt toegelicht aan de hand van fig. 5. In fig. 5a is één van de zijdelingse openingen van de met water gevulde vijfwegkraan verbonden met de vacuumentank waarin een onderdruk van 500 cm wordt gehandhaafd. De centrale opening van de kraan is afgesloten met een plug. De verplaatsing van de menisci in de nylon slangen werd gemeten nadat de kraan met de hand tien keer is rondgedraaid. Een verplaatsing van de menisci was niet waar te nemen. Dit wijst op een verwaarloosbaar kleine waterverplaatsing.

Fig. 5b is de opstelling voor meting van de waterverplaatsing bij bediening van de afsluiterkraan. Door het verstellen van de zuiger werd een positieve of negatieve druk ingesteld welke met de drukopnemer werd gemeten. Daarna werd de drukverandering bij het sluiten van de kraan gemeten. De drukverandering was slechts enkele centimeters waterdruk. Hieruit wordt geconcludeerd dat ook de afsluiterkranen een verwaarloosbaar kleine waterverplaatsing bij bediening hebben.

### 5.4. I n v l o e d v a n t e m p e r a t u u r s v e r a n d e - r i n g e n

De vochtspanningsmetingen kunnen beïnvloed worden door temperatuursveranderingen vanwege verschillen in de warmteuitzettingscoëfficiënten van de in het systeem verwerkte materialen. Vooral in het relatief droge traject, waar het watergeleidingsvermogen van het medium waarin gemeten wordt sterk is gedaald, is dit merkbaar.



De uitzettingscoëfficiënten van messing, nylon en water zijn gegeven in tabel 1. De invloed van een verandering van de temperatuur wordt geïllustreerd door het volgende voorbeeld. Beschouwd wordt een stuk nylon slang, één meter lang, gevuld met water. De temperatuur van slang en water is  $t_1$  °C. Er geldt:  $V_s(t_1) = V_w(t_1) = V(t_1)$  waarbij  $V_s$  en  $V_w$  respectievelijk de inhoud van de slang en het volume van het water in de slang zijn. Na verhoging van de temperatuur tot  $t_2$  °C geldt:

$$V_s(t_2) = V(t_1) \{1 + 3\alpha_n(t_2 - t_1)\}$$

en

$$V_w(t_2) = V(t_1) \{1 + \beta(t_2 - t_1)\}$$

waarbij  $\alpha_n$  de lineaire uitzettingscoëfficiënt van nylon is en  $\beta$  de uitzettingscoëfficiënt van water. Uit beide bovenstaande vergelijkingen volgt:

$$V_s(t_2) - V_w(t_2) = \Delta V = V(t_1) \{(3\alpha_n - \beta)(t_2 - t_1)\}.$$

Met behulp van de gegevens in tabel 1 wordt voor de gebruikte nylon slang met een inwendige diameter van ,15 cm een  $\Delta V$ -waarde van omstreeks  $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 \cdot \text{C}^{-1}$  per meter slang berekend. De berekende  $\Delta V$  is positief bij een temperatuursstijging. Dit heeft tot gevolg dat bij vochtspanningsmetingen een daling van de druk van het water in de slang optreedt bij stijging van de temperatuur, tenzij water snel vanuit de grond via de poreuze wand van de tensiometer kan toestromen. Bij een daling van de temperatuur treedt het tegenovergestelde effect op.

Eenzelfde redenering is ook van toepassing op het messing gedeelte van het systeem. In dat geval echter is  $\Delta V$  negatief bij verhoging van de temperatuur omdat de factor  $3\alpha_m$  kleiner is dan de uitzettingscoëfficiënt  $\beta$  van water.

Ook het verlies van water door verdamping vanaf het oppervlak van de nylon slang kan problemen opleveren. Aan de hand van een rekenvoorbeeld komt BAKKER (1975) tot de conclusie dat een verdamping

van de orde van grootte als in tabel 1 aangegeven van invloed kan zijn op vochtspanningsmetingen in relatief droge grond.

## 6. OPBOUW VAN HET SYSTEEM, CALIBRATIE EN MEETPROCEDURE

### 6.1. O p b o u w v a n h e t s y s t e e m

Na het testen van de onderdelen wordt het in fig. 1 weergegeven systeem opgebouwd. Alle onderdelen behalve de drukopnemer worden in de met water gevulde vacuümtank ontlucht en onder water met elkaar verbonden. De tensiometers worden nog niet aangesloten. De drukopnemer wordt als laatste onderdeel aangebracht door het vastdraaien van de in fig. 4 aangegeven bevestigingsschroeven. Hierbij bestaat het gevaar van overbelasting van het membraan van de drukopnemer. Daarom worden de kranen AK1 en AK4 in fig. 1 gesloten, de kranen AK2 en AK3 worden geopend en de fles WF wordt boven het niveau van de drukopnemer opgesteld. Op deze wijze is overbelasting van het membraan of insluiting van lucht bij het vastschroeven van de drukopnemer uitgesloten.

In verband met mogelijke overbelasting van de drukopnemer is het aan te bevelen altijd de kranen AK2 en AK3 open te laten wanneer het systeem niet wordt gebruikt.

### 6.2. C a l i b r a t i e v a n d e d r u k o p n e m e r

De calibratie omvat het instellen van de gevoeligheid van de lijnschrijver om een gegeven verandering van de druk op het membraan van de opnemer overeen te doen komen met een gewenste verplaatsing van de pen op het papier van de schrijver. De druk, uitgedrukt in cm waterdruk, wordt gevariëerd door verticale verplaatsing van fles WF in fig. 1. De kranen AK2 en AK3 zijn daarbij geopend. In dit geval werd de calibratie zodanig uitgevoerd dat een uitslag van de pen over de volle breedte van het papier overeenkomt met een drukverandering van 100 cm waterdruk, bij een meetbereik van 2 mV.

Het verschil tussen de hoogste en laagste druk tijdens de calibratieprocedure was 500 cm waterdruk. Over dit gehele traject

bleek het uitgangssignaal van de opnemer lineair met de druk te veranderen. Verandering van de temperatuur van de opnemer had een verschuiving van de calibratielijn ten gevolge, maar de hellingshoek werd niet beïnvloed. Bij vochtspanningsmetingen moet hiermee rekening worden gehouden.

### 6.3. V o c h t s p a n n i n g s m e t i n g e n m e t d e d r u k o p n e m e r

Het meten van vochtspanningen met het tensiometer-drukopnemer-systeem komt uiteindelijk neer op het meten van de druk van het water in de tensiometers. Eén en ander wordt toegelicht aan de hand van fig. 6. In het onderstaande worden drukken uitgedrukt in cm waterdruk en afstanden in cm.

Allereerst wordt een referentieniveau gekozen waar  $x = 0$  wordt gesteld. Bij de in fig. 6 weergegeven situatie ligt het referentieniveau in het vlak door het 'maaiveld' in de pot met de plant. De posities van de drukopnemer en de tensiometer ten opzichte van het referentieniveau worden bepaald door respectievelijk de afstanden  $x_d$  en  $x_t$ . De waterspiegel in de fles WF wordt op het referentieniveau gebracht. Met kraan AK1 dicht en kraan AK2 open wordt met de opnemer een druk  $P_1$  gemeten. In dit geval geldt:

$$P_1 = x_d \quad (1)$$

Bij meting met de tensiometer is kraan AK1 open en kraan AK2 dicht, De gemeten druk is nu  $P_2$ :

$$P_2 = P_t + (x_d - x_t) \quad (2)$$

waar  $P_t$  de druk van het water in de tensiometer is.

Uit de vergelijkingen (1) en (2) volgt:

$$P_2 - P_1 = \Delta P = (P_t - x_t) \quad (3)$$

Het drukverschil  $\Delta P$  wordt uit de verrichte meting afgeleid. Omdat ook  $x_t$  bekend is kan  $P_t$  worden berekend.

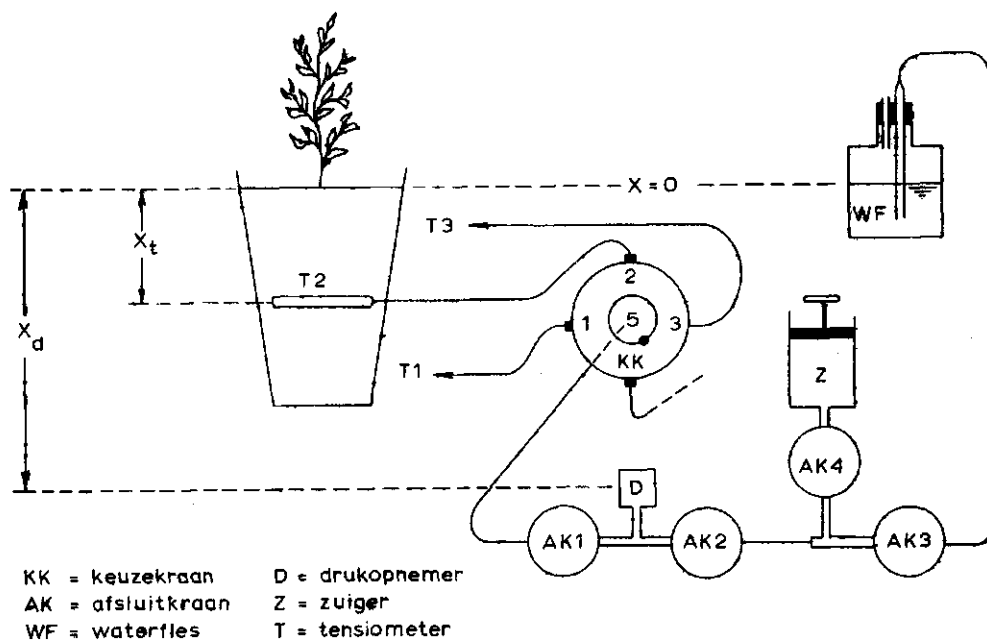


Fig. 6. Schematische weergave van het tensiometer-drukopnemersysteem ter verduidelijking van de in hoofdstuk 6 besproken meet-procedure en de in hoofdstuk 7 behandelde metingen in venig groeisubstraat

Uit het voorgaande blijkt dat de grootte van de drukken  $P_1$  en  $P_2$  niet van belang is. Alleen het drukverschil  $\Delta P$  moet worden gemeten. Bij de daadwerkelijke uitvoering van de metingen wordt onderscheid gemaakt tussen metingen in het relatief natte traject en metingen in het relatief droge traject.

#### 6.4. Meetprocedure in het natte traject

In het natte traject is het watergeleidingsvermogen van het medium waarin wordt gemeten relatief groot, zodat evenwichtsinstelling snel plaatsvindt. Aangenomen wordt dat een meting steeds plaatsvindt uitgaande van de situatie met de kranen AK1 en AK4 in fig. 6 dicht en de kranen AK2 en AK3 open. De lijnschrijver schrijft dan de druk  $P_1$  van vergelijking (1). De meetprocedure omvat de volgende stappen:

- a. de vijfwegkraan KK wordt in de gewenste positie gezet;
- b. kraan AK2 wordt gesloten en direct daarna wordt kraan AK1 geopend; uit de verplaatsing van de pen op het papier kan worden afgeleid wanneer evenwichtsinstelling is bereikt; de lijnschrijver schrijft dan de druk  $P_2$  van vergelijking (2);
- c. kraan AK1 wordt gesloten en kraan AK2 geopend; en de druk  $P_1$  wordt weer geschreven
- d. een nulpuntcorrectie wordt uitgevoerd indien tijdens de meting een nulpuntverschuiving is opgetreden ten gevolge van een temperatuursverandering van de drukopnemer; daarna vindt de volgende meting plaats.

#### 6.5. Meetprocedure in het droge traject

De vereiste tijd om evenwichtsinstelling te verkrijgen neemt toe naarmate het medium waarin de tensiometer zich bevindt droger wordt. De evenwichtsinstelling kan worden versneld door toepassing van onderdruk op het systeem met behulp van zuiger Z in fig. 6.

De procedure is dan als volgt:

- a. vijfwegkraan KK wordt in de gewenste positie gezet;
- b. met de kranen AK1 en AK3 dicht en AK2 en AK4 open wordt door het verstellen van zuiger Z een onderdruk ingesteld; de grootte van de onderdruk wordt op de lijnschrijver geschreven;
- c. kraan AK2 wordt gesloten en kraan AK1 wordt geopend; de richting van de verplaatsing van de pen op het papier van de lijnschrijver geeft aan of de ingestelde onderdruk in overeenstemming is met de vochtspanning van het medium waarin wordt gemeten;

- d. de onder b en c beschreven handelingen worden zonodig herhaald tot de ingestelde onderdruk bij benadering de gewenste waarde heeft bereikt; in dat geval is de verplaatsing van de pen na het sluiten van kraan AK2 en het openen van kraan AK1 als beschreven onder c minimaal geworden;
- e. kraan AK1 wordt gesloten en de kranen AK2 en AK3 worden geopend;
- f. zonodig wordt een nulpuntscorrectie uitgevoerd waarna een volgende meting kan plaatsvinden.

## 7. BEPROEVING VAN HET SYSTEEM

Het tensiometer-drukopnemersysteem werd getest door vochtspanningsmetingen te verrichten in een venig groeisubstraat en in een kasgrond met een lichte textuur.

### 7.1. Metingen in groeisubstraat

De metingen werden verricht tijdens uitdroging van een venig groeisubstraat in een pot met een tomatenplant. De opstelling komt overeen met fig. 6. De pot met de plant werd regelmatig gewogen. De metingen vonden plaats in een kas bij een redelijk constante luchttemperatuur. De luchtramen waren permanent gesloten zodat de luchtbeweging minimaal was.

In een eerste serie metingen werden drie van de in fig. 3a weergegeven kleine tensiometers gebruikt. De tensiometers werden in de vacuümtank ontvlucht, verbonden met de nylon slangen van de vijfwegkraan en via gaten in de potwand horizontaal in het substraat geprikt (fig. 6). De verticale afstand tussen de tensiometers was 5 cm.

Een tweede serie metingen werd uitgevoerd met twee van de in fig. 3b weergegeven grote tensiometers. Met een scherpe kurkboor worden verticale gaten in het substraat gesneden voor opstelling van de tensiometers.

In fig. 7 is het gemiddelde vochtgehalte van het substraat in de pot uitgezet tegen de vochtspanning. Bij vochtgehalten boven

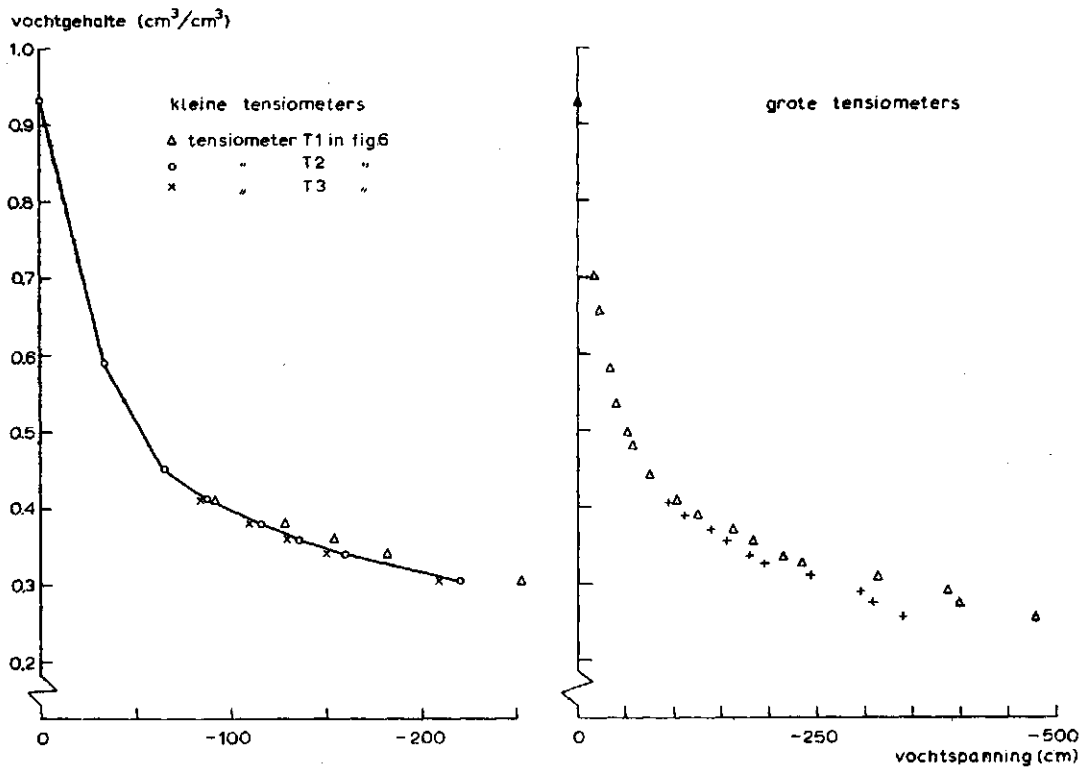


Fig. 7. Het verband tussen het gemiddelde vochtgehalte van het substraat en de vochtspanning, gemeten met kleine en grote tensiometers

.45 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> zijn de verschillen in vochtspanning tussen de tensiometers minimaal zodat slechts de metingen voor één van de tensiometers zijn weergegeven. Bij verdere uitdroging beginnen verschillen op te treden. Opvallend is vooral de sterke uitdroging onder in de pot bij de metingen met de kleine tensiometers. Dit hangt samen met de concentratie van wortels op de bodem. Ook bij de metingen met de grote tensiometers treden verschillen op ondanks hun gelijkwaardige posities in de pot.

In fig. 8 is de vereiste tijd om evenwichtsinstelling te bereiken na het sluiten van kraan AK2 en het openen van kraan AK1 (zie de beschrijving van de meetprocedure onder 6.4 van deze nota) uitgezet tegen de vochtspanning  $P_v$  in het substraat. Hoewel de grote tensiometers een kleinere doorlatendheid (BAKKER, 1975) en een grotere

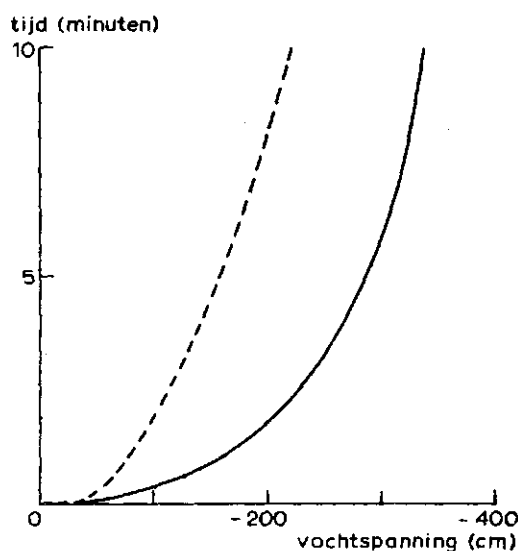


Fig. 8. Vereiste tijd voor evenwichtsinstelling in afhankelijkheid van de vochtspanning in het venig groeisubstraat voor de onder 7.1 beschreven metingen; de getrokken en gestippelde curves hebben betrekking op de metingen met respectievelijk de grote en de kleine tensiometers

capaciteit (tabel 1) hebben dan de kleine tensiometers, blijkt toch dat de evenwichtsinstelling bij een gegeven vochtspanning sneller tot stand komt bij meting met de grote tensiometers. De verklaring moet worden gezocht in de grootte van het contactoppervlak tussen tensiometer en substraat. Als gevolg hiervan kan de serie metingen met de grote tensiometers tot veel drogere omstandigheden worden voortgezet.

Fig. 8 is beperkt tot metingen van de vochtspanning van omstreeks -200 cm en -400 cm in respectievelijk de eerste en tweede serie metingen. Bij verdere uitdroging van het substraat werd met redelijk succes de onder punt 6.5 van deze nota beschreven meetprocedure voor het 'droge' traject toegepast.

Gedurende de metingen hebben zich af en toe weersomstandigheden voorgedaan waarbij grote fluctuaties in de globale straling optraden. Onder die omstandigheden konden alléén betrouwbare metingen worden verkregen in het relatief natte traject. De moeilijkheden bij



metingen onder droge omstandigheden werden vooral veroorzaakt door veranderingen van de temperatuur van de nylon slangen. Dit probleem werd ten dele ondervangen door de slangen met aluminiumfolie te omwikkelen.

## 7.2. Metingen in kasgrond

De vochtspanningsmetingen in een kasgrond werden uitgevoerd met de kleine tensiometers (fig. 3a). Het bodemprofiel heeft een bovengrond van humeus slibhoudend zand waar de tensiometers verticaal in werden geprikt tot maximaal 40 cm diepte. In de kas werden paprika's geteeld. De berekening vond automatisch plaats, steeds nadat een ingestelde stralingssom was bereikt.

Bij de automatische berekening op basis van de straling bleek de vochtspanning in de bovengrond te fluctueren tussen -10 en -50 cm. In dit traject levert het meten geen problemen op en vindt evenwichtsinstelling na het sluiten van kraan AK2 en het openen van kraan AK1 (zie de beschrijving van de meetprocedure onder punt 6.4) binnen 30 seconden plaats.

Om de reactie van het systeem bij metingen in drogere grond na te gaan werd de automatische berekening tijdelijk uitgeschakeld. De vereiste tijd voor evenwichtsinstelling bleek toe te nemen tot omstreeks 5 minuten bij een vochtspanning van -100 cm. De invloed van veranderingen van de omgevingstemperatuur werden dan duidelijk merkbaar. Zo steeg tijdens een bepaalde meting de druk in het systeem plotseling van -150 cm tot -100 cm door bevochtiging van de nylon slangen bij berekening. Dit werd veroorzaakt door afkoeling van de slang (zie onder punt 5.4 van deze nota).

Ook de invloed van de luchtbeweging is merkbaar bij metingen van vochtspanningen van -100 cm en lager. Het bleek bij winderig weer en geopende luchtramen niet mogelijk nauwkeurige metingen te verrichten. Ook hier spelen temperatuursveranderingen van de nylon slang ten gevolge van de luchtbeweging een rol.

De vereiste tijd voor evenwichtsinstelling bij een gegeven vochtspanning neemt toe wanneer de betreffende tensiometer een aantal malen in de grond is geprikt. Blijkbaar heeft deze handeling

een ongunstige invloed op de doorlatendheid van de wand van het keramische pijpje.

#### 8. SAMENVATTING

Deze nota gaat over een tensiometer-drukopnemersysteem voor rauwkeurige vochtspanningsmetingen in kasgronden. De onderdelen van het systeem worden afzonderlijk behandeld alvorens de werking van het systeem als geheel wordt besproken.

Bij metingen in veensubstraat en een kasgrond bleek het systeem goed te voldoen bij metingen in het relatief vochtige traject. Onder drogere omstandigheden werden de metingen beïnvloed door fluctuaties in straling en door de luchtbeweging in de kas bij geopende luchtramen. Een en ander bleek vooral samen te hangen met veranderingen van de temperatuur van de nylon slangen waardoor de tensiometercups en de drukopnemer met elkaar zijn verbonden.

## LITERATUUR

- BAKKER, J.W., 1975. Tensiometers, materialen en reactiesnelheden van systemen. Nota 847. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
- KLUTE, A. en D.B. PETERS. Hydraulic and pressure head measurement with strain gauge pressure transducers. Proceedings of the 1966 Wageningen Symposium on Water in the unsaturated zone. Vol. 1 : 156 - 165, 1968.

ONDERDELEN VAN HET HYDRAULISCHE GEDEELTE VAN HET TENSIOMETER-  
DRUKOPNEMERSYSTEEM

In onderstaande lijst zijn de onderdelen van het hydraulisch gedeelte van het systeem opgenomen. Hoewel alle onderdelen met zorg werden gekozen, impliceert opname in de lijst niet dat geen vergelijkbare of zelfs betere onderdelen van elders betrokken zouden kunnen worden.

Verbindingen

M e s s i n g p i j p - e n T - s t u k k e n met 1/8 NPT-draad,  
- fabrikaat: Imperial Eastman Corporation, 6300 W. Howard st.,  
Chicago, Illinois, U.S.A.

- geleverd door: de Gidts en Feldman, Technisch en Commerciëel  
Bureau B.V., Haringvlietstraat 8, Amsterdam.

N y l o n s l a n g, type nylaflow 12

- geleverd door: Polypenco B.V., Anth. Fokkerweg 2, Almelo

M e s s i n g s l a n g p i l a a r t j e e n d o o r b o o r d e  
p l u g g e n met NPT-draad

- fabrikaat: Clippard Instrument Laboratory, Inc. 7390 Colerain Rd.,  
Cincinnati, Ohio, U.S.A.

- geleverd door: Doedijns Industriële en Handelsonderneming B.V.,  
Polakweg 6, Rijswijk, Z.H.

Kranen

V i j f w e g k r a n e n e n a f s l u i t e r k r a n e n

- fabrikaat: Whitey Company, 5679 Landregan Street, Oakland,  
California, U.S.A.

- geleverd door: Techmation, Schiphol Oost, Gebouw 105-106,  
Amsterdam

Tensiometers

K e r a m i s c h e p i j p j e s (alumino-silicate ceramics type  
P-2) waaruit de kleine tensiometer (fig. 3a) worden  
gemaakt.

bijlage 1 (vervolg)

- geleverd door: Coors, 600 Ninth Street, Golden, Colorado,  
U.S.A.

K e r a m i s c h e b u i s j e s (porous ceramic cups) waaruit  
de grote tensiometers (fig. 3b) werden gemaakt.

- geleverd door: Soilmoisture Equipment Corp., P.O. Box 30025,  
Santa Barbara, California, U.S.A.

Zuigertje en Drukopnemer

Z u i g e r t j e (zgn. pompje-volumeregelaar)

- geleverd door: Tradinco Instrumenten-Apparaten B.V., Postbus 37,  
Berkel en Rodenrijs (Z.H.)

D r u k o p n e m e r, type 4-312 met koppelstuk voorzien van 1/8  
NPT-draad.

- geleverd door: Bell en Howell, Postbus 29037, Rotterdam