

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOU**

NN31545.0847

TENSIOMETERS, MATERIALEN EN REACTIESNELHEDEN VAN SYSTEMEN

ir. J.W. Bakker

BIBLIOTHEEK DE HAAFF
Droevendaalsesteeg 3a
Postbus 241
6700 AE Wageningen

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, 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



1709715

I N H O U D

	Blz.
I. MATERIAAL	1
De grootste met tensiometers te bepalen onderdruk van het bodemwater	1
II. WATERTRANSPORT EN INSTELSNELHEID	2
Weerstand van de tensiometerwand	2
Weerstand in de grond	4
Capaciteit meetsysteem	5
Insteltijd	5
III. REKENVOORBEELDEN INSTELTIJDEN + VOORKOMENDE WAARDEN VAN CAPACITEIT, WEERSTAND EN GELEIDBAARHEID	6
Capaciteit meetsysteem	6
Weerstand tensiometercup W_t	6
Weerstand in de grond W_g	7
Instelsnelheid manometer-tensiometer combinaties in verschillende gronden	8
IV. AANVULLINGEN	10
V. CONCLUSIES	12

I. MATERIAAL

Tensiometers zijn poreuze buisjes, cups of platen, aan de binnenzijde gevuld met water, dat in verbinding staat met meetapparatuur om de druk van dat water te meten. In principe is ieder waterbestendig materiaal met veel kleine doorlopende poriën geschikt voor het maken van tensiometers.

Gebruikt wordt:

- a. keramisch materiaal, meest gebakken kaoliënklei ook wel gebakken fijnzandige illiet;
- b. gesinterd glas of roestvrij staal;
- c. fijn zand voor het meten van lage onderdrukken, kaoliën voor de hogere onderdrukken.

Met water gevuld tensiometer materiaal blijft ondoorlatend voor lucht, zolang de luchtdruk ten opzichte van de waterdruk lager is dan $3000/D$. D is de diameter van de grootste porie in μm , de druk wordt gegeven in cm waterkolom.

D e g r o o t s t e m e t t e n s i o m e t e r s t e b e p a -
l e n o n d e r d r u k v a n h e t b o d e m w a t e r

Deze bedraagt $3000/D$ cm waterkolom tot een maximum nominale onderdruk gelijk aan de atmosferische druk - de dampspanning van water. Dit is bij 20°C : $1000 - 24 = \text{ca. } 975$ cm. Bij deze onderdruk gaat het water in de leidingen 'koken'. Is het water niet zeer zorgvuldig ont- lucht, dan ontstaan reeds bij lagere onderdrukken luchtbelllen. $700 \text{ à } 800$ cm onderdruk blijkt zonder bijzondere voorzorgen meetbaar.

Poreus materiaal met een kleinere poriediameter dan $3 \mu\text{m}$ is alleen dan nodig wanneer de luchtdruk in de grondmonsters,

$P_{\text{(monster)}}$, kunstmatig wordt verhoogd. De max. te maten onderdruk wordt dan:

$$P_{\text{(monster)}} - P_{\text{atmosfeer}} + 975 \text{ cm}$$

II. WATERTRANSPORT EN INSTELSNELHEID

Er stroomt water door de tensiometerwand en de daaraan grenzende grond tot de druk in de tensiometer en het meetsysteem gelijk is aan de waterdruk in de grond.

De instelsnelheid van de tensiometer wordt bepaald door de hoeveelheid water die nodig is om het meetsysteem op spanning te brengen en door de stromingsweerstand in wand en grond.

Dit is te beschrijven met de vergelijking voor laminaire stroming

$$\frac{dQ}{dt} = -K \frac{dH}{dx} F \quad (1)$$

waarin: Q = hoeveelheid verplaatst water cm^3

t = tijd (sec.)

x = afstand (cm)

F = doorstroomd oppervlak (cm^2)

H = waterdruk (cm waterkolom)

of ook wel door:

$$dQ/dt = -\frac{h}{W} \quad (1a)$$

waarin: W = de stromingsweerstand (sec.cm^{-2})

h = drukverschil over die weerstand (cm)

W e e r s t a n d v a n d e t e n s i o m e t e r w a n d

Noemen we afstand en spanning aan de buitenzijde respectievelijk x_u en H_u en aan de binnenzijde van de wand x_i en H_i en $(H_u - H_i) = h$ dan geldt:

$$W = \int_{x_i}^{x_u} \frac{dx}{KF} \text{ (sec.cm}^{-2}\text{)} \quad (2)$$

De geometrie en grootte van het te doorstromen materiaal is te karakteriseren met het quotiënt van afstand en oppervlakte A

$$A = \int_{x_i}^{x_u} \frac{dx}{F} \text{ (cm}^{-1}\text{)} \quad (2a)$$

dus:

$$W = \frac{A}{K} \quad (2b)$$

Voor een cilindervormige tensiometer van lengte 1 cm en straal van buiten respectievelijk binnenkant groot r_u en r_i cm wordt formule 2a

$$A = \int_{r_i}^{r_u} \frac{dr}{2\pi r}$$

$$A = \left(\frac{1}{2\pi} \ln r_u / r_i \right) \quad (3)$$

Voor een half bolvormige cup geldt:

$$A = \int_{r_i}^{r_u} \frac{dr}{2\pi r^2}$$

$$A = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_u} \right) \quad (4)$$

Bestaat een tensiometer uit een cylinder afgesloten met een bolvormig deel dan geldt voor deze als het ware parallel geschakelde weerstanden:

$$\frac{1}{W_{\text{totaal}}} = \frac{1}{W_{\text{cyl.}}} + \frac{1}{W_{\frac{1}{2}\text{bol}}}$$

Weerstand in de grond

Ter vereenvoudiging nemen we aan dat het meeste te transporteren water door grond op grotere afstand wordt opgenomen of afgegeven, waaruit volgt dat al het water de grond rond de tensiometer passeren moet, en dat de vochtgehalten na de meting gelijk zijn aan die van voor de meting.

De berekening van de weerstanden is dan identiek aan die van de tensiometercup zelf.

De weerstand van grond en tensiometercup samen kan worden beschouwd als de som van twee in serie geschakelde weerstanden, dus:

$$W_{\text{tot.}} = W_{\text{cup}} + W_{\text{grond}} = W_c + A_g / K_g$$

Het volume grond waarover de weerstand berekend moet worden is niet eenvoudig te bepalen. Laten we het schatten op 1000 x de waterverplaatsing, nodig om de drukverandering in het systeem aan te geven, dit is $(h_o - h_t) C$, waarin C de capaciteit is van het meetsysteem h_o en h_t is h op begintijd t_o respectievelijk tijd van waarnemen t. Berekend voor een cilindrisch systeem is dit

$$(h_o - h_t) \cdot 1000 C = \text{volume grond} = \pi(r_u^2 - r_i^2)$$

dit geeft:

$$r_{ug} = \sqrt{(h_o - h_t) \frac{1000 C}{\pi} + r_{ig}^2} \quad (5)$$

uiteeraard is $r_{i\text{grond}} = r_u$ tensiometercup.

De weerstand rond de cilindrische tensiometer wordt dan volgens formule 2b, 3 en 5

$$W_g = \frac{1}{k_g \cdot 2\pi} \left[\frac{1}{2} \ln \left\{ (h_o - h_t) \frac{1000 C}{\pi} + r_{ig}^2 \right\} - \ln r_{ig} \right] \quad (5a)$$

Capaciteit meetstelsel

De capaciteit C van een systeem is te definiëren als de volume verandering, nodig om een eenheid drukverandering aan te geven

$$C = \frac{dQ}{dh} \text{ (cm}^2\text{)}$$

Aan deze 'elasticiteit' dragen bij de waterverplaatsing in de manometer, de rekbaarheid van de leidingen, eventuele luchtbellens en ook sommige tensiometer materialen staan nog wat water af bij vochtspanningsverlaging.

Insteltijd

Substitutie van C in formule 1a geeft:

$$dt = - CW \frac{dh}{h} \quad (6)$$

Het verband tussen verstreken tijd ($t_0 - t$) en het drukverschil tussen de grond en het inwendige van de tensiometer h is

$$t_t - t_0 = CW \ln h_0/h_t \quad (7)$$

Bij evenwicht geldt $h = 0$ wat wordt bereikt wanneer $h_0 \neq 0$ voor $t - t_0 = \infty$.

Praktisch gesproken is evenwicht bereikt wanneer h_t ca. 1 % is van het begin verschil h_0 . Dan geldt voor de insteltijd

$$t_t - t_0 = CW \ln 100 = 4,606 CW \quad (8)$$

Voor een cilindervormige tensiometer is de insteltijd berekend met de formules 3, 5 en 7 of meer algemeen

$$t_t - t_0 = C(W_c + W_g) \ln \frac{h_0}{h_t} \quad (9)$$

III. REKENVOORBEELDEN INSTELTIJDEN + VOORKOMENDE WAARDEN VAN
CAPACITEIT, WEERSTAND EN GELEIDBAARHEID

C a p a c i t e i t m e e t s y s t e e m

De capaciteit van een systeem is de som der capaciteiten van de onderdelen.

Capaciteiten worden bepaald door de druk in een systeem te variëren (b.v. met behulp van een injectiespuit) en de volume veranderingen af te lezen aan de verplaatsing van een watermeniscus in een dunne slang.

Tabel 1. Capaciteiten in cm^3/cm

Pressure Transducer Statham P856		$6.2 \cdot 10^{-6}$
Kwik manometer U model \emptyset 0,15 cm	$C = \frac{r^2 \pi}{26,2}$	$6.8 \cdot 10^{-4}$
Water manometer enkel \emptyset 0,15	$C = r^2 \pi$	$17.7 \cdot 10^{-3}$
Tensiometer cup type Königs zie tabel 2		$4 \cdot 10^{-5}$
Idem Coors idem		$< 10^{-8}$
Slang polypenco type 12 3 x 1,5 mm per meter		$1.2 \cdot 10^{-6}$
Idem 6.6 1,5 x 1 mm per meter		$< 10^{-8}$
Luchtbellen per cm^3	$C = \frac{1}{a} \left(\frac{P}{P-a} - 1 \right)$ P=1000 a= - 100 cm	10^{-3}
P = begin druk	P=1000 - 500 cm	$2 \cdot 10^{-3}$
a = druk verandering	P=1000 - 900 cm	10^{-2}

W e e r s t a n d t e n s i o m e t e r c u p W_c

Voorbeeld: door een cilindervormige tensiometerbuis wordt in water bij een drukverschil van 20 cm H_g , $0,088 \text{ cm}^3 H_2O/\text{sec.}$ getransporteerd. Afmetingen buis $l = 4,2 \text{ cm}$ $r_u = 0.080$ en $r_l = 0.035 \text{ cm}$

$$W_c = \frac{dt}{dQ} \cdot h = \frac{1}{0.088} \times 20 \times 13,6 = 3079 \text{ sec.cm}^{-2}$$

$$W'_c = W_c \text{ per cm} = W_c \times \mathcal{L} = 12\,929 \text{ sec.cm}^{-1}$$

$$K_c = \frac{1}{W_c} \frac{1}{2\pi} \ln r_u/r_i = 1,01 \cdot 10^{-5} \text{ cm.sec}^{-1}$$

Tabel 2. Weerstanden tensiometers

Type	r_i cm	r_u cm	W'_c sec.cm ⁻¹	$K_{\text{cup-1}}$ cm.sec
1. Cups Königs ^x	0,95	0,70	52 000	0,23 ^{9,3} 10 ⁻⁷
2. Filterpijp Coors U.S.A.	0,080	0,035	13 000	1,01 10 ⁻⁵
3. Idem	0,075	0,025	24 000	0,73 10 ⁻⁵
3a = 3 sterk vervuild	0,075	0,025	700 000	
3b = 3a na schoonschuren	0,075	0,025	70 000	

^xType 1 na gebruik in grond W_c 4 à 5 x kleiner

W_c van bijvoorbeeld een tensiometer type 1 ($\mathcal{L} = 4,0$ cm $r = 0,70$ cm en $r_u = 0,95$ cm) is $10\,756 \text{ sec.cm}^{-2}$. Dit is de resultante van W cylinder: $\frac{52\,000}{4} = 13\,000$ en de weerstand van de ronde kop W_{kop} : $62\,325 \text{ sec.cm}^{-2}$

Weerstand in de grond W_g

Hiervoor geldt $W_g = A_g/K_g$

De doorlatendheid van de grond K_g is sterk afhankelijk van de vochtspanning en de grondsoort.

Tabel 3. Waarden K_g^x in $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$

	Vochtspanning	→	- 150 cm	- 400 cm
Grondsoort				
Duinzand (3)			2.1 10^{-5}	8.6 10^{-9}
Lichte zavel (11)			16 10^{-5}	68 10^{-9}
Zware zavel (13)			1.7 10^{-5}	38 10^{-9}
Komklei			3.4 10^{-7}	12 10^{-9}

^xVolgens RIJTEMA nota ICW 513 nummers van tabel 1 pag. 5

Gegeven de grootte en vorm van de tensiometer en de capaciteit van het meetsysteem is nu met formule 5a W_g te berekenen.

I n s t e l s n e l h e i d m a n o m e t e r - t e n s i o m e t e r
c o m b i n a t i e s i n v e r s c h i l l e n d e g r o n d e n

Voorbeeld:

Cups nr 1 (Königs) $\mathcal{Z} = 4$ $r_u = 0,95$ cm

nr 3 (Coors) $\mathcal{Z} = 4$ $r_u = 0,075$ cm

(zie tabel 2)

Verbonden met 1 meter polypenco type 12 slang 3 x 1,5 mm aan een Pressure transducer (P.T.) of kwik manometer (zie tabel 1).

Cup nr 1 heeft ronde kop, de bijdrage van de kop waarden op ca. 1 cm extra lengte cup 1 wordt dus 5 cm.

Voor de verschillende combinaties zijn de diverse grootheden berekend (tabel 4a), nodig voor de berekening van de insteltijd (tabel 4).

Tabel 4. Benodigde insteltijd voor 99 % response

$$t_o - t = 4,606 C(W_t + A_g/K_g) \text{ sec.}$$

Kombi- natie	Materiaal vochtspanning $K_g \text{ cm. sec}^{-1}$	H_2O 0	Lichte zavel		Kouklei	
			- 50	-400	- 50	-400 cm
			$16 \cdot 10^{-5}$	$68 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^7$	$12 \cdot 10^{-9}$
a.	P.T. - cup 1	2,3	2,3	16,9	5,3	85,1
b.	P.T. - cup 3	0,2	0,2	24,0	5,0	136,5
c.	Kwikm. - cup 1	35,6	36,0	1437	316	8000 798
d.	Kwikm. - cup 3	18,8	21,5	6340	1283	35 839

Tabel 4a

Kombi- natie	Capaciteit (zie tabel 1) sec. cm^{-2}	r_{ug}^x zie form. 5 ^x cm	A_g^{xx} cm^{-1}	W_c sec. cm^{-2}
b.	$7,4 \cdot 10^{-6}$	0,254	0,048	6 000
c.	$721,2 \cdot 10^{-6}$	2,34	0,0287	10 756
d.	$681,2 \cdot 10^{-6}$	2,33	0,137	6 000

^xSpanningsverschil tussen manometer en grond op tijd 0, $h_o = 100 \text{ cm}$
 $h_t = 1 \text{ cm}$

$$\text{form. 5: } r_{ug} = \sqrt{(h_o - h_t) \frac{1000C}{\pi \ell} + r_i^2}$$

$$A_g^{xx} = \frac{1}{2\pi \ell} \ln \frac{r_{ug}}{r_{ig}}$$

Opmerkingen:

- . Vergelijking van de insteltijd in water en in grond laat zien dat in drogere grond de invloed van de weerstand in de grond, die van de tensiometer weerstand overtreft.
- . Manometers met veel waterverplaatsing hebben in drogere grond alleen in combinatie met grote tensiometer cups nog een redelijke instel snelheid.

IV. AANVULLINGEN

1. In veel meetopstellingen blijft de tensiometer in de grond en wordt de manometer aangesloten, alleen zo lang als nodig is voor de meting.

Het is mogelijk om direct na aansluiting af te lezen als de capaciteit van het tensiometerdeel hoog is vergeleken met de capaciteit van het manometerdeel onder de volgende voorwaarden:

- a. De capaciteit van het tensiometersysteem mag niet dermate hoog worden dat de instelsnelheid van de tensiometer cup zo laag wordt, dat de te verwachten veranderingen in de vochtspanning onvoldoende worden gevolgd.
- b. De daling van de druk in het tensiometerdeel, als gevolg van het aansluiten op het manometerdeel ($= h_o$) moet kleiner zijn dan de gewenste nauwkeurigheid ($= h_t$) van de vochtspanningsmeting.

Er geldt:

$$h_o = \frac{C_{\text{manometer}}}{C_{\text{manometer}} + C_{\text{tensiometer}}} \times (H_{\text{grond}} - H_{\text{manometer}}) \quad (10)$$

Is h_o groter dan h_t dan wordt de tijd nodig om op evenwicht te komen snel zoveel langer dat beter een tensiometerdeel met lage capaciteit kan worden gebruikt.

Of aan de voorwaarden a en b wordt voldaan kan met formule 9 en 10 worden berekend.

2. Voordruk en hystherese

De insteltijd wordt ook verkort door de druk in het manometersysteem (H_{man}) vóór het aansluiten op de tensiometer een waarde te geven, die slechts iets hoger is dan de verwachte meetwaarde ($= H_{\text{grond}}$).

Bijvoorbeeld als $H_{\text{grond}} = -200$ à -300 cm dan de $H_{\text{manometer}}$ op ca. -180 cm brengen.

Wel moet $H_{\text{manometer}}$ hoger zijn dan H_{grond} omdat:

a. Tijdens het instellen van het evenwicht de grond rond de tensiometer daardoor iets natter wordt, en daardoor het geleidingsvermogen van de grond K_g en de instelsnelheid stijgen.

b. Hystherese verschijnselen kunnen optreden.

Bij de gebruikte pressure transducer + m Voltmetercombinatie is - wanneer in water wordt gemeten - het verschil tussen de waarden gemeten met een hogere en lagere voordruk ca. 1 % van het schaalbereik.

Bij metingen in grond kunnen veel grotere verschillen voorkomen.

Wordt in een meetreeks met hogere en lagere voordrukken gemeten dan moet zeker getest worden hoe groot de hystherese invloed is.

3. Invloed temperatuurvariaties

Temperatuurveranderingen kunnen volumen en drukvariaties veroorzaken als gevolg van uitzetten van leidingen en water bij temperatuurverhogingen vooral bij hoge stromingsweerstand in en rond de tensiometer cup is zo'n drukverandering langdurig. Ook zijn sommige pressure transducers onvoldoende temperatuur gecompenseerd.

Bij apparatuur voor het meten bij variërende temperaturen dient het volume water in het systeem zo klein mogelijk te zijn en moet een weinig temperatuurgevoelige manometer worden gebruikt.

4. Door de wand van veel kunststof slangen verdampt wat water

Voorbeeld: Slang polypenco nylon 1,5 x 1 mm 1 meter lang bij 20°C en 50 % relatieve vochtigheid verlies $3,6 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$.

Bij meting in komklei met een vochtspanning van - 400 cm met tensiometer type 3 is de $W_{\text{tot.}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ sec} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Betekent dit een verhoging van de gemeten spanning met

$$dH = - \frac{dQ}{dt} \cdot W_{\text{tot.}} = - 1,44 \text{ cm.}$$

De slang aangesloten op de pressure transducer ($C = 6,210^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}$) aan een kant en afgesloten aan de andere kant.

Staat in $\frac{6,2 \cdot 10^{-6} \times 10^3}{3,6 \cdot 10^{-7}} = 1,7 \cdot 10^4 \text{ sec.} = 4,78 \text{ uur}$ onder vacuum.

Bij metingen in drogere gronden, ook met de combinatie van pressure transducer en dunne Coors tensiometer, komen langere insteltijden voor dan hier als voorbeeld zijn gegeven.

Met formule 7: $t - t_0 = C.W \ln \frac{h_0}{h_t}$ is de totale weerstand W te berekenen.

Wordt 63 % van de uiteindelijke aanwijzing bereikt in 5 min. dan is bij een capaciteit van $7,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{cm}$ de weerstand $58 \cdot 10^{+6} \text{ sec.cm}^{-2}$.

Waterverlies door slangen heeft dan wel degelijk invloed, bij het eerdergenoemde verlies van $3,6 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ wordt de berekende $dH = 21 \text{ cm}$.

In werkelijkheid wordt geen evenwicht bereikt; de gemeten onderdruk wordt langzaam groter. De watertoevoer in deze drogere gronden is kennelijk onvoldoende om uitdroging rond de tensiometer te voorkomen.

V. CONCLUSIES

1. De Spanning van het bodemwater is tot een onderdruk van ca. 800 mbar te meten met tensiometers.
2. De tijd die nodig is om een drukverandering aan te geven kan worden gegeven als functie van de capaciteit van het drukmeetsysteem, de watergeleidbaarheid van de grond, de grootte en doorlatendheid van de tensiometercup en de grootte van de drukverandering. Aan de hand hiervan kan worden nagegaan of een tensiometercup-drukmeetsysteem-combinatie bruikbaar is voor de gewenste metingen.
3. Er moet zeker worden nagegaan of de verbindingsslangen voldoende gas en waterdicht zijn en of de invloed van temperatuurvariaties klein genoeg is.