

NN31545.0752

juli 1973

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

TE VERZENDEN AAN H.I.D.'s		
d.d.	ja	neen
d.d. 10/12 '73		
w. G.P. Wind		<i>[Handwritten signature]</i>
directeur		<i>[Handwritten signature]</i>
verzonden d.d.	X	

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

BIBLIOTHEEK DE HAFF

Droevendaalsesteeg 3a
Postbus 241
6700 AE Wageningen

EEN MODELONDERZOEK NAAR HET MECHANISME VAN DE
NATUURLIJKE VERDICHTING VAN EEN ZANDGROND

J.M.H. Hendrickx en ir D. Boels

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

1792726

12 FEB. 1998

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0941 0313

I N H O U D

	Blz.
VOORWOORD	
1. INLEIDING	1
2. EEN THEORETISCHE BESCHOUWING OVER HET MECHANISME VAN VERDICHTING	3
2.1. De aard van de verdichtende kracht	3
2.2. Verdichting tengevolge van een netto verdichtende kracht	4
3. PROEFOPZETTEN	5
3.1. Fotoproef	5
3.2. Zakkingsproef bij verschillende vochtspanningen	6
3.3. Samendrukkingsproef	7
3.4. Infiltratieproef	7
4. MEETRESULTATEN	8
4.1. Fotoproef	9
4.2. Zakkingsproef bij verschillende vochtspanningen	10
4.3. Samendrukkingsproef	16
4.4. Infiltratieproef	17
5. DISCUSSIE VAN DE MEETRESULTATEN	23
CONCLUSIES	30
6. LITERATUUR	31
LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN	33

VOORWOORD

In het kader van het onderzoek aan bodemverdichting na een losmakende bewerking door de afdeling bodemtechniek, wil men nagaan welke de mechanismen van natuurlijke bodemverdichting zijn. Daartoe werd door mij in de maanden februari 1973 tot en met juni 1973 onder leiding van de heer D. Boels een eerste onderzoek gedaan, waarvan deze nota een verslag geeft. Dit verslag dient tevens als ingenieursscriptie.

Rest mij te vermelden dat de resultaten van dit onderzoek mede bereikt werden door de prettige en leerzame begeleiding van de heer D. Boels en de goede samenwerking met de personeelsleden van het laboratorium, het ontwikkelingsatelier en de tekenkamer.

Jan M.H. Hendrickx

1. INLEIDING

Na het losmaken van de grond treedt weer een verdichting op, die het oorspronkelijk resultaat doet afnemen. In bepaalde gevallen is het uiteindelijk resultaat slechter dan de uitgangstoestand (BOELS en HAVINGA (19), HAVINGA en VAN GREUNINGEN (19)). Een inzicht in het mechanisme van de verdichting na een losmakende bewerking is nodig om deze verdichtingen te kunnen voorspellen en om te kunnen aangeven welke verdichtingen op welke gronden verminderd kunnen worden.

Grondmechanisch gezien kan pas een verdichting optreden wanneer de korrelspanning toeneemt. De korrelspanning is gedefinieerd als:

$$\sigma_k = \sigma_g - \sigma_w \quad (1)$$

σ_k = korrelspanning

σ_g = grondspanning

σ_w = waterspanning

De korrelspanning moet, om verdichtingen te veroorzaken, voldoen aan de voorwaarde (HUIZINGA (1959)):

$$\sigma_1 > \sigma_3 \operatorname{tg}^2(45 + \phi/2) + 2 C \operatorname{tg}(45 + \phi/2) \quad (2)$$

$\sigma_1, 3$ = korrelhoofdspanningen

C = cohesie

ϕ = hoek van inwendige wrijving

Voor zandgronden waar $C = 0$, moet voldaan zijn aan:

$$\sigma_1 > \sigma_3 \operatorname{tg}^2(45 + \phi/2) \quad (3)$$

Een aantal auteurs hebben zich beziggehouden met het proces van verdichtingen in onverzadigde gronden.

JONGERIUS (1970) schrijft verdichtingen in de bouwvoor toe aan een verzadigde Ap-horizont. Door die verzadiging verliezen de bodemdeeltjes hun onderlinge binding, waardoor ze uiteenvallen, naar beneden zakken, uitsorteren en in een dichte pakking afgezet worden. Micromorfologische waarnemingen bevestigen dit.

HAVINGA en PERDOK (1969) vonden dat de samendrukbaarheid van de grond grote samenhang toonde met het vochtgehalte.

WEAVER, e.a. (1951) namen waar dat de grootste gevoeligheid voor samendrukken bij een lager vochtgehalte lag, naarmate de belasting groter was.

VAN DER WATT (1969) relateerde de gevoeligheid voor samendrukken aan de korrelgrootteverdeling en vond dat deze gevoeligheid het grootst was bij die gronden, waarvan vrijwel gelijke hoeveelheden in elke korrelgrootte klasse werden aangetroffen.

CAMP (1969) bestudeerde het effect van drogen op de grootte van de cohesie en de hoek van inwendige wrijving. Waargenomen werd dat bij afnemend vochtgehalte het volumegewicht toenam, evenals de cohesie en de hoek van inwendige wrijving. Bij Lloyd-klei bleef echter het volumegewicht bij droging gelijk, terwijl toch de cohesie en hoek van inwendige wrijving toenam. Daar de cohesie en hoek van inwendige wrijving samenhangen met het contactoppervlak tussen de vaste delen, dus met het volumegewicht, was de toename van de cohesie en hoek van inwendige wrijving bij Lloyd-klei niet goed door Camp te verklaren.

WILLIAMS (1970) ging na hoe groot de bijdrage van de zuigspanning was in de totale verdichtende kracht. Het bleek dat wanneer de afschuifkrachten gecorrigeerd werden op de vochtspanning en de luchtspanning, een cohesie en hoek van inwendige wrijving gevonden werden die alleen afhingen van het volumegewicht, dus van het contactoppervlak tussen de vaste delen.

Hoewel de geciteerde auteurs aspecten van de bodemverdichting bestudeerden, is het niet mogelijk met die gegevens een bodemverdichting te voorspellen. In deze nota wordt ingegaan op een aantal aspecten van de natuurlijke bodemverdichting van een zandgrond.

('Natuurlijk', omdat alleen gelet wordt op verdichtingen met als oorzaak veranderingen in vochtgehalte en vochtspanning). Getracht wordt een samenhang tussen de dichtheid en de verdichtende krachten te vinden.

2. EEN THEORETISCHE BESCHOUWING OVER HET MECHANISME VAN VERDICHTING

2.1. De aard van de verdichtende kracht

Een verdichting zal pas optreden wanneer een netto verdichtende kracht werkzaam is. Loodrecht op een doorsnede op diepte z onder het maaiveld heersen een aantal krachten.

a. De kracht tengevolge van het gewicht van de bovenliggende grond:

$$\sigma_g = \int_0^z \rho_{z,n} dz$$

$\rho_{z,n}$ = nat. vol. gew. op diepte z

b. De vochtspanning, die niet over de totale doorsnede aangrijpt, maar over een deel χ daarvan (BISHOP en BLIGHT (1963)):

$$\sigma_w = \psi \cdot \chi$$

ψ = vochtspanning

c. De stromingsdruk die over een deel χ van de doorsnede werkt:

$$\sigma_v = - \left(\frac{d\psi}{dz} + 1 \right) \cdot \chi$$

d. Een weerstand tegen verdichting.

De grond kan als quasi elastisch materiaal worden opgevat. Dat betekent dat de weerstand tegen verdichten recht evenredig is met de dichtheidsverandering:

$$\sigma_e = \int_{\rho_0}^{\rho_a} e \frac{d\rho}{\rho_0} = e \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0}$$

ρ_0 = minimale dichtheid

e = elasticiteitsmodulus

ρ_a = actuele dichtheid van de grond

Als de verdichtende kracht weggenomen wordt, neemt de dichtheid niet meer af.

De netto verdichtende kracht is dus:

$$K = \sigma_g - \sigma_v - \sigma$$

of:
$$K = \sigma_g - \left(\psi - \frac{d\psi}{dz} - 1 \right) \chi - e \cdot \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} \quad (4)$$

Het deel χ van de doorsnede waarover de vochtspanning werkt, hangt samen met de verzadigingsgraad. Volgens JENNINGS EN BURLAND (1962):

$$\chi = S_r + \frac{1}{\sigma_w} \int_0^{\sigma_w} 0,3 \sigma_w \cdot \Delta S_r$$

S_r = verzadigingsgraad

Voorwaarde is echter dat het volumegewicht niet verandert tengevolge van de verandering van vochtinhoud.

2.2. Verdichting tengevolge van een netto verdichtende kracht

Door het langzame verloop van een bevochtiging van de grond, zijn de optredende krachtsveranderingen per tijdseenheid gering. Het verdichtingsproces kan dan als een quasi-stationaire, axiale vervorming worden opgevat.

De dichtheidsverandering van een grond die een dichtheid ρ_a heeft, is tengevolge van de nettokracht K (zie 4):

daar;

$$K = e \cdot \left(\frac{-\rho_a + \rho_a - \rho_o}{\rho_o} \right) = \sigma_g - \left(\psi - \frac{d\psi}{dz} - 1 \right) \chi$$

is dus:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_o}{e} \left\{ \sigma_g - \left(\psi - \frac{d\psi}{dz} - 1 \right) \chi \right\} - (\rho_a - \rho_o) \quad (5)$$

3. PROEFOPZET

Om een idee te krijgen met welk soort proefopzet en meettechniek het mechanisme van natuurlijke verdichting het best kan worden bestudeerd, werden vier verschillende proeven uitgevoerd. De opzet van deze proeven en de gebruikte meettechnieken zullen in dit hoofdstuk worden behandeld.

3.1. Fotoproef

Een glazen trechter (d 6,5 cm, h 5,5 cm) met daarin een filter, werd met zand (korrelfractie 20-30 μm , θ 2,5 gew. %) gevuld. Een regelmatige vulling werd verkregen door het zand via een zeef (doorlaatopening 2 mm) in de trechter te laten vallen. Onder het filter werd een overdruk van 50 gr/cm^2 aangelegd. Tijdens de bevochtiging van het zand werd om de 10 minuten met een technische camera één foto gemaakt, in totaal 17 foto's. De uiteindelijke afdrukken op krimp- en rekvrije polyesterfilm waren tot 13 x de werkelijkheid vergroot. Bij deze vergroting was het mogelijk de verticale verplaatsing van een aantal afzonderlijke korrels tijdens de bevochtiging op te meten. Ook konden op de foto's globaal drie vochtzones onderscheiden worden: droog, nat-onverzadigd en nat-verzadigd.

3.2. Zakkingsproef bij verschillende vochtspanningen

Per vochtspanningstrap werden drie glazen trechter ($d = 6,5$ cm, $h = 5,5$ cm) met zand (korrelfractie 20-30 μm , $\theta = 2,5$ gew. % gevuld. Een regelmatige vulling met vrij constant volumegewicht werd verkregen door het zand via een zeef (doorlaatopening 2 mm) op de zeefmachine in de trechters te laten vallen. Daarna werd onder het filter een vochtspanning aangelegd. De aangelegde vochtspanningen waren: -3, -1, +1, +3, +5 en +10 gr/cm^2 . De zakking van het monster werd gemeten met een meetklok. Op deze meetklok zijn schaaldelen van 1/100 mm aangegeven, zodat een aflezing tot op 1/1000 mm mogelijk is. De stift van de meetklok rust op een perspexplaatje ($d = 6,0$ cm). De veer die de stift op het plaatjedrukt, geeft een maximale druk van ongeveer 100 gr, zodat de maximale druk die door de meetklok op het zand uitgeoefend werd 3 à 4 gr/cm^2 bedroeg. Tijdens het plaatsen van het perspeksplaatje en de meetklok zakte de grond wat onder de rand van de trechter. Die zakking werd met een schuifmaat tot op 2/10 mm nauwkeurig opgemeten. In het perspeksplaatje zijn gaatjes geboord om tijdens het opstijgen van het water de lucht te laten ontsnappen.

Nadat de vochtspanning was aangelegd, werd de zakking gemeten totdat deze zeer klein of nul was. Na de proef werd uit de zakking de verandering van het volumegewicht berekend. Voor de proefopstelling zie fig. 1.

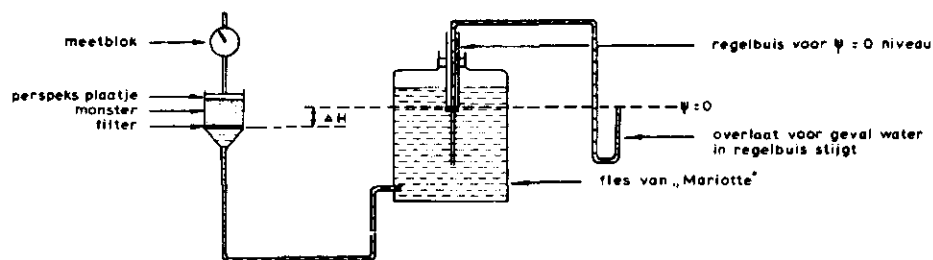


Fig. 1. Proefopstelling van de zakkingsproef

3.3. Samendrukkingsproef

Drie ringen ($d=6,5$ cm, $h = 1,6$ cm) werden met zand (korrelfrac-tie $20-30 \mu\text{m}$, $\theta=2,5$ gew. %) gevuld. Een regelmatige vulling met vrij constant volumegewicht werd verkregen door het zand via een zeef (doorlaatopening 2 mm) op de zeefmachine in de ringen te laten vallen. Daarna werd op het zand een perspeksplaatje met gaatjes gelegd. Op dat plaatje rustte de stift van een meetklok. De proef werd uitge-voerd voor twee gewichtsklassen met een totale belasting van 100 en 500 gr.

Na correctie op de veedruk, die uit een zelf bepaalde ijkgrafiek wordt afgelezen, komen deze gewichtsklassen overeen met een grond-druk van respectievelijk $4 \text{ à } 5 \text{ gr/cm}^2$ en $16 \text{ à } 17 \text{ gr/cm}^2$. De gewich-ten werden geplaatst op een plaatje dat bovenaan de meetstift beves-tigd was (fig. 2).

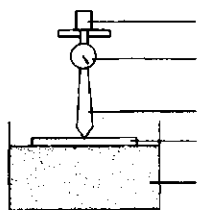


Fig. 2. Proefopstelling van de samendrukkingsproef

De proef werd uitgevoerd om na te gaan of het mogelijk is op deze manier een verband te vinden tus-sen aangelegde kracht en verande-ring van het volumegewicht. Het was niet mogelijk voor deze proef het samendrukkingsapparaat te ge-bruiken dat in Delft ontworpen is (HUIZINGA p. 35 (1959)) omdat dat teveel inwendige wrijving heeft om bij gewichten tot enkele kilogram-men betrouwbare resultaten te krijgen.

3.4. Infiltratieproef

Een perspekstrechter ($d 6,7$ cm, $h = 7$ cm) bestaande uit drie af-neembare ringen ($h = 1,5$ cm) en een vast onderstuk met daarin een fil-ter werd met zand gevuld (korrelfractie $20-30 \mu\text{m}$, $\theta 2,5$ gew. %). Een regelmatige vulling met vrij constant volumegewicht werd verkregen door het zand via een zeef (doorlaatopening 2 mm) op de zeefmachine

in de trechter te laten vallen. Daarna werd onder het filter een vochtspanning van $+15 \text{ gr/cm}^2$ aangelegd. Tijdens de infiltratie werd op twee plaatsen, 1,75 en 4,75 cm boven het filter, de vochtspanning gemeten. Dat gebeurde met tensiometers bestaande uit 2 cm lange keramische pijpjes ($d_{\text{uitw.}} = 1,6 \text{ mm}$, $d_{\text{inw.}} = 0,4 \text{ mm}$), die goed doorlatend zijn ($k = 4,2 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$) en een luchtintreewaarde van 0,9 atm. hebben. De tensiometers waren verbonden met een transducer en deze met een recorder. Voor de proefopstelling zie fig. 3.

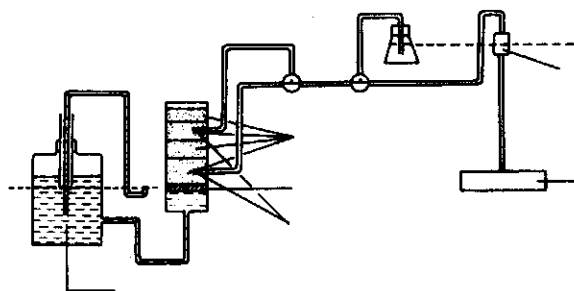


Fig. 3. Proefopstelling van de infiltratieproef

Op die wijze was het mogelijk het verloop van het vochtfront te volgen. Vier proeven werden uitgevoerd met een infiltratietijd van 0, 14, 78, 180 en 210 minuten. Na afloop van de proef werd per ring het vochtgehalte en het volumegewicht bepaald. Met de resultaten wordt een verband aangegeven tussen de voortschrijding van het vochtfront en de verandering van het volumegewicht en het vochtgehalte.

4. MEETRESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten weergegeven van de proeven die in het vorige hoofdstuk beschreven zijn, daarbij zal dezelfde volgorde worden aangehouden.

4.1. Fotoproef

De zakking van twintig korrels, die regelmatig over de hoogte van de grondkolom verdeeld lagen, werd gemeten. In fig. 4 is deze zakking weergegeven. De fout die bij het opmeten van de zakking gemaakt is,

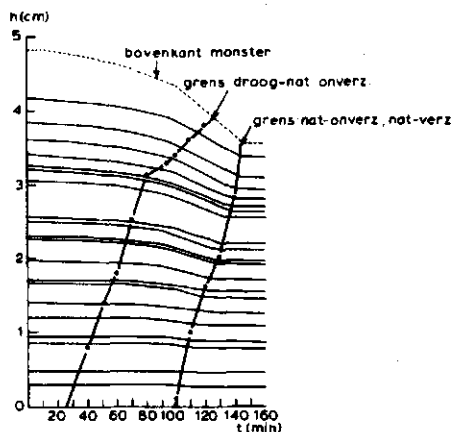


Fig. 4. De zakking van 20 korrels tijdens infiltratie met water

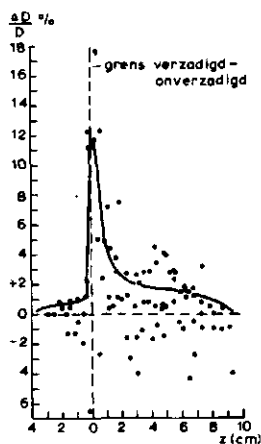


Fig. 5. Verband tussen de mate van verdichting ($\frac{\Delta D}{D}$) en de hoogte boven de water-spiegel (z)

bedraagt ongeveer $\pm 0,1$ mm.

tevens is het verloop van de bovenkant van het monster en van de grenzen van drie te onderscheiden vochtzones ingetekend. Aangezien de bovenkant van het monster en de vochtgrenzen niet nauwkeurig op de foto's te volgen waren, moet rekening worden gehouden met een fout van $\pm 1,5$ mm.

Het verband tussen de mate van verdichting ($\frac{\Delta D}{D}$) en de hoogte boven de water-spiegel (z) staat in fig. 5.

De verhouding $\frac{\Delta D}{D}$ werd bepaald door bij 6 korrelparen na te gaan hoe de onderlinge afstand (D) bij een stijgende water-spiegel veranderde. De hoogte z werd bepaald in fig. 4 als de afstand van het punt midden tussen

twee korrels tot de grens onverzadigd en verzadigd. Teneinde $\frac{\Delta D}{D}$ ook in de eerste 90 minuten te bepalen, werd die grens naar beneden ge-extrapolleerd. Als $\frac{\Delta D}{D} = 0$ treedt geen verdichting op, maar kunnen de korrels wel zakken. Als $\frac{\Delta D}{D} > 0$ treedt verdichting op tussen de beide

korrels en als $\frac{\Delta D}{D} < 0$ treedt verdichting op vlak onder de laagste gelegen korrel. Dan kan de hoogte z niet nauwkeurig bepaald worden, daarom blijven die gevallen buiten beschouwing.

Fig. 5 laat zien dat de grootste verdichting plaats vindt op de grens van onverzadigd en verzadigd.

De pakking van de korrels vertoonde een groot toevalskarakter. Slechts op enkele plaatsen kon een systematische pakking onderscheiden worden, zoals die door GRATON (1935) beschreven worden.

4.2. Zakkingsproef bij verschillende vochtspanningen

In fig. 6 wordt van iedere vochtspanning een representatieve curve gegeven van de verandering van het volumegewicht in de tijd. Naarmate de vochtspanning hoger is, verandert het volumegewicht sneller en in sterkere mate. Dat gaat niet onbeperkt door.

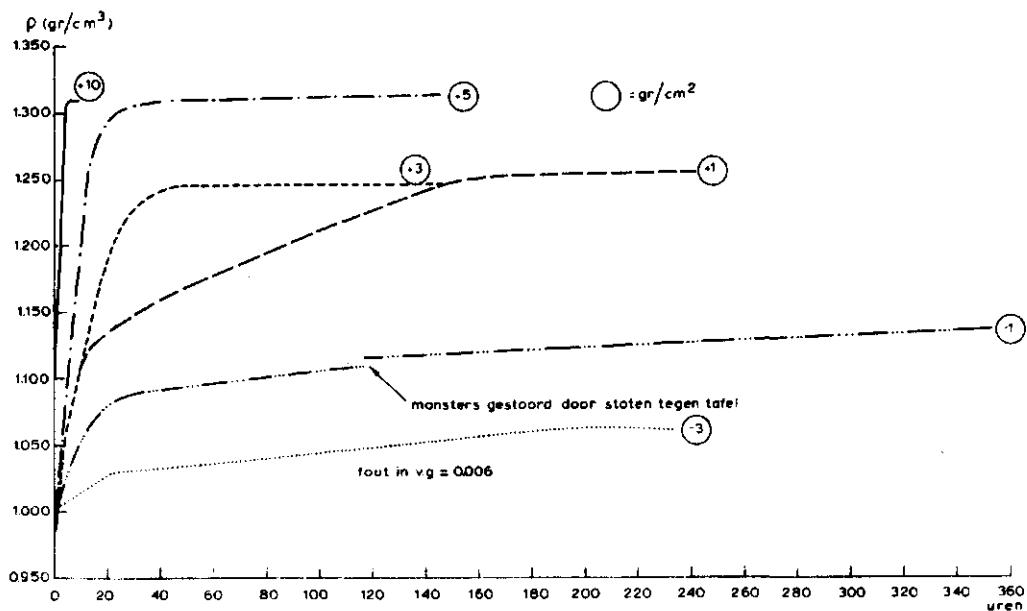


Fig. 6. Verandering van het volumegewicht in de tijd bij 6 vochtspanningen

Uit fig. 7 blijkt dat het volumegewicht na een bepaalde vochtspanning een constante waarde heeft. De snelheid waarmee die waarde bereikt wordt, neemt nog wel toe.

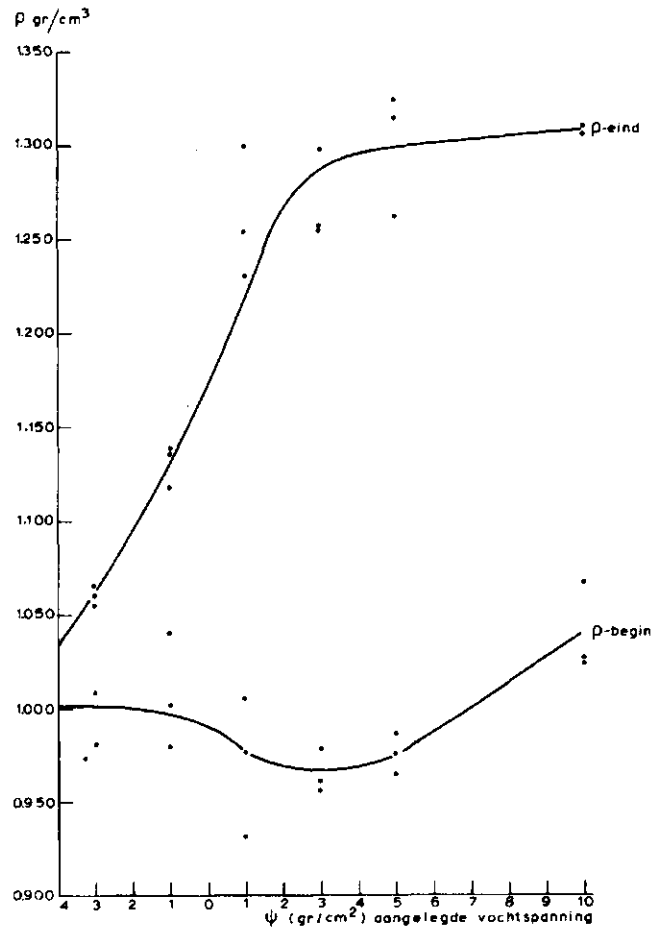


Fig. 7. Verschillen tussen begin- en eind volumegewicht bij 6 vochtspanningen

Uit fig. 7 blijkt dat de begin volumegewichten niet steeds gelijk waren. Nagegaan werd of deze verschillen in het begin volumegewicht invloed uitoefenen op de verandering van het volumegewicht of dat die verandering alleen van de vochtspanning afhankelijk is. Daartoe zijn in tabel 1 de sommen van de kleinste, middelste en grootste volumegewichten bij iedere vochtspanning vergeleken met de sommen van hun veranderingen.

Tabel 1. De begin volumegewichten en hun verandering

Vochtspanning ψ (gr/cm ²)	kleinste begin ρ	$\Delta\rho$	middelste	$\Delta\rho$	hoogste	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
- 3	0.982	0.075	0.993	0.073	1.009 ^x	0.052
- 1	0.980	0.159	1.002	0.134	1.041 ^x	0.077
+ 1	0.932 ^x	0.290	0.977	0.322	1.006	0.320
+ 3	0.956	0.292	0.961	0.285	0.978	0,320
+ 5	0.965 ^x	0.359	0.976	0.338	0.986	0.275
+10	1.026	0.280	1.027	0.280	1.067 ^x	0.242
Som	5.841	1.455	5.936	1.432	6.087	1.214

Indien alleen de vochtspanning invloed uitoefent, zullen de sommen van de verandering van de volumegewichten in alle drie de kolommen gelijk zijn. Dat is echter niet het geval, duidelijk blijkt een negatieve correlatie tussen het begin volumegewicht en zijn verandering: naarmate het begin volumegewicht kleiner is, wordt zijn verandering meer dan evenredig groter.

Dat verband is ook uitgezet in fig. 8. De getrokken lijn geeft het verband tussen het begin volumegewicht en zijn verandering, de onderbroken lijn het verband tussen het begin volumegewicht en zijn verandering die nodig zou zijn om een eind volumegewicht te bereiken dat gelijk is aan het eind volumegewicht dat bij het hoogste begin volumegewicht bereikt werd. Alleen bij vochtspanning -3 gr/cm^2 wordt geen negatieve correlatie tussen het begin volumegewicht en zijn verandering gevonden. Dat is te wijten aan meetfouten. Bij vochtspanning $+1 \text{ gr/cm}^2$ liggen de eerste twee punten ver uit elkaar, hetgeen de getrokken lijn minder betrouwbaar maakt.

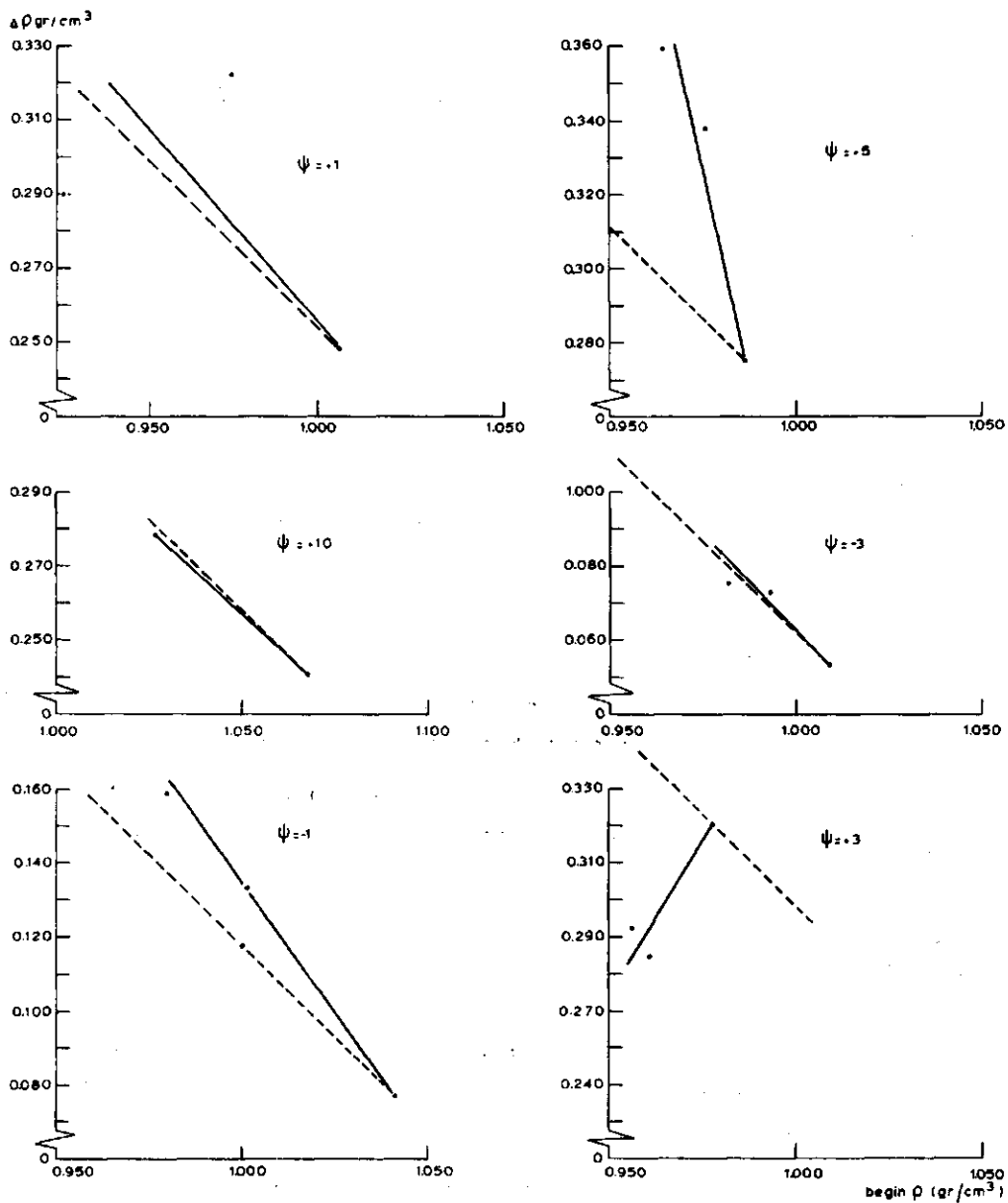


Fig. 8.

In fig. 9 is de relatieve volumegewichtsverandering uitgezet tegen de vochtspanning. De kleinere relatieve volume verandering bij vochtspanning $+10 \text{ gr/cm}^2$ is te wijten aan een hoger begin volumegewicht (zie fig. 7) dan bij vochtspanning $+5 \text{ gr/cm}^2$.

Voorts is nagegaan of de volumegewichten na verdichting dichter bij elkaar liggen dan voor verdichting, hetgeen erop zou wijzen dat bij een bepaalde vochtspanning het eind volumegewicht een constante waarde bereikt die onafhankelijk is van het begin volumegewicht.

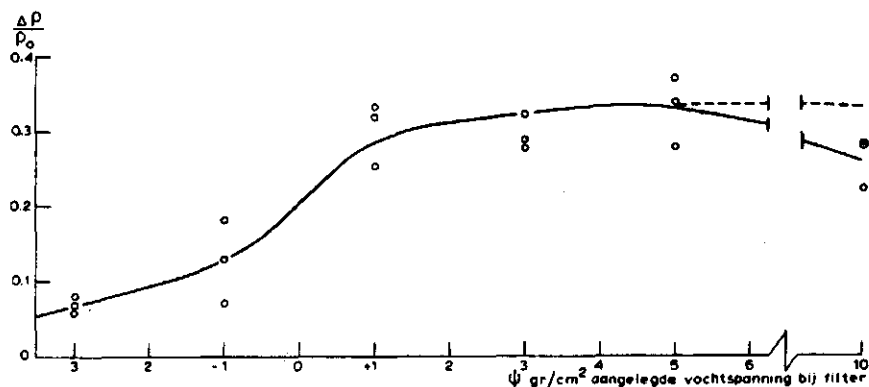


Fig. 9. Verband tussen de relatieve volume verandering en de vochtspanning

Daartoe zijn in tabel 2 per vochtspanning de verschillen tussen de drie volumegewichten (ρ_1, ρ_2, ρ_3) voor en na verdichting gesommeerd. De som van de verschillen tussen de drie volumegewichten na verdichting is 0.198 gr/cm^3 groter dan de som van de verschillen voor verdichting. De volumegewichten na verdichting blijken dus niet dichter bij elkaar te liggen dan de volumegewichten voor verdichting, eerder lijkt het tegendeel waar.

Tabel 2. Verschillen tussen de volumegewichten voor en na verdichting

Vochtspanning gr/cm ²	-3		-1		+1		+3		+5		+10	
	voor	na	voor	na	voor	na	voor	na	voor	na	voor	na
$ \rho_1 - \rho_2 $	0.027	0.022	0.022	0.025	0.029	0.045	0.017	0.052	0.010	0.068	0.040	0.038
$ \rho_1 - \rho_3 $	0.011	0.002	0.061	0.082	0.055	0.069	0.022	0.050	0.011	0.021	0.001	0.000
$ \rho_2 - \rho_3 $	0.016	0.021	0.039	0.057	0.074	0.024	0.005	0.002	0.021	0.084	0.041	0.038
Som	0.054	0.045	0.122	0.164	0.158	0.138	0.044	0.104	0.042	0.173	0.082	0.076

Somverschillen voor verdichting: 0.502

Somverschillen na verdichting: 0.700

Het volumegewicht werd bepaald volgens:

$$\rho = \frac{G_{\text{grond}}}{(\text{tot.vol.trechter}) - (\text{gedeelte van vol. dat niet met grond gevuld is})}$$

$$= \frac{G}{V_{\text{totaal}} - h \times d^2 \times \pi/4} \quad (6)$$

Om de relatieve fout te berekenen werd de natuurlijke logaritme van (6) genomen en vervolgens gedifferentieerd (BRUGGENWERT e.a. (1966))

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta G}{G} + \frac{\Delta V_{\text{totaal}} + \pi/4 \cdot d^2 \cdot \Delta h + 2 \cdot d \cdot h \cdot \pi/4 \cdot \Delta d}{V_{\text{totaal}} - h \cdot d^2 \cdot \pi/4} \quad (7)$$

Met (7) wordt de relatieve fout van het begin volumegewicht berekend. Daarbij is:

$\Delta G = 5 \text{ gr}$ Tussen het perspeksplaatje en de trechterwand kwam vaak wat grond (maximaal 5 gr) omhoog, die grond zit niet in het volume met behulp waarvan het volumegewicht werd bepaald.

$\Delta V_{\text{totaal}} = 2 \text{ cm}^3$

$\Delta h = 0,02 \text{ cm}$ Voordat de vochtspanning werd aangelegd zakte de grond een beetje onder druk van de meetstift; die zakking werd gemeten met de schuifmaat.

$\Delta d = 0,01 \text{ cm}$

Tabel 3 geeft voor de volumegewichten die in tabel 1 met een π gemerkt zijn de relatieve fout in het begin volumegewicht. Deze fout blijft als een systematische fout aanwezig in de volumegewichten die gemeten worden, nadat een vochtspanning is aangelegd. Een extra fout (boven die systematische fout) wordt veroorzaakt door een fout bij de meting van de zakking (h) met de meetklok.

Daarbij zijn ΔG , ΔV en Δd nul, terwijl $\Delta h = 0.001 \text{ cm}$. In tabel 3 wordt ook deze fout weergegeven.

Tabel 3. Overzicht van de systematische fout in het begin volumegewicht en de extra-fout bij het eind volumegewicht en de tussenliggende volumegewichten van vijf begin volumegewichten uit tabel 1

Vochtspanning	Begin ρ	G	V _{totaal}	h	d	Systematische fout	Extra fout
						$\Delta\rho$ ρ %	$\Delta\rho$ ρ %
- 3	1.009	159.11	183.54	0.740	6.67	3.1	0.2
- 1	1.041	192.87	185.24	0.000	6.66	4.0	0.2
+ 1	0.932	172.60	185.24	0.000	6.66	2.9	0.2
+ 5	0.965	175.34	194.27	0.360	6.68	4.4	0.2
+10	1.067	170.29	182.40	0.663	6.61	4.7	0.2

4.3. Samendrukkingsproef

Anders dan bij de zakkingsproef treedt de verandering van het volumegewicht bij de samendrukkingsproef zeer snel op (fig. 10).

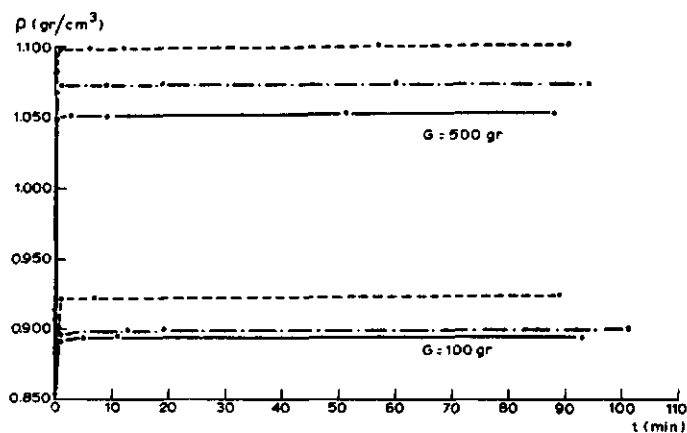


Fig. 10. Verband tussen volumegewicht en tijd

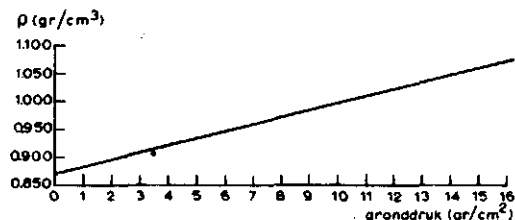


Fig. 11. Verband tussen gronddruk en volumegewicht

Het verband tussen de gronddruk (gewicht gedeeld door oppervlak perspeksplaatje) en het volumegewicht wordt in fig. 11 weergegeven. Daaruit is een elasticiteitsmodulus (e) van 69.60 gr/cm² berekend. Aangezien slechts twee metingen gedaan werden, is de interpretatie ervan in het totaal moeilijk.

4.4. Infiltratieproef

Na de vijf proeven met een infiltratietijd van respectievelijk 0, 14, 78, 180 en 210 minuten werd per ring het vochtgehalte en volumegewicht bepaald. Deze waarden en het gemiddelde begin volumegewicht over de hele trechter worden vermeld in tabel 4.

Tabel 4. Infiltratietijden, vochtgehalten en volumegewichten van de infiltratieproef

Proef	Ring infiltratietijd (min)	I		II		III		IV		I t/m IV
		θ	ρ	θ	ρ	θ	ρ	θ	ρ	ρ
I	0	2.37	1.073	1.82	1.002	1.65	0.963	1.55	0.814	0.981
II	14	7.45	1.154	2.39	0.927	2.33	0.883	1.91	0.825	0.956
III	78	23.12	1.425	2.91	0.780	2.52	0.852	2.20	0.628	0.965
IV	180	30.00	1.484	39.00	1.308	3.24	0.580			0.930
V	210	29.00	1.494	40.00	1.276	9.42	0.697			0.975

Uit de tensiometerwaarnemingen van proef 5 werd voor tensiometer 1 en 2 het verband tussen de vochtspanning en de tijd bepaald. De vochtspanning die met de tensiometer gemeten was, werd gecorrigeerd volgens (KASTANEK (1971)):

$$\psi_{\text{grond}} = \psi_{\text{tensiometer}} - w \cdot \frac{d\psi}{dt} \quad w = \text{correctiefactor} \quad (8)$$

De correctiefactor (w) werd bepaald door de tensiometers in gronden met bekende vochtspanning te steken en vervolgens uit de gemeten Ψ -waarden het verband tussen $(\Psi_{\text{grond}} - \Psi_{\text{tensiometer}})$ en $\frac{d\Psi}{dt}$ af te leiden (fig. 12). Met behulp van dat verband werden de gemeten vochtspanningen gecorrigeerd. Fig. 13 geeft het (gecorrigeerde) verband tussen de vochtspanning en de tijd voor meter 1 en 2. Met deze verbanden en de tijd (T) die het vochtfront nodig had om de afstand tussen tensiometer 1 en 2 af te leggen, werd het verloop van de vochtspanning boven de waterspiegel afgeleid.

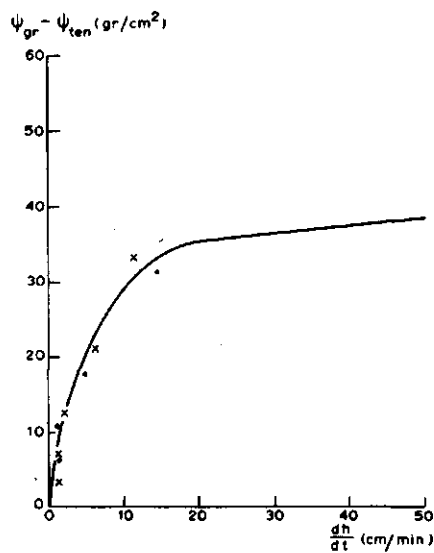


Fig. 12. Verband tussen $(\Psi_{\text{grond}} - \Psi_{\text{tensiom.}})$ en $\frac{d\Psi}{dt}$

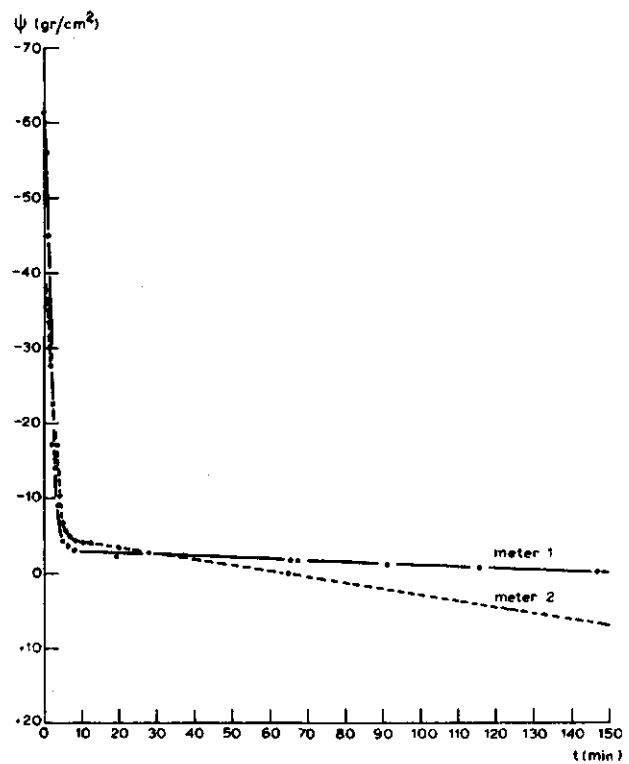


Fig. 13. Verband tussen vochtspanning en tijd voor meter 1 en 2

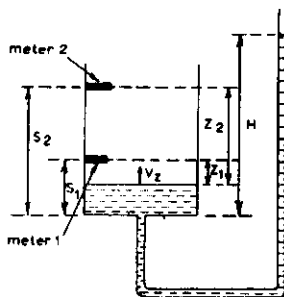


Fig. 14.

De afleiding loopt als volgt (zie fig. 14) (BOELS (1973)):

$$q = \mu \cdot \frac{dh}{dt} = \alpha(H - h)$$

$$\frac{dh}{(H - h)} = \frac{\alpha}{\mu} dt \quad (9)$$

q = debiet

h = drukhoogte

t = tijd

μ = bergingsfactor

α = drainage-intensiteit

Vervolgens wordt (9) opgelost met als grenzen:

$$t = 0 \quad h = S_1$$

$$t = T \quad h = S_2$$

dan wordt: T = tijd die vochtfront nodig heeft om van meter 1 naar 2 te stijgen

$S_{1, 2}$ = afstand van filter tot meter 1, 2

$$\frac{\alpha}{\mu} = \frac{1}{T} \ln \frac{(H - S_1)}{(H - S_2)} \quad (10)$$

De snelheid van het vochtfront op hoogte z is:

$$v_z = \left(\frac{dh}{dt} \right)_z = \frac{\alpha}{\mu} (H - S_1 + z) = \frac{1}{T} \ln \frac{(H - S_1)}{(H - S_2)} \cdot (H - S_1 + z)$$

nu is $\int_0^z dz = \int_0^t v_z dt$ ofwel $\int_0^z \frac{1}{v_z} dz = \int_0^t dt$

en dat geeft:

$$z = (H - S_1) \left(e^{t \cdot \frac{1}{T} \ln \frac{(H - S_1)}{(H - S_2)}} - 1 \right) \quad (11)$$

t = tijdsduur tussen moment waarop een vochtspanning gemeten werd
 en het moment waarop de vochtspanning nul is;
 Z = afstand tussen tensiometer en plaats waar vochtspanning nul is

Met behulp van (11) werd het verband tussen hoogte Z en de tijd
 bepaald (fig. 15). Als referentievlak voor Z is de hoogte van de

tensiometer gekozen. Op het
 moment dat de vochtspanning bij de
 tensiometer nul is (t_0), is de hoog-
 te (Z) nul. De grafiek van de
 hoogte (Z) tegen de tijd wordt nu
 zo op de grafiek van de vochtspan-
 ning (Ψ) tegen de tijd gelegd dat
 de Ψ - en Z -lijn elkaar snijden op
 t_0 . Vervolgens kan bij iedere t
 de bijbehorende Ψ en Z afgelezen
 worden en in een grafiek tegen
 elkaar uitgezet (fig. 16).

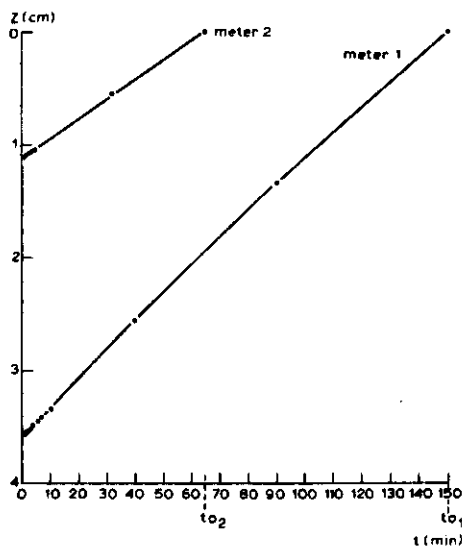


Fig. 15. Verband tussen afstand
 (Z) tussen tensiometer
 en plaats waar vocht-
 spanning nul is én de
 tijd

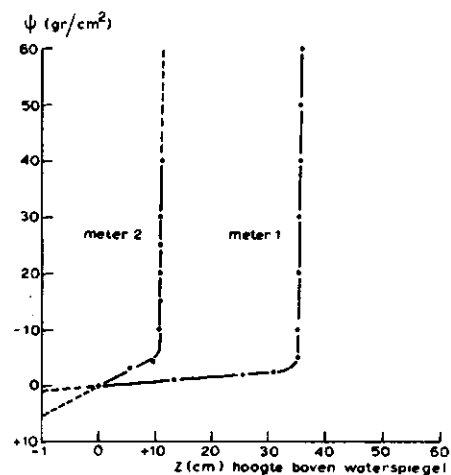


Fig. 16. Verloop van de vochtspan-
 ning boven de waterspiegel

In fig. 17. wordt het verloop van het vochtfront in de tijd weer-
gegeven zoals dat bepaald werd uit de tensiometer waarnemingen bij
proef V. Tevens wordt het verloop van het volumegewicht en vochtge-
halte in de tijd bepaald uit de proeven I tot en met V. Zo kan fig. 17
worden beschouwd als een redelijke weergave van het gebeuren binnen
één enkele grondkolom in de tijd.

Uit tabel 4 blijkt dat de gemiddelde begin volumegewichten van
de hele trechter redelijk met elkaar overeenstemmen. Ook waren de
infiltratiesnelheden (tabel 5) bij iedere proef ongeveer gelijk, be-
halve bij proef III waar de tijd tussen het begin van de infiltratie
en het moment waarop de vochtspanning bij meter 1 - 40 gr/cm^2 wordt
(t_1) en de tijd tussen het moment waarop de vochtspanning bij meter 1
- 40 gr/cm^2 is en het moment waarop de vochtspanning - 5 gr/cm^2 be-
draagt (t_2), afwijken van de t_1 en t_2 bij de andere proeven. De som
van t_1 en t_2 komt echter wel weer overeen met die van de andere proe-
ven.

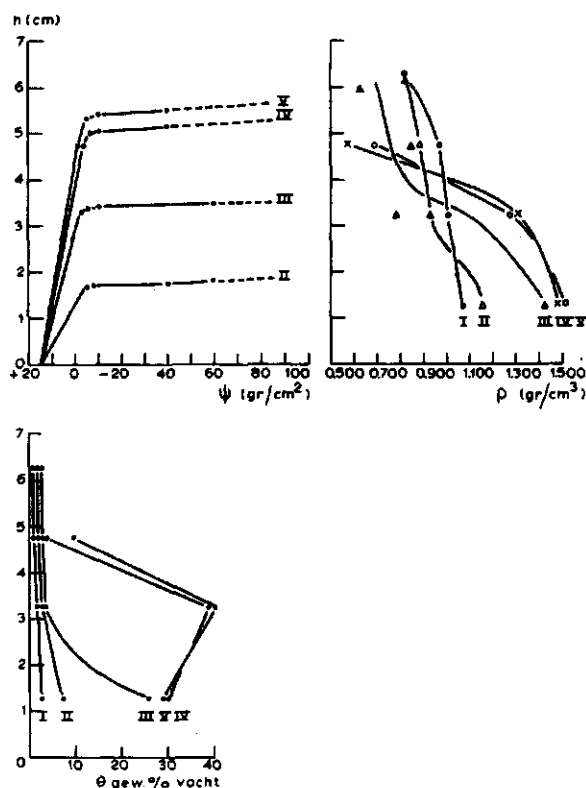


Fig. 17. Verloop van vochtspanning, volumegewicht en vochtgehalte
tijdens verdichting

Tabel 5. Overzicht van de infiltratiesnelheden bij de vijf proeven

t_1 = tijdsduur van begin infiltratie tot vochtspanning -40 cm bij meter 1

t_2 = tijdsduur van -40 cm tot -5 cm vochtspanning bij meter 1

t_3 = tijdsduur van -5 cm bij meter 1 tot -40 cm vochtspanning bij meter 2

t_4 = tijdsduur van -40 tot -5 cm vochtspanning bij meter 2

Proef	t_1	t_2	t_3	t_4
I	-	-	-	-
II	14,5	-	-	-
III	6,0	8,5	-	-
IV	14,0	1,6	172,2	-
V	13,6	3,8	154,3	9,9

Reeds voor bevochtiging treedt enige verdichting op in de onderste ringen door het gewicht van de bovenliggende grond (fig. 17, I). Uit die verdichting werd een elasticiteitsmodulus berekend van 32 gr/cm^2 . De grootste verdichting treedt op tijdens infiltratie rond de waterspiegel. Dit wordt afgeleid uit fig. 18 waarin de gemiddelde volumegewichten uitgezet zijn tegen de vochtspanningen zoals die in fig. 17 gevonden worden. Waar de verdichting precies optreedt, valt niet uit fig. 18 af te leiden, omdat deze te onnauwkeurig is. Dat is te wijten aan het feit dat de volumegewichten gemiddelden zijn over 1,5 cm, de hoogte van een ring, terwijl het verdichtingsproces zich in een dunnere laag afspeelt (zie fotoproef) én aan meetfouten die ontstaan zijn tijdens het demonteren van de ringen.

Ofschoon de infiltratieproef duidelijk laat zien (fig. 17 en 18) dat de verdichting zich afspeelt in een laag ergens rond de waterspiegel, blijkt toch de methode te onnauwkeurig (vochtgehalte en volumegewichten zijn gemiddelden, verstoring grond tijdens demontage van de ringen) om resultaten te krijgen die voldoende mogelijkheden bieden het proces precies te volgen.

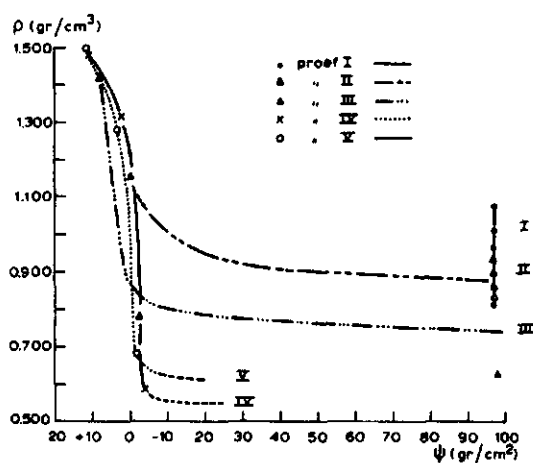


Fig. 18. Verband tussen volumegewicht en vochtspanning bij de 5 proeven

5. DISCUSSIE VAN DE MEETRESULTATEN

In hoofdstuk 2 werd voor de verandering van het volumegewicht het volgende verband afgeleid:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_0}{e} \left\{ \sigma_g - \Psi \cdot \chi + \left(\frac{d\Psi}{dz} + 1 \right) \chi \right\} - (\rho_a - \rho_0) \quad (5)$$

Nu zal worden bekeken in hoeverre dit verband overeenstemt met de meetresultaten.

Voor een bepaald geval kan de minimale dichtheid (ρ_0) als een constante worden opgevat. Bij vergelijking (5) wordt ervan uitgegaan dat grond een quasi-elastisch materiaal is. Bij een quasi-elastisch materiaal is de elasticiteitsmodulus (e) constant. Voor de gebruikte grond geldt dit echter niet. Zo werd bij de samendrukkingsproef tussen een gronddruk van $3,5 \text{ gr/cm}^2$ en $16,5 \text{ gr/cm}^2$ een elasticiteitsmodulus bepaald van 70 gr/cm^2 (fig. 11), bij de infiltratieproef uit proef I (fig. 17) tussen een gronddruk van $2,5 \text{ gr/cm}^2$ en $6,5 \text{ gr/cm}^2$ een elasticiteitsmodulus van 32 gr/cm^2 . De oorzaak van dit verschil kan liggen in de verschillende begin volumegewichten: bij de samendrukkingsproef $\pm 0,875 \text{ gr/cm}^3$, bij de infiltratieproef $\pm 0,814 \text{ gr/cm}^3$. Naarmate het volumegewicht groter wordt, neemt de elasticiteitsmodulus

toe. Verder blijkt uit de publikaties van HAVINGA en PERDOK (1969) en WEAVER (1951) dat de samendrukbaarheid van een grond samenhangt met zijn vochtgehalte. Dat houdt in dat ook de elasticiteitsmodulus met het vochtgehalte zal samenhangen.

Ofschoon de elasticiteitsmodulus van grond niet constant is, kan verg. (5) toch worden gebruikt voor trajecten waarin het vochtgehalte en volumegewicht weinig veranderen. Bij ieder ander traject moet dan een andere elasticiteitsmodulus worden ingevoerd.

Hiervoor moet eerst het verband tussen elasticiteitsmodulus, volumegewicht en vochtgehalte bepaald worden.

Naarmate het begin volumegewicht (ρ_a) groter is, zal de verandering van het volumegewicht ($\Delta\rho$) kleiner zijn volgens (5). De negatieve correlatie is aangetoond in tabel 1 en fig. 8. De oorzaak daarvan is dat de weerstand tegen verdichting (σ) toeneemt, naarmate het begin volumegewicht groter is.

In fig. 8 is nagegaan of bij een bepaalde vochtspanning altijd eenzelfde eind volumegewicht optreedt, onafhankelijk van het begin volumegewicht. Bij vochtspanningen -3, -1, +1 en +10 gr/cm² lijkt deze veronderstelling op te gaan. Hierbij moet echter in het oog gehouden worden dat de begin volumegewichten dicht bij elkaar lagen. Wanneer de begin volumegewichten ver uit elkaar liggen zal die veronderstelling waarschijnlijk niet opgaan omdat door een verschillende poriëngrootteverdeling bij de begin volumegewichten de invloed van de krachten σ_g , σ_w , σ_v en σ niet gelijk is. Tabel 2 geeft een aanwijzing dat het eind volumegewicht wel afhankelijk is van het begin volumegewicht.

Indien de grond boven laag Z bevochtigd of belast wordt met nog meer grond zal de gronddruk (ϕ_g) op laag Z toenemen. Die vermeerdering van de gronddruk zal in laag Z een verdichting veroorzaken. Naarmate de gronddruk groter is, zal ook de verandering van het volumegewicht toenemen (fig. 11). Hoe groot die verandering zal zijn, hangt af van de elasticiteitsmodulus van laag Z.

Wat de invloed van de vochtspanning ($\Psi \cdot \chi$) en van de stromingsdruk ($(\frac{dy}{dz} + 1) \chi$) betreft, moet worden opgemerkt dat deze moeilijk te scheiden zijn: als de vochtspanning verandert, treedt ook een stromingsdruk op. Als de vochtspanning laag is, zal het relatieve aan-

grijpingsoppervlak (χ) zeer klein zijn. Er zal geen of een zeer kleine verandering van het volumegewicht optreden. Naarmate de vochtspanning hoger wordt, neemt χ toe totdat een grootste waarde $\Psi \cdot \chi$ bereikt is (zie fig. 22). De grootte van het relatieve aangrijpingsoppervlak (χ) komt globaal overeen met de verzadigingsgraad (S_r). Fig. 17 laat zien dat de vochtspanning in ongeveer 1/2 cm oploopt van -100 tot 0 gr/cm^2 . Omdat zand een 'stoelvormige' pF-curve heeft, zal de grond tussen een vochtspanning van -10 tot 0 gr/cm^2 de grootste hoeveelheid water opnemen. Pas dan zal het relatieve oppervlak (χ) een grote waarde aannemen en $\Psi \cdot \chi$ zijn maximale waarde bereiken. Omdat $\Psi \cdot \chi$ vlak boven de waterspiegel een grootste waarde aanneemt, zal $\Psi \cdot \chi$ daar het meeste bijdragen aan de verdichting. Als de vochtspanning positief is, neemt volgens (1) de korrelspanning af en bij afnemende korrelspanning kan geen verdichting optreden. Onder de waterspiegel is hier geen verdichting mogelijk.

De invloed van de stromingsdruk ($(\frac{d\Psi}{dz} + 1) \chi$) is moeilijk af te leiden uit de meetresultaten. Fig. 6 laat zien dat bij een vochtspanning $+10 \text{ gr/cm}^2$ wel een snellere, maar geen grotere of kleinere verdichting optreedt dan bij een vochtspanning $+5 \text{ gr/cm}^2$. Of ook bij grotere stromingsdrukken de verdichting gelijk blijft is niet nagegaan. Dit is echter zeer onwaarschijnlijk, want volgens (5) kan een sterke opwaartse stroming de invloed van $\Psi \cdot \chi$ beperken. Als later evenwicht optreedt en de stromingsdruk wijkt, kan Ψ reeds positief zijn en heeft $\Psi \cdot \chi$ minder tot een verdichting bijgedragen dan zonder stromingsdruk het geval geweest was. Dit verklaart misschien waarom GERARD e.a. (1962) een grotere verandering van het volumegewicht vond bij langzame droging (d.w.z. kleine opwaartse stromingsdruk) dan bij snelle droging (d.w.z. grote opwaartse stromingsdruk) van een fijn zandige leemgrond. De stromingsdruk zal bij zand vlak boven de waterspiegel veel invloed uitoefenen, omdat daar χ een grote waarde heeft. Maar ook hoger kan hij nog een bijdrage tot een verdichting leveren als de gradiënt $\frac{d\Psi}{dz}$ een grote waarde heeft (zie fig. 23).

Uit het bovenstaande volgt dat de grootste verdichting bij zand vlak boven de waterspiegel optreedt. Toch vertonen de fig. 5 en 18 nog verdichting onder de 'waterspiegel'. Dat moet worden toegeschreven

aan meetfouten: bij fig. 5 kon op de foto's de hoogteligging van het vlak $\Psi = 0$ slechts geschat worden, fig. 12 werd samengesteld uit gemiddelden volumegewichten over 1,5 cm, terwijl ook bij de demontage van de ringen verstoringen van de grond zijn opgetreden die de bepaling van het volumegewicht en het vochtgehalte beïnvloed hebben.

Omdat de verdichting grotendeels optreedt in een dunne laag boven de waterspiegel geven de volumegewichten en de veranderingen van de volumegewichten die in de fig. 7 en 8 als gemiddelden over een trechter van 5 cm hoogte bepaald zijn, geen juist beeld van de werkelijkheid. Dat gemiddelde volumegewicht is samengesteld uit een begin volumegewicht boven de waterspiegel en een eind volumegewicht onder de waterspiegel. Toch kunnen uit fig. 7 en 8 enkele gegevens worden afgeleid. Pas bij een vochtspanning van -5 gr/cm^2 begint verdichting op te treden. Dat is wanneer de grond gevuld wordt met water en de invloed van de toegenomen gronddruk en vochtspanning zich laten gelden. Na een vochtspanning van $+5 \text{ gr/cm}^2$, wanneer de waterspiegel tot de oppervlakte van het monster gestegen is, treedt geen verdichting meer op. Dan heeft de verdichtingszone het hele monster gepasseerd. Ook al stijgt het water bij vochtspanning $+10 \text{ gr/cm}^2$ nog hoger dan de bovenkant van het monster, een extra verdichting treedt niet meer op. Dit duidt erop dat onder de waterspiegel geen verdichting plaats vindt.

Tot slot is met een geschatte pF-curve (fig. 19) en $\Psi - Z$ curve (fig. 20) van een zandgrond het optreden van de verdichtende kracht nagegaan zoals dat in (7) gegeven wordt. Uit de pF-curve werd het verband tussen de vochtspanning (Ψ) en het relatieve oppervlak (χ) afgeleid. Daarbij werd verondersteld dat het relatieve oppervlak (χ) gelijk is aan de verzadigingsgraad (S_r). Met deze gegevens werden de afzonderlijke componenten van de verdichtende kracht (σ_g , σ_w en σ_v) berekend (fig. 22, 23 en 24). Opvallend is de toename van de invloed van de stromingsdruk tussen 5 en 6 cm boven de waterspiegel. In fig. 25 werden die afzonderlijke componenten en een tegenwerkende kracht (σ) van 5 gr/cm^2 samengesteld tot de netto verdichtende kracht.

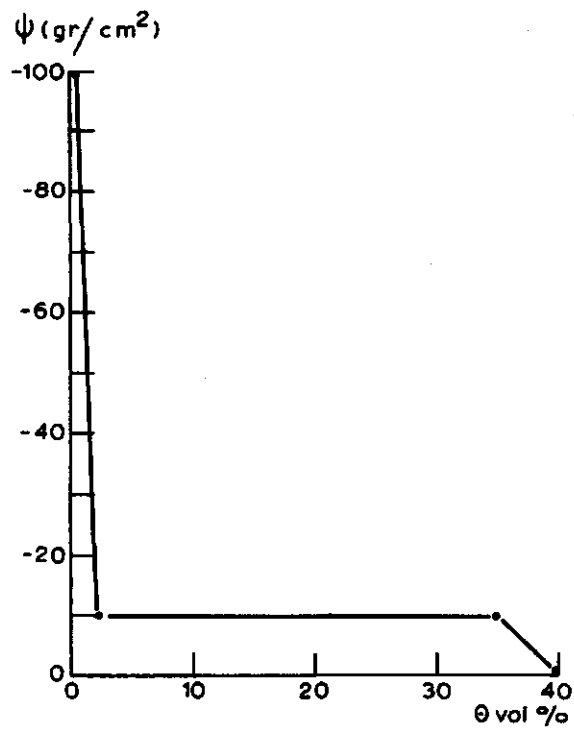


Fig. 19. Verband tussen vochtspanning en vochtgehalte

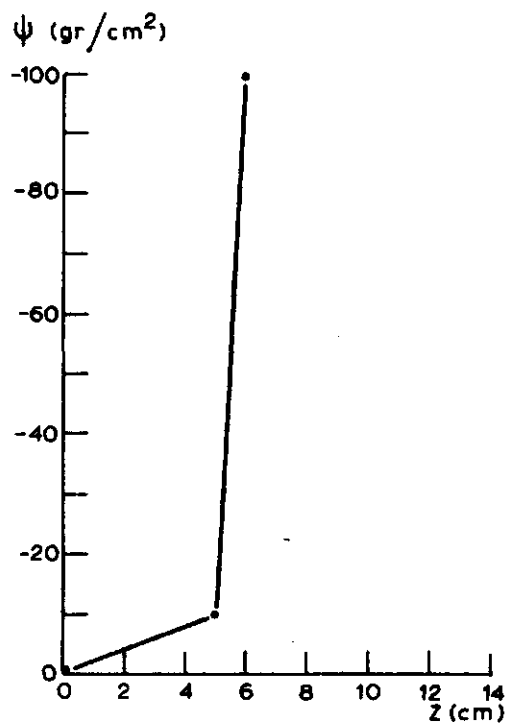


Fig. 20. Verband tussen vochtspanning en hoogte boven waterspiegel

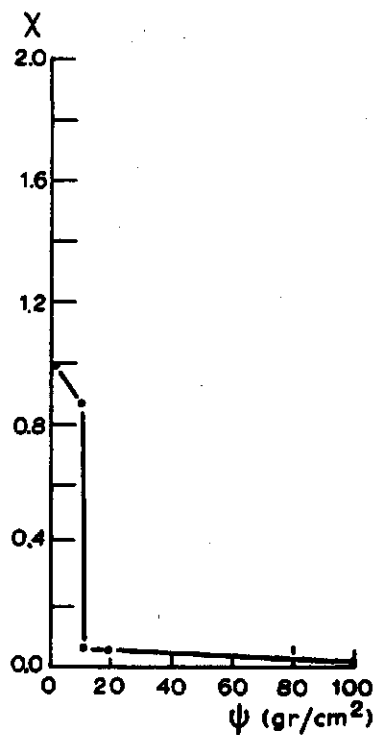


Fig. 21. Verband tussen relatief aangrijpingsoppervlak en vochtspanning

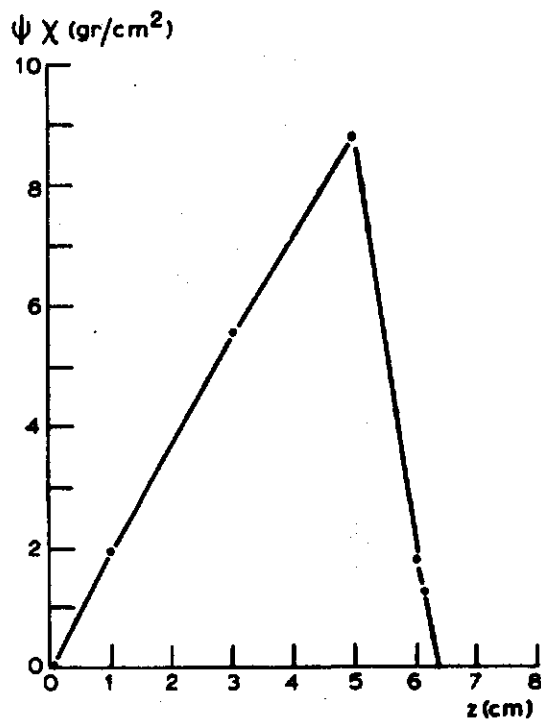


Fig. 22. Verband tussen $\psi \chi$ en hoogte boven waterspiegel

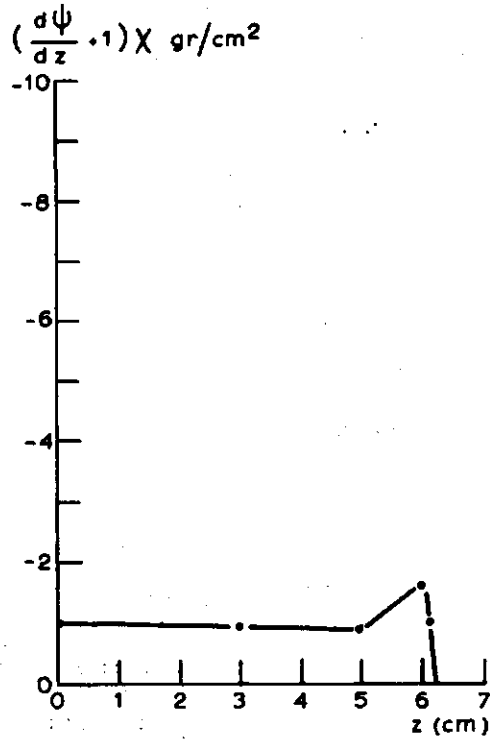


Fig. 23. Verband tussen $(\frac{d\psi}{dz} + 1)\chi$ en hoogte boven waterspiegel

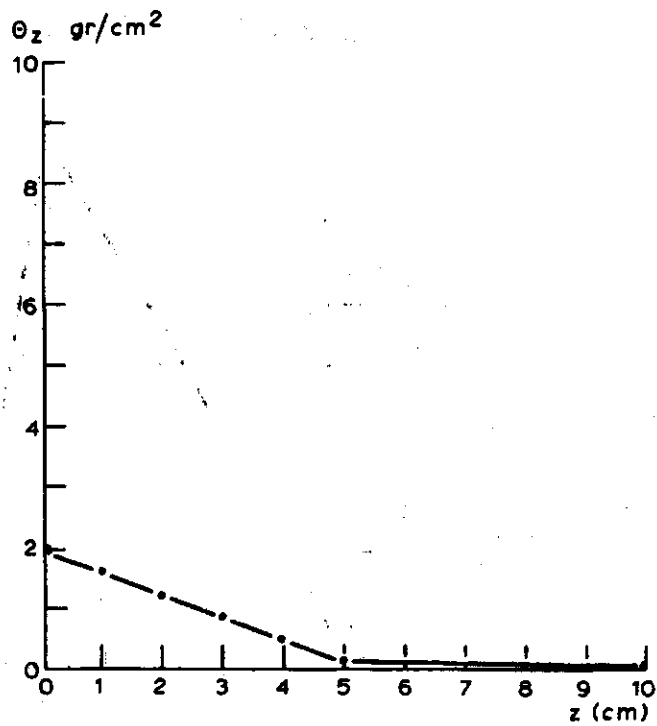


Fig. 24. Verband tussen gewicht van het water op hoogte z (θ_z) en hoogte z boven de waterspiegel

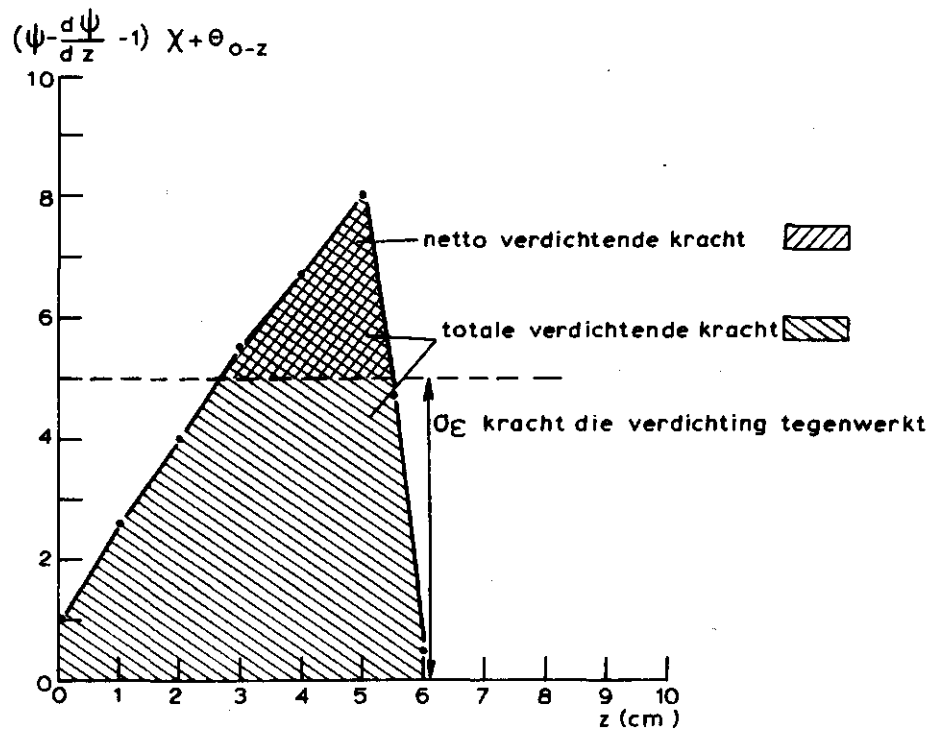


Fig. 25. Verband tussen $(\psi - \frac{d\psi}{dz} - 1) \chi + \theta_{0-z}$ en hoogte boven waterspiegel

CONCLUSIES

- Het mechanisme van verdichting treedt op wanneer de gronddruk (σ_g), vochtspanning (σ_w) en stromingsdruk (σ_v) een kracht op de grond uitoefenen die de weerstand van de bodem tegen verdichting (σ) overtreft. Dat kan gebeuren tijdens bevochtiging en tijdens droging van de grond.
- De optredende verdichting is negatief gecorreleerd met de grootte van het begin volumegewicht, positief met de gronddruk (σ_g) en vochtspanning (σ_w) én negatief of positief met de stromingsdruk (σ_v).
- De meettechnieken die ontwikkeld zijn om het mechanisme van verdichting te bestuderen voldoen goed wat betreft de fotoproef en samendrukkingsproef, slechter wat betreft de zakkingsproef bij verschillende vochtspanningen en de infiltratieproef. Bij deze bleken lagen grond van respectievelijk 5 en 1,5 cm te dik om het proces nauwkeurig te volgen, terwijl bij de infiltratieproef de grond

tijdens de demontage van de ringen verstoord kan worden. De meetinstrumenten, meetklokken en tensiometers, voldoen goed mits van de meetklok een ijkgrafiek gemaakt en van de tensiometer de correctiefactor bij verschillende drukveranderingen bepaald wordt.

- Indien het verband tussen e , θ , ρ en Ψ en het verband tussen K'_h (onverzadigde doorlatendheid) θ , ρ en Ψ van een grond bekend is, kan met behulp van (7) een verdichting worden gesimuleerd.

Door het gesimuleerde resultaat te vergelijken met de werkelijkheid kan worden nagegaan of het quasi elastische verdichtingsmodel, zoals weergegeven in vergelijking (7), het proces juist beschrijft. De simulatie kon niet worden uitgevoerd omdat van de twee genoemde verbanden nog te weinig bekend is.

6. LITERATUUR

- BISHOP, A.W. and G.E. BLIGHT (1963). Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Geotechnique* 13, 177.
- BOELS, D. (1973). Bepaling van het capillair geleidingsvermogen en een deel van de pF-curve in een proefopstelling R.I.D. Nota 742 ICW.
- en L. HAVINGA (19). Effect van woelen op een verdichte zavelgrond (nog niet gepubliceerd)
- BRUGGENWERT, M.G.M. e.a. (1966). Handleiding kandidaats practicum algemene bodemkunde.
- CAMP, C.R. and W.R. GILL (1969). The effect of drying on soil strenght parameters. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 33, 641-644.
- GERARD, C.J. (1962). Soil hardpan formation as affected by rate of moisture loss, cyclic wetting and drying and surface applied forces. *Proc. Soil Sci. Am.* 26, 601-605.
- GRATON, L.C. and H.J. FRASER (1935). Systematic packing of spheres with particular relation to porosity and permeability. *Journal of Geology* Vol. XLIII, number 8, part I.
- HAVINGA, L. en C. VAN GREUNINGEN (19). Langdurig effect van diepe grondbewerking (nog niet gepubliceerd).

- HAVINGA, L. en U.D. PERDOK (1969). Methode ter karakterisering van het mechanisch gedrag van de grond. Nota 534 ICW.
- HUIZINGA, T.K. (1959). Grondmechanica. N.V. Uitgeverijg 'Argus', Amsterdam.
- JENNINGS, J.E. and BURLAND, J.B. (1962). Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Geotechnique*, 12:2:125-144.
- JONGERIUS, A. (1970). Some morphological aspects of regrouping phenomena in dutch soils. *Geoderma* 4 (1970), 3 pp. 311-331.
- KASTANEK, F. (1971). Numerical simulation technique for vertical drainage from a soil column. *Journal of Hydrology* 14 (1971) 213-232.
- WATT, H.V.H. VAN DER (1969). Influence of particle size distribution on soil compactibility. *Agrochemophysica* vol. 1 (1969), 3 en 4.
- WEAVER, H.A. and V.C. JAMINSON. Effects of moisture on tractor tire compaction of soil. *Soil Sci.* 71 (195). 15-23.
- WILLIAMS, J. and C.F. SHAYKEWICH (1970). The influence of soil water matric potential on the strenght properties of unsaturated soil. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 34, 835-840.

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN

α	drainage-intensiteit
c	cohesie
d	diameter
D	afstand tussen twee korrels
e	elasticiteitsmodulus
G	gewicht
θ	vochtgehalte
H, h	drukhoogte
h	hoogte
K	netto verdichtende kracht
K'_h	onverzadigde doorlatendheid
k	verzadigde doorlatendheid
μ	bergingsfactor
ρ	dichtheid, volumegewicht
ρ_o	minimale dichtheid
ρ_a	actuele dichtheid
ρ_z, n	nat volumegewicht op diepte Z
$\sigma_{1, 3}$	korrelhoofdspanningen
σ	weerstand tegen verdichtende kracht
σ_g	grondspanning
σ_k	korrelspanning
σ_v	stromingsdruk
σ_w	waterspanning
$S_{1, 2}$	afstand van filter tot tensiometer 1, 2
S_r	verzadigingsgraad
t	tijd
ϕ	hoek van inwendige wrijving
χ	relatief aangrijpingsoppervlak
ψ	vochtspanning
V	volume
w	correctiefactor
Z	hoogte ten opzichte van een referentievlak