

NOTA 999

november 1977

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

BODEMVERVORMING DOOR SLEUFLOOS WERKENDE
DRAINEERMACHINES EN DE INVLOED DAARVAN
OP DE DRAINAFSTAND

ir. D. Boels

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

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. BEPALING VAN DE VERVORMING ROND HET GRAAFELEMENT	2
2.1. Kritieke diepte	2
2.2. De aard van bodemvervorming	6
2.3. De bodemvervorming beneden de kritieke diepte	7
3. SAMENHANG BODEMVERVORMING-DOORLATENDHEID	13
3.1. De meetopstelling	13
3.2. Meetresultaten	15
4. DE TE VERWACHTEN VERVORMING	16
5. DE INVLOED VAN VERVORMING OP DE DRAINAFSTAND	18
6. VERGELIJKING SLEUFLOZE- MET SLEUVENDRAINAGE	20
7. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	22
LITERATUUR	25

1. INLEIDING

Technische veranderingen aan draineermachines hebben tot doel de capaciteit te vergroten, de slijtage te verminderen of mankracht te besparen. De sleufloos werkende draineermachine is ontworpen om zowel de capaciteit te vergroten als de slijtage te verminderen. Bij dit type draineermachine wordt een star lichaam door de grond getrokken waarmee een ruimte wordt geschapen waarin de drainbuis wordt gelegd.

De ontwikkeling van de sleufloze draineermachine is in de beginjaren '60 op gang gebracht door Janert en Willner (VOSS en ZIMMERMANN, 1974). Vanaf 1965 zijn deze machines in de handel. Er zijn vele typen sleufloze machines in West Europa ontwikkeld, waarvan het motorvermogen varieert van 100 - 400 pk, de bereikbare werkdiepte van 1,20 - 3,0 m en het gewicht van 2,5 - 20 ton (VAN SOMEREN, 1971, EGGELSMAN, 1973, DIEMKE, 1973, NAARDING, 1977).

In Engeland wordt 10 - 15% van het gedraineerd oppervlak aangelegd met een sleufloos werkende machine; in Frankrijk is 1 op de 7 draineermachines een sleufloze machine. In Nederland wordt de sleufloos werkende machine vrijwel uitsluitend op particuliere objecten toegepast en dan nog op beperkte schaal. Het vermoeden bestaat dat door versmering, verdichting en vervorming van de grond, de sleufloos gelegde drainage slechter zal werken dan de traditioneel gelegde drainage.

Om inzicht te krijgen in de werking van de drainage die met een sleufloos werkende machine is gelegd zijn enkele proefvelden aangelegd in Friesland (Berlicum), Drenthe (Anloo) en Noord Brabant (Zonzeel).

De grondsoort op de proefvelden in Berlicum en Zonzeel is een lichte tot zware zavel, dit op het proefveld in Anloo is leemhoudend zand.

Om de proefveldresultaten te kunnen verklaren is getracht de vervormingen die rond een woellichaam van een sleufloze draineermachine optreden in verband te brengen met de mechanische eigenschappen van de grond. Voorts is langs experimentele weg de samenhang vastgesteld tussen de mate van vervorming en de verzadigde doorlatendheid van de grond. Tot slot is berekend wat de invloed van de vervorming is op de toe te passen drainafstand in vergelijking met de traditionele draineer methode.

2. BEPALING VAN DE VERVORMING ROND HET GRAAFELEMENT

2.1. K r i t i e k e d i e p t e

Wanneer een tandvormig lichaam door de grond wordt getrokken, moet er ruimte in de bodem worden gecreëerd. Daarbij kan de grond vanaf de voet van het lichaam in bovenwaartse richting worden opgebroken, terwijl de brokken in opwaartse richting worden verplaatst, zoveel als nodig is om de gewenste ruimte te laten ontstaan. Wordt het lichaam diep door de grond getrokken, dan is het mogelijk dat vanaf een zekere diepte de grond niet meer in opwaartse richting wordt verplaatst, maar als een soort plastische massa rond het lichaam stroomt. De beweging speelt zich dan nog alleen af in een horizontaal vlak. De diepte waarop dit juist optreedt wordt de kritieke diepte genoemd (GODWIN, 1974). De kritieke diepte hangt af van de breedte-diepte verhouding van het lichaam en voorts van de hoek die het lichaam maakt met de horizontale richting.

In fig. 1 is dit verband weergegeven. Aan de hand van lakfilms van drainsleuven op het drainage proefveld Zonzeel is de ligging van de lagen schematisch weergegeven. Breukvlakken zijn te herkennen aan abrupte overgangen in de laagjes, vervormingen aan, gaande in de richting van de woelsleuf, opgebogen laagjes. De kritieke diepte wordt geacht te beginnen vanaf de diepte waarop geen breukvlakken

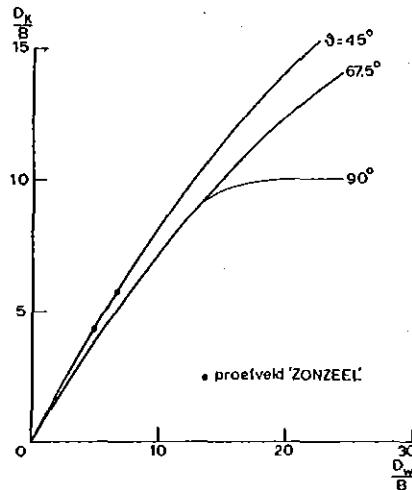


Fig. 1. Verband tussen de verhouding kritieke diepte/breedte van de tand ($\frac{D_k}{B}$) en de verhouding werkdiepte/breedte ($\frac{D_w}{B}$) bij verschillende hoek, θ , tussen de tand en horizontaal vlak (naar GODWIN, 1974)

zijn te herkennen. Bij een draandiepte van 0,97 m -mv. is dit 0,87 m (fig. 2a) en bij een draandiepte van 1,35 m is dit 1,15 m (fig. 2b).

De door Godwin bepaalde verbanden voor relatief ondiep werkende tandvormige werktuigen blijken ook te gelden voor diep werkende werktuigen. Deze verbanden voor een sleufloze draineermachine met een breedte van circa 0,2 m en een oploophelling van de voet van circa 45° zoals op het proefveld Zonzeel heeft gewerkt zijn uit fig. 2a en b afgeleid en in fig. 1 ingetekend.

Uit fig. 1 valt voorts af te leiden dat er ongeacht draandiepte zoals die in Nederland gebruikelijk zijn, grond zal stromen rond het graafelement van de sleufloos werkende draineermachine in de omgeving van de drains. Als gevolg van de grondstroming treden er vervormingen op ten gevolge waarvan de doorlatendheid kan afnemen. De grond boven de kritieke diepte breekt en zal waarschijnlijk niet worden vervormd.

DRAINAGEPROEFVELD ZONZEEL

Draentle machine (profiel a)

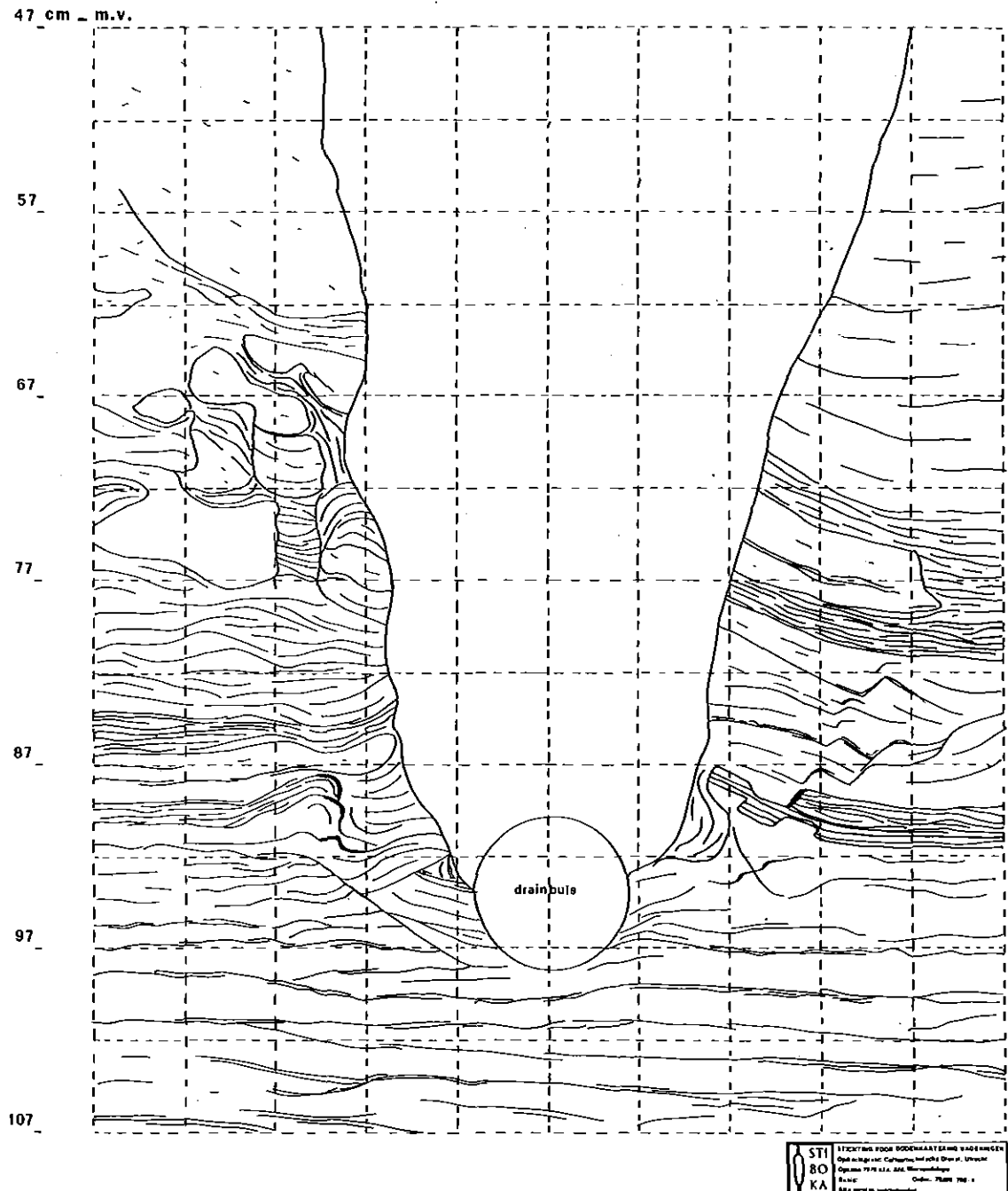


Fig. 2. Verloop van horizonten en breukvlakken in een vlak, loodrecht op de drainrichting op proefveld Zonzeel
a. draandiepte circa 1,0 m - maaiveld

DRAINAGEPROEFVELD ZONZEEL

Drailentlemachine (profiel b)

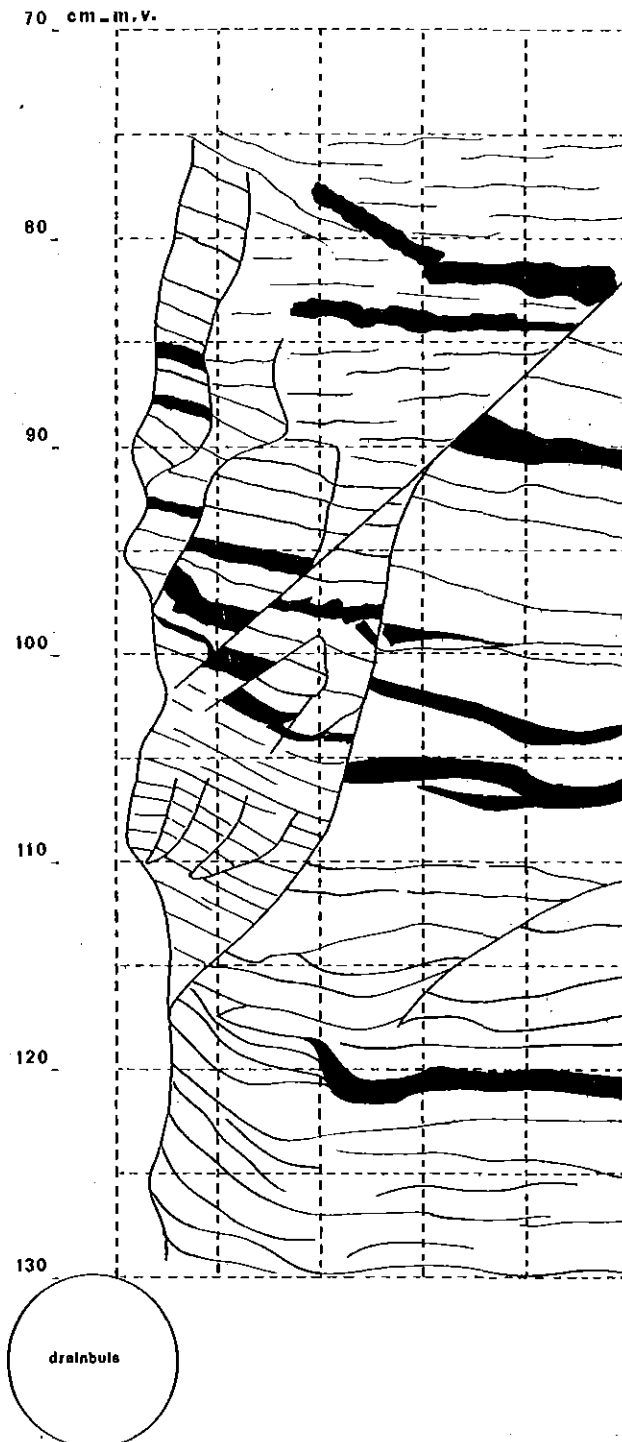


Fig. 2. Verloop van horizonten en breukvlakken in een vlak, loodrecht op de drainrichting op proefveld Zonzeel
b. draandiepte circa 1,4 m - maaiveld

2.2. De aard van bodemvervorming

Om ruimte te creëren in de bodem is het denkbaar, dat de bodem wordt verdicht beneden de kritieke diepte. De maximaal mogelijke verdichting is gelijk aan het actueel luchtgehalte. Aangeomen, dat de grondwaterspiegel circa 0,1 m beneden drainniveau is, kan de maximaal mogelijke verdichting uit de pF-curve worden afgelezen, waarbij de grootst bekende dichtheid echter niet kan worden overschreden.

Tabel 1. Maximale potentiële verdichtingen

Grondsoort	Poriënvolume ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)		Luchtgeh. bij -0,10 m	Max.verdichting
	gemiddeld	verdicht	W.K ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
grof zand	0,40	0,38	0,18	0,02
loess	0,46	0,39	0,019	0,019
lichte zavel	0,44	0,39	0,025	0,025
zware zavel	0,45	0,41	0,016	0,016
klei	0,50	0,45	0,015	0,015

Uit tabel 1 blijkt dat op de meeste gronden de mogelijke verdichting beperkt is (afname volume poriën met 1,5 - 2,5 vol.%) en door het luchtgehalte wordt begrensd, de grove zandgronden uitgezonderd.

Op het proefveld te Berlicum zijn de dichtheden gemeten op verschillende diepten in een ongeroerd profiel (6 monsters per laag) en in woelsleuven van een sleufloos gelegde drainage (per laag 19 monsters) (fig. 3).

Uit fig. 3 blijkt, dat de grond vanaf circa 0,15 m boven drainniveau bij de sleufloos werkende draineermachine lossier is geworden, terwijl er geen verdichting is opgetreden rond de drain. Het lijkt derhalve aannemelijk, dat daar zuivere vervorming is opgetreden.

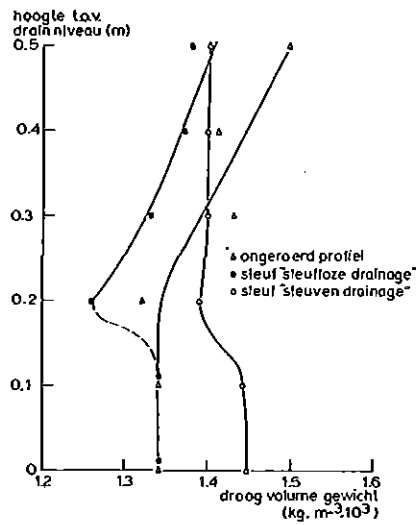


Fig. 3. Verloop van de dichtheid op zavelgrond
 0 in het ongevoerd profiel
 + in de sleuf van de 'sleufloos' gelegde drainage
 x idem, bij sleuven drainage

2.3. De bodemvervorming beneden de kritieke diepte

Bodemvervorming ontstaat wanneer de vorm onder invloed van schuifkrachten blijvend is veranderd. Men spreekt hierbij van

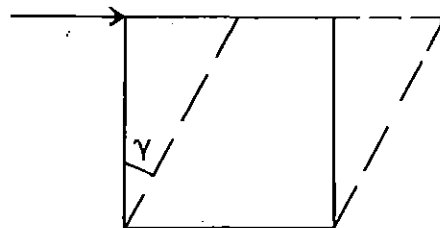


Fig. 4. Definitie schets van vervorming zonder verdichting. Een maat voor de vervorming is de hoekverdraaiing, γ

zuivere vervorming wanneer het volume gewicht gelijk blijft. De hoekverandering die een denkbeeldig vierkant tengevolge van vervorming ondergaat, wordt hoekverdraaiing genoemd en wordt in radialen opgegeven (fig. 4). Voor geen al te grote vervormingen geldt (LUDOLPH e.a., 1963)

$$\gamma = \epsilon_y - \epsilon_x \quad (1)$$

hierin is:

- γ - hoekverdraaiing, radialen
- ϵ_x - relatieve lengte verandering in x-richting
- ϵ_y - idem, in y-richting

De relatieve lengteverandering in onderling loodrechte richtingen, kan worden afgeleid uit de optredende grondverplaatsing rond het graafelement. Aangenomen wordt dat de stroomlijnen identiek zijn aan de glijvlakken die met de benadering van PRANDTL (1921) kunnen worden beschreven.

Deze benadering houdt in dat de grond zich als een plastisch materiaal gedraagt, wat betekent dat de voor deformatie benodigde spanning onafhankelijk is van de grootte van de deformatie.

Voorts is deze benadering gebaseerd op de veronderstelling dat een stelsel rechte glijvlakken (de vlakken OA, OB etc., in fig. 5) alle door de hoekpunten O respectievelijk P gaan. Een tweede stelsel glijvlakken (o.a. het vlak door A B C D) snijdt het eerste stelsel onder een hoek $2\mu = 90 - \phi$. (HUIZINGA, 1969). Hierin is ϕ de hoek van inwendige wrijving. In het vlak OG en PG is de normaalspanning 0.

De hoek die de grootste hoofdspanning maakt met een glijvlak is $\mu = 45 + \frac{\phi}{2}$ (HUIZINGA, 1969). De glijvlakken OA en PA zijn rechte vlakken en maken een hoek $2\mu = 90 - \phi$ met elkaar in punt A. Het verloop van het uiterste glijvlak door A, B, C, D is derhalve te berekenen (fig. 6) uit:

$$\int_R dr = \int_{\psi} r \operatorname{tg}\phi \cdot d\psi \quad (2)$$

met: $r = OA$, indien $\psi = 0$, terwijl $0 < \psi < \pi$.

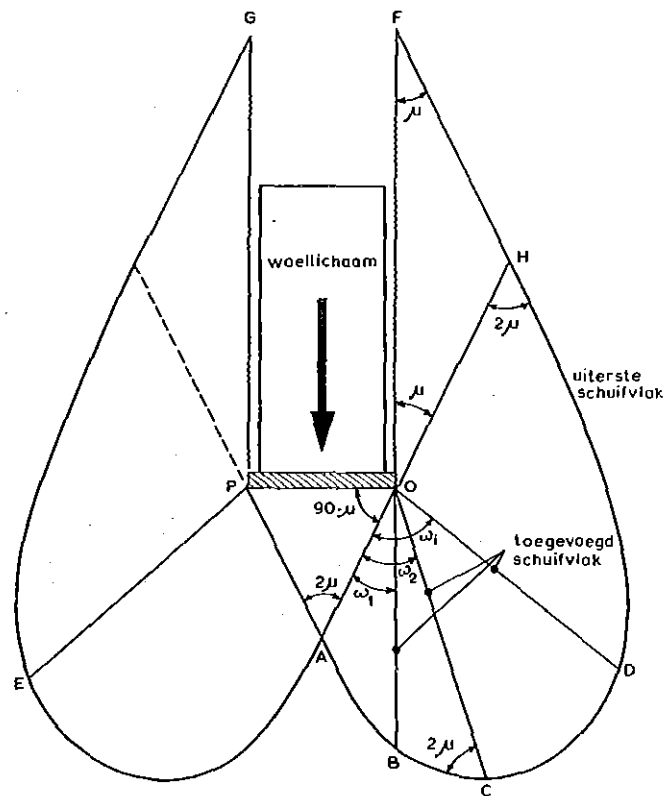


Fig. 5. Schematisch verloop van glijvlakken onder en naast een belaste strook OP

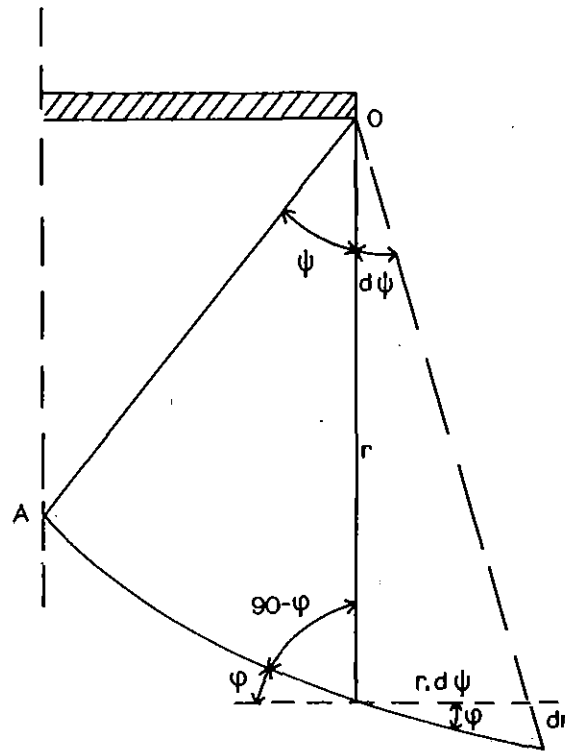


Fig. 6. Definitie schets, behorend bij vergelijking 5

Uit vergelijking 2 valt af te leiden dat:

$$r(\psi) = OA \cdot e^{\text{tg}\phi \cdot \psi} \quad (3)$$

(de zogenaamde logaritmische spiraal).

Bij het verplaatsen van OP, die een willekeurige doorsnede voorstelt in het horizontaal vlak door het woellichaam van een sleufloos werkende draineermachine wordt de wig POA in de grond gedreven, waardoor de wig OAB in zijwaartse richting wordt bewogen. Na passage van OP ligt het punt A in het punt B en het punt B in C(fig. 5).

Wanneer geen bodemverdichting optreedt, moet het oppervlak van de wig OAB gelijk zijn aan het oppervlak van wig OBC. Daar $OC > OB > OA$ is de hoek $w_1 < w_0$ dit wil zeggen er is een hoekverandering opgetreden.

Er geldt voor de oppervlaktes van de genoemde wiggen

$$\iint_{WR} r(\psi) dr d\psi = C(\text{constant}) \quad (4)$$

Substitutie van vergelijking 3 in 4, voor $w_i \leq \psi \leq w_{i+1} = w_i + \Delta w_i$ levert:

$$\frac{OA^2}{2\text{tg}\phi} (e^{w\text{tg}\phi} \cdot W_{i+1} - e^{2\text{tg}\phi} W_i) = C \quad (5)$$

De waarde van C (= oppervlak van de wig OAB) wordt gevonden voor $w_0 = 0$ en $\Delta w_0 = \mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$.

Als gevolg van het opschuiven van de verschillende wiggen treedt er hoekverandering op, die $\Delta\psi_i$ radialen is in de wig i (wig OAB is wig 1, wig OBC is wig 2, etc.).

De hoek w_i kan wegens $\Delta w_i = \Delta w_{i-1} + \Delta\psi_i$, worden geschreven als:

$$w_i = w_{i-1} + w_{i+2} + \Delta\psi_{i-1}, (i \geq 2) \quad (6)$$

Nu is $w_2 = \mu + (\mu + \Delta\psi_1)$ en $w_3 = \mu + (\mu + \Delta\psi_1) + (\mu + \Delta\psi_1 + \Delta\psi_2)$ dus is:

$$w_i = i\mu + \sum_{k=1}^{i-1} (i-k)\Delta\psi_k, (i > 2) \quad (7)$$

Het afstandstraject tot het woelement waarin $\Delta\psi_{i+1}$ voorkomt heeft als ondergrens:

$$r(w_i) \cdot \sin(w_i - \mu) \quad (8)$$

en als bovengrens:

$$r(w_{i+1}) \cdot \sin(w_{i+1} - \mu) \quad (9)$$

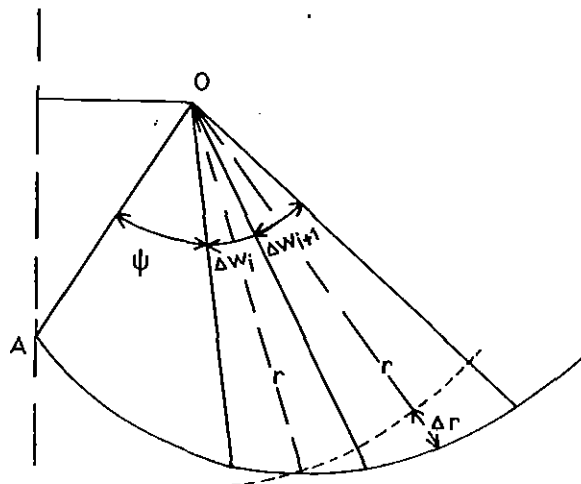


Fig. 7. Definitie schets, behorend bij vergelijking 10

De relatieve radiale lengteverandering die optreedt bij het opschuiven van de wiggen is te berekenen uit (fig. 7)

$$\epsilon_r = \frac{r_o e^{\text{tg}\phi \cdot (\psi + \Delta w_i + \frac{1}{2}\Delta w_{i+1})} - r_o e^{\text{tg}\phi \cdot (\psi + \frac{1}{2}\Delta w_i)}}{r_o e^{\text{tg}\phi \cdot (\psi + \frac{1}{2}\Delta w_i)}} = e^{\text{tg}\phi \cdot (\frac{1}{2}\Delta w_i + \frac{1}{2}\Delta w_{i+1})} - 1 \quad (10)$$

terwijl aan de voorwaarde genoemd in vergelijking 5, moet zijn voldaan.

De relatieve lengteverandering loodrecht op de straat door het punt 0 volgt uit:

$$\epsilon_n \approx \frac{\Delta w_{i+1} \cdot r - \Delta w_i \cdot r}{\Delta w_i \cdot r} = \frac{\Delta w_{i+1}}{\Delta w_i} - 1 \quad (11)$$

De hoekverdraaiing, γ_i , die ontstaat door het opschuiven van de wiggen waarbij $\Delta w_{i+1} = \Delta w_i + \Delta \psi_{i+1}$, is volgens vergelijking 1:

$$\gamma_{i+1} = \frac{\Delta \psi_{i+1}}{\Delta w_i} - e^{\text{tg}\phi \cdot (\Delta w_i + \frac{1}{2}\Delta \psi_{i+1})} + 1 \quad (12)$$

Met de vergelijking 5, 7, 8 en 9 wordt de relatie berekend tussen hoek van inwendige wrijving, ϕ , de relatieve afstand tot het woellichaam, $\frac{r(w_{i+1})}{\frac{1}{2}B}$, en de hoekverandering, $\Delta \psi_{i+1}$.

Vervolgens wordt met vergelijking 8, 9 en 12 het verband bepaald tussen de relatieve afstand tot het woellichaam en de vervorming (= hoekverdraaiing van een denkbeeldig vierkant). Dit verband is weergegeven in fig. 8.

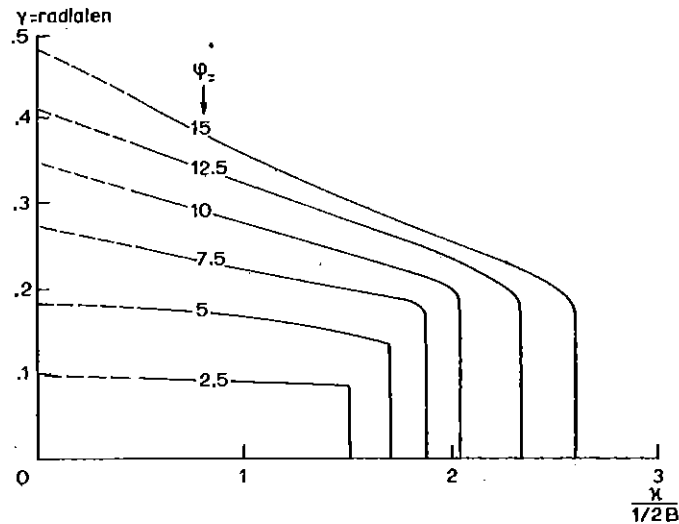


Fig. 8. Verband tussen de vervorming (hoekverdraaiing, γ), hoek van inwendige wrijving, ϕ , en de verhouding afstand tot woelelement en de halve breedte van het woelelement ($x/\frac{1}{2}B$)

Uit fig. 8 valt af te lezen dat de mate van vervorming en de breedte van de zone waarin deze optreedt toenemen, bij toenemende hoek van inwendige wrijving. Het moet om deze redenen niet uitgesloten worden geacht dat de vervormingsgraad groter en de vervormingszone breder is op een relatief droge grond (relatief grote ϕ) dan op een natte grond (relatief kleine ϕ).

3. SAMENHANG BODEMVERVORMING-DOORLATENDHEID

3.1. De meetopstelling

Een ongeroerd monster werd in een triaxiaal-apparaat geplaatst (fig. 9), aan de onder- en bovenzijde voorzien van een poreuze plaat en omgeven met een klemmend zittend rubber membraam. Water werd aan de onderzijde ingevoerd en aan de bovenzijde afgevoerd. Door een buret als een mariotte-systeem te gebruiken wordt een constant niveauverschil gerealiseerd tussen de invoer- en afvoeropening. De doorgestroomde hoeveelheid in een zekere periode kan uit het niveauverschil in de buret worden afgeleid, na correctie op het

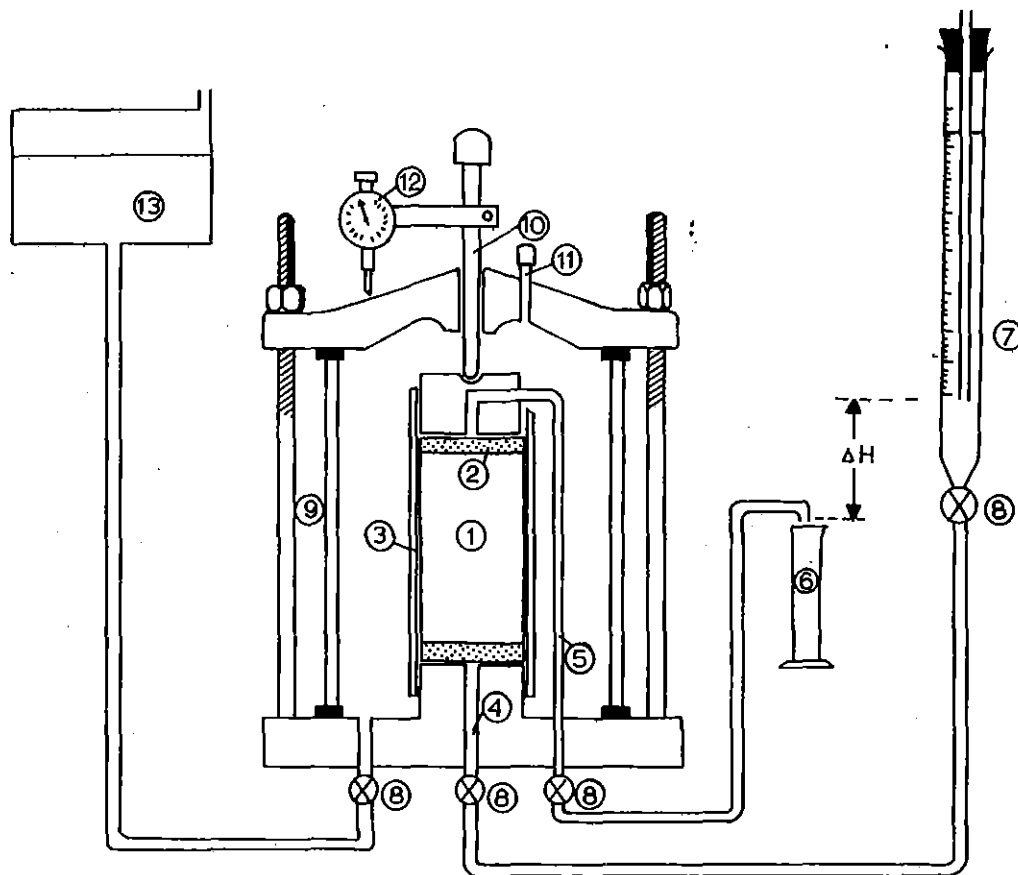


Fig. 9. Experimentele opstelling ten behoeve van de bepaling van het verband tussen de vervorming en doorlatendheid.
1 - ongestoord monster, 2 - filter, 3 - rubber membraam,
4 - watertoevoerleiding, 5 - waterafvoerleiding,
6 - maatcilinder, 7 - buret, 8 - kraan, 9 - perspexcilinder,
10 - plunjer, 11 - ontluicht ventiel, 12 - verplaatsings opnemer (mechanisch), 13 - reservoir, gevuld met glycerol

volume van de nylong slang in de buret. De drukgradient over het monster is bekend, zodat derhalve de doorlatendheid kan worden bepaald.

Om er zeker van te zijn dat er geen water tussen het monster en het membraam zal stromen, wordt het monster omgeven met een laagje vet voordat het membraam wordt aangebracht en wordt een celdruk aangebracht, groter dan de waterdruk ter plaatse van de invoeropening.

Een zekere vervorming, zonder verdichting, wordt gerealiseerd door het monster samen te persen terwijl de aan en afvoer leidingen gesloten zijn (het monster is met water verzadigd).

3.2. Meetresultaten

Het monster blijft na vervorming niet cilindervormig doch tendeert naar een tonvorm. De diameter op halve hoogte neemt toe, terwijl die aan de top en aan de basis nauwelijks verandert. Bij geen verdichting is voor deze wijze van vormverandering de relatieve lengte- en breedteverandering te berekenen door het monster op te vatten als twee, met de basis tegen elkaar liggende, afgeknotte kegels. Is ϵ_y de met de verplaatsingsopnemer gemeten relatieve hoogteverandering dan is de relatieve breedteverandering, ϵ_x :

$$\epsilon_x = \frac{3}{2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{1 - \frac{\epsilon_y}{3}}{1 + \epsilon_y} \right)} - 1 \right\} \quad (13)$$

en de hoekverdraaiing is te bepalen met vergelijking 1.

Indien echter het monster gelijkmatig over de gehele hoogte vervormt, is:

$$\epsilon_x = \sqrt{\left(\frac{1}{1 + \epsilon_y} \right)} - 1 \quad (14)$$

Enkele resultaten van metingen zijn in fig. 10 weergegeven.

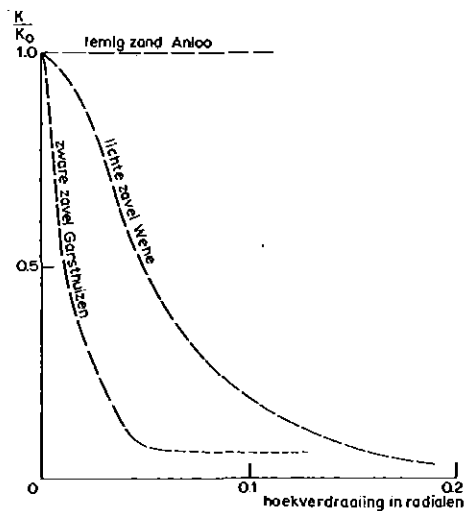


Fig. 10. Samenhang tussen de relatieve doorlatendheid na vervorming, $\frac{K}{K_0}$, en de bodemvervorming (= hoekverdraaiing)

Uit fig. 10 blijkt, dat de doorlatendheid op iets leemhoudende zandgronden nauwelijks verandert, terwijl op zware zavel de doorlatendheid bij enige vervorming vrij snel tot een basiswaarde terugvalt. Op lichte zavel is deze terugval geringer.

4. DE TE VERWACHTEN VERVORMING

De mate van vervorming hangt af van de hoek van inwendige wrijving, ϕ . De actuele grootte van deze hoek wordt bepaald door het vochtgehalte van de bodem (LAMBE en WHITMAN, 1969, p.437) en door de snelheid van belasten. Zo is bij langzame belasting van een kleimonster de hoek van inwendige wrijving 28° , bij snelle belasting echter 4° , terwijl na grote vervorming de hoek van inwendige wrijving bijna 0° is (HUIZINGA, 1969).

Met behulp van triaxiaal tests is inzicht te verkrijgen in de te verwachten hoek van inwendige wrijving bij bepaalde, met de praktijk overeenkomende belastingsnelheden. De daarvoor benodigde apparatuur is momenteel nog in ontwikkeling. Op het moment kan de

hoek van inwendige wrijving worden vastgesteld door de breedte van de vervormde zone in het veld te meten. Deling van deze breedte door de halve breedte van het woelelement levert de parameter $R(\phi)$.

In fig. 11, die van fig. 8 is afgeleid, kan de bij $R(\phi)$ behorende hoek van inwendige wrijving, ϕ , worden afgelezen. Uit fig. 2a en b (proefveld Zonzeel) valt globaal af te leiden dat $R(\phi)$ ligt tussen 1,5 en 1,7. De hoek van inwendige wrijving varieert dus van $2,5 - 5^\circ$ en de daarbij behorende gemiddelde hoekverandering (vervorming) 0,9 - 1,7 radialen (fig. 8). In zware zavel zal de hoek van inwendige wrijving bij snelle belasting waarschijnlijk iets geringer zijn dan in lichte zavelgronden.

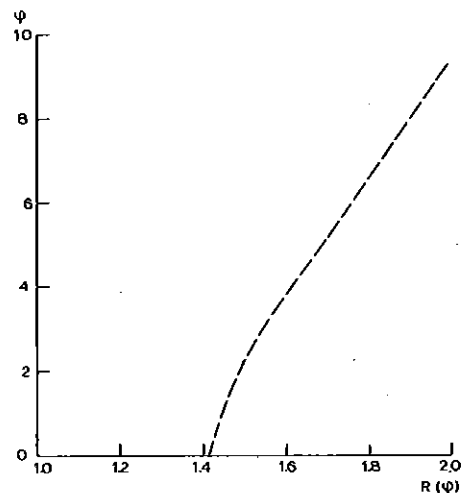


Fig. 11. Samenhang hoek van inwendige wrijving, ϕ , en de verhouding $\frac{\text{maximale breedte vervormde zone}}{\frac{1}{2} \times \text{breedte woellichaam}} (= R(\phi))$

5. DE INVLOED VAN VERVORMING OP DE DRAINAFSTAND

Het neerslag overschot wordt afgevoerd naar sloten en naar drains. Bij het afvoerproces ondervindt het water weerstanden van verschillende soort: een verticale weerstand, een horizontale weerstand naar zowel de sloot als naar de drains, radiale weerstand naar de drain en naar de sloot.

De afzonderlijke componenten kunnen worden geschreven als (ERNST, 1962, 1963, 1976)

verticale weerstand:
$$\frac{D_1}{K_1} \quad (15)$$

horizontale weerstand:
$$\frac{L_{d,s}^2}{8K_2 D_2} \quad (16)$$

radiale weerstand:
$$\frac{L_d}{\pi K_1} \text{ of } 2 \ln \frac{R_1 \text{ (drain)}}{R_2} \quad (17)$$

$$\frac{L_s}{\pi K_{1,2}} \ln \frac{D_2 \text{ (sloot)}}{B_s} \quad (18)$$

extra radiale weerstand:
$$\frac{L_d}{\pi K_3} \ln \frac{R_2 \text{ (drain)}}{R_3} \quad (19)$$

Hierin is:

- D_1 - dikte slecht doorlatende laag hoog in het profiel
- K_1 - doorlatendheid van slecht doorlatende laag
- D_2 - (equivalente) dikte watervoerende laag
- K_2 - doorlatendheid in deze laag
- R_1 - straal, begrensd gebied waarin de stroming bij benadering radiaal is
- R_2 - straal van zone rond drain waarin vervorming is opgetreden
- R_3 - straal drain + omhullend filtermateriaal
- B_s - natte omtrek sloot

- K_3 - doorlatendheid in de vervormde zone
- L_d - afstand tussen de drainreeksen
- L_s - afstand tussen sloten

In deze benadering lopen de drainreeksen evenwijdig aan twee per-
 ceels- of kavelsloten en heeft de sloot waarin de drains afwateren
 geen drainerende werking.

De totale drainage weerstand van het gecombineerd ontwaterings-
 systeem is

$$T_a = \left\{ \frac{1}{T_{dr}} + \frac{1}{T_{s1}} \right\}^{-1} \quad (20)$$

Hierin is:

$$T_{dr} = \frac{D_1}{K_1} + \frac{L_d^2}{8K_2 D_2} + \frac{L_d}{\pi K_{1,2}} \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{L_d}{\pi K_3} \ln \frac{R_2}{R_3} \quad (21)$$

en

$$T_{s1} = \frac{D_1}{K_1} + \frac{L_{s1}^2}{8K_2 D_2} + \frac{L_{s1}}{\pi K_{1,2}} \ln \frac{D_2}{B_s} \quad (22)$$

welke zeer groot is.

Voor een drainage geldt bij benadering

$$D_2 \approx \frac{1}{4} L_d \quad (23)$$

$$\frac{R_1}{R_2} \approx 5 \quad (24)$$

$$\frac{R_2}{R_3} \approx 1,5 \quad (25)$$

De drainage afstand wordt uit (20) voor een zekere T_a opgelost
 door substitutie van 23, 24 en 25 in 21 en 21 en 22 in 20:

$$L_{dr} = \frac{(T_s - T_a) \frac{D_1}{K_1} - T_a T_s}{(T_a - T_s) \left(\frac{1}{K_2} + \frac{1}{7,75 K_3} \right)} \quad (26)$$

Bij het in de ontwerptechniek gehanteerde drainagecriterium:
 drainafvoer $0,007 \text{ m etm.}^{-1}$ bij een grondwaterstand van $0,5 \text{ m -mv}$,
 kan afhankelijk van de ontwateringsdiepte een waarde voor T_a worden
 berekend:

ontwateringsdiepte:	1,0	1,2	1,4	1,6	m -mv.
T_a	: 71,4	100	128,6	157,1	etm.

Met vergelijking 26 kan de invloed van K_3 , de (gemiddelde) doorlatendheid in de vervormde zone, worden bestudeerd. Voor enkele typen gronden is deze berekening uitgevoerd ($T_a = 100 \text{ etm.}$)

Tabel 2.

Grondsoort	D_1	K_1	D_2	K_2	L_{s1}	Drainafstand voor					
						$\frac{K_3 = 1}{K_2}$	0,5	0,1	0,05	0,01	0,005
zand	0	-	10	1,0	300	96	86	47	-	-	-
leemh.zand	0	-	5	0,5	300	45	41	22	14	-	-
lichte zavel	0,5	0,1	4	0,25	300	21	19	10	7	-	-
zware zavel	0,5	0,02	4	0,25	300	17	15	8	5	-	-

De natte omtrek van de sloot is aangenomen op circa 1,5 m.

6. VERGELIJKING SLEUFLOZE- MET SLEUVEN DRAINAGE

Bij vergelijking tussen sleufloze- en sleuwendrainage moet er rekening mee worden gehouden dat de doorlatendheid van de drainsleuf bij sleuwendrainage niet gelijk hoeft te zijn aan die in de omringende grond. Bij zware, stabiele kleigronden zal de doorlatendheid van de drainsleuf in het algemeen veel groter zijn; op zand-

gronden minstens gelijk, echter op zavelgronden veelal minder. De oorzaak kan zijn dat een oorspronkelijk relatief weinig dichte grond, na het graven van en terugstorten in de drainsleuf, als gevolg van sedimentatie een grotere dichtheid krijgt, zoals dit is waargenomen op verschillende gewoelde gronden (BOELS en HAVINGA, 1974, HAVINGA, 1975). De aanwezige grote poriën gaan daarbij verloren. Een oorspronkelijke dichtheid op drainniveau op zavelgronden is circa 1350 kg m^{-3} (49 volume procent poriën). Na losmaken wordt de dichtheid van deze gronden $1400 - 1450 \text{ kg m}^{-3}$. Op het proefveld Berlicum werd 1450 kg m^{-3} gemeten (fig. 3) (47 - 45% poriën) (HAVINGA, 1975). De doorlatendheid daarvan kan uit het verband tussen capillair geleidingsvermogen en vochtgehalte worden afgeleid. Verdichting, waar bij de porositeit met $a\%$ afneemt zal ongeveer eenzelfde effect hebben op de doorlatendheid als een afname met $a\%$ vocht heeft bij een niet verdichte grond op het capillair geleidingsvermogen ervan. Gerekend vanaf verzadiging (vochtspanning = 0) betekent een afname in het vochtgehalte met 3% op een zavelgrond een vochtspanningsstijging met circa 0,60 m waterkolom. Het capillair geleidingsvermogen is dan nog circa 0,12 keer de verzadigde doorlatendheid (sandy clay loam, RIJTEMA, 1969).

Voor zavelgronden mag derhalve worden aangenomen dat de doorlatendheid in de drainsleuf circa 0,12 keer de doorlatendheid is in het ongevoerd profiel.

Uit de afvoermetingen op de proefvelden Zonzeel (CD, 1975) en Berlicum (CD, 1974, 1975) is de verhouding berekend tussen de doorlatendheid van de grond direct rond de drain, gelegd met een sleuvengraver, en de doorlatendheid in het ongeroerd profiel bepaald met vergelijking 26. In tabel 3 staan de resultaten als 'gemeten' weergegeven. Als 'berekend' staan de verhoudingen weergegeven, zoals die aan de hand van fig. 6 zijn bepaald voor sleufloze drainage en langs zojuist beschreven weg voor de sleuwendrainage.

Tabel 3. Berekende en gemeten verhouding: $\frac{\text{doorl.heid rond drain (K}_3\text{)}}{\text{idem ongeroerd profiel (K}_2\text{)}}$

Proefveld	L	D ₁	K ₁	K ₂	T _{dr}	verhouding K ₃ /K ₂				
						sleufloos		sleuf		
						be- rekend	ge- meten	be- rekend	ge- meten	
Zonzeel	13	0,3	0,15	0,20	131,6	156,1	0,14	0,07	0,12	0,05
Berlicum	14	0,3	0,05	0,13	246,7	186,7	0,036	0,037	0,12	0,09

Uit tabel 3 blijkt dat de berekende verhouding $\frac{K_3}{K_2}$ voor de zware zavel de gemeten waarde goed benadert, doch veel minder goed voor de lichte zavel (proefveld Zonzeel).

Tabel 4. Berekende en gemeten verhouding $\frac{\text{drainafstand sleufloze drainage(L)}}{\text{idem sleuven drainage(L}_0\text{)}}$

Proefveld	Verhouding $\frac{L}{L_0}$	
	berekend	gemeten
Zonzeel	1,12	1,33
Berlicum	0,37	0,47

Ondanks de hier optredende verschillen, kan de verhouding tussen de drainafstand bij sleufloos draineren en die bij een sleuwendrainage voor beide grondsoorten redelijk worden berekend (tabel 4).

7. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Bij de 'sleufloze' drainage techniek wordt een woellichaam door de grond getrokken om ruimte te creëren voor de te leggen drainbuis. Bij dit proces is uit dichtheidsmeting gebleken dat de grond op drainniveau niet wordt verdicht. Uit micropedologisch onderzoek en uit het dichtheidsonderzoek werd geconcludeerd, dat er vrijwel zuivere vervorming moest zijn opgetreden.

Een methode werd ontwikkeld waarbij de invloed kon worden bepaald van de vervorming op de doorlatendheid aan de hand van monsters. Daartoe werd in een triaxiaal apparaat de doorlatendheid bij verschillende vervorming gemeten.

De in de bodem rond het woellichaam optredende vervorming kon langs theoretische weg in verband worden gebracht met de breedte van het woellichaam en de hoek van inwendige wrijving van de grond. Uit dat verband kon een samenhang worden afgeleid tussen maximale breedte van de vervormde zone, de breedte van het woellichaam en de opgetreden hoek van inwendige wrijving. Hierdoor was het mogelijk in een profielkuil op een drain de hoek van inwendige wrijving vast te stellen. Voor een lichte zavel bleek deze te liggen tussen 2 en 5°.

Voorts werd de langs theoretisch-empirische weg bepaalde reductie van de doorlatendheid rond de drain vergeleken met uit grondwaterstands- en drainafvoer berekende reducties. Voor een lichte zavelgrond werd een reductie bepaald van circa 85% en op een zware zavel circa 95%. Uit drainafvoeren etc. werd respectievelijk 93% en 96% berekend. De overeenstemming lijkt vrij goed, zodat geconcludeerd kan worden dat de ontwikkelde methode bruikbaar lijkt om het resultaat van sleufloos gelegde drainages op andere grondsoorten redelijk te voorspellen.

Tot slot werden de bij de sleufloze drainage toe te passen drainafstand vergeleken met de bij de sleuwendrainage toe te passen afstand.

Uit een onderzoek was gebleken dat het losmaken van grond (vergelijk los vullen van drainsleuf), afhankelijk van de oorspronkelijke dichtheid, soms resulteert in een grotere dan de oorspronkelijke dichtheid. In die gevallen zal de doorlatendheid verminderen, als gevolg van het verdwijnen van de grote poriën of gangen. Er werd aangenomen dat de doorlatendheid bij verdichting waarbij de grote poriën verdwijnen op dezelfde manier wordt verminderd als het capillair geleidingsvermogen vermindert wanneer een even grote hoeveelheid vocht aan de grond wordt onttrokken als de bodemverdichting is, indien dit in volumes wordt uitgedrukt. Voor een zavelgrond zou de oorspronkelijke dichtheid (1350 kg m^{-3}) overgaan

in $1400 - 1450 \text{ kg m}^{-3}$ en de verzadigde doorlatendheid met circa 90% afnemen. Gemeten was een dichtheid van 1450 kg m^{-3} en een reductie van de doorlatendheid in de drainsleuf met 95% (lichte zavel) en 91% (zware zavel).

Tot slot werd de verhouding toe te passen drainafstand bij sleufloze drainage en sleuvendrainage berekend met de langs empirisch-theoretisch verkregen resultaten en met uit veldwaarnemingen berekende gegevens. Berekend werd dat de drainafstand op een lichte zavel circa 10% (gemeten 33%) meer kon zijn wanneer sleufloze drainage in plaats van sleuvendrainage wordt toegepast. Voor een zware zavel werd berekend dat de drainafstand circa 60% (gemeten 53%) minder moest zijn bij sleufloze drainage ten opzichte van de sleuvendrainage.

LITERATUUR

- ANONYMUS, 1975. Structuur en doorlatendheid van zavelgronden boven en naast de drains, gelegd met verschillende typen draineermachines. Rapport nr. 1236, Stiboka, Wageningen
_____ 1975.
- _____ Rapport NBR: 75012. Cult. Techn. Dienst Noord Brabant
_____ 1974. Vergelijking tussen resultaten van traditionele en sleufloze drainage in ruilverkaveling 'Berlikum'. Cult. Techn. Dienst afd. Onderzoek Leeuwarden
_____ 1975. Vergelijking tussen resultaten van traditionele en sleufloze drainage in de ruilverkaveling 'Berlikum' (II) Cultuurtechnische Dienst afd. Onderzoek Leeuwarden
- BOELS, D. en L. HAVINGA, 1973. Effekt van woelen op een verdichte zavelgrond. Cultuurtechnisch Tijdschrift. 1491: 26-34
- DIEMKE, K. e.a., 1973. Die Dränmaschine Meliomat. Wissenschaftlich-technische Informationen für das Meliorationswesen. Heft 22
- EGGELSMANN, R, 1973. Drän a leitung. Verslag Wasser und Boden Axel Lindow & Co., Hamburg
- ERNST, L.F., 1962. Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen. PUDOC, Wageningen
_____ 1963. De berekening van grondwaterstroming tussen evenwijdige leidingen. Committee for Hydrological Research TNO, Den Haag. Proceedings and Information 8: 48-68
_____ 1976. Second and third degree equation for the determination of the spacing between parallel drainage channels. Nota 896 ICW, Wageningen
- GODWIN, R.J., 1974. An investigation into the mechanics of narrow tines in frictional soils. Thesis, University of Reading
- HAVINGA, L, 1975. Blijvend effect van diepe grondbewerking. Cultuurtechnische Tijdschrift 15,3
- HUIZINGA, T.K., 1969. Grondmechanica, Agon Elsevier, Amsterdam
- LAMBE, W.T. and R.V. WHITMAN, 1969. Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc. New York

- LUDOLPH, G.L. e.a., 1963. Sterkteleer J.B. Wolters, Groningen
- NAARDING, W.H., 1977. A review on international experience with trenchless-versus trenching drainage machines. Mededeling 121, Cultuurtechnische Dienst, Utrecht
- PRANDTL, L., 1921. Über die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastische Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. Z.A.M.T., 1.1
- RIJTEMA, P.E., 1969. Soil moisture forecasting. Nota 513, ICW, Wageningen
- SOMEREN, VAN, C.L., 1973. Drainage machinery European Commission on Agriculture Working Party on Water Resources and irrigation Bucharest, Romania, 1972. F.A.O. of the U.N., Rome
- VOSS, B. und F. ZIMMERMANN, 1974. Zugkraft bedarf und Verlegeswindigkeit grabenlos arbeitender Drainmaschinen. Wasser und Boden 26, 4: 89-102