

NN31545.1388

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

**BODEMVERDICHTING OP EEN VERBETERDE VELDPDZOLGROND
EEN PROEF MET VERSCHILLENDE WIELLASTEN**

ing. L. Havinga
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

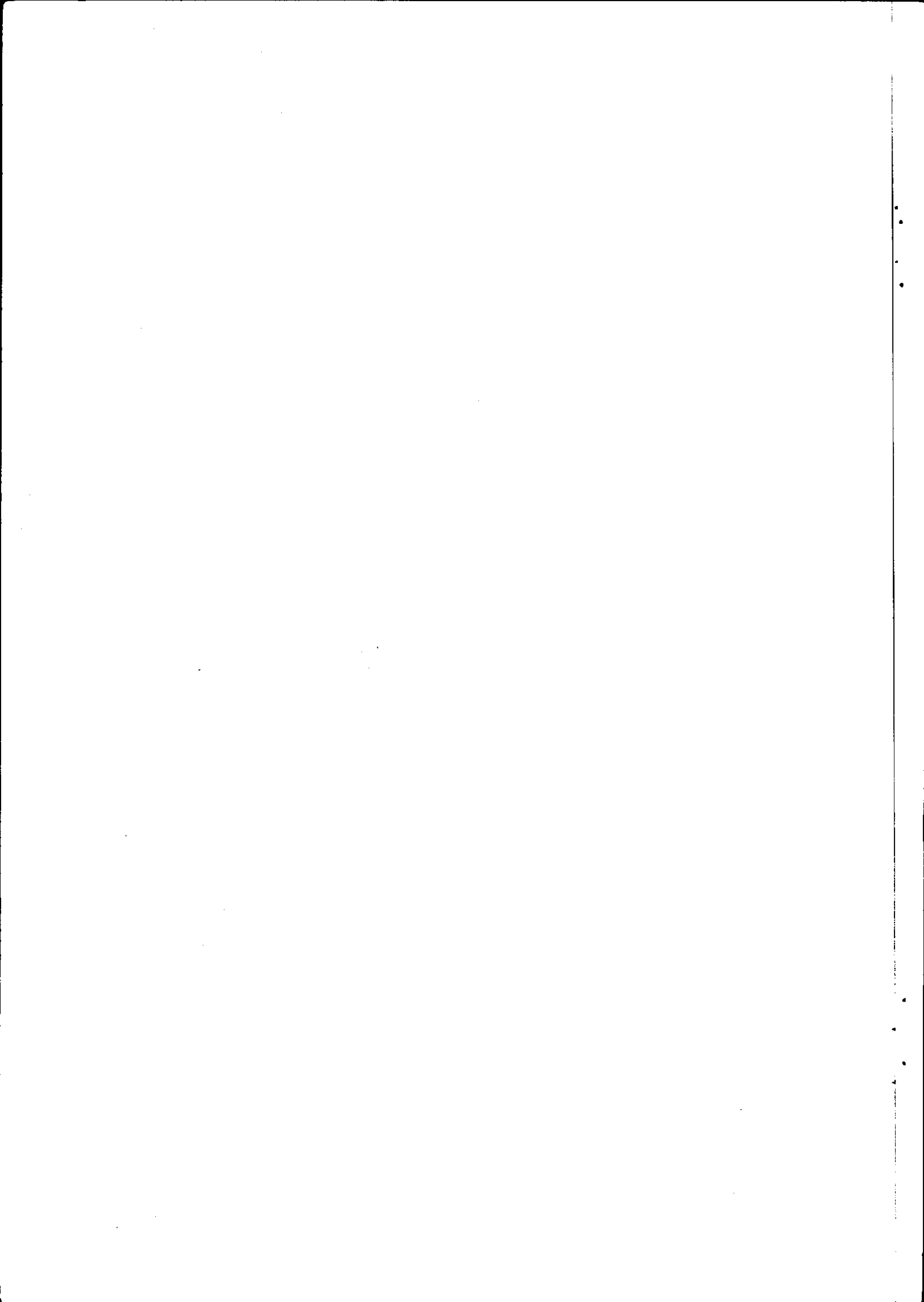
ENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0082 6699

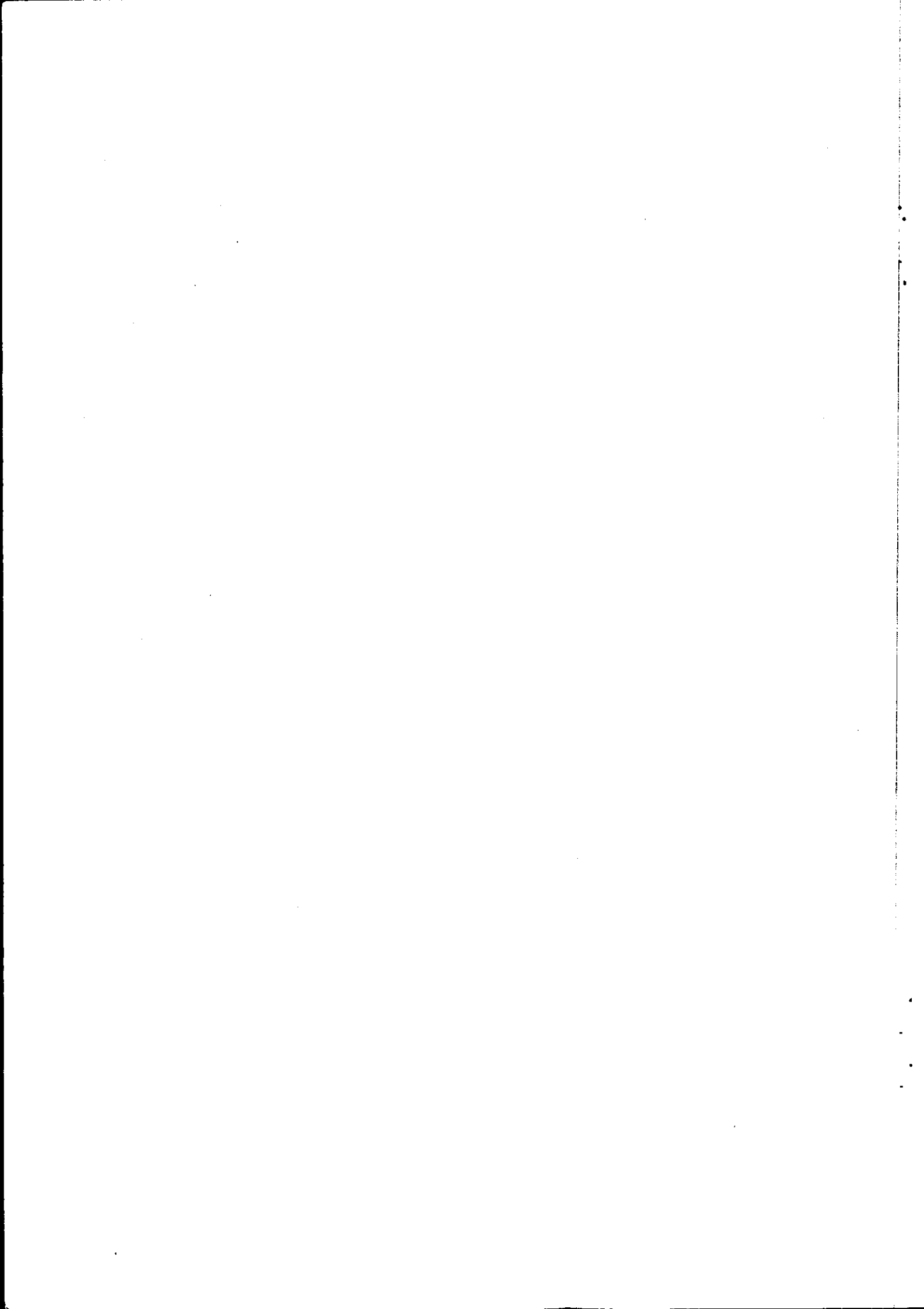
00 JAN. 1988

ISBN 178663-02



I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. PROEFOPZET	3
2.1. Algemeen	3
2.2. Inrichting proefveld	4
2.3. Verdichtingsvarianten	5
2.4. Meetprogramma	6
3. MEETRESULTATEN	7
3.1. Uitgangstoestand	7
3.2. Insporingsdiepten	10
3.3. Gronddruk	11
3.4. Bodemvervorming	15
3.5. Bodemverdichting	29
4. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	37
5. LITERATUUR	39



1. INLEIDING

Wielasten in de landbouw en bij uitvoering van grondverzetsverkeer nemen gestaag toe. Tot deze conclusie komt zowel de 'Working group on soil compaction by vehicles with high axel load' in haar bijeenkomst in 1980 te Uppsala, als de deelnemers aan het EEG Seminar Soil Degradation, oktober 1980 te Wageningen (BOELS et al., 1981a).

Voorts wordt geconcludeerd dat toenemende wielasten leiden tot een extra bodemverdichting, die op zijn beurt opbrengsten van akkerbouwgewassen verlaagt. Verlagen tot circa 30% en meer zijn niet uitzonderlijk bij verdichtingen van enige omvang (BOELS en HAVINGA, 1974, BOELS e.a. 1981b).

Niet gekwantificeerde berichten van bodemspecialisten in de veenkoloniën en zuidelijke zandgebieden spreken van tegenvallend resultaat van grondverbeteringen. De oorzaak zou zijn dat bodemverdichting na deze verbetering van dien aard is dat diepe beworteling niet mogelijk is. De beoogde vochtwinst wordt dan niet gerealiseerd, waardoor het resultaat tegenvalt.

Bodemverdichting door hoge wielasten is een verschijnsel waartegen mogelijk slechts in beperkte mate maatregelen te treffen zijn van cultuurtechnische aard (b.v. diepere ontwatering met als oogmerk grotere draagkracht). Mochten deze maatregelen onvoldoende effect sorteren, dan staat de landbouw voor de keuze tussen
a - ongelimiteerde voortzetting van de trend in de mechanisatie of
b - aangepaste mechanisatie.

Alternatief a leidt tot toenemende bodemverdichting en opbrengstdepressie tenzij de gecreëerde verdichting regelmatig wordt opgeheven. Het kosten/baten aspect zal bepalen of dit steeds gebeurt. Vooralsnog lijkt dit het geval te zijn, gelet op het (overmatig) gebruik van woelers, vaste tandcultivatoren en andere soortgelijke werktuigen.

Alternatief b verheugt zich nog niet in overmatige belangstelling. Dit alternatief kan inhouden het beperken van wiellasten tot een nog vast te stellen grens of de ontwikkeling van nieuwe wiel concepten, waarbij de afsteunende krachten niet zoals gebruikelijk via drukken op de bodem wordt overgebracht, maar via schuifspanningen (SOANE, 1981).

Ook kan dit alternatief inhouden dat wel hoge wiellasten worden geaccepteerd, doch dat bij transport steeds over hetzelfde spoor wordt gereden. (PERDOK en TELLE, 1979, LUMKES, 1980). In slechts een aantal gevallen is deze oplossing mogelijk, want zij stelt hoge eisen aan de verkaveling. De spoorbreedte van werktuigen bij dit systeem is namelijk minstens 4 meter, wat te groot is voor transport+ over de weg. De wendbaarheid is slecht, zodat rijlengtes zo groot mogelijk moeten zijn om wendverliezen, althans relatief, te beperken.

Bedrijven waar deze oplossing kan worden toegepast, dienen te bestaan uit een (huis)kavel.

Voor op de korte termijn komt de Working Group of Soil Compaction etc. tot de conclusie dat het stellen van grenzen aan wiellasten de meest voor de hand liggende oplossing is om bodemverdichting te beperken. De toelaatbare grens dient echter nog te worden vastgesteld.

De conclusies en aanbevelingen getrokken, respectievelijk gedaan, tijdens het Seminar Soil Degradation tenderen in dezelfde richting. Bovendien wordt dan nog geconcludeerd, dat deze grens op economische argumenten moet steunen, terwijl waterhuishoudkundige ingrepen aandacht verdienen. Dit eist de ontwikkeling van modellen waarmee zowel bodemverdichting als de effecten worden voorspeld. Oplossingen kunnen dan worden beoordeeld op hun doelmatigheid. Zo'n model is momenteel in ontwikkeling. Zulke modellen dienen echter op bruikbaarheid en betrouwbaarheid te worden getoetst aan reële situaties.

Een veldproef is daartoe opgezet door het IMAG, ICW, PAGV en Stiboka om aspecten te bestuderen van het rijden met verschillende wiellasten, bandspanningen en aantal keren rijden op een recent verbeterde veldpodzolgrond bij verschillende vochttoestanden.

Het doel van de proef is tweeledig. In de eerste plaats verschafft de proef informatie over de mate van verdichting die in verbeterde grond optreedt in samenhang met het aantal keren rijden.

Voor directe toepassing kan hieruit worden afgeleid wanneer en tot welke diepte de verbeterde grond eventueel regelmatig weer moet worden losgemaakt.

In de tweede plaats verschaft de proef gegevens waaraan een model kan worden getoetst, waarmee bodemverdichting onder wielen wordt berekend.

2. PROEFOPZET

2.1. A l g e m e e n

Wielen dragen een last die volgens het principe van actie = reactie op de bodem wordt afgesteund. Dit afsteunen gebeurt over een zeker oppervlak, zodanig dat het product van (gemiddelde) bodemdruk en oppervlak gelijk is aan de wiellast (inclusief het gewicht van het wiel). De bodemdruk is begrensd. Dat kan inhouden dat het draagvermogen groter is dan de bandspanning, vermeerderd met een bijdrage van de karkas stijfheid van de band. In dat geval is de bodemdruk gelijk aan bandspanning maal karkasstijfheid.

De band zal daarbij zoveel vervormen dat het vereist contactoppervlak is bereikt. Op verharde oppervlaktes en droge (harde) gronden is dit het geval.

Is echter het draagvermogen van de bodem geringer dan bandspanning keer karkasstijfheid, dan zal de band gaan insporen. Daarbij neemt het contact oppervlak toe, de band vervormt weinig. Tijdens dat insporen kan de bodem worden verdicht waardoor het draagvermogen toeneemt. De insporing zal in elk zover gaan dat de wiellast op de bodem kan worden afgesteund (BOELS, 1978). Lukt dat niet dan wordt het wiel geïmmobiliseerd ('zakt tot z'n as in de grond').

Het draagvermogen van de bodem is gedefiniëerd als een druk over een zeker oppervlak die de bodem zonder (verdere) vervorming kan verdragen. Zo gedefiniëerd, is een draagvermogen (in b.v. kg/cm^2) geringer voor grote oppervlakten dan kleine (vgl. BEKKER, 1969, p44).

Bij een keer rijden over een relatief losse grond wordt een zekere insporingsdiepte waargenomen. Bij een tweede keer rijden door het zelfde spoor zal het wiel weer iets uitsporen en wel zoveel als weer nodig is om de last af te steunen. Het contact oppervlak is bij een tweede keer rijden (meestal) geringer dan bij de eerste keer.

Verwacht mag derhalve worden dat de bodemverdichting toeneemt na elke keer rijden. Deze toename zal echter naar nul tenderen. Eventuele vervormingen onder wielen zijn dan van puur elastische aard.

De mate van verdichting hangt samen met bandspanning, bandtype (stijfheid), banddimensies, wielast en grondgedrag onder invloed van krachten.

Het grondgedrag, de samenhang tussen verdichting en opgelegde krachten, is afhankelijk van de vochttoestand van de grond. Een natte grond wordt in het algemeen gemakkelijker verdicht, dan een relatief droge grond.

Bodemverdichting onder een wiel is een gecompliceerd proces van beweging van gronddeeltjes, waarbij de onderlinge positie wordt gewijzigd.

Uit onderzoek van YONG en WEBB (1969) aan grondbeweging onder slippende wielen op een niet samendrukbare plastische grond blijkt dat de grondpartikeltjes een soort elliptische baan beschrijven. De begin en eindpunten van de baan vallen, zelfs op niet samendrukbare grond, niet samen. Afhankelijk van de mate van wielslip ligt het eindpunt onder en achter de oorspronkelijke positie.

2.2. I n r i c h t i n g p r o e f v e l d

De proef is uitgevoerd op een recent verbeterde (gespitfreesde) veldpodzolgrond. Het perceel grenst aan de Grenssloot (Schadijk, midden Limburg) en helt af naar deze watergang. Daardoor zijn grondwaterstanden vlak bij de watergang relatief ondiep en naarmate de afstand tot deze watergang groter is, dieper. Variaties in vochttoestand worden daardoor langs natuurlijke weg verkregen.

Het perceel is voorafgaand aan de proef tot circa 0,4 m losgemaakt met een vaste tandcultivator. Op het perceel, loodrecht op

Tabel 1. Beproefde wiellasten, bandspanningen, bandenmaten en berijdingsintensiteit

Proef no.	Wiellast (kg)	Bandspanning (bar)	Bandenmaat	Aantal keren door zelfde spoor rijden		
1	1600	1,5	13 - 16	1	3	8
2	3200	1,5	20. - 20	1	-	8
3	3200	4,3	20. - 20	1	-	-
4	6200	..	6 - 26,5 (16 pr)	1	2	6

De proef 1 t/m 3 is uitgevoerd met de zogenaamde bandenwagen van het IMAG. Deze wagen kan met een enkel wiel of met een tandem worden uitgerust, en met betonblokken worden beladen. De wagen wordt door een trekker met grote spoorbreedte getrokken. Deze spoorbreedte maakte het mogelijk dat drie sporen met de bandenwagen naast elkaar kunnen worden gemaakt zonder daarbij overtrekker-sporen te rijden. In de proef zijn steeds drie sporen naast elkaar gemaakt.

Proef 1 is met een tandem uitgevoerd, de proeven 2 en 3 met een enkel wiel. Proef 4 is uitgevoerd met een drijfmest wagen. Deze wagen is zelfrijdend en heeft vier wielen. De wagen is met water geladen, waardoor een totaal gewicht van 24,7 ton werd verkregen. Dit gewicht is op een weegbrug vastgesteld.

2.4. M e e t p r o g r a m m a

Voor de bepaling van het tijdstip van uitvoering van de proef is het verloop van de grondwaterstand op enkele plaatsen op het perceel gemeten. Tevens is het verloop van de vochtspanning op enkele dieptes midden op het perceel gevolgd.

Volumegewichten in lagen van 0,1 m zijn bepaald voorafgaande aan de proef en na uitvoering van de proef op de verschillende objecten. Op het laboratorium is de vochtspanning gemeten aan monsters waaraan het volumegewicht na uitvoering van de proef is gemeten.

Indringingsweerstand en zijn eveneens gemeten (HOUBEN,). Tijdens de proef is na elke keer rijden de insporingsdiepte gemeten door met een waterpastaestel de hoogte te bepalen van een plankje (circa 0,05 m breed, 0,2 m lang) die midden in een spoor was gelegd.

Vormverandering in de bodem is gemeten als verplaatsing van horizontaal aangebrachte pvc-pijpjes in een verticale wand, loodrecht op de rijrichting. De pijpjes lagen met hun lengteas in de rijrichting.

De gronddruk is gemeten met een gronddrukopnemer. Het signaal van deze opnemer is geregistreerd op een x-t recorder. De vereiste voedingsspanning (220 Volt, wisselstroom) is door een mobiel stroomaggregaat geleverd. De gronddrukopnemer is op circa 0,02 m onder maaiveld aangebracht in het hart van een toekomstig spoor.

3. MEETRESULTATEN

3.1. U i t g a n g s t o e s t a n d

Op een drietal plekken op het perceel zijn vochtspanningen gemeten op 5 dieptes: 0,10, 0,2, 0,3 0,4 en 0,5 m respectievelijk. De meetplekken zijn zo gekozen dat er een op het laagste gedeelte van het perceel ligt, een op het hoogste deel en een daar tussen in. Deze plekken worden in het vervolg aangeduid met respectievelijk laag, hoog en midden.

De gebruikte tensiometers bestaan uit een keramische cup, die is geschroefd aan een perspex buis. Een manometer is in de bovenzijde van deze buis geschroefd. Ontluchting van de manometers gebeurt vanuit een voorraadkamer met behulp van een zogenaamd 'jet-fill' systeem. Tijdens de meetperiode in het voorjaar van 1981 zijn een aantal van deze tensiometers tijdens nachtvorst bevroren en in het ongereede geraakt. Metingen op enkele data op het object 'midden' zijn in tabel 2 weergegeven.

Tabel 2. Gemeten vochtspanningen (cm waterkolom) op object 'midden' op enkele data

Diepte (m-mv.)	Datum		
	15 dec. '80	10 apr. '81	13 apr. '81 *
0,10	37	80	164 (5)
0,20	25	63	111 (15)
0,30	22	53	92 (25)
0,40	15	51	92 (35)
0,50	23	41	72 (45)
Grondw.stand (cm -mv.)	158	94	97

*Gemeten aan ringmonsters

() diepte 10^{-2} m -mv.

De dichtheidsverdeling op de verschillende objecten is bepaald aan ringmonsters met een volume van 100 cc en hoogte 0,05 m. Het volume vochtgehalte, organisch stofgehalte (gloeiverlies methode) en vochtspanning is eveneens aan deze monsters bepaald. De samengevatte gegevens staan in tabel 3 vermeld.

Uit tabel 3 blijkt, dat de dichtheid van de bodem op object 'laag' geringer is in de laag 0 - 0,5 m -mv en groter is in de diepere lagen dan op de andere objecten. Het lijkt er op dat op dit object de grondverbetering met de spitfrees in 1979, niet tot een grotere diepte is gebeurd dan 0,5 m.

De dichtheidsverschillen in de bovenste laag van 0,5 m zijn overigens niet erg groot. Bij overigens gelijke omstandigheden mag dan ook, gelet op de vrijwel gelijke gehalten aan organische stof, op alle objecten een zelfde soort grondgedrag worden verwacht.

Tabel 3. Uitgangssituatie op de verschillende objecten

Diepte (m -mv)	Laag (grondw.st. 0,56 m -mv)		Midden (grondw.st. 0,97 m -mv)		Hoog (grondw.st. 1,36 m -mv)							
	dichth. org.st. 1) (kg/m ³)	vochtgeh. 2) (cm H ₂ O)	dichth. org.st. 1) (kg/m ³)	vochtgeh. 2) (cm H ₂ O)	dichth. org.st. 1) (kg/m ³)	vochtgeh. 2) (cm H ₂ O)						
0 -0,1	1350	4,5	23,3	-	1410	4,6	18,2	164	1400	4,5	16,7	169
0,1-0,2	1380	4,7	31,0	-	1400	4,3	20,0	111	1400	4,5	17,2	124
0,2-0,3	1360	3,9	34,5	-	1470	3,4	18,7	92	1380	3,4	16,9	121
0,3-0,4	1380	2,8	36,3	-	1510	2,1	13,7	92	1420	2,5	13,3	93
0,4-0,5	1360	1,9	37,2	-	1510	1,4	12,3	72	1480	2,1	9,5	75
0,5-0,6	1580	1,1	-	-	1510	0,8	-	-	1490	1,0	-	-
0,6-0,7	1590	0,6	-	-	1530	0,6	-	-	1490	0,8	-	-
0,7-0,8	1590	0,6	-	-	1580	0,6	-	-	1520	0,5	-	-

1 - percentage van de droge massa; gloeiverlies methode

2 - volume vochtgeh.

3 - gemeten aan ringmonster op laboratorium

3.2. In s p o r i n g s d i e p t e n

De insporingsdiepte is gemeten ten opzichte van het oorspronkelijke maaiveld, in het hart van een spoor. Daartoe is het hoogterverloop van een dun smal plankje in het hart van een spoor door waterpassing gemeten. Behalve met de drijfmestwagen (wiellast 6200 kg) zijn steeds drie sporen naast elkaar gereden. Om praktische redenen was dit met de drijfmestwagen niet uitvoerbaar.

Niet op elk object is elke gewenste berijdingsfrequentie gerealiseerd. Te hoge wiellasten, vaak in combinatie met natte grond, immobiliseerden de voertuigen. Het maximaal aantal keren rijden is bepaald als die frequentie waarbij de insporingsdiepte niet meer toeneemt. Bij de berijdingsfrequentie moet worden bedacht dat 1 keer rijden met een wiellast van 1600 kg en 6200 kg feitelijk twee wielpassages inhoudt. Immers bij de eerste wiellast is de bandenwagen uitgerust met een tandem, bij de tweede betreft het een vierwielige zelfrijdende drijfmestwagen.

In tabel 4 zijn de gemiddelde insporingsdiepten weergegeven. De algemene trend is dat naarmate de wiellast groter is, de insporingsdiepte ook groter is, eveneens is op een nattere grond de insporingsdiepte groter dan op een droge grond, terwijl de insporingsdiepte bij lage bandspanning geringer is dan bij grote bandspanning.

Bij wiellasten van 1600 en 3200 kg wijken de gemeten insporingsdiepten op het midden object af van de trend. De oorzaak hiervan is dat de oorspronkelijke dichtheid vanaf een diepte van 0,2 m significant groter is dan op het object hoog. De draagkracht van deze ondergrond is derhalve groter dan op het object hoog, hetgeen de geringere insporingsdiepten verklaart.

De insporingsdiepte op object midden na 6 keer rijden met een wiellast van 6200 kg is geringer dan na 2 keer rijden. Een afdoende verklaring hiervoor is niet te geven. Wel is geconstateerd, dat op het object laag ernstige verkneding is opgetreden: Mogelijk hierdoor gedraagt de grond zich als een visceuse vloeistof waardoor ontstane sporen de neiging hebben dicht te vloeien.

Tabel 4. Gemiddelde insporingsdieptes (cm) ten opzichte van oorspronkelijk maaiveld, gemeten in hart spoor

Wiel last	Band sp.	Frequentie	Object		
			hoog	midden	laag
6200	-	1	11,2	13,5	17,0
	-	2	12,2	14,9	20,2
	-	6	15,7	14,1	20,0
1600	1,5	1	4,6	2,5	9,0
		3	4,3	3,3	21,1
		8	5,1	5,1	*
3200	1,5	1	5,0	4,7	7,0
	4,3	1	6,0	5,1	11,0
	1,5	8	10,6	9,1	*

*rijden onmogelijk

3.3. Gronddruk

Gronddrukken zijn in het hart van circa 0,02 m diepte gemeten. Dit is gebeurd op het object 'hoog', bij berijdingsfrequentie van 1 keer.

De gronddruk in het contact oppervlak grond-wiel ontstaat doordat de wiellast wordt afgesteund over een zeker oppervlak, de zogenaamde voetprint van de band, waarin een drukverdeling optreedt. De vorm van de voetprint wordt opgevat als een cilinder segment. De druk loodrecht op dit oppervlak in een willekeurig punt wordt aangeduid met $p(\theta)$ (zie fig. 2). Nemen we aan dat de drukverdeling dwars over de band uniform is, dan moet de betrekking gelden:

$$W = B \int P(\theta) \cos^2 \theta \cdot R \, d\theta \quad (1)$$

De drukverdeling $P(\theta)$ kan blijkens eigen grondbakonderzoek aan een stalen wiel en blijkens metingen van ONAFEKO en REECE (1967), worden beschreven met:

$$P(\theta) = P_m \sin \left\{ \frac{\pi}{\theta_m} \cdot \theta \right\} \quad (2)$$

hierin is:

P_m = de piekdruk in het contact oppervlak

Substitutie van (2) in (1) levert na enige herschikkingen:

$$\frac{W}{2RB} = \frac{P_m}{2} \int_0^{\theta_m} \sin \left\{ \frac{\pi}{\theta_m} \cdot \theta \right\} \cdot \cos^2 \theta \, d\theta \quad (3)$$

De linkerterm wordt naar analogie van FREITAG (1979) aangeduid als laadindex. De integraal in de rechterterm van vgl. 3 wordt via numerieke integratie gevonden. Nu is eenvoudig in te zien dat:

$$\theta_m = \arccos \left(1 - \frac{D}{R} \right) \quad (4)$$

zodat geschreven kan worden:

$$f\left(\frac{D}{R}\right) = \int_0^{\theta_m} \sin \left\{ \frac{\pi}{\theta_m} \cdot \theta \right\} \cos^2 \theta \, d\theta \quad (5)$$

De samenhang tussen $\frac{D}{R}$ en $f\left(\frac{D}{R}\right)$ is in tabel 5 weergegeven.

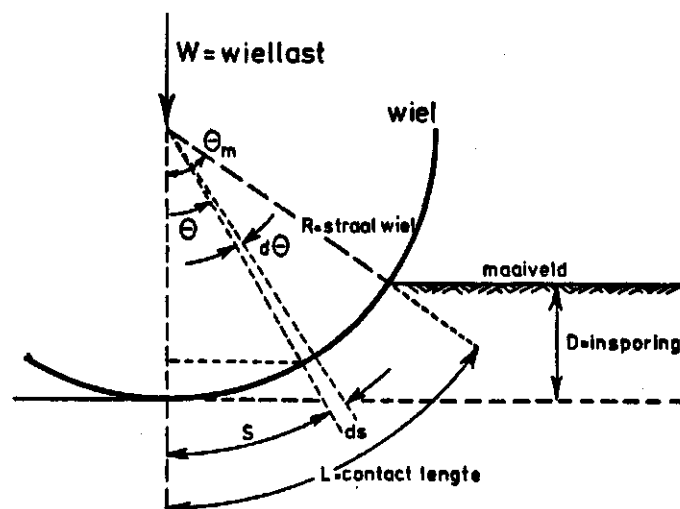


Fig. 2. Toelichting grootheden in vergelijking 1 t/m 5

Tabel 5. Enkele waarden voor $f\left(\frac{D}{R}\right)$

$\frac{D}{R}$	$f\left(\frac{D}{R}\right)$	$\frac{D}{R}$	$f\left(\frac{D}{R}\right)$
0,0044	0,070	0,0702	0,276
0,0123	0,120	0,0822	0,296
0,0177	0,143	0,0952	0,316
0,0241	0,161	0,1090	0,335
0,0314	0,189	0,1236	0,354
0,0397	0,211	0,1393	0,371
0,0489	0,233	0,1557	0,389
0,0591	0,255	0,1729	0,405
		0,1909	0,421

De berekende samenhang tussen de laadindex, $\frac{W}{2RB}$, de relatieve insporing, $\frac{D}{R}$, en de maximale piekdruk, P_m , zijn in fig. 3 weergegeven.

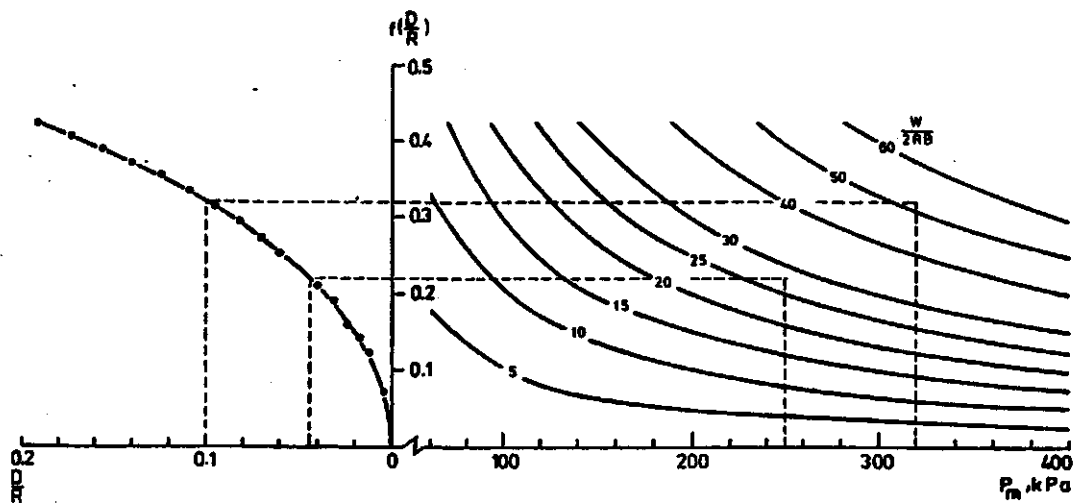


Fig. 3. Samenhang tussen insporingsdiepte (D), straal wiel (R), piekdruk onder het wiel (P_m) en de laadindex ($\frac{W}{2RB}$)

Opgemerkt zij dat deze relaties gelden voor starre wielen. Indien banden afplatten neemt de kromte straal in het contact oppervlak toe. In die gevallen dient met een andere straal te worden gerekend. De samenhang tussen afplatting (zie fig. 4) en equivalente straal is wegens:

$$\theta_m = \frac{R'}{R} \theta'_m$$

derhalve:

$$\frac{\Delta R}{R} = 1 - \frac{R'}{R} - \cos \frac{1}{2} \cdot \theta_m + \frac{R'}{R} \cos \frac{1}{2} \theta'_m$$

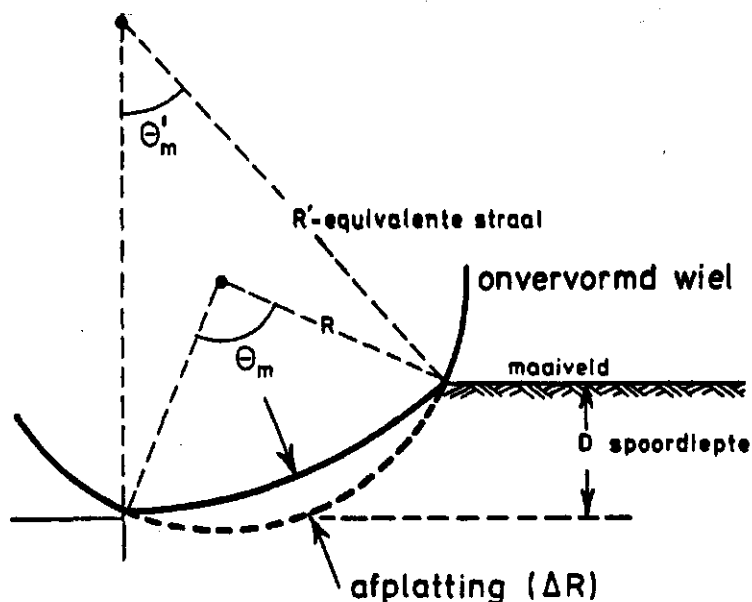


Fig. 4. Definitie schets voor afplatting

Op het object 'hoog' is de maximale gronddruk in het hart van een spoor gemeten. In tabel 6 zijn naast gemeten piekdruk en spoor diepte, de wiellasten en wiel demensies, de berekende equivalente straal R' en de relatieve afplatting $\frac{\Delta R}{R}$, weergegeven.

De rekenprocedure houdt in dat eerst de verhouding $\frac{D}{R}$ (spoor diepte/straal wiel) en de laadindex $\frac{W}{2RB}$ wordt bepaald. Vervolgens wordt in fig. 4 de bijbehorende piekspanning P_m afgelezen. Indien deze groter is dan de gemeten waarde wordt de procedure herhaald voor een grotere straal tot de afgelezen piekspanning gelijk is aan de gemeten waarde. Met de aldus benaderde equivalente straal, wordt tenslotte de afplatting berekend.

Tabel 6. Berekende equivalente straal en afplatting van de banden op object 'hoog'

Wielmaat	Band- breedte	Band- diam.	Wiellast	Spoor- diepte	Piekdruk	Berekende	
						eq. straal	rel. afplatting
	B (mm)	2R(mm)	W.kg	D.mm	P _m kPa	R' (mm)	$\frac{\Delta R}{R}$
13-16(*)	336	900	1600	46	170	3000	0,059
20-20(*)	508	1220	3200	50	250	2250	0,017
20-20(**)	508	1220	3200	60	310	1300	0,0016

* bandsp. 1,5 bar

** " 4,3 bar

De piekgrondruk onder de banden met een wiellast van 1600 kg is circa 170 kPa (1,7 kg/cm²), bij een bandspanning van 1,5 bar, 310 kPa (3,1 kg/cm²) bij wiellast van 3200 kg en bandspanning van 4,3 bar en 250 kPa bij dezelfde wiellast, maar nu met een bandspanning van 1,5 bar. Dit laatste betekent dat de karkasstijfheid van deze band groot is (circa 1,6).

De bodemdruk bij deze band, maar dan bij een bandspanning van 4,3 bar, komt niet hoger dan 310 kPa. Dit is kennelijk de maximale draagkracht van de bodem. Dat toch verdichtingen bij geringere bodemdrukken ontstaan, moet waarschijnlijk worden verklaard uit het type grondgedrag. Dit gedrag lijkt quasi-visco-elastisch te zijn. Dit houdt in dat bij zeer kortdurende belastingen de elasticiteit gering is, doch dat deze toeneemt naarmate de belastingsduur groter is. Elke belasting veroorzaakt een vervorming, waarvan een deel blijvend is (vergel. BROWN, 1981).

3.4. B o d e m v e r v o r m i n g

Tijdens het bodemverdichtingsproces kunnen een tweetal elementaire bewegingen worden onderscheiden: een translatie en een rotatie.

Een translatie kan worden opgevat als een verplaatsing van de oorsprong van een denkbeeldig assenstelsel. Voor het twee dimensionaal geval wordt verplaatsing in x-richting aangeduid met u , die in de y-richting met v (fig. 5).

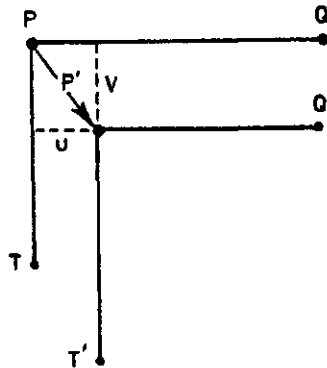


Fig. 5. Translatie

Een rotatie wordt opgevat als een hoek verdraaiing van een denkbeeldig assenstelsel rond de oorsprong. De rotatie, voor het twee-dimensionaal geval, wordt aangeduid met een hoek verdraaiing ψ (fig. 6).

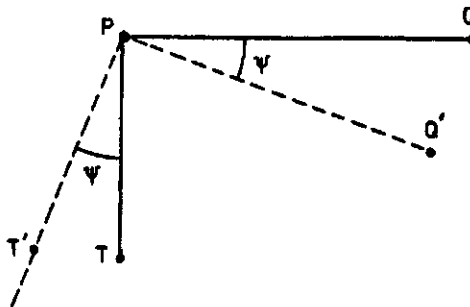


Fig. 6. Rotatie

Er wordt van bodemverdichting gesproken indien van een denkbeeldige kubus de ribben korter zijn geworden na uitoefening van spanningen. Van bodemvervorming is sprake, in zuivere zin, wanneer de hoeken van de denkbeeldige kubus na belasting niet recht meer zijn,

terwijl echter de dichtheid niet is gewijzigd. De mate van vervorming wordt gegeven, in het tweedimensionaal geval als het verschil in rotatiehoek van beide denkbeeldige hoofdassen (zie fig. 7).

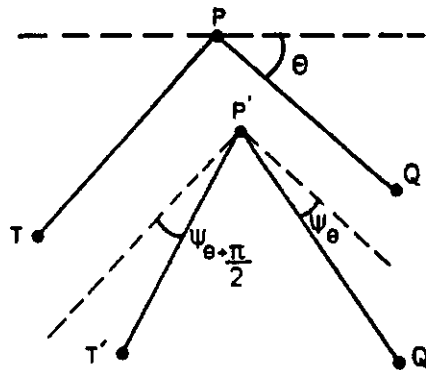


Fig. 7. Translatie en deformatie

$$\gamma_{\theta} = \psi_{\theta} - \psi_{\theta + \frac{\pi}{2}} \quad (6)$$

Hierin is:

γ_{θ} = vervorming van assenstelsel dat een hoek θ maakt met de horizontale richting

ψ_{θ} = rotatie van de x-as van dat stelsel

$\psi_{\theta + \frac{\pi}{2}}$ = rotatie van de y-as van dat stelsel

Een niet uniforme translatie in een denkbeeldig vlak geeft aanleiding tot rotatie en deformatie.

Stel we hebben een tweetal punten P en Q met coördinaten (x, y) en $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ (zie fig. 8). Na uitoefenen van spanningen blijkt het punt P verplaatst te zijn naar P' en het punt Q naar Q'. De verplaatsing van P is u in de x-richting en v in de y-richting. De verplaatsing van Q is respectievelijk:

$$\text{- in x-richting } u + \frac{\partial u}{\partial x} x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (7)$$

$$\text{- in y-richting } v + \frac{\partial v}{\partial x} x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (8)$$

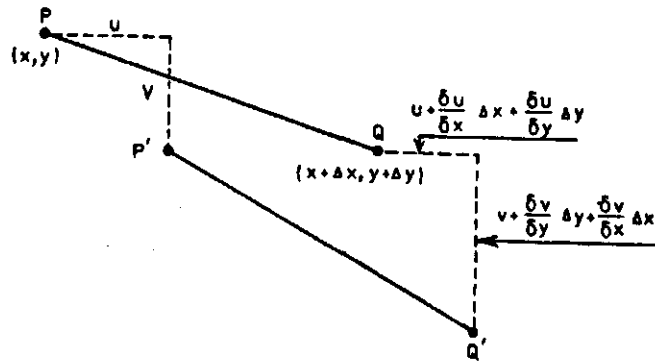


Fig. 8. Rotatie en niet uniforme translatie

Wij zijn geïnteresseerd in de relatieve lengteverandering van de lijn PQ, aangeduid met ϵ_θ en de rotatie van deze lijn.

Voor de berekening van deze laatste grootheden voeren we een translatie uit van de punten P' en Q' in x- en y-richting over afstanden van respectievelijk $-u$ en $-v$. Hiermee is het punt P' weer teruggebracht in het punt P. De relatieve translatie van Q naar Q'' (zie fig. 9) is nu

$$\text{- in x-richting } \frac{\partial u}{\partial x} x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (9)$$

$$\text{- in y-richting } \frac{\partial v}{\partial x} x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (10)$$

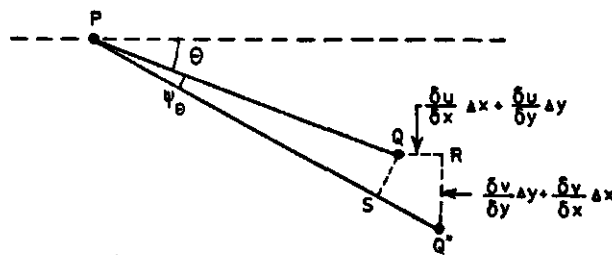


Fig. 9. Rotatie en rek van de voerstraal

De gezochte grootheden zijn:

$$\epsilon_\theta = \frac{SQ''}{PQ} \quad (11)$$

$$\psi_\theta = \arctg \frac{QS}{PQ} \approx \frac{QS}{PQ} \quad (\text{in radialen en } \psi_\theta \text{ klein}) \quad (12)$$

PQ maakt een hoek θ met de horizontale richting en de rotatie ψ_θ wordt klein verondersteld. In dat geval is (zie fig. 7):

$$SQ'' = QR \cos \theta + RQ'' \sin \theta \quad (13)$$

$$QS = -QR \sin \theta + RQ'' \cos \theta \quad (14)$$

Hierin is QR de relatieve verplaatsing van Q in de x-richting en RQ'' die in de y-richting.

Voorts is:

$$PQ = \frac{\Delta y}{\sin \theta} = \frac{\Delta x}{\cos \theta} \quad (15)$$

Nu worden vergelijking 8 t/m 10 gesubstitueerd in vergel. 6 en 7 en vervolgens vergel. 4 en 5 in de nieuw verkregen vergelijkingen. Na enige omwerkingen ontstaat:

$$\epsilon_\theta = \frac{\partial u}{\partial x} \cos^2 \theta + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \sin \theta \cos \theta + \frac{\partial v}{\partial y} \sin^2 \theta \quad (16)$$

$$\psi_\theta = -\frac{\partial u}{\partial y} \sin^2 \theta + \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) \sin \theta \cos \theta + \frac{\partial v}{\partial x} \cos^2 \theta \quad (17)$$

We noemen nu:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \text{ relatieve 'rek' in x-richting} \quad (18)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \text{ relatieve 'rek' in y-richting} \quad (19)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \text{ vervorming van denkbeeldige vierkant,} \\ \text{waarvan een ribbe samenvalt met x-as} \\ \text{en een tweede met de y-as} \quad (20)$$

In fig. 10 zijn in een assenstelsel twee ribben van een denkbeeldige vierkant weergegeven waarvan de lengte OE en OS eenheidslengtes zijn. De rotatie van OE, ψ is mits in radialen uitgedrukt, identiek aan $\frac{\partial v}{\partial x}$, en van OS, ψ_π , identiek aan $\frac{\partial u}{\partial y}$. Substitutie van deze gelijkheden in vergelijking 6 levert vergelijking 20.

Met vergelijking 17 is de rotatie van een lijnstuk bekend, die een hoek maakt met de horizontale richting. Om de vervorming

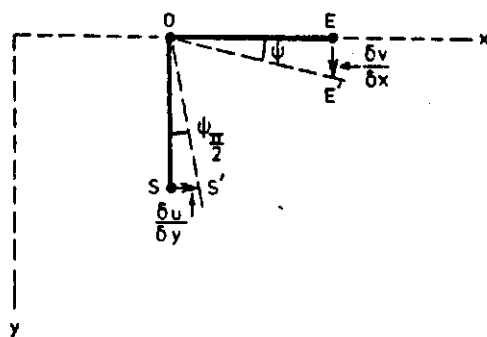


Fig. 10. Meetkundige voorstelling van hoekverandering (vervorming) van een denkbeeldig vierkant

te berekenen moet ook de rotatie van een lijnstuk bekend zijn die loodrecht stond op het eerste lijnstuk (PQ). Deze rotatie wordt verkregen door in vergelijking 17 voor θ de waarde $\theta + \frac{\pi}{2}$ in te vullen. Nu geldt dat $\cos(\theta + \frac{\pi}{2}) = -\sin\theta$ en $\sin(\theta + \frac{\pi}{2}) = \cos\theta$. De rotatie van een lijnstuk \perp PQ is derhalve:

$$\psi_{\theta + \frac{\pi}{2}} = \frac{\partial u}{\partial y} \cos^2\theta - \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x}\right) \cos\theta \sin\theta + \frac{\partial v}{\partial y} \sin^2\theta \quad (21)$$

De vervorming wordt verkregen door substitutie van 12 en 16 in 1:

$$\gamma_{\theta} = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)(\cos^2\theta - \sin^2\theta) + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x}\right) \sin\theta \cos\theta$$

oftewel wegens vgl 18 t/m 20 en wegens $\sin^2\theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$, $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$ en

$$2 \sin\theta \cos\theta = \sin 2\theta:$$

$$\gamma_{\theta} = \gamma_{xy} \cos 2\theta + (\epsilon_y - \epsilon_x) \sin 2\theta \quad (22)$$

Uit (22) is af te leiden dat de vervorming $\gamma_{\theta} = 0$, voor

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (23)$$

Vergelijking 16 kan na substitutie van vgl. 18 t/m 20 en na enige bewerkingen, worden geschreven als:

$$\epsilon_{\theta} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta + \frac{1}{2}\gamma_{xy} \cdot \sin 2\theta \quad (24)$$

Vgl. 22 en 24 zijn transformatiebewerkingen om uit gegeven ϵ_x , ϵ_y en γ_{xy} waarden te berekenen voor de relatieve lengteverandering en deformatie in willekeurige richtingen. Als zodanig zijn deze transformatievergelijkingen identiek aan de transformatievergelijkingen voor spanningen volgens SOKOLOVSKI (1960).

De meetkundige voorstelling van vgl. 22 en 24 is in fig. 11 weergegeven. De corresponderende waarden van ϵ in onderling loodrechte richting, behorende bij $\gamma_{\theta} = 0$, worden aangeduid met respectievelijk ϵ_1 en ϵ_2 .

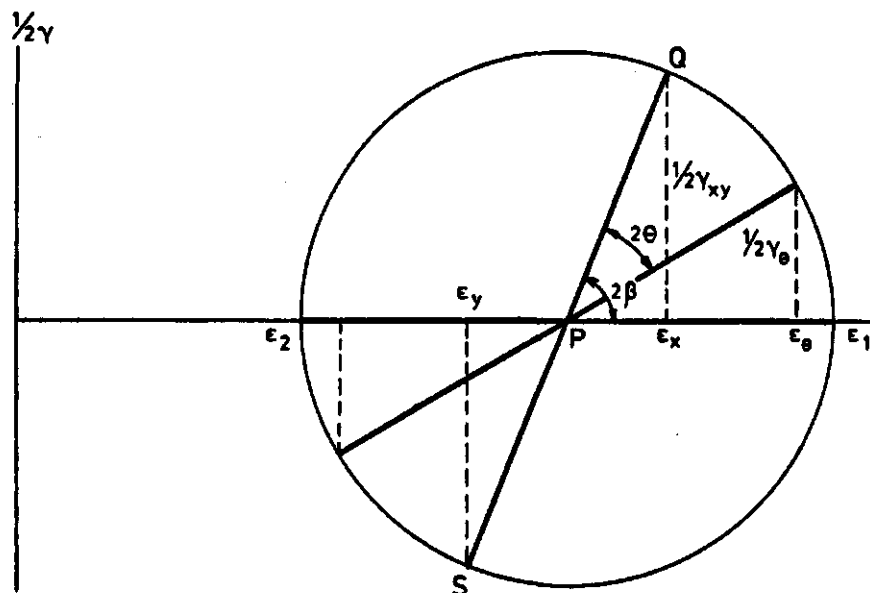


Fig. 11. Meetkundige voorstelling van vergelijkingen 27 en 29

Een cirkel met straal $\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2}$ en middelpunt in $\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$ wordt geconstrueerd. Een willekeurige lijn die een hoek 2β maakt met de ϵ -as wordt getrokken. Eenvoudig is in te zien dat:

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2\beta \quad (25)$$

$$\epsilon_y = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2\beta \quad (26)$$

$$\frac{1}{2}\gamma_{xy} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \sin 2\beta \quad (27)$$

Voorts geldt:

$$\epsilon_\theta = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos(2\beta - 2\theta) \quad (28)$$

$$\frac{1}{2}\gamma_\theta = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \sin(2\beta - 2\theta) \quad (29)$$

Uit het verschil tussen (25) en (26) volgt:

$$\epsilon_x - \epsilon_y = (\epsilon_1 - \epsilon_2) \cos 2\beta \quad (30)$$

Delen we vergelijking 30 door vergelijking 27 dan ontstaat:

$$\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{\gamma_{xy}} = \cotg 2\beta \quad (31)$$

Nu geldt dat $\cos(2\beta - 2\theta) = \cos 2\beta \cos 2\theta + \sin 2\beta \sin 2\theta$ en $\sin(2\beta - 2\theta) = \sin 2\beta \cos 2\theta - \cos 2\beta \sin 2\theta$.

Voorts volgt uit 27:

$$\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} = \frac{1}{2}\gamma_{xy} \cdot \frac{1}{\sin 2\beta} \quad (32)$$

Substitutie van de bovenstaande goniometrische betrekkingen en vergelijking 31 en 32 in de vergelijkingen 28 en 29, levert wegens $\epsilon_x + \epsilon_y = \epsilon_1 + \epsilon_2$ (som vgl. 25 en 26) de betrekkingen 24 en 27 op.

Dit betekent dat de zogenaamde spanningscirkel van Mohr waarmee op eenvoudige wijze normaal- en schuifspanningen in een willekeurig vlak bij gegeven hoofdspansingen worden afgelezen, ook bruikbaar is voor berekening van 'rek' en vervorming in elk willekeurig vlak,

indien de hoofdrek is gegeven. De waarde ϵ_1 en ϵ_2 is de hoofdrek in onderling loodrechte vlakken. In deze vlakken treedt geen vervorming op.

Eenvoudig is nu ook in te zien dat de grootste vervorming gelijk is aan $\epsilon_1 - \epsilon_2$ (zie fig. 11).

Berekening van θ

In een vlak loodrecht op de rijrichting zijn tracers (pcv-pijpjes) aangebracht waarvan de hoogteligging is gemeten. Na berijding zijn de tracers teruggezocht en is de hoogteligging bepaald. Tegelijkertijd is het volumegewicht gemeten. De verplaatsing in horizontale richting is niet gemeten, deze wordt uit de dichtheidsmeting afgeleid.

Stel het oorspronkelijk volumegewicht in de laag AB, ter dikte van Δy , gelijk is aan $\rho_{o,1}$ en het eind volumegewicht $\rho_{e,1}$. De loodrechte afstand tussen de tracers is h_1 (zie fig. 12).

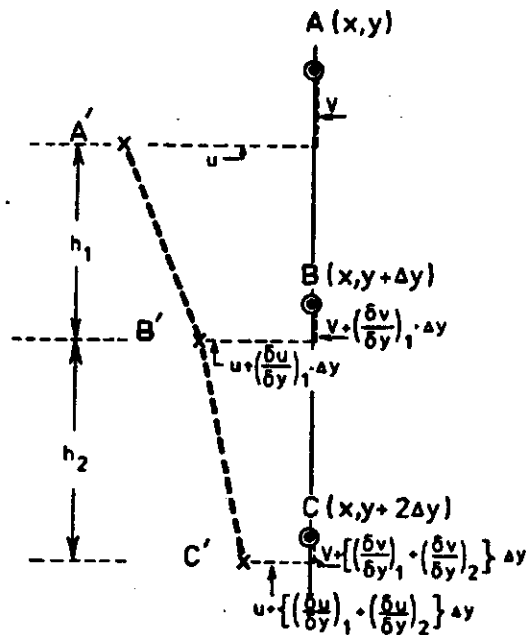


Fig. 12. Verplaatsing van de tracers van de oorspronkelijke positie (O) naar uiteindelijke positie (X)

De afstand A'B' is derhalve:

$$A'B' = \frac{\rho_{o,1}}{\rho_{e,1}} \cdot \Delta y \quad (33)$$

Voorts geldt:

$$A'B' = \sqrt{\{h_1^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_1^2 \Delta y^2\}} \quad (34)$$

en dus

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_1 = \sqrt{\left[\frac{\rho_{o,1}}{\rho_{e,1}}\right]^2 - \left(\frac{h_1}{\Delta y}\right)^2} \quad (35)$$

De insporingsdiepten zijn over grote afstanden constant. Derhalve mag worden aangenomen dat ook $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$. Daar in dat geval ook de dichtheid in elke bodemlaag in horizontale richting uniform is, geldt dat $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$. De bodemvervorming in een bepaalde laag is derhalve (volgens vgl. 20)

$$\gamma_1 = \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_1 \quad (36)$$

De y-as is neerwaarts gericht. De verdichting neemt af met de diepte, evenals de horizontale verplaatsing afneemt met de diepte. Derhalve geldt dat

$$\frac{\partial v}{\partial y} \leq 0 \quad (37)$$

en

$$\frac{\partial u}{\partial y} \leq 0 \quad (38)$$

Dit houdt in, daar $\frac{\partial u}{\partial x} = \epsilon_x = 0$, dat $\text{tg } 2\theta \leq 0$ (vgl. 23). De richting van het vlak waarin een hoofd 'rek' optreedt is derhalve schuin naar voren, in de rijrichting, georiënteerd.

Berekening verdichting van de oorspronkelijke lagen

De verticale dichtheidsverdeling is zowel voor als na het rijden bepaald op basis van gemiddelde dichtheid in lagen van 0,1 m. Voor de berekening van $\frac{\partial u}{\partial y}$, vergelijking 35, moet de dichtheid bekend zijn die na berijden in de oorspronkelijke laag optreedt.

De oorspronkelijke dichtheid in laag i wordt aangeduid met $\rho_{o,i}$. De dikte van deze laag is $d (= 0,1 \text{ m})$. De dichtheid in laag j na berijden is $\rho_{e,j}$ en de dikte van de laag is d . De laag aan het maaiveld is de 1e laag.

Voor een willekeurige laag geldt (wet van behoud van massa)

$$d \sum_{i=1}^k \rho_{o,i} = d \sum_{j=1}^{k-1} \rho_{e,j} + (d - \Delta d_k) \rho_{e,k}, \quad k > 1 \quad (39)$$

(voor verklaring symbolen zie fig. 13)

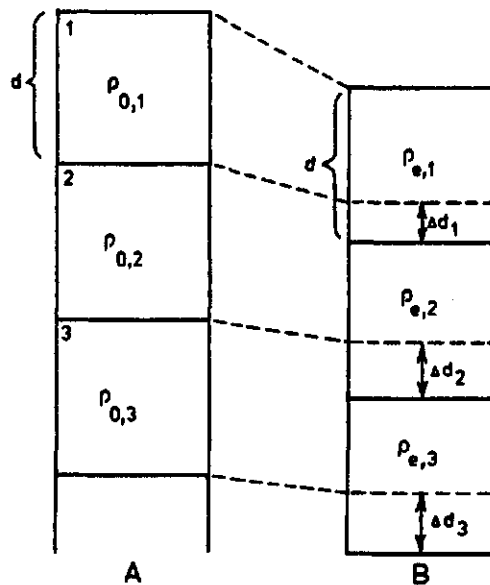


Fig. 13. Samendrukking van lagen in een bodemprofiel

A - voor het rijden, B - na het rijden

$\rho_{o,1}$ - oorspronkelijke dichtheid in laag 1

$\rho_{e,1}$ - einddichtheid in laag 1

De verhouding tussen de oorspronkelijke en de uiteindelijke dichtheid (vgl. 30) mag ook worden geschreven als verhouding van de uiteindelijke dikte en de oorspronkelijke dikte. Deze verhouding, aangeduid met E_k is voor laag k :

$$E_k = \frac{d - \Delta d_k + \Delta d_{k+1}}{d} = 1 - \left(\frac{\Delta d}{d}\right)_k + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)_{k-1} \quad (40)$$

Uit (39) is af te leiden, dat:

$$1 - \left(\frac{\Delta d}{d}\right)_k = \frac{\rho_{o,k}}{\rho_{e,k}} - \frac{1}{\rho_{e,k}} \sum_{j=1}^{k-1} (\rho_{e,j} - \rho_{o,j}) \quad (41)$$

dus is

$$E_k = \frac{\rho_{o,k}}{\rho_{e,k}} - \frac{1}{\rho_{e,k}} \sum_{j=1}^{k-1} (\rho_{e,j} - \rho_{o,j}) + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)_{k-1} \quad (42)$$

Vgl. 35 gaat voor $d = \Delta y$, over in:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_k = \sqrt{\left[E_k^2 - \left(\frac{h_k}{d}\right)^2\right]} \quad (43)$$

Voor $k=1$, is:

$$E_1 = \frac{\rho_{o,1}}{\rho_{e,1}} \quad (44)$$

Aan de hand van gemeten verplaatsingen van de tracers (fig. 14 a t/m c) en volumegewichten voor en na het rijden (ρ_o resp. ρ_e) is voor elke laag berekend welke hoek (θ) de richting van de eerste hoofd'rek', ϵ_1 , maakt met de horizontale richting. De tweede hoofd'rek', ϵ_2 , is eveneens berekend (zie fig. 15). Een positieve waarde van $\epsilon_{1,2}$ wil zeggen, dat een ribbe van een denkbeeldig vierkant langer is geworden (is uitgerekt), een negatieve waarde daarentegen wil zeggen dat de bewuste ribbe korter is geworden (is ingedrukt).

In tabel 7 staan voor het object 'midden' de resultaten samengevat. De richting van de eerste hoofd'rek ϵ_1 , ten opzichte van de horizontale richting wordt berekend als een hoek in een rechtsom draaiende richting (met de wijzers van de klok mee). Een negatieve waarde van deze hoek betekent een draairichting linksom (tegen de wijzers van de klok in).

De vervorming in de laag onder de bouwvoor bedraagt na 8 passages circa 0,32 radialen ($\approx 18^\circ$). Vlak onder het wiel is dit circa 0,57 radialen (32°).

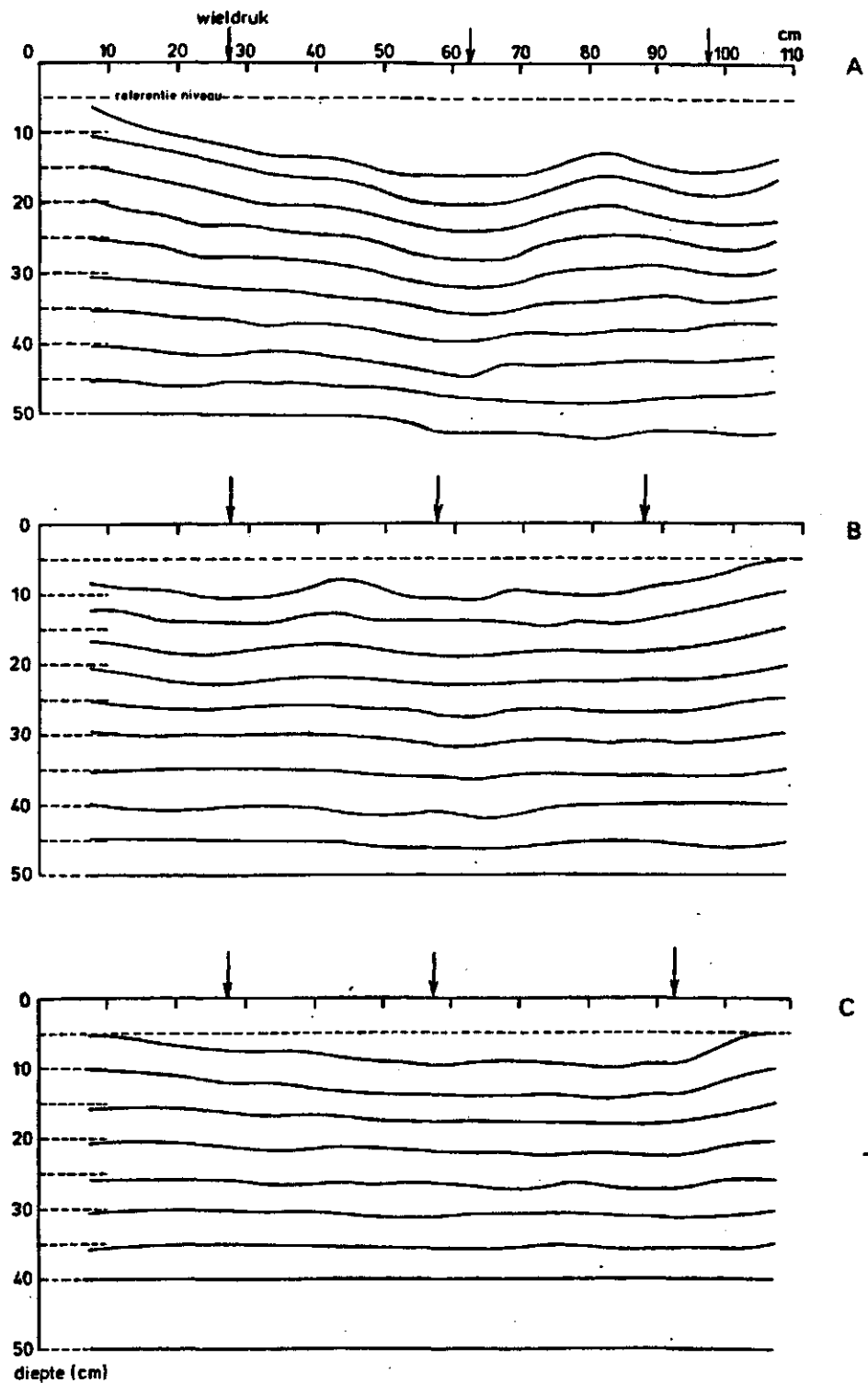


Fig. 14. Positie van tracers in een verticaal vlak loodrecht op de rijrichting (wiellast 1600 kg, bandsp. 1,5 bar, tandem)

A - na 8 passages

B - na 3 passages

C - na 1 passage

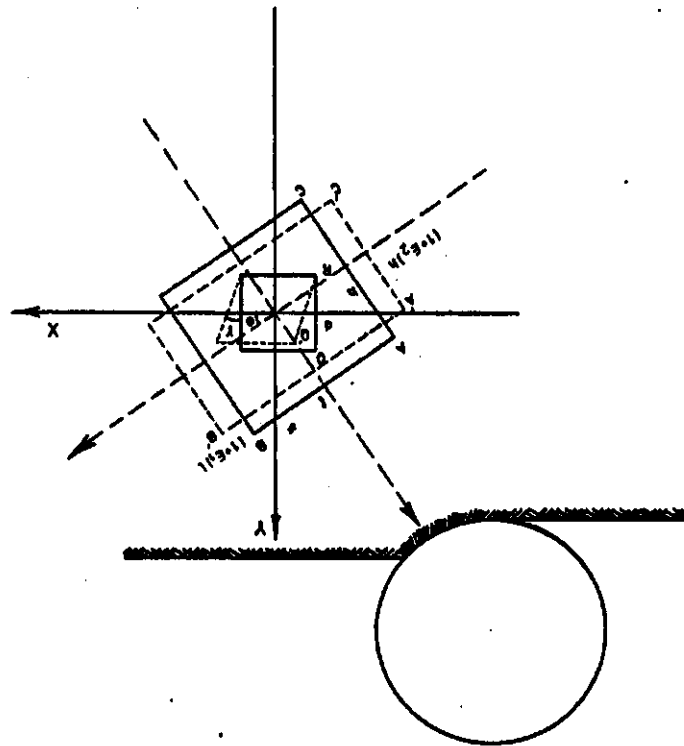


Fig. 15. Definitieschets voor symbolen uit tabel 7

Tabel 7. Berekende waarden van de eerste- en tweede hoofdrek, ϵ_1 respectievelijk ϵ_2 en de hoek tussen de ϵ_1 -richting en horizontale richting, in de verschillende lagen voor object 'midden', na 1 respectievelijk 8 keer rijden, met een tandem (Wiellast 1600 kg, bandsp. 1,5 bar)

laag	ρ_o^*	ρ_e^*		$\frac{h^{***}}{d}$		θ^{**}		ϵ_1		ϵ_2	
		1	8	1	8	1	8	1	8	1	8
1	1410	1500	1550	0,90	0,683	-39	-33	0,16	0,12	-0,26	-0,44
2	1408	1524	1545	0,88	0,817	-35	-33	0,08	0,05	-0,20	-0,23
3	1450	1450	1570	0,91	0,80	-19	-33	0,06	0,06	-0,03	-0,26
4	1500	1500	1526	0,91	0,90	-39	-27	0,16	-0,03	-	-0,08
5	1510	1510	1510	-	0,87	-	-37	-	0,13	-	-0,27

*kg/m³

**graden

***zie fig. 13

De richting van de eerste 'hoofdrek' toont enige variatie in de verschillende lagen. Gemiddeld is deze richting -33° zowel na 1 als na 8 keer rijden.

3.5. B o d e m v e r d i c h t i n g

31

Bodemverdichting is een proces waarbij tengevolge van opgelegde spanningen het bodemskelet blijvend wordt samengedrukt en waarbij de weerstand tegen vervorming toeneemt. Deze laatste toename gaat zover tot er een evenwicht met de opgelegde last is ontstaan. Bodemverdichting is derhalve af te leiden uit een gegeven spanningsverdeling in de grond en een gegeven grondgedrag onder invloed van spanningen. De soort grondgedrag is bepalend voor de spanningsverdeling.

Bij een elastisch of quasi-elastisch gedrag kan de spanningsverdeling onder een belast oppervlak worden berekend met behulp van de elasticiteitstheorie. Een eerste benadering van spanningsverdeling in een zuiver elastisch medium onder een puntbelasting is gegeven door BOUSSINESQ (1885). Gronden gedragen zich echter niet zuiver elastisch en daarom is door FROHLICH (1934) een zogenaamde concentratie factor ingevoerd in de benadering van BOUSSINESQ. Deze factor houdt er rekening mee dat op 'slappe' gronden de zijdelingse drukverdeling beperkt blijft, terwijl de diepte relatief groot is tot waar invloed merkbaar is. Op 'harde' gronden daarentegen is de zijdelingse drukverdeling relatief groot, terwijl de invloed naar de diepte beperkt blijft. SÖHNE (1958) gebruikte deze benadering om spanningsverdelingen in de bodem onder wielen te berekenen in een verticaal vlak loodrecht op de rijrichting. De invloed van wielslip op de spanningsverdeling en vervorming werd door PERUMPRAL et al (1971) numeriek berekend in een verticaal vlak evenwijdig aan de rijrichting.

Spanningsverdelingen die verantwoordelijk zijn voor een bodemverdichting wanneer het grondgedrag plastisch is, zijn berekend door JANBU (1970). Deze laatste neemt aan dat er sprake is van één verticaal glijvlak waarin schuifspanningen heersen, die steeds in evenwicht zijn met de normale spanningen en die verantwoordelijk zijn

voor de spanningsverdeling. De invloed van de breedte van het wiel is op eenvoudige wijze te berekenen.

Uitgaande van een spanningsverdeling onder een belaste strook volgens PRANDTL, neemt BOELS (1982) aan dat de spanningsverdeling in het hoofdschuifvlak de verdichting bepaalt na herhaaldelijk spoor aan spoor rijden. Ook hierin is met wielbreedtes rekening gehouden. Spanningsverdelingen berekend met behulp van de elasticiteitstheorie tonen piekspanningen aan maaiveld die met de diepte meer dan evenredig afnemen. Dichtheidsprofielen zouden derhalve ook de grootste dichtheid aan het maaiveld tonen en daarna afnemende met de diepte.

Gebaseerd op de plasticiteitstheorie, toont de berekende spanningsverdeling over een zekere diepte vanaf maaiveld een uniform verloop en daarna een snel afnemend. Het overeenkomstig dichtheidsprofiel zal een zelfde verloop tonen.

De gemiddelde volumegewichten per bodemlaag bij de verschillende berijdingsvarianten zijn in tabel 8 weergegeven. De bijbehorende gemeten vochtspanningen zijn, volledigheidshalve, gegeven in tabel 9.

Uit tabel 8, en fig. 16 a t/m c valt af te leiden, dat de bodemverdichting onder het wiel met een wiellast van 3200 kg nagenoeg gelijk is aan de verdichting onder het wiel met een last van 6200 kg. De bandbreedtes verschillen weinig. Hieruit valt af te leiden, dat de spanningsverdeling onder beide wielen nagenoeg gelijk moet zijn. In dit geval moet het grensdragvermogen van de bodem zijn bereikt. Een wiel moet daarbij zover insporen dat het produkt van contactoppervlak tussen grond en wiel en de gemiddelde spanning in het contactvlak gelijk is aan de wiellast. Uit tabel 4 blijkt inderdaad dat de spoordieptes van het wiel met een wiellast van 6200 kg systematisch groter is dan die van het wiel met een wiellast van 3200 kg.

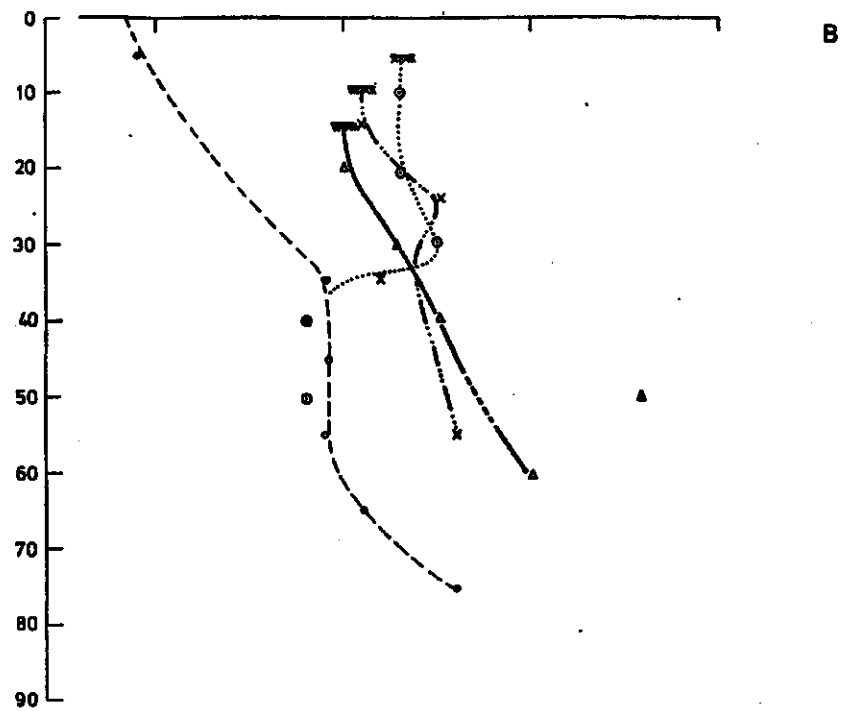
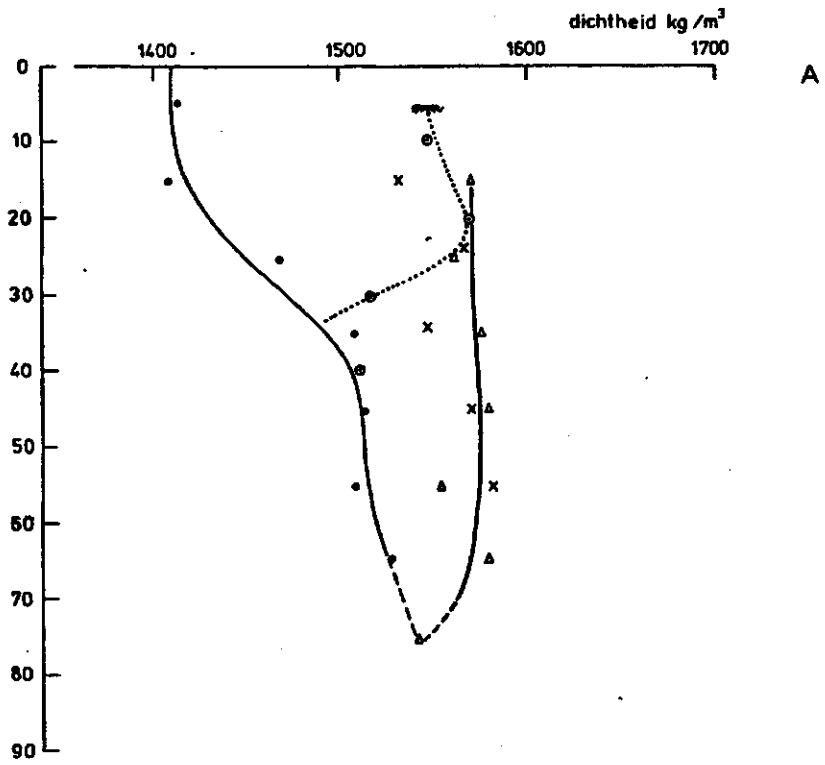
Voorts blijkt dat de dichtheidsverdeling onder beide wielen nagenoeg uniform is. Op het object 'midden' en 'laag' neemt de dichtheid toe met de diepte. Hierbij dient er rekening te worden gehouden dat de grondwaterstanden op deze objecten geringer zijn dan op het object 'hoog'. De grond zal derhalve ook vochtiger en daardoor gevoeliger voor verdichting zijn (zie tabel 9).

Tabel 8. Volumegewichten (kg/m^3) voor en na berijding

Object	wiel- last	bandsp. freq.	Dichtheid in de laag (cm -mv)										Grondw. stand m -mv
			2-7	12-17	22-27	32-37	42-47	52-57	62-67	72-77			
hoog	6200	onbereiden	1400	1400	1380	1420	1480	1490	1490	1490	1520	1,36	
			1500	1500	1520	1530	1500	1550	1540	1550	1550	1550	
			1540	1550	1560	1490	1510	1520	1550	1550	1570	1570	
	1600	1,5	1570	1560	1560	1580	1560	1580	1580	1580	1550		
			1440	1470	1440	1460	1470	-	-	-	-	-	
			1500	1530	1550	1500	1510	-	-	-	-	-	
	3200	1,5	1550	1580	1551	1440	1410	-	-	-	-		
			1390	1430	1440	1420	-	-	-	-	-	-	
			1520	1520	1520	1550	1570	-	-	-	-	-	
	midden	4,3	1480	1520	1520	1480	1460	-	-	-	-		
			1410	1440	1470	1510	1510	1510	1530	1580	1580	0,97	
			1500	1570	1570	1570	1580	1610	1650	1640	1640	1640	
6200	onbereiden	1520	1530	1520	1560	1560	1680	1680	1680	1630			
		1520	1550	1570	1680	1620	-	-	-	-	-		
		1500	1520	1440	1490	1520	-	-	-	-	-		
1600	1,5	1520	1520	1530	1550	1540	1550	1550	1550	1550			
		1550	1550	1570	1500	1500	-	-	-	-	-		
		1470	1500	1510	1500	1500	-	-	-	-	-		
3200	1,5	1530	1570	1540	1570	1580	1570	1570	1570	1580			
		1470	1550	1560	1520	1520	-	-	-	-	-		
		1350	1380	1360	1380	1360	1580	1590	1590	1590	0,56		
laag	onbereiden	1480	1480	1530	1570	1640	1640	1640	1640	1680			
		1470	1500	1510	1500	1490	-	-	-	-	-		
		1570	1490	1530	1520	1630	-	-	-	-	-		
6200	1,5	1430	1450	1430	1520	1620	1620	1620	1620	1620			
		1550	1510	1530	1670	1620	-	-	-	-	-		
		1400	1450	1480	1560	1550	-	-	-	-	-		

Tabel 9. Aan ringmonsters gemeten vochtspanningen (cm H₂O)

Object	Variant			Vochtspanning in de laag (cm -mv)							
	wiel- last	band- sp.	freq.	2-7	12-17	22-27	32-37	42-47	52-57	62-67	72-77
hoog	6200	-	1	212	147	125	125	90	78	67	62
			2	220	120	122	91	76	71	68	50
	1600	1,5	1	192	147	124	90	88	-	-	-
			3	187	147	85	89	134	-	-	-
			8	138	155	136	130	80	-	-	-
	3200	1,5	1	230	191	120	103	-	-	-	-
			8	198	99	75	92	-	-	-	-
		4,3	1	131	108	102	70	67	-	-	-
	gemiddeld:				189	139	112	99	89	75	67
midden	6200	-	1	183	88	80	76	81	37	17	13
			2	237	139	86	78	84	30	22	22
	1600	1,5	1	129	108	106	98	59	-	-	-
			3	138	113	96	99	74	-	-	-
			8	224	93	99	88	77	-	-	-
	3200	1,5	1	181	201	148	74	-	-	-	-
			8	251	123	122	107	87	-	-	-
		4,3	1	199	172	81	81	64	-	-	-
	gemiddeld:				193	130	102	88	75	33	20
laag	6200	-	2	95	85	36	26	21	41	35	31
	1600	1,5	1	77	73	55	39	24	-	-	-
			3	111	81	55	55	22	-	-	-
	3200	4,3	8	65	44	38	34	37	-	-	-
			1,5	1	73	57	61	38	37	-	-
		3	62	61	71	51	46	-	-	-	
gemiddeld:				81	67	53	41	31			



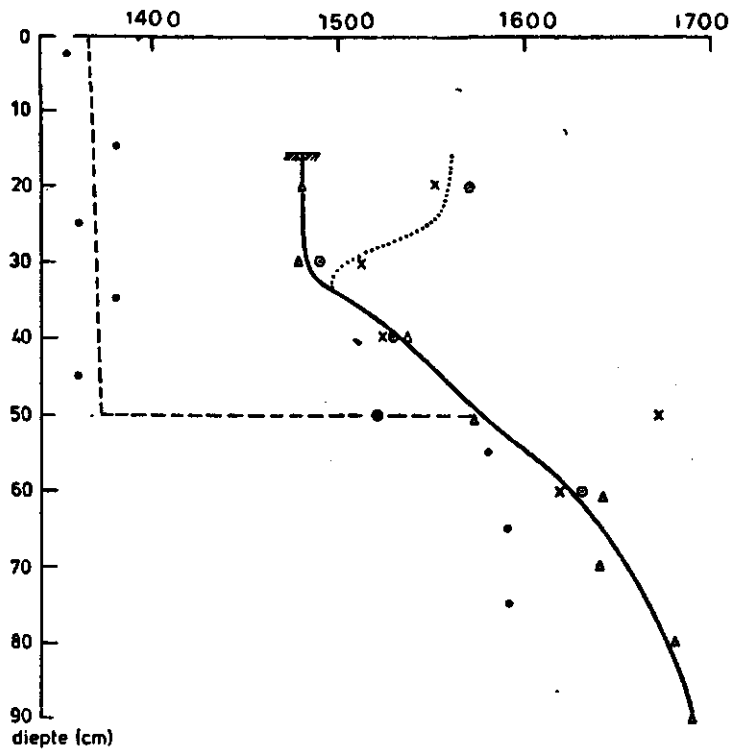


Fig. 16. Dichtheitsverdeling op het object 'hoog', grondwaterstand 1,36 m -mv. (A), object 'midden' met grondwaterstand 0,97 m -mv. (B) en 'laag', grondwaterstand 0,56 m -mv. (C)

symbool	wiellast	bandsp.	aant.pass.
o	1600	1,5	8 (3)
x	3200	1,5	8 (3)
.	6200	-	6 (3)
.	uitgangstoestand		

Het dichtheitsprofiel onder het wiel met een wiellast van 1600 kg (wielbreedte circa 0,34 m) is op de objecten 'hoog' en 'midden' nagenoeg uniform over een diepte van respectievelijk 0,2 en 0,3 m. Daaronder neemt de dichtheid af en wordt gelijk aan de oorspronkelijke dichtheid. Deze vorm van de dichtheitsverdeling lijkt de veronderstelling van een plastisch grondgedrag te wettigen. Er wordt uitgegaan van een gemiddelde diepte van circa 0,25 m. Tevens wordt ervan uitgegaan dat de hoofdspansingen dezelfde richting hebben als de hoofdrek (zie tabel 7). De dikte van de zone waarin de dichtheid uniform is, is derhalve $0,25/\cos(33) = 0,30$ m, wat gelijk is aan 1,8 keer de

de halve bandbreedte. Uit BOELS et al. 1982, fig. 1, p. 51 valt nu af te leiden dat de bijbehorende hoek van inwendige wrijving circa 30° is en de verhouding tussen de som van de hoofdspansingen en 2 keer de cohesie gelijk is aan 20.

Nu is een piekdruk gemeten van 170 kPa (tabel 6), welke gelijk is aan de som van de hoofdspansingen in de bedoelde laag. De cohesie moet derhalve circa 4 kPa zijn geweest.

Deze uitkomsten worden toegepast op het wiel met een last van 3300 kg en bandspanning 1,5 bar. De verhouding som hoofdspansingen en twee keer cohesie wordt daarbij (vergel. tabel 6) circa 59. De diepte tot waar de dichtheid uniform zou zijn is, rekening houdend met de richting van de hoofdspansingen, 0,48 m. Zou worden uitgegaan van dezelfde hoek van inwendige wrijving en cohesie, dan zou de diepte tot waar de dichtheid uniform is 0,38 m. zijn. Gemiddeld is dit circa 0,43 m. Dit echter wordt niet ondersteund door de gemeten dichtheidsprofielen, die tot grotere diepte een uniforme of zelfs toenemende dichtheid laten zien. Een zelfde soort bevinding is af te leiden uit metingen gerefereerd door SCHWIEG (1980). Hieruit moet dan ook worden geconcludeerd, dat er kennelijk sprake is van een simultaan optreden van zowel een elastisch als een plastisch grondgedrag. De niet uniforme vochtverdeling heeft daarnaast nog een, niet te kwantificeren, invloed. Een nadere analyse van het verdichtingsproces is danook nodig.

De toelaatbare verdichting wordt bepaald door de bewortelbaarheid van de grond, en de daarmee samenhangende gewasopbrengst. Opbrengstdepressies door bodemverdichting lijken terug te voeren te zijn tot een geremde gewasverdamping (zie BOELS et al., 1982, p.58). De bewortelingsdiepte bepaalt daarbij de hoeveelheid beschikbaar vocht in de bodem.

Voor zandgronden geldt als vuistregel dat deze niet meer bewortelbaar zijn wanneer de porositeit geringer is dan circa 40% (HIDDING en V.D. BERG, 1961, SCHUURMAN et al., 1974). Het droogvolume gewicht waarbij deze porositeit is bereikt is voor de verschillende objecten in tabel 10 weergegeven.

Tabel 10. Droogvolumegegewicht (kg/m^3) waarbij porositeit van 40% wordt verkregen

Object	2-7	12-17	22-27	32-37	42-47	52-57	62-67	72-77 cm -mv
hoog	1540	1540	1550	1570	1580	1580	1580	1580
midden	1540	1540	1550	1570	1580	1570	1580	1590
laag	1540	1540	1540	1540	1540	1580	1580	1590

Uit de proeven van SCHUURMAN blijkt, dat onder zekere condities plantenwortels nog in staat zijn over een beperkte afstand door te dringen in een dichte laag. Aangenomen wordt hier, dat deze afstand circa 0,1 m is. Hierop gebaseerd is onderstaande tabel (tabel 11) samengesteld, waarin per berijdingsvariant de maximaal mogelijke bewortelingsdiepte op het proefveld is aangegeven.

Tabel 11. Maximaal te verwachten bewortelingsdiepte bij een bouwvoordikte van 0,2 m en doordringingsdiepte in dichte laag van 0,1 m

wiellast	Variant		Object		
	bandsp.	aantal pass.	hoog	midden	laag
Niet bereden			0,75	0,75	0,5
1600	1,5	8	0,75	0,75	0,4
3200	1,5	8	0,4	0,4	0,3
3200	4,3	1	0,75	0,75	0,5
6200	-	6	0,3	0,3	0,3
grondw. stand (m -mv)			1,36	0,97	0,56

Uit tabel 11 zou kunnen worden geconcludeerd dat wiellasten van meer dan 1600 kg in alle gevallen aanzienlijke verdichtingen teweegbrengen op veldpodzolgronden.

Nemen we in aanmerking dat situaties als op object 'laag' in het najaar tijdens de oogst van hakvruchten niet denkbeeldig zijn, dan zouden zelfs wiellasten van 1600 kg nog te groot zijn.

4. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

In samenwerking met het IMAG, PAGV, STIBOKA en ICW is een veldproef uitgevoerd om bodemverdichting en -vervorming te bestuderen, die optreden na (herhaaldelijk) rijden met wielen met verschillende wiellasten en banden. Getest zijn wiellasten van 1600, 3200 en 6200 kg, bandspanningen van 1,5 en 4,3 bar, bandbreedtes van 0,34 m en 0,51 m. Gemeten is op objecten bij verschillende vochttoestanden (grondw.standen 0,56, 0,97 en 1,36 m -mv) de dichtheidsverdeling, de verplaatsing van tracers in de bodem, de insporingsdiepten en de bodemdruk tussen grond en wiel. Met de voertuigen (enkele wieltester van het IMAG en een zelfrijdende dunnemestwagen) is steeds spoor aan spoor gereden.

De gemeten piek-bodemdruk op het object hoog (grw.st. 1,36) bedroeg 170 kPa onder een wiel met een last van 1600 k en bandspanning van 1,5 bar, 250 kPa bij 3200 kg en 1,5 bar en 310 kPa bij 3200 kg en 4,3 bar.

Uit de verplaatsing van tracers in de bodem en de gemeten bodemverdichting is de vervorming afgeleid. Onder vervorming wordt verstaan de verandering van een rechte hoek van een denkbeeldige vierkant tengevolge van opschuiving. Deze hoekverandering wordt gewoonlijk in radialen gegeven. De vervorming in de laag onder de bouwvoor bedraagt na 8 keer rijden met een wiel met een last van 1600 kg en bandspanning van 1,5 bar, 0,32 radialen ($\approx 18^\circ$). Vlak onder het wiel is de maximale vervorming 0,57 radialen (32°).

De grootte van de vervorming hangt samen met de richting waarin deze wordt bepaald. Het vlak, waarin de vervorming 0 is, maakt een hoek van 33° met de normaal op het maaiveld en is in voorwaartse zin georiënteerd ten opzichte van de rijrichting. Uit de gemeten dichtheidsverdeling is afgeleid dat deze verdeling bepaald wordt door het grensdragvermogen van de bodem op alle objecten en nauwelijks

door de wiellasten zelve, voorzover deze groter waren dan 1600 kg. Voor het natste object gaat dit echter ook op voor de wiellast van 1600 kg.

Voor de insporingsdiepte geldt dan dat deze zodanig groot wordt dat het produkt van contactoppervlak en gemiddelde bodemdruk (grens draagvermogen) gelijk is aan de wiellast.

Over de aard van het verdichtingsproces werd geconcludeerd dat simultaan een plastisch en quasi-elastisch grondgedrag lijken op te treden. Het plastisch grondgedrag werd afgeleid uit de dichtheidsverdeling die vanaf maaiveld eerst uniform is en dan snel afneemt met de diepte, althans onder wielen met een wiellast van 1600 kg. Voor wielen met grotere wiellast en grotere breedte werd dit patroon niet gevonden. Afwijking kan alleen worden verklaard uit de aanname van een tegelijkertijd optredende elastisch (quasi-) grondgedrag.

Tot slot is benaderd welke invloed de verdichtingen op de bewortelingsdiepte hebben. Hierbij is er vanuit gegaan dat de bouwvoor een dikte heeft van 0,2 m, dat de bodemlagen met een porositeit van minder dan 40% niet bewortelbaar zijn en dat wortels nog 0,1 m kunnen doordringen in een dichte laag.

Hiervan uitgaande kan worden geconcludeerd dat wiellasten van 3200 kg en 6200 kg in alle gevallen de bewortelingsdiepten beperken tot respectievelijk 0,4 en 0,3 m. Wiellasten van 1600 kg remmen de bewortelingsdiepten alleen wanneer onder natte omstandigheden wordt gereden. Die natte omstandigheden zijn niet denkbeeldig bij de oogst van hakvruchten in het najaar, zodat mogelijk deze wiellasten dan ook nog te groot zijn. Tot slot zij opgemerkt, dat een nadere analyse van het verdichtingsproces wenselijk geacht wordt.

5. LITERATUUR

- BEKKER, M.G., 1969. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor
- BOELS, D. en L. HAVINGA, 1974. Verdichting en bouwvoorverschraling door ploegen en afschuiven bij verschillende vochtgehaltenes. Nota ICW 703
- _____ 1978. Kanttekeningen bij besteksvoorwaarden ter beperking van bandspanning van dumpers en trekkers. Nota ICW 1081
- _____ P. BOEKEL, A. JONGERIUS, L.A.H. DE SMET en W. VAN DER MEER, 1981. Inrichtings- en uitvoeringsaspecten van perceelsvergroting op lichte zavelgronden in het Noordelijk Klei mozaïk gebied. Mededeling nr. 133, Landinrichtingsdienst, Utrecht
- x _____ B.D. DAVIES and A.E. JOHNSTON, (eds) 1982. Soil Degradation (276 p) Balkema, Rotterdam
- BOUSSINESQ, J., 1885. Applications des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Paris
- BROWN, R.L., 1981. An analysis of vehicle power requirements in deep snowpack. Journal of Terra mechanics, 18,3: 169-181
- FREITAG, P.R., 1979. History of wheels for off-road transport. J. Terramechanics 16,2: 49-58
- FRÖHLICH, O.K., 1934. Druckverteilung im Baugrunde. Springer, Wien
- x HIDDING, A.P. en C. VAN DEN BERG, 1961. The relation between pore volume and the formation of root systems in soils with sandy layers. Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci. Madison 1,38: 369-373
- JANBU, W., 1970. Grunnlag i geoteknikk, Trondheim
- x LUMKES, L.M., 1980. Studies on the effect of traffic and of soil compaction on the growth of arable crops. In: WGSC 1980, Report of Meeting in Uppsala 1980, Report nr. 60, Swedish University of Agricultural Sciences, dept. Soil Science
- ONAFEKO, O. and A.R. REECE, 1967. Soil stress and deformation beneath rigid wheels. J. Terramechanics, 4,1: 59-80
- x PERDOK, U.D. and M.G. TELLE, 1979. Controlled traffic in crop productions. Proceedings of the 8th Conference of the International Soil Tillage Research Organization (ISTRO), Germany

- PERUMPRAL et al., 1971. A numerical method for predicting the stress distribution and soil deformation under a tractor wheel.
Journal of Terramechanics, 8,1
- SCHUURMAN, J.J., J.J.H. BOER en L. KNOT; 1974. De reactie van wortelgroei op opname en spruitgroei van haver op de dichtheid van zandgrond. Landb.k. Tijdschr. 86,10: 256-266
- SOANE, B.D., 1981. Soil degradation attributable to compaction under wheels and its control in: BOELS, D. et al. (eds) 1982. Soil Degradation Balkema Rotterdam
- SOHNE, W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres. Agric. Eng. St. Joseph, Mich. 39: 276-281,290
- SOKOLOVSKI, V.V., 1960. Statics of soil Media. Butterworths Scientific Publications, London
- X SWIECH, J., 1980. Compaction of Soil, Field experiments with winter wheat and sugar beet. in: Report nr. 60 p46-51, Division of Soil Management, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala
- WORKING GROUP ON SOIL COMPACTION by vehicles with high Axle load (W.G.S.C.), 1980. Report of Meeting in Uppsala 1980. Report nr. 60, Department of Soil Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala
- YONG, R.N. and G.L. WEBB, 1969. Energy dissipation and drawbar pull prediction in soil-wheel interaction. In: Proceedings of the 3rd International Conference of the Intern. Soc. for Terrain-Vehicle systems, Inc., Vol. I