

NN31545.0534

METHODE TER KARAKTERISERING VAN HET MECHANISCH

GEDRAG VAN GROND

L. Havinga en ir U.D. Perdok

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

Nota's van het Instituut zijn inprincipe interne communicatiemid-
delen, 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.

5-13-9106

moderate... ..

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

CHICAGO, ILLINOIS

... ..

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. KARAKTERISERING VAN HET MECHANISCH GEDRAG	3
2.a. De grond	3
2.b. De samendrukking	4
2.c. De doorlatendheid	4
3. PROEFRESULTATEN	6
3.a. Algemeen	6
3.b. De relatie druk-doorlatendheid	6
3.c. Overzicht van de onderzochte grondsoorten	8
3.d. Mechanisch gedrag bij de uitrolgrens	10
3.e. Discussie	11
4. DE DOORLATENDHEID IN AFHANKELIJKHEID VAN PORIËNVOLUME EN LUCHTGEHALTE	12
4.a. Algemeen	12
4.b. Het poriënvolume	13
4.c. Het luchtgehalte	13
5. SAMENVATTING	14
6. LITERATUUR	17

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

INDICATED BY THE FOLLOWING: (1) THE FOLLOWING IS THE

113

114

115

116

117

OF THE ABOVE

1. INLEIDING

Vroeger werden grondverbeteringsmaatregelen uitgevoerd in handwerk. Zo nodig werd het gehele profiel op de schop genomen. Voor grondtransport werd soms de kruiwagen op planken gebruikt. Door de voorzichtige werkwijze en de geringe dagcapaciteit bleef eventuele structuurschade aan natte grond van beperkte omvang.

Tegenwoordig rijden zware dumpers over het veld en wordt het grondwerk soms uitgevoerd met trillende en (versmerende) bulldozers. In de praktijk worden daarmee niet steeds goede resultaten geboekt. Blijkbaar verdraagt de grond slechts onder bepaalde omstandigheden dergelijke (mis)handelingen. Verschillende combinaties van werktuigen, grondsoorten en vochtgehalten zullen daarom nader moeten worden onderzocht. Bij dat onderzoek kunnen de praktici de bewerkbaarheid beoordelen. Eventueel wordt het in uitvoering zijnde cultuurtechnische werk onder slechte omstandigheden stopgezet. Natuurlijk wordt daarbij gelet op zicht- of voelbare verschijnselen tijdens de bewerking; de grond wordt versmeerd, gaat kleven of wordt bijvoorbeeld sterk verdicht.

De theoretici hebben echter behoefte aan meer algemeen geldige bewerkbaarheidscriteria, omdat hen de feeling ontbreekt om per geval te beslissen. Wanneer de bewerkbaarheid subjectief gewaardeerd is door praktici kan bijvoorbeeld tegelijk het vochtgehalte van de grond objectief worden bepaald.

Bij de vele typen werktuigen hangt de werking echter niet af van het vochtgehalte, maar van bepaalde mechanische eigenschappen die de onderzochte grond bij dat vochtgehalte heeft. Deze mechanische eigenschappen kunnen het best worden onderzocht volgens een standaardmethode waarbij de 'bewerking' zoveel mogelijk overeenkomt met die uit de praktijk. RID (1968) vermeldt enige onderzoeksmethoden, die op mechanische eigenschappen betrekking hebben. In het algemeen is groundbewerking gebaseerd op de uitoefening van krachten. Bij de in deze nota voor te stellen methode wordt het mechanisch gedrag (vervorming onder invloed van krachten) onderzocht door samendrukking van kunstmatige grondmonsters. Deze fundamentele bewerking biedt door drukverandering tevens de mogelijkheid tot variatie in bewerkingsintensiteit

~~door drukverandering~~ (zodat ook reeds enige nabootsing van min of meer intensief werkende werktuigen wordt verkregen).

In de proef geeft de verdichting (vervorming), die ontstaat na iedere belastingsstap (kracht), inzicht in het mechanisch gedrag van de onderzochte grond. De bovengenoemde vervorming zou goed worden weer-gegeven door de afname van het gemiddelde poriënvolume. Belangrijk zijn echter ook de nieuwe grond-water-lucht-verhouding en het aantal luchtgevulde poriën, die ontstaan na drukuitoefening. Daarom wordt in dit geval de verdichting gekarakteriseerd door metingen van de lucht-doorlatendheid.

Uit de proefuitkomsten blijkt, dat het mechanisch gedrag van grond met behulp van de voorgestelde samendrukkingsmethode goed kan worden beschreven. Gelijke proefuitkomsten (doorlatendheden) worden per grondsoort onder gelijke druk en zeer verschillend vochtgehalte gevonden. Door het nog ontbreken van praktijkgegevens kan moeilijk worden nagegaan in hoeverre de methode bruikbaar is bij het bewerkbaarheidsonderzoek. Uit de literatuur is echter een soort absolute bewerkbaarheidsgrens bekend. Zo is de door ATTERBERG (1912) geïntroduceerde uitrolgrens gedefinieerd als het punt, waarbij het plastisch gedrag van een grondpasta juist verloren gaat. Deze consistentiegrens geeft tevens het vochtgehalte aan, waarbij het mogelijk wordt de grond in kleinere eenheden te verdelen en dus doeltreffend te bewerken. De vochtgehalten, behorend bij de uitrolgrens verschillen sterk per grondsoort. Toch blijkt, dat bij die vochtgehalten de proefuitslagen (druk en doorlatendheid) ongeveer overeenkomen. Het predicaat - al dan niet bewerkbaar - kan dus worden gegeven zonder kennis van grondsoort en vochtgehalte. Dat lijkt op het eerste gezicht wat vreemd, maar de proefuitslag hangt immers van het mechanisch gedrag van de grond af. Dit gedrag is juist een gevolg van de combinatie grondsoort-vochtgehalte. Daarom lijkt de testmethode ook van nut bij de opstelling van bewerkbaarheidscriteria. De zogenaamde absolute bewerkbaarheidsgrens (uitrolgrens) wordt met de hand bepaald en is dus onafhankelijk van enig type werktuig.

Aangenomen wordt, dat machines met een bepaalde bewerkingsintensiteit, op iedere grondsoort pas goed werk gaat leveren als die grond een zekere minimale mechanische sterkte heeft. Lichtere werktuigen vereisen een minder sterke grond dan zware. De proefondervindelijk per werktuig vast te stellen noodzakelijke mechanische sterkte kan kwantitatief worden gekarakteriseerd volgens de testmethode.

Zouden praktisch en laboratoriumbewerking qua karakter overeen komen, dan hoort bij ieder werktuig een vaste proefuitslag (een bepaalde combinatie van druk en doorlatendheid). Zonder kennis van grondsoort en vochtgehalte zou op basis van het mechanisch gedrag in het laboratorium het gebruik van een bepaalde machine in de praktijk kunnen worden veroordeeld of getolereerd.

2. KARAKTERISERING VAN HET MECHANISCH GEDRAG

2.a. De grond

In tabel 1 staan enige gegevens vermeld van de onderzochte gronden. De herkomst van de komklei, pikklei, klei, löss en zavel zijn bekend. Het slibgehalte is bepaald of geschat en het humusgehalte is eveneens geschat. Grote verschillen in zwaarte komen voor.

Tabel 1. Enige gegevens van de onderzochte gronden

benaming	herkomst	grondsoort	percen- tage < 16 μ	humus- gehalte
komklei	Ewijk	komkleigrond op rivierterras	75*	10*
pikklei	Oudkarspel	pikkleigrond op zavel	52	3,5*
klei	Godlinze	ondiepe kalkarme lichte klei	33*	1,7*
löss	Eijgelshoven	lössleemgrond	24*	2,0*
zavel	Leens	kalkarme matig lichte zavelgrond	20	1,6*

* geschat

Per grondsoort is de uitgezeefde aggregaatfractie 4,0 - 2,0 mm op het gewenste vochtgehalte gebracht met een buret. Met de aggregaten van een bepaalde vochttrap wordt een Kopecki-ring (inhoud 100 cc) los ingevuld.

2.b. D e s a m e n d r u k k i n g

De kunstmatig bereide monsters worden daarna samengedrukt met een mechanische pers (merk Soiltest-model 500-D). De drukstempels daarvan passen onder en boven precies in de Kopecki-ring en zorgen voor een gelijkmatige tweezijdige samendrukking. Het gehele monster wordt daardoor zo gelijkmatig mogelijk verdicht. De druk is in stappen van meestal 1 kg/cm^2 opgevoerd tot het maximum van $6,66 \text{ kg/cm}^2$. Steeds wordt de bijbehorende zakking gemeten. Uit het drooggewicht en het soortelijk gewicht (voor alle vijf grondsoorten is s.g. 2,60 aangehouden) kunnen dan de gemiddelde poriënvolumina en de gehalten aan water en lucht (in volume %) bij iedere druk worden berekend. Wanneer bij natte monsters water of grond uittreedt via twee aanwezige gaatjes ($\emptyset 2 \text{ mm}$) in de bovenste drukstempel wordt verder persing gestaakt.

2.c. D e d o o r l a t e n d h e i d

De gegevens van poriënvolumina zijn door de grote verschillen in grondsoort moeilijk bruikbaar als criterium (zie hoofdstuk 3.a.). Bekend is, dat ook de doorlatendheid van het grondmonster een indruk geeft van de veranderende grond-water-lucht-verhouding. Meting daarvan door middel van het medium water geeft moeilijkheden door optredende zwel- en krimpverschijnselen, terwijl het monster verder onbruikbaar wordt wegens verandering van het vochtgehalte. Bepaling van de doorlatendheid met behulp van lucht biedt daarentegen de mogelijkheid van een snelle, herhaalbare meting. Ook volgens KIRKHAM (1959) heeft de bodemstructuur een grote invloed op de luchtdoorlatendheid. In dit geval kan de doorlatendheid na iedere belastingsstap worden gemeten aan hetzelfde monster, mits de uitdroging te verwaarlozen is. Voor deze metingen is gebruik gemaakt van het apparaat volgens KMOCH (1962). Daarbij laat men een bekend volume lucht onder bekende druk door het grondmonster stromen. De hiervoor benodigde tijd wordt gemeten. Uit deze gegevens kan de waarde van de doorlatendheid worden berekend. Vermeld is de zogenaamde

intrinsieke permeabiliteit, een waarde die onafhankelijk is van de aard van de doorgestroomde materie.

Er is gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$K^1 = \frac{V}{P} \times \frac{\eta}{A} \times \frac{1}{t}$$

waarin: K^1 = intrinsieke permeabiliteit (doorlatendheid), in μ^2
($\text{cm}^2 \times 10^{-8}$)

V = volume van de doorgestroomde lucht, in cm^3 bekende ge-

P = druk van de lucht in de gashouder, in dyne/cm^2 gevens bij het apparaat.

η = viscositeit van de lucht, in dyne sec/cm^2
(bedraagt in dit geval bij 25°C $189,51 \times 10^{-6}$ dyne sec/cm^2)

A = doorsnede van het monster in cm^2
(bedraagt bij Kopecki-ringen 20 cm^2)

l = lengte van het grondmonster, in cm
(bekend uit de gemeten zakking)

t = tijd, benodigd voor doorstroming, in sec
(automatisch gemeten met behulp van een stophorloge)

Voor een beoordeling van de proefuitkomsten werd gebruik gemaakt van onderstaande klassificatie (BRUGGENWERT, 1966).

Klasse	Intrinsieke doorlatendheid - K^1 ($\text{cm}^2 \times 10^{-10}$)
zeer langzaam	< 3
langzaam	3 - 15
matig langzaam	15 - 60
matig	60 - 170
matig snel	170 - 350
snel	350 - 700
zeer snel	> 700

Er wordt wel aangenomen (KMOCH, 1962), dat slechts de luchtgevulde porien met een equivalente doorsnede $> 50 \mu$ meedoen aan de doorlatendheid. Dat zou betekenen, dat bij toename van de zuigspanning boven 60 cm , overeenkomend met een pF waarde 1,77, geen vergroting van de luchtdoorlatendheid meer optreedt.

3. PROEFRESULTATEN

3.a. Algemeen

Ook in een kunstmatig grondmonster, opgebouwd uit aggregaten, komen in het algemeen de drie componenten grond, water en lucht voor. Bij belasting van relatief korte duur kan de grond maximaal worden verdicht tot het volume dat wordt ingenomen door de vaste en vloeibare componenten. De grond is dus te verdichten zolang er met lucht gevulde poriën aanwezig zijn; voor uitpersing van water is een veel langere belastingduur nodig. Bij verdichting blijven de hoeveelheden grond en water gelijk, maar de grond-water-luchtverhouding verandert door de zakking van de stempels. De proefuitkomsten van de samendrukking en de gemeten luchtdoorlatendheid worden in grafiekvorm weergegeven.

Ter orientatie zijn in de grafieken a.1. en a.2. (bijlagen a.1. en a.2.) voor respectievelijk komklei en zavel eerst de relaties druk-poriënvolume weergegeven bij verschillende vochtgehalten. Komklei is in droge toestand tamelijk hard en sterk waardoor het gemiddeld poriënvolume bij oplopende druk hoog blijft (grafiek a.1.). Bij hoog vochtgehalte is de weerstand tegen samendrukking gering. Maximale verdichting kan echter niet optreden, omdat reeds bij een lage druk het nog hoge percentage poriën geheel met water is gevuld. Het beeld van de zavel (grafiek a.2) komt met dat van komklei overeen; de bereikte poriënvolumina liggen echter op een veel lager niveau. Voor beide gronden is er tussen de droge en natte toestand een 'optimaal' vochtgehalte, waarbij een constante druk de grootste verdichting tot gevolg heeft.

Uit bovenstaande blijkt, dat het gemiddelde poriënvolume op zichzelf geen goede maat is voor de weerstand tegen samendrukking. Daarom werd het samendrukkingseffect nagegaan door middel van luchtdoorlatendheidsmetingen.

3.b. De relatie druk - doorlatendheid

Nadat per grondsoort de monsters van verschillend vochtgehalte zijn samengedrukt in stappen van meestal 1 kg/cm^2 , is de luchtdoorlatendheid gemeten. De resultaten zijn per grondsoort in de grafiekenserie b.1. t/m b.5. weergegeven (zie overeenkomstige bijlagen). De berekende intrinsieke doorlatendheid is logaritmisch tegen de druk uitgezet,

waardoor de curven, behorende bij de verschillende vochtgehalten (uitgedrukt in gew. %) rechte lijnen benaderen. De klassificatie is op de doorlatendheids-as aangegeven. Bij alle grondsoorten zorgen de opeenvolgende vochttrappen voor een soort waaiervorm. De luchtdoorlatendheid is dus inderdaad een gevoelige maat voor de ontstane verdichting. Het is niet onwaarschijnlijk, dat die waaiers bij een druk van 0 kg/cm^2 in één punt zouden samenkomen (bijvoorbeeld voor $K^1 = 2000 \text{ } 000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$).

In natte en droge toestand zal de luchtstroom immers voornamelijk gaan door de interaggregaatporiën, waarvan aantal en grootte vooral afhangen van de afmetingen van de ingevulde fractie. Bij zeer snelle en matige doorlatendheid (< 100 en $> 10 \text{ } 000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$) wordt de tijdmeting van het apparaat onnauwkeurig, waardoor bovenstaande suggestie niet te controleren is. Het absolute vochtgehalte-niveau van overeenkomstige curven in de waaiër is sterk afhankelijk van de grondsoort.

Bij komklei (b.1) verloopt de lijn van 16,1 gew. % bijna horizontaal; bij een druk van $2,0 \text{ kg/cm}^2$ is de doorlatendheid $140 \text{ } 000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ en onder de veel hogere druk van $6,0 \text{ kg/cm}^2$ bedraagt de doorlatendheid nog $37 \text{ } 000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$. Komklei is in droge toestand dus erg hard en vrijwel ongevoelig voor drukuitoefening. Bij meer vochtige grond gaan de curven schuiner lopen. Bij het vochtgehalte van 29,6 % is de doorlatendheid bij $2,0 \text{ kg/cm}^2$ $10 \text{ } 000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ en bij bijna datzelfde vochtgehalte namelijk 30,9 % is onder een druk van $6,0 \text{ kg/cm}^2$ de doorlatendheid tot $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ gedaald. Op genoemd vochtgehalte-niveau wordt de grond dus veel drukgevoeliger. Deze tendens is in versterkte mate zichtbaar bij de natste curven links, die vrijwel verticaal lopen.

Bij pikklei (b.2) lopen de lijnen, behorende bij de droogste vochttrappen (bijvoorbeeld die van 14,4) minder vlak dan bij komklei en ligt het doorlatendheidsniveau beneden de $100 \text{ } 000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$. De schuinlopende lijn, behorend bij het vochtgehalte 30,9 % gaat bijna door de punten, die worden bepaald door drukken van $2,0$ en $6,0 \text{ kg/cm}^2$ bij doorlatendheden van respectievelijk $10 \text{ } 000$ en $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$. Verder vertonen de zwaarste gronden, komklei en pikklei, sterke gelijkenis. De lichtere gronden wijken enigzins af. De zavel (b.5) kan voor deze groep als voorbeeld dienen.

De lijn, behorend bij de droogste vochttrap (6,2 %) loopt reeds tamelijk schuin. In droge toestand (6,2 %) blijven de aggregaten blijkbaar zachter en is de grond reeds wat drukgevoelig. De lijnen vertonen

echter enige ronding, wat bijvoorbeeld voor het vochtgehalte van 6,2 % het volgende effect heeft. Bij een druk van 2,0 kg is de doorlatendheid $10\ 000\ \text{cm}^2 \times 10^{-10}$; als gevolg van de oplopende druk tot 6,0 kg daalt dan de doorlatendheid echter niet tot ca $100\ \text{cm}^2 \times 10^{-10}$ (zoals in bovenstaande gevallen) maar slechts tot $600\ \text{cm}^2 \times 10^{-10}$. Pas de lijn behorend bij het vochtgehalte 15,4 % gaat door het punt ($6,0\ \text{kg/cm}^2 - 100\ \text{cm}^2 \times 10^{-10}$). De rechte lijnen van de nattere linkerkant lopen eveneens vrijwel verticaal. Voor de andere gronden (klei en löss) geldt bovenstaande in iets mindere mate. In de linker beneden hoeken staan bij alle grondsoorten de 'natte' curven. Reeds bij geringe druk wordt water uitgeperst, waarna de doorlatendheidsmeting onbetrouwbaar wordt. Op die curven is het uitpersingsmoment aangegeven. Bij iets minder natte curven wordt bij hogere druk veelal tegelijk grond uitgeperst door de aanwezige gaatjes. Iets lagere doorlatendheidswaarden zijn in die gevallen nog betrouwbaar. In dit vochtgehalte traject zijn de gronden dus kneedbaar geworden. Hierop wordt nader teruggekomen in hoofdstuk 3.d.

3.c. Overzicht van de onderzochte grondsoorten

Per grondsoort kan een overzicht van de vochtgehaltewaaiers (grafiekenserie b) worden gegeven door de vochttrappen steeds te vergelijken bij eenzelfde druk van bijvoorbeeld $2,0\ \text{kg/cm}^2$. In principe is de grafiekenserie b reeds op eenzelfde manier besproken in hoofdstuk 3.b. Bij de vrij lage druk van $2,0\ \text{kg/cm}^2$ worden zoveel mogelijk vochttrappen bij de doorsnijding geraakt en in het vochtgehalte-overzicht betrokken. Ook kunnen de vochtgehaltewaaiers worden bekeken in de situatie van gelijke doorlatendheid (bijvoorbeeld $100\ \text{cm}^2 \times 10^{-10}$). Ook dit is reeds voor enkele punten gedaan onder hoofdstuk 3.b. In grafiek c.1. zijn de resultaten samengevat van de doorsnijding volgens een constante druk van $2,0\ \text{kg/cm}^2$. Steeds is bij een druk van $2,0\ \text{kg/cm}^2$ de luchtdoorlatendheid werkelijk gemeten tijdens de samendrukkingsproef. Ook zonder de grafiekenserie b had grafiek c.1. opgebouwd kunnen worden uit de vier gegevens; grondsoort - vochtgehalte - druk - doorlatendheid. In grafiek c.1. zijn onder constante druk ($2,0\ \text{kg/cm}^2$) de bijbehorende doorlatendheden per grondsoort weer logaritmisches uitgezet tegen het vochtgehalte.

Bij de zware gronden komklei en pikklei bestaat er een vrijwel lineair verband tussen het vochtgehalte en de logaritme van de doorlatendheid. De curven van de lichtere gronden löss en zavel hebben duidelijke buigpunten; in dat vochttraject geeft de druk van $2,0 \text{ kg/cm}^2$ bij oplopend vochtgehalte slechts een geringe daling van de doorlatendheid. Het effect van de in die vochtgehaltewaaiers voorkomende gebogen en rechte lijnen wordt hier duidelijk gedemonstreerd. De curve van de klei is geknikt en neemt een tussenpositie in. De vochtgehalten bij hoge en lage doorlatendheid (bijvoorbeeld $10\ 000$ en $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$) en uiteraard constante druk van $2,0 \text{ kg/cm}^2$ zijn per grondsoort erg verschillend, evenals de vochttrajecten daartussen.

In tabel 2 zijn de vochtgehalten per grondsoort vermeld, die nodig zijn om bij een druk van $2,0 \text{ kg/cm}^2$ bovengenoemde hoge en lage doorlatendheden te vertonen. Zoals reeds genoemd kunnen de vochtgehaltewaaiers (grafieken serie b) ook worden bekeken in een situatie van gelijke doorlatendheid in plaats van gelijke druk. Bij de samendrukkingsproeven is de druk 'de oorzaak' van de verdichting en de doorlatendheid 'het gevolg' daarvan. De lijn van constante doorlatendheid $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ is in alle vijf vochtgehaltewaaiers (grafiekenserie b) getrokken. Op het snijpunt van deze doorlatendheidslijn met iedere vochtgehaltelijn uit de waaier moet dus de bijbehorende druk worden afgelezen. In grafiek 2.c zijn bij constante doorlatendheid de gevonden druk-vochtgehalte combinaties per grondsoort weergegeven. De ontstane curven zijn geen van alle recht, maar hebben wel een tamelijk regelmatig verloop. Deze curven kunnen worden gebruikt bij het interpoleren van tussenliggende lijnen in de vochtgehaltewaaiers (grafiekenserie b). Voor een bekende grondsoort kan bij een gewenst vochtgehalte de bijbehorende druk in grafiek c.2 worden afgelezen. De gevonden vochtgehalte-drukcombinatie geeft op de lijn van constante doorlatendheid $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ in de waaier (grafiekenserie b) reeds één ~~combinatie~~ **PUNT** van de gezochte vochtgehalte lijn. Op de beschreven manier zijn de lijnen van het uitrolgrens-vochtgehalte in de waiers gebracht (hoofdstuk 3.d). Ook nu weer blijkt uit grafiek c.2, dat bij hoge en lage druk (bijvoorbeeld $2,0$ en $6,0 \text{ kg/cm}^2$) bij uiteraard constante doorlatendheid $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ de bijbehorende vochtgehalten erg verschillen en de vochttrajecten eveneens.

In tabel 2 zijn enige gegevens daaromtrent vermeld.

Tabel 2. De vochtgehalten (gew. %), behorend bij de aangegeven combinaties van druk en doorlatendheid

kolom nr	constante druk 2 kg/cm ²			constante doorlatendheid 100 cm ² x 10 ⁻¹⁰			verschil kolommen nrs 5-2	uit- rel- grens	pF 2,0 bij por. vol. 50 %
	doorlatendheid		vocht- gehalte traject	d r u k		vocht- gehalte traject			
	100 cm ² x 10 ⁻¹⁰	10000 cm ² x 10 ⁻¹⁰		2,0 kg cm ²	6,0 kg cm ²				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
komklei	46,0	29,6	16,4	46,0	30,7	16,3	1,1	41,7	42,5
pikklei	25,5	21,3	4,2	25,5	21,0	4,5	-0,3	25,8	27,0
klei	22,1	14,0	8,1	22,1	17,2	4,9	3,2	21,6	23,9
löss	20,3	7,5	12,8	20,3	16,8	3,5	9,3	21,0	20,7
zavel	21,6	6,2	15,4	21,6	15,2	6,4	9,0	23,2	21,8

In de rechter helft van tabel 2 is bij een constante doorlatendheid van $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ onder andere het vochtgehaltetraject tussen de drukken 2,0 en 6,0 kg/cm² aangegeven. Uiteraard komen de kolomnummers 1 en 4 met elkaar overeen, daar ze gelden voor dezelfde combinatie druk-doorlatendheid. Voor komklei en pikklei komen ook de vochtgehalten uit de kolommen 2 en 5 (en daarmee ook van 3 en 6) vrijwel met elkaar overeen. Deze gronden voldoen bij hetzelfde vochtgehalte aan beide over de kolomnummers 2 en 5 aangegeven combinaties van druk en doorlatendheid. In de grafieken b.1 en b.2 lopen de curven met vochtgehalten van respectievelijk 30, 9 en 20, 9 gew. % dan ook vrijwel door de genoemde punten (zie hoofdstuk 3.b). Bij klei, löss en zavel worden de verschillen tussen de vochtgehalten van de kolommen 2 en 5, vermeld in kolom 7, steeds groter. Voor zavel is in hoofdstuk 3.b reeds besproken, dat voor het vochtgehalte 6,2 % een druk van 6,0 kg/cm², een doorlatendheid geeft van $600 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ en dat het vochtgehalte mag oplopen tot 15,4 % eer de doorlatendheid daalt tot $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$. Tabel 2 bevat dan ook weinig nieuwe gegevens, maar kon pas nauwkeurig worden samengesteld op basis van de grafieken c.1 en c.2.

3.d. Mechanisch gedrag bij de uitrolgrens

Zoals bijvoorbeeld uit tabel 2 en grafiek c.2 blijkt worden gelijke proefuitkomsten in de vorm van een combinatie druk-doorlatendheid per

grondsoort bij geheel verschillende vochtgehalten verkregen. Beoordeling van het vochtgehalteniveau is echter pas mogelijk bij een per grondsoort vergelijkbare situatie. Zo verschillen de vochtgehalten bij de uitrolgrens en bij p_f 2,0 (vermeld in tabel 2) eveneens sterk per grondsoort. In dit geval is het interessant de proefuitkomsten, behorend bij het vochtgehalte van de uitrolgrens te vergelijken. Bij dat vochtgehalte immers zijn de gronden juist niet meer in plastische toestand en beginnen 'bewerkbaar' te worden. De uitrolgrens wordt bepaald door de grondpasta met de hand te rollen over een poreuze ondergrond. Valt de cylinder uiteen of komen er scheuren in, dan is de uitrolgrens bereikt. Door het subjectieve karakter van deze methode liggen de per persoon bepaalde vochtgehalten soms wel enkele procenten uit elkaar. De door één persoon in duplo bepaalde vochtgehalten (vermeld in tabel 2, kolom 8) zijn in grafiek c.2 aangegeven. Door interpolatie met behulp van genoemde grafiek konden ook de lijnen op het juiste vochtgehalte van de uitrolgrens in de waaiers van de grafiekenserie b met stippellijnen worden geschetst. Genoemde lijnen komen bij een druk van ca $2,0 \text{ kg/cm}^2$ beneden de doorlatendheid $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$. De drukvariatie loopt daarbij van $1,4$ tot $2,7 \text{ kg/cm}^2$, zoals het duidelijk uit grafiek c.2 blijkt. In tabel 2 wijken de vochtgehalten van kolom 4 (doorlatendheid $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$, druk $2,0 \text{ kg/cm}^2$) dan ook weinig af van die uit kolom 8 (uitrolgrens). De positie van de 'uitrolgrenscurven' in de grafiekenserie b is steeds ongeveer dezelfde. Naar verwachting blijkt de uitrolgrenscurve steeds in de buurt te liggen van één van de curven, waarbij tussen $2-3 \text{ kg/cm}^2$ water en/of grond wordt uitgeperst (vergelijk hoofdstuk 3.b) en de grond kneedbaar wordt. In dit geval zijn de mechanische eigenschappen gekwantificeerd bij de absolute bewerkbaarheidsgrens, de zogenaamde uitrolgrens.

Steeds was de uitslag ongeveer gelijk en lag in de buurt van de druk-doorlatendheid combinatie $2,0 \text{ kg/cm}^2 - 100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$. De standaard methode lijkt het grote voordeel te hebben, dat de proefuitslag niet afhangt van de grondsoort of het vochtgehalte, maar van mechanische eigenschappen, die behoren bij de onderzochte combinatie grondsoort-vochtgehalte.

3.e. D i s c u s s i e

Met behulp van de voorgestelde methode kan het mechanisch gedrag van de grond goed worden beschreven. De proefuitkomsten zijn per grondsoort sterk afhankelijk van het vochtgehalte. Ook lijken de proefuitslagen

bruikbaar bij de opstelling van bewerkbaarheidscriteria; de uitslagen stemmen per grondsoort vrijwel overeen als deze gronden worden onderzocht bij vochtgehalten behorend bij een vergelijkbare situatie (bijvoorbeeld de bewerkbaarheidsgrens). De opstelling van een zeer eenvoudig criterium wordt gesuggereerd.

Na veel praktijkonderzoek kan blijken, dat bijvoorbeeld bulldozers steeds pas naar behoren gaan werken als de grond een zekere minimale sterkte heeft. In de proef wordt de mechanische sterkte gegeven in de vorm van druk-doorlatendheidscombinatie. Worden de uitslagen steeds bij dezelfde doorlatendheid (bijvoorbeeld $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$) gegeven, dan is vermelding van de druk voldoende. Zware werktuigen zullen pas goed gaan functioneren als in de proef bij een hoge druk de doorlatendheid $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ wordt bereikt. Lichtere werktuigen eisen een minder sterke grond; in de proef mag de doorlatendheid $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ reeds onder invloed van een lage druk worden bereikt. De bepaling van één lijn uit de waaier op het actuele vochtgehalte is voldoende. Het snijpunt van deze vochtgehalte-lijn met de horizontale druk-(en tevens werktuigen)lijn geeft aan welk werktuig in de gegeven situatie mag worden gebruikt. Bovenstaande suggestie gaat alleen op, als de bewerking, zoals die in de praktijk bij vele werktuigen voorkomt, steeds goed wordt nagebootst bij de samendrukkingsproef. Alhoewel het onwaarschijnlijk lijkt, dat allerlei verschijnselen als versmering en dergelijke door druk uitoefening kunnen worden nagebootst geeft de methode ook bij opstelling van criteria toch mogelijkheden. Immers het mechanisch gedrag volgens de proef en het werktuigeffect in het veld hangen beide van ongeveer dezelfde mechanische eigenschappen af.

4. DE DOORLATENDHEID IN AFHANKELIJKHEID VAN PORIËNVOLUME EN LUCHTGEHALTE

4.a. A l g e m e e n

De vervorming die door samendrukking ontstaat, wordt goed weergegeven door de afname van het gemiddelde poriënvolume. De verdichting kan alleen ontstaan ten koste van het luchtgehalte. De gemeten luchtdoorlatendheid zal op de een of andere wijze samenhangen met het poriënvolume en het luchtgehalte. Deze gegevens konden naderhand redelijk goed worden berekend uit de gemeten zakkingen van de drukstempels. Zakkingen $< 0,5 \text{ mm}$ zijn echter niet meer nauwkeurig en dus bijbehorende (geringe) verschillen

in poriënvolume en luchtgehalte evenmin. Als gevolg hiervan verlopen de lijnen in de te bepalen grafieken soms minder vloeiend. Voor alle vijf grondsoorten zijn de relaties doorlatendheid-poriënvolume en doorlatendheid-luchtgehalte respectievelijk weergegeven in de grafieken-series d en e. Wanneer in grafiekvorm puntenzwermen ontstaan zijn steeds alle vochtgehalten overeenkomstig grafiekenserie b weergegeven. Wanneer het verband minder nauw is, is een selectie uit de vochtgehalten van serie b gedaan. Door het trekken van lijnen van gelijk vochtgehalte en gelijke druk konden zodoende de afzonderlijke punten verduidelijkt worden.

4.b. H e t p o r i ë n v o l u m e

Bij de komklei (grafiek d.1) bestaat er een slecht verband tussen de doorlatendheid en het poriënvolume. Per vochttrap echter geeft verhoging van het gemiddelde poriënvolume een duidelijk lagere doorlatendheid. De curven per vochttrap liggen dakpansgewijs over elkaar; rechts de nattere en links de drogere grond. Enkele lijnen van gelijke druk zijn ter oriëntatie geschetst. Een bepaalde doorlatendheid kan voorkomen bij poriënvolumina die ca 10 % uit elkaar liggen. Poriënvolumina < 50 % zijn niet bereikt (vgl. grafiek a.1). Bij een doorlatendheid $1000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ ligt het centrum van de curvenband op een poriënvolume van ca 58 %. Bij de iets minder zware pikklei (grafiek 2.d) komt het beeld met dat van komklei overeen. Het poriënvolume-traject voor bijvoorbeeld een doorlatendheid $1000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ is versmald tot ca 5 %, terwijl het centrum daar ligt op ca 46,5 % poriën.

Bij de lichtere gronden (grafieken d.3, d.4 en d.5) ontstaat vooral bij iets hogere poriënvolumina en doorlatendheden een smalle puntenzwerm; tussen beide grootheden bestaat een uitgesproken verband, onafhankelijk van het vochtgehalte. Bij een doorlatendheid van $1000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ bedragen de poriënvolumina voor klei, löss en zavel respectievelijk 44, 43 en 46 %. Met uitzondering van komklei komen gelijke doorlatendheden dus bij ongeveer overeenkomstige poriënvolumina voor.

4.c. H e t l u c h t g e h a l t e

Vooraf bij iets hogere luchtgehalten is er bij komklei en pikklei een duidelijke relatie tussen de doorlatendheid (logaritmisch uitgezet) en het luchtgehalte (grafieken e.1 en e.2).

Doorlatendheden van $1000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ komen voor bij luchtgehalten van respectievelijk 22 en 19 %. Bij de drie lichtere gronden klei, löss en zavel lopen per grondsoort de lijnen per vochttrap parallel; droge gronden rechts, nattere links. Enkele lijnen van gelijke druk zijn ingetekend. Het luchtgehalte-traject bijvoorbeeld ter hoogte van een doorlatendheid $1000 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ wordt steeds breder en bedraagt voor klei, löss en zavel respectievelijk 14, 24 en 26 %; de centra ervan komen voor bij luchtgehalten van respectievelijk 21, 24 en 25 % en wijken dus weinig af. Vergelijking van de grafiekenseries d en e laat zien dat deze elkaar aanvullen. Wordt de duidelijkste relatie gevonden tussen doorlatendheid en poriënvolume, dan is het verband tussen doorlatendheid en luchtgehalte voor dezelfde grond (in dit geval zavel) tegelijkertijd het slechtst. Bovenstaande geldt ook voor de andere lichtere gronden klei en löss, maar iets minder uitgesproken. De zwaardere gronden komklei en pikklei tonen juist een omgekeerd beeld; ze geven een goede relatie doorlatendheid-luchtgehalte te zien en een slecht verband doorlatendheid-poriënvolume. De gesignaleerde verschillen in gedrag per grondsoort zouden af kunnen hangen van verschillen in spanningsverdeling onder de stempels. Daardoor wordt dan het monster ongelijkmatig verdicht met de grootste dichtheid bijvoorbeeld juist onder het stempel. Het poriënvolume en luchtgehalte ter plaatse wijken dan af van de gemiddelde waarden, terwijl de mogelijke doorlatendheid voor lucht toch grotendeels wordt bepaald door de dichtere zones in het monster. Een bevredigende verklaring kan op deze manier echter nog niet worden gegeven.

5. SAMENVATTING

Bij het onderzoek omtrent verschillende uitvoeringsalternatieven zal het mechanisch gedrag van de grond ook kwantitatief gekarakteriseerd moeten worden. Een methode, die het mechanisch gedrag (vervorming onder invloed van krachten) niet alleen kwalitatief, maar ook in objectieve cijfers weergeeft, is niet bekend. Daarom wordt voorgesteld, de weerstand tegen samendrukking te meten met de doorlatendheid voor lucht als criterium, in plaats van bijvoorbeeld het gemiddeld poriënvolume (grafieken a.1 en a.2).

De luchtdoorlatendheid blijkt een gevoelige maat voor de verandering in de grond-water-luchtverhouding te zijn. In de betreffende proefuitkomsten (grafiekenserie b) is de luchtdoorlatendheid omgerekend op de zogenaamde intrinsieke permeabiliteit (doorlatendheid). De vochtgehalte trajecten verschillen per grondsoort sterk bij constante druk (grafiek c.1). De standaard-test-methode geeft een goede indruk van het mechanisch gedrag van de grond. De proefuitkomsten hangen niet af van de grondsoort en het vochtgehalte, maar van mechanische eigenschappen, die daarvan het gevolg zijn, zoals uit het volgende blijkt.

Curven op het vochtgehalte van de uitrolgrens (de uiterste bewerkbaarheidsgrens) geven bij een druk van ca. $2,0 \text{ kg/cm}^2$ (drukvariatie van $1,4$ tot $2,7 \text{ kg/cm}^2$) een doorlatendheid $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$ (grafiek c.2). De geschetste uitrolgrenscurven nemen in de waaiers van de grafiekenserie b ongeveer dezelfde positie in. De testmethode geeft per grondsoort dus ongeveer gelijke uitslagen, wanneer deze gronden worden beproefd bij vochtgehalten, die behoren bij vergelijkbare situaties. In dit geval is daarvoor gekozen een consistentiegrens (uitrolgrens), die tevens wordt beschouwd als uiterste bewerkbaarheidsgrens. De methode lijkt daarom geschikt voor de opstelling van bewerkbaarheidscriteria. De kans bestaat immers, dat ook bij andere consistenties de proefuitslag ongevoelig is voor grondsoort- en vochtgehalteverschillen. Ter verduidelijking het volgende:

Het is aannemelijk, dat bepaalde werktuigen op verschillende grondsoorten gelijke minimale eisen stellen aan de mechanische weerstand. Na praktijkonderzoek zou kunnen blijken, dat het effect van werktuigen met een hoge bewerkingsintensiteit in de laboratoriumproef kan worden nagebootst door een hoge druk (als de doorlatendheid constant wordt gehouden op bijvoorbeeld $100 \text{ cm}^2 \times 10^{-10}$). Door drukvariatie zouden alle werktuigtypen kunnen worden nagebootst. Bij lichtere werktuigen behoort een geringere druk, bij zwaardere of intensiever werkende een hogere druk. In een gegeven situatie is de bepaling van één curve uit de waaiër van grafiekenserie b voldoende; het snijpunt met de horizontale druk- (tevens werktuig!) as geeft reeds aan of er met het gebruikte werktuig in de gevarenszone wordt gewerkt. Slechts als het mechanisch gedrag volgens de proef en het werktuig effect in het veld bij vele intensiteiten afhangen van dezelfde mechanische eigenschappen, is bovenstaande suggestie juist.

De kans is echter groot, dat bewerkingscriteria toch afhankelijk gesteld zullen moeten worden van grondsoorten, omdat niet alle werktuigeffecten uit de praktijk nagebootst kunnen worden door middel van drukuitoefening, (waarop de samendrukkingsproef berust.). Bij de meting van de weerstand tegen samendrukking is als criterium de doorlatendheid voor lucht gekozen in plaats van het gemiddelde poriënvolume of het luchtgehalte. De samenhang tussen de drie genoemde grootheden wordt weergegeven in de grafiekenseries d en e. Bij zwaardere gronden komklei en pikklei is er een nauw verband tussen doorlatendheid en luchtgehalte; bij de lichtere gronden klei, löss en zavel tussen doorlatendheid en poriënvolume (vooral bij iets hogere waarden van beide grootheden). Voor dit verschil in gedrag kon nog geen bevredigende verklaring worden gegeven. Geconcludeerd kan worden, dat de voorgestelde methode goed bruikbaar kan zijn bij kwantitatieve karakterisering van het mechanisch gedrag van de grond; bewerkbaarheidscriteria kunnen pas na praktijkonderzoek worden opgesteld.

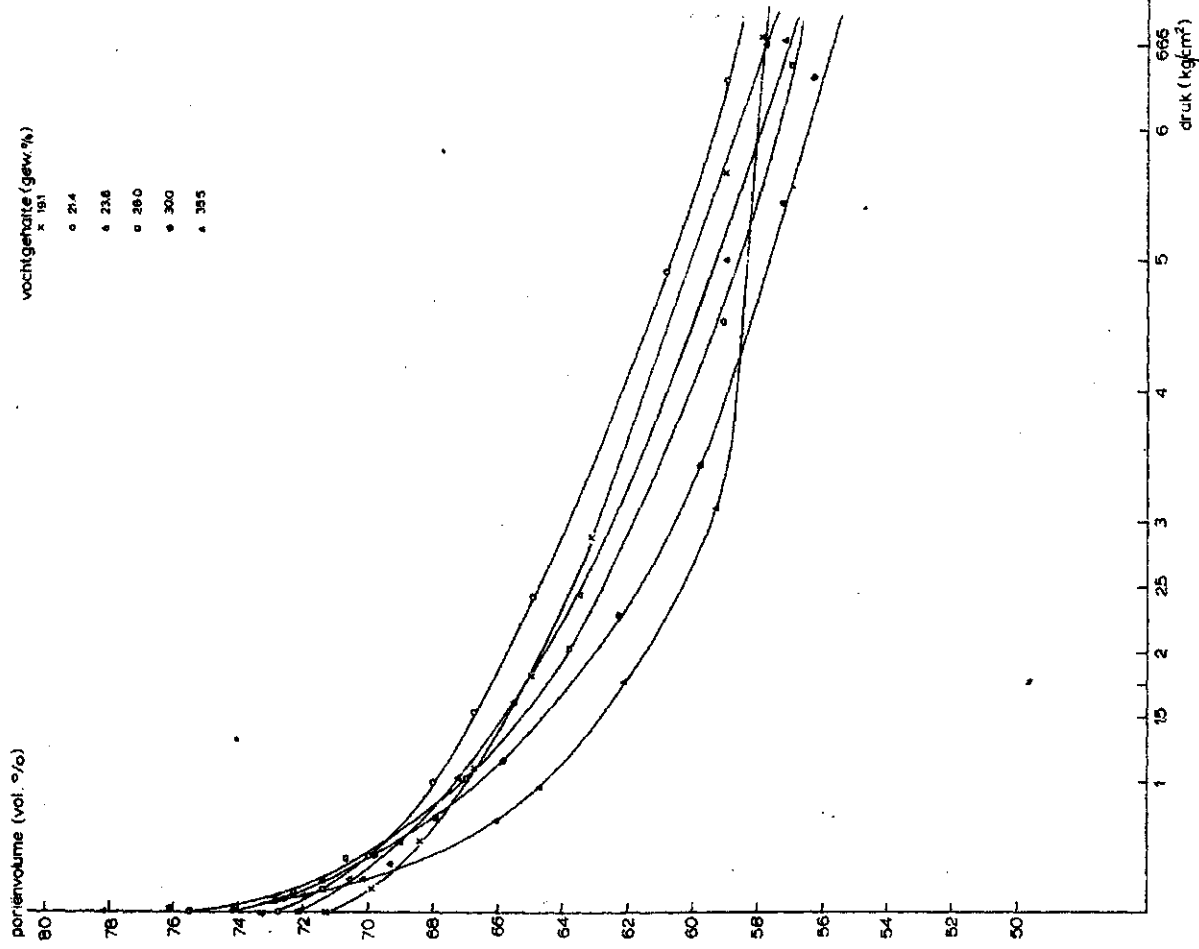
6. LITERATUUR

- ATTERBERG, A. Die Konsistenz und die Bindigkeit der Boden. Intern. Mitt. Bodenk. 2 (1912)
- BRUGGENWERT, M.G.M. e.a. Algemene bodenkunde. Handleiding kandidaats practicum, Landbouwhogeschool, Wageningen (1966)
- KIRKHAM, Don. e.a. Air permeability at the field capacity as related to soil structure and yields. Med. van de Landbouwhogeschool en de Opzoekingsstations van de staat in Gent. Deel XXIV (1959) blz. 377-391
- KMOCH, H.G. Die Luftdurchlässigkeit des Bodens. Berlin (1962)
- RID, H. en U. Mittel. Ergebnisse physikalischer Untersuchungen an schweren Böden der Fränkischen Trias. Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch Sonderheft 3 (1968) blz. 33-52

Die Entwicklung der Wirtschaft in der DDR ist durch die
 Umstrukturierung des Volkswirtschaftlichen Gesamtsystems
 gekennzeichnet. Infolge der Reformen sind die
 Produktionsbedingungen für die Betriebe deutlich
 verbessert worden. Die Ertragsabhängigkeit der
 Betriebe hat zu einer Steigerung der
 Wirtschaftlichkeit und der Produktivität
 geführt. Die Investitionen in die
 Volkswirtschaft sind in den letzten
 Jahren stark gestiegen, was die
 Modernisierung der Produktionsanlagen
 ermöglicht hat. Die Entwicklung der
 Wirtschaft in der DDR ist insgesamt
 positiv zu bewerten.

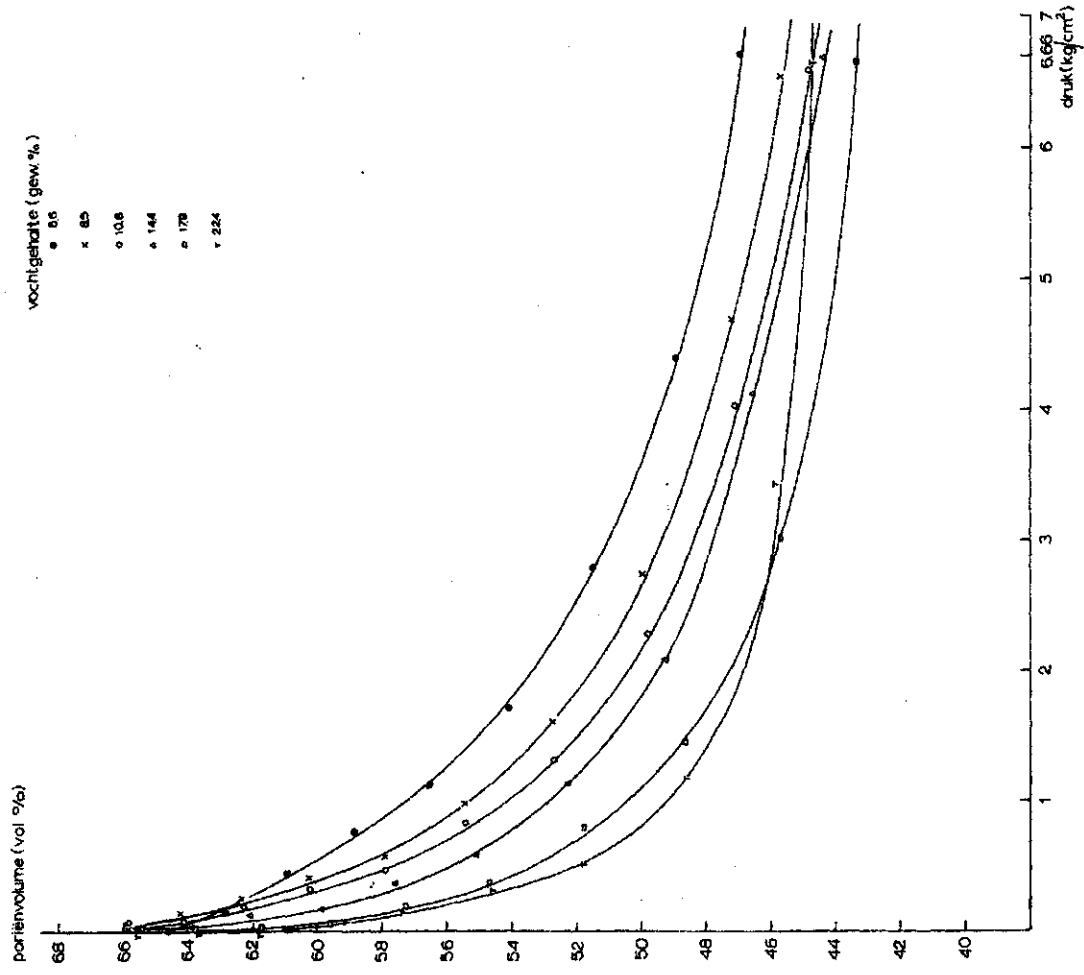
Relatie druk - poriërvolume voor klinkiet

bijl.a1

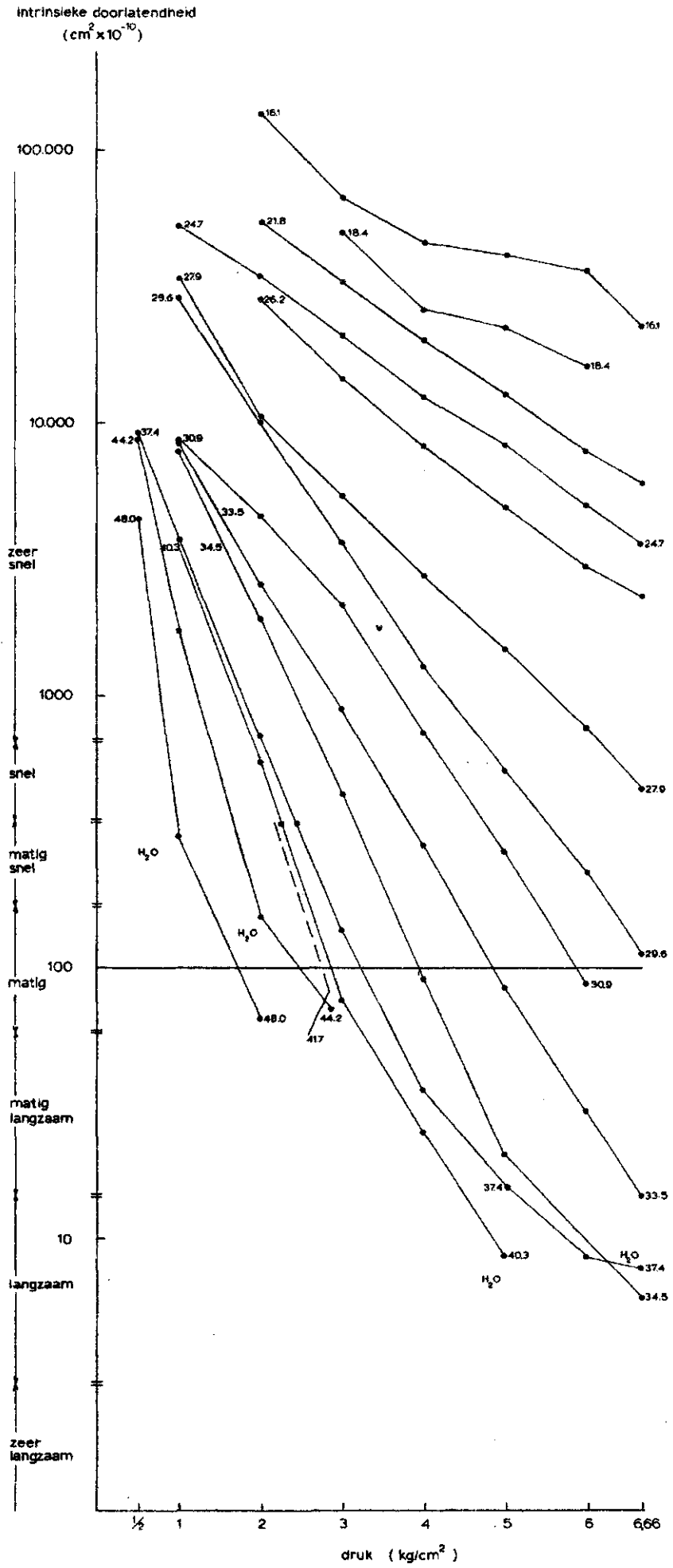


Relatie druk - poriërvolume voor zavel

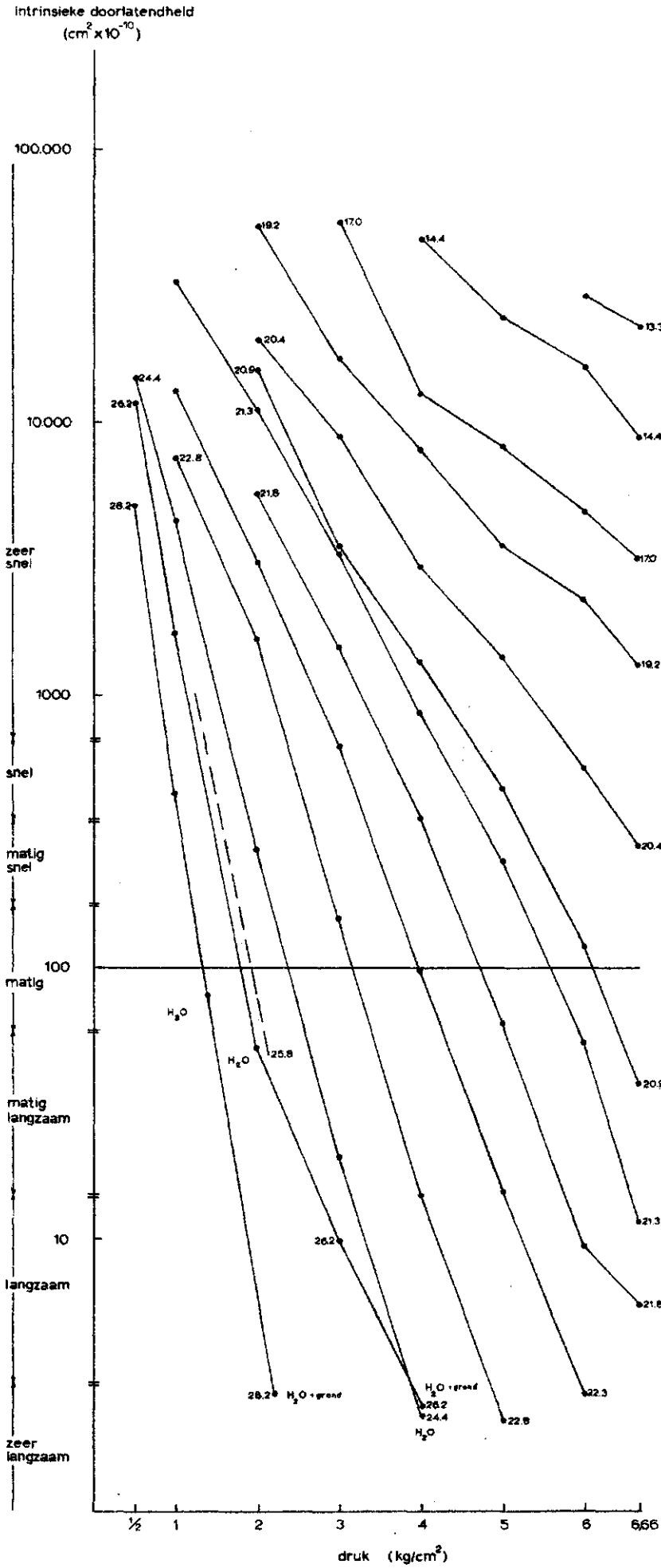
bijl.a2

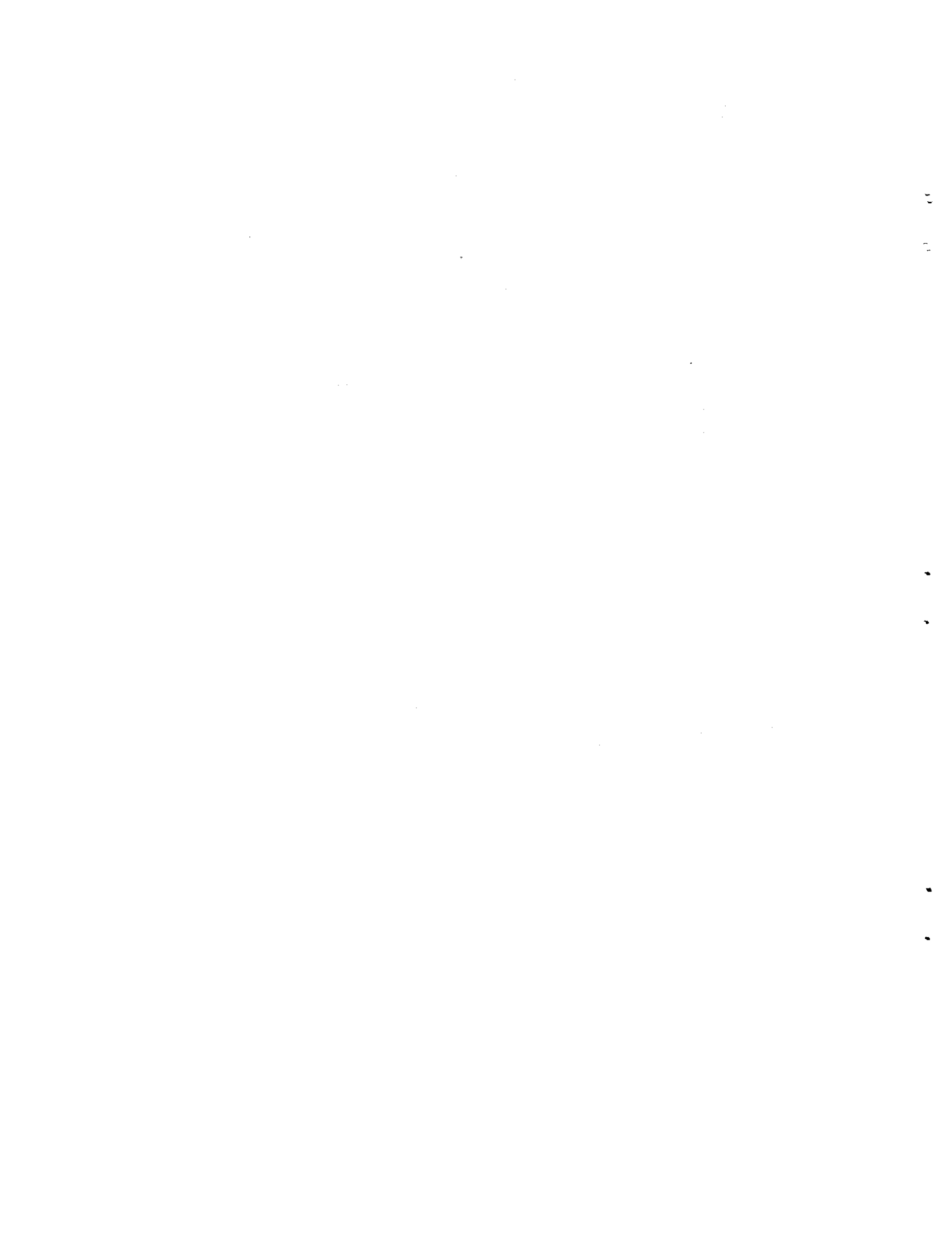


Relatie doorlatendheid-druk voor komklier
bij verschillende vochtgehalten (gew. %)

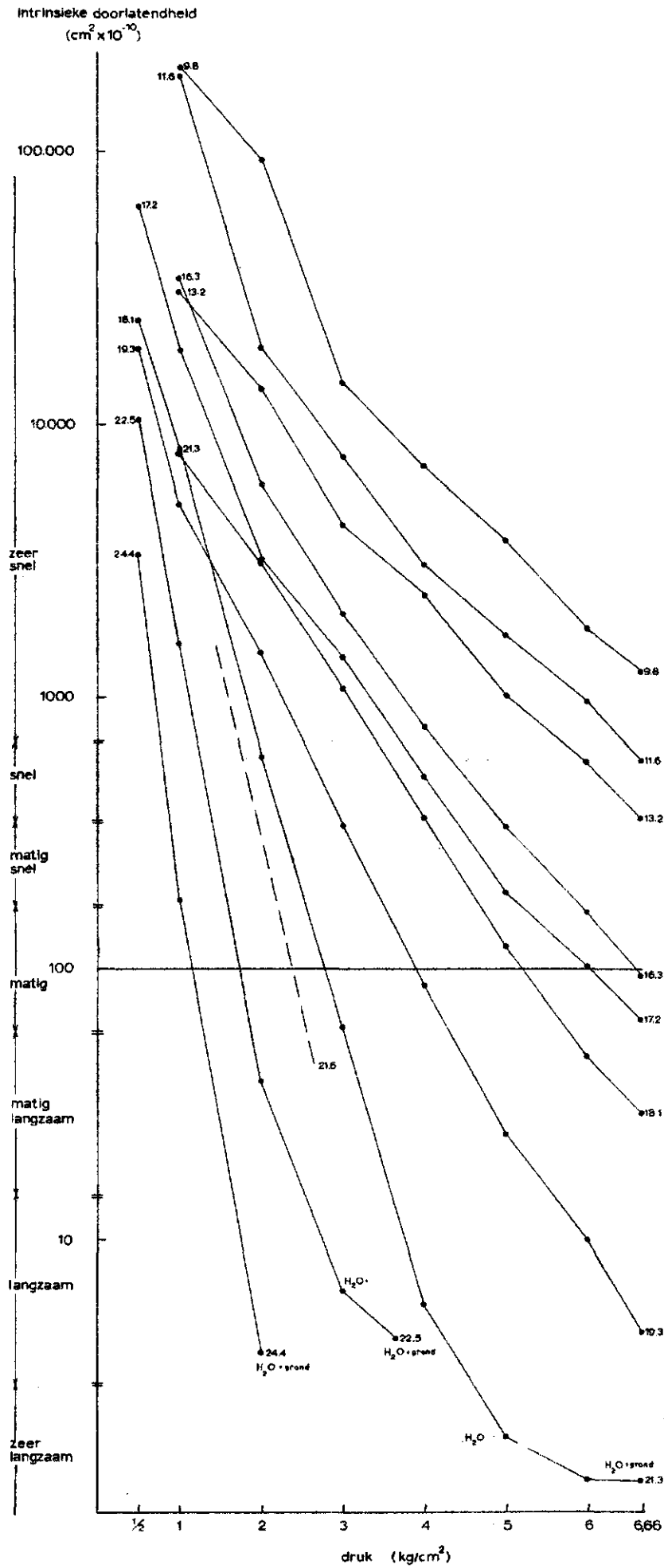


Relatie doorlatendheid-druk voor pikkelei bij verschillende vochtgehalten (gew.%)

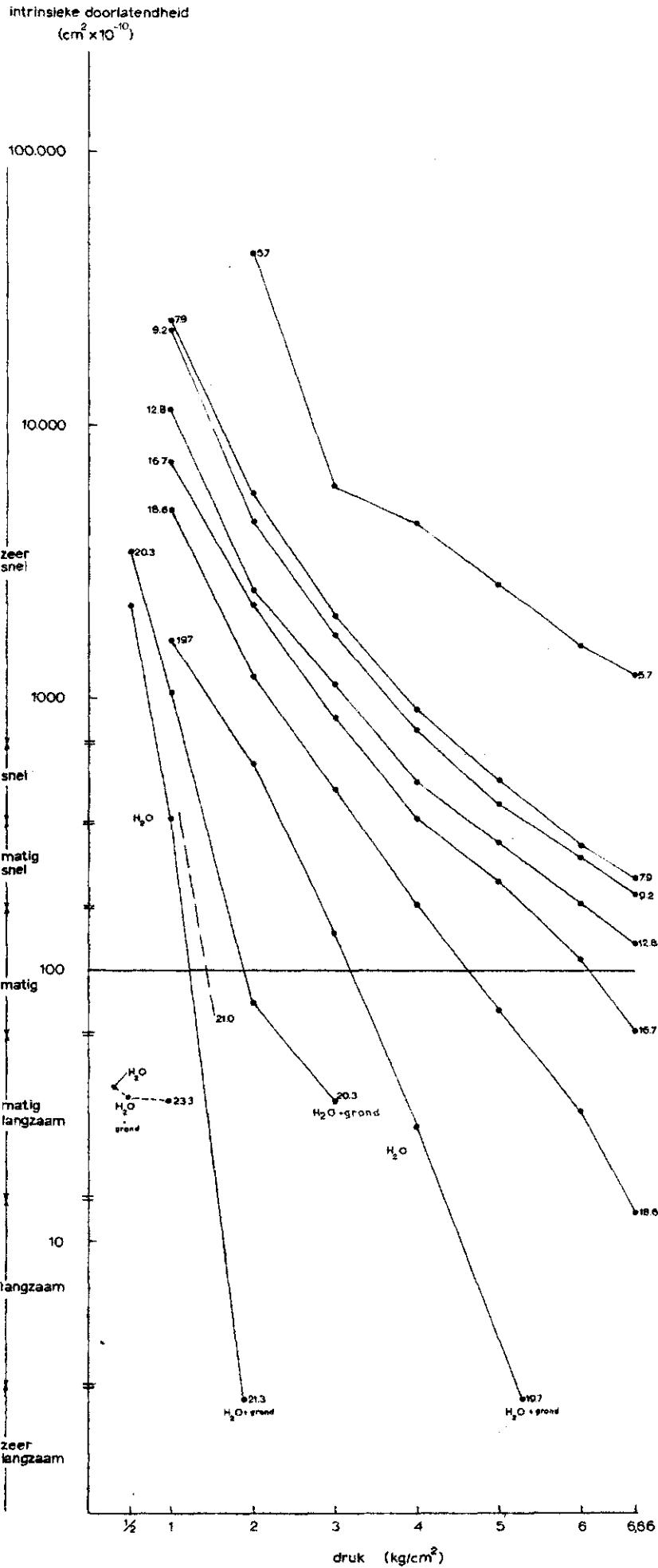


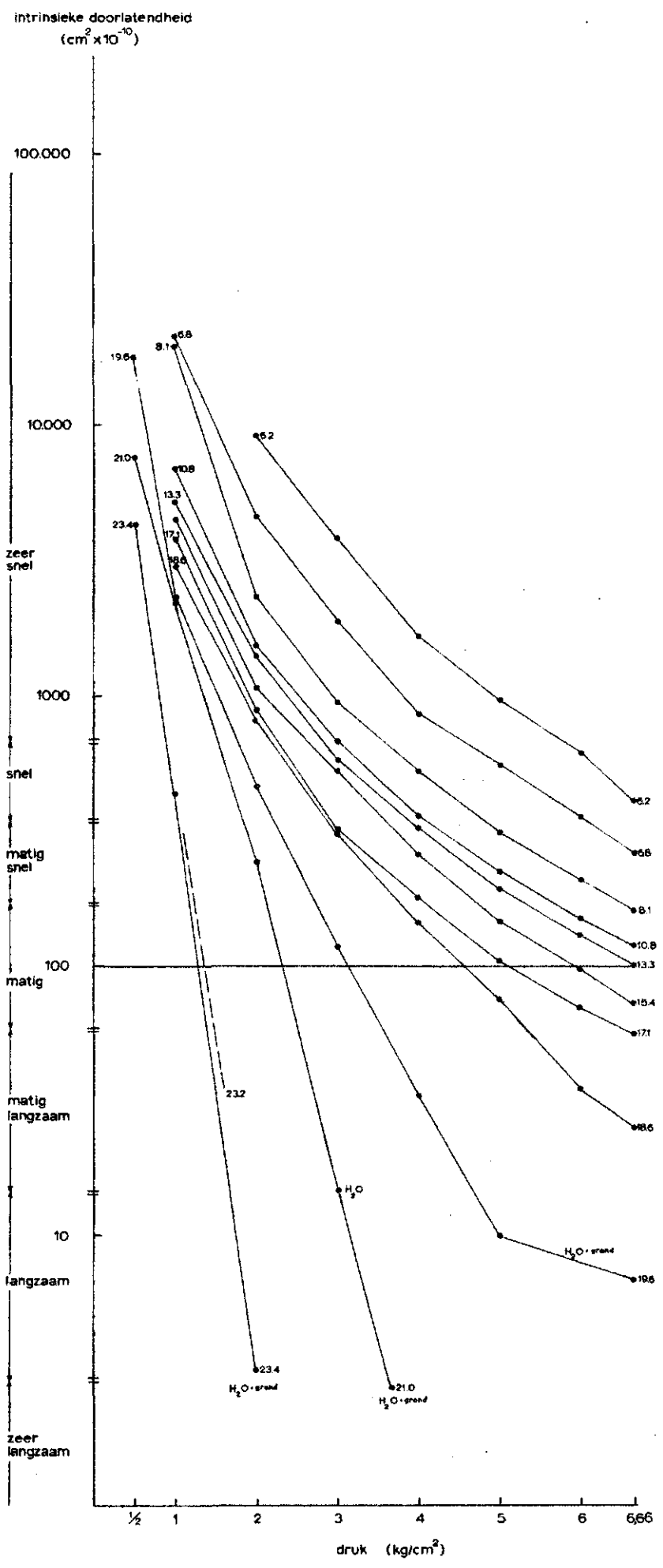


Relatie doorlatendheid-druk voor klei bij verschillende vochtgehalten (gew.%)



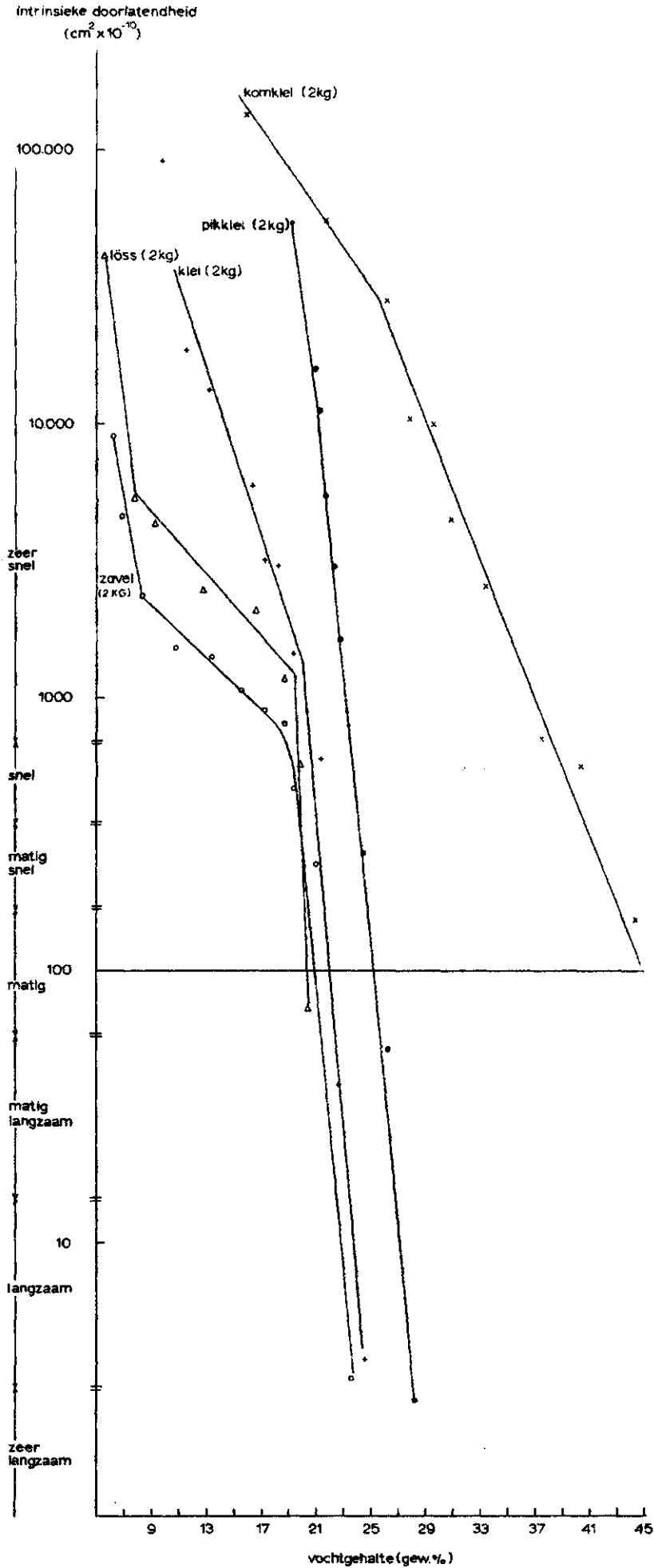
Relatie doorlatendheid-druk voor löss
bij verschillende vochtgehalten (gew.%)





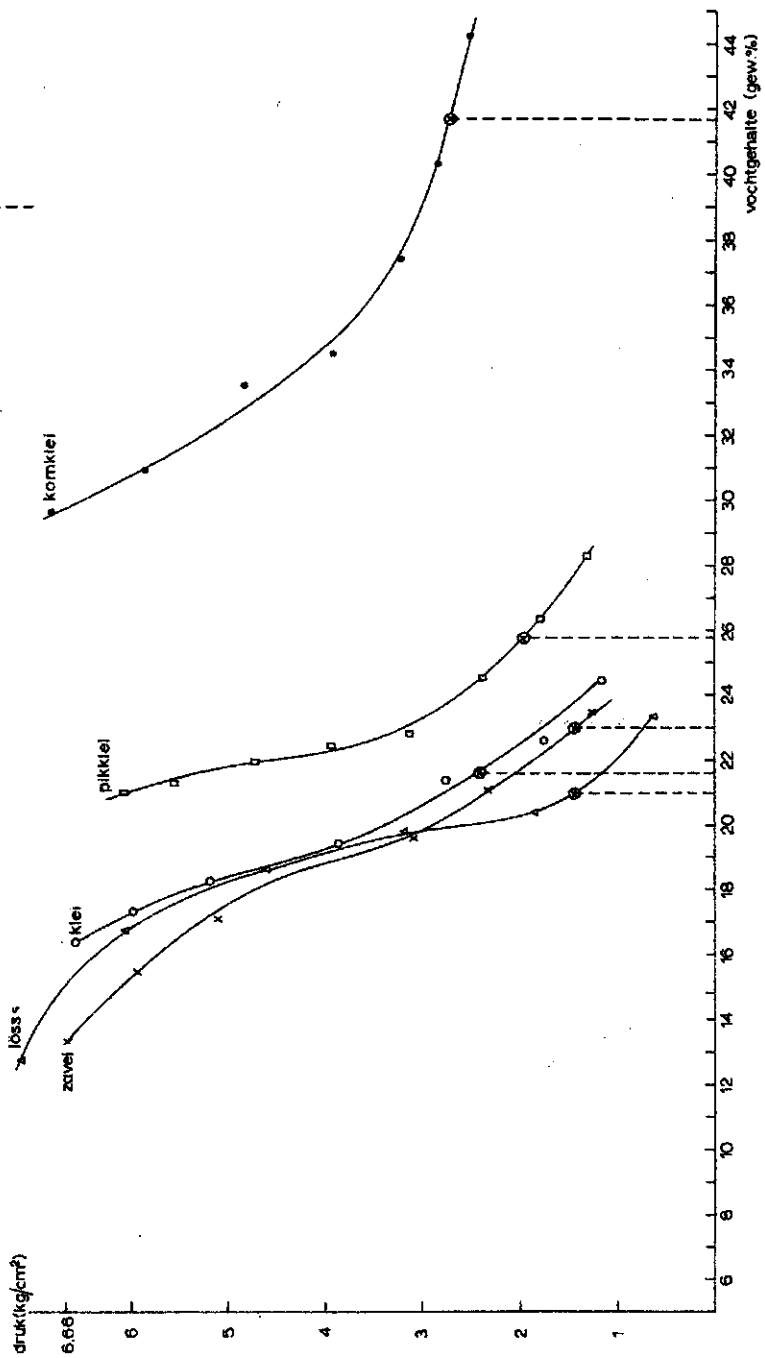
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

Relatie doorlatendheid - vochtgehalte (gew.%) bij een druk van 2 kg/cm² voor diverse gronden

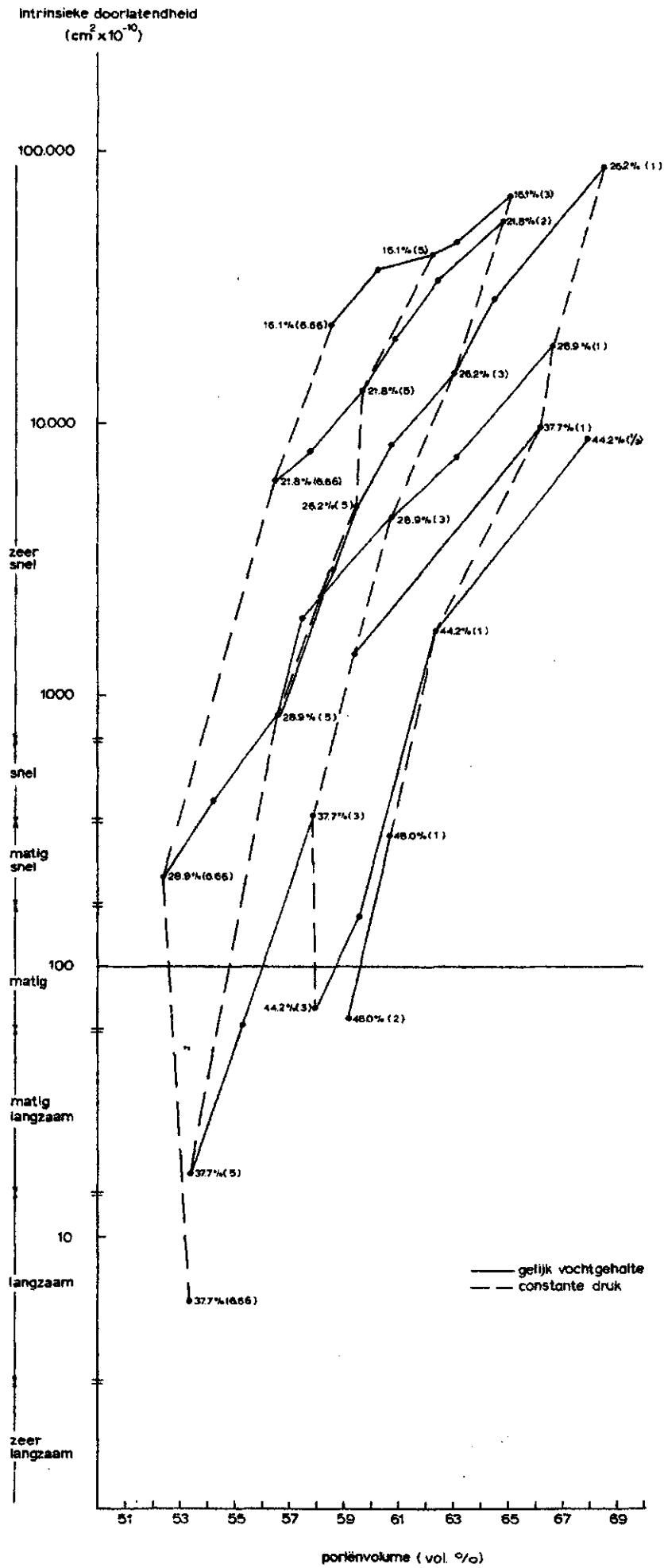


bijk.2

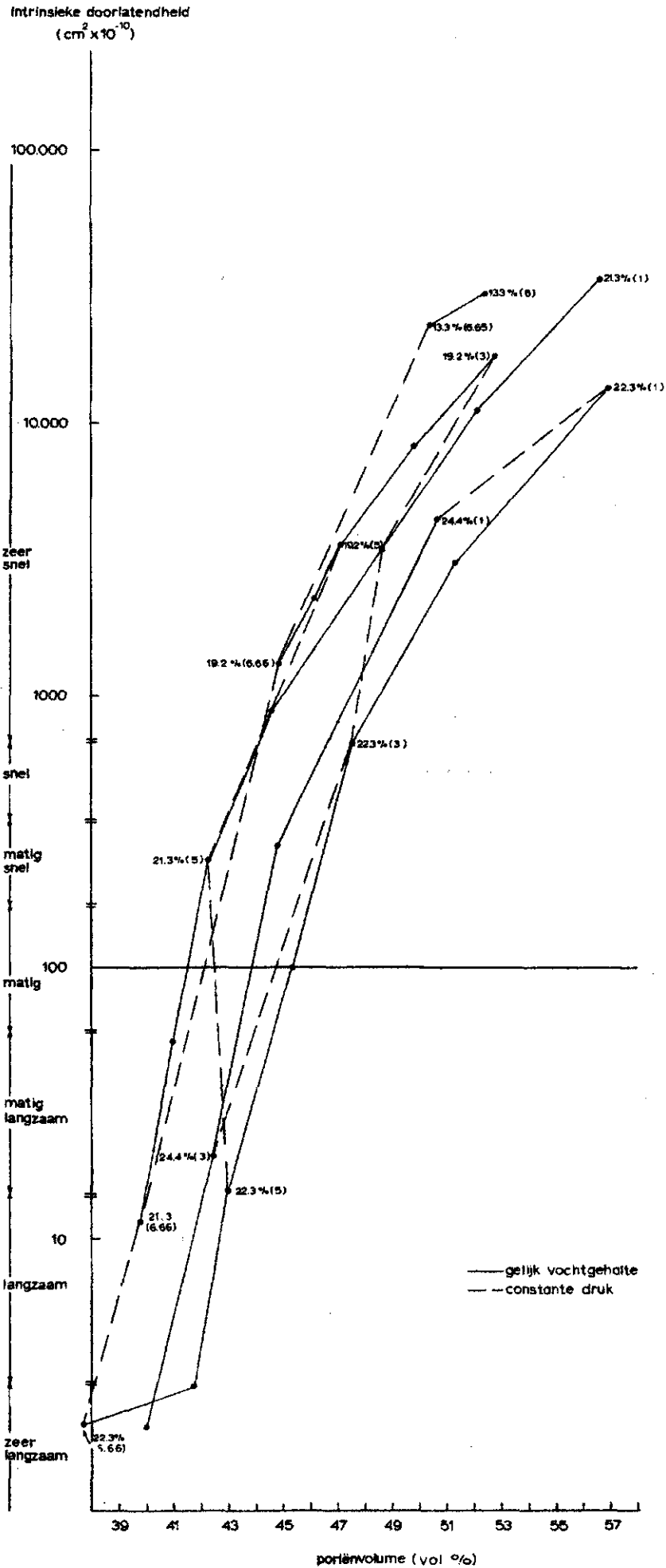
Relatie druk - vochtgehalte bij constante intrinsieke doorlatendheid
($100\text{cm}^2 \times 10^{-10}$)



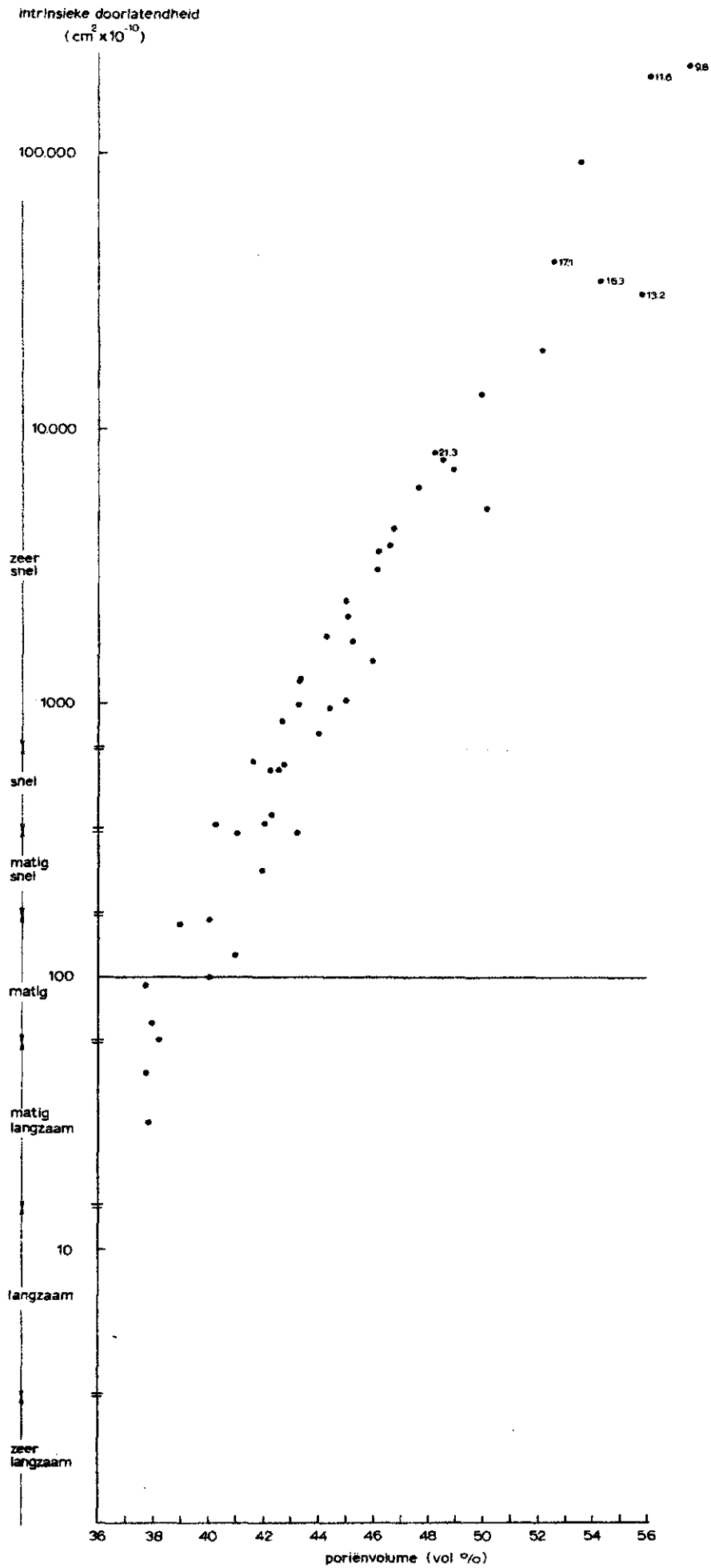
Relatie doorlatendheid-poriënvolume voor komklei



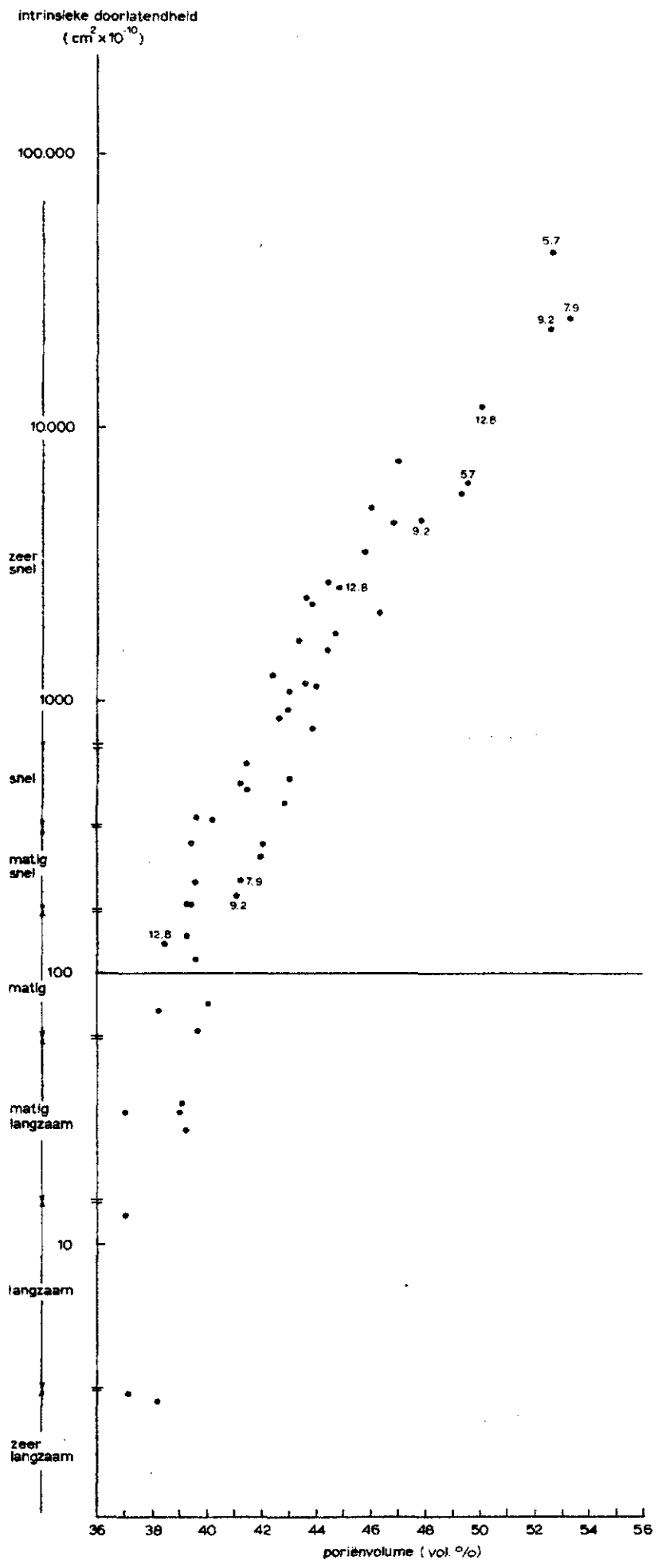
Druk doorlatendheid - poriëvolume
voor pikklei



Relatie doorlatendheid - poriëvolume
voor klei

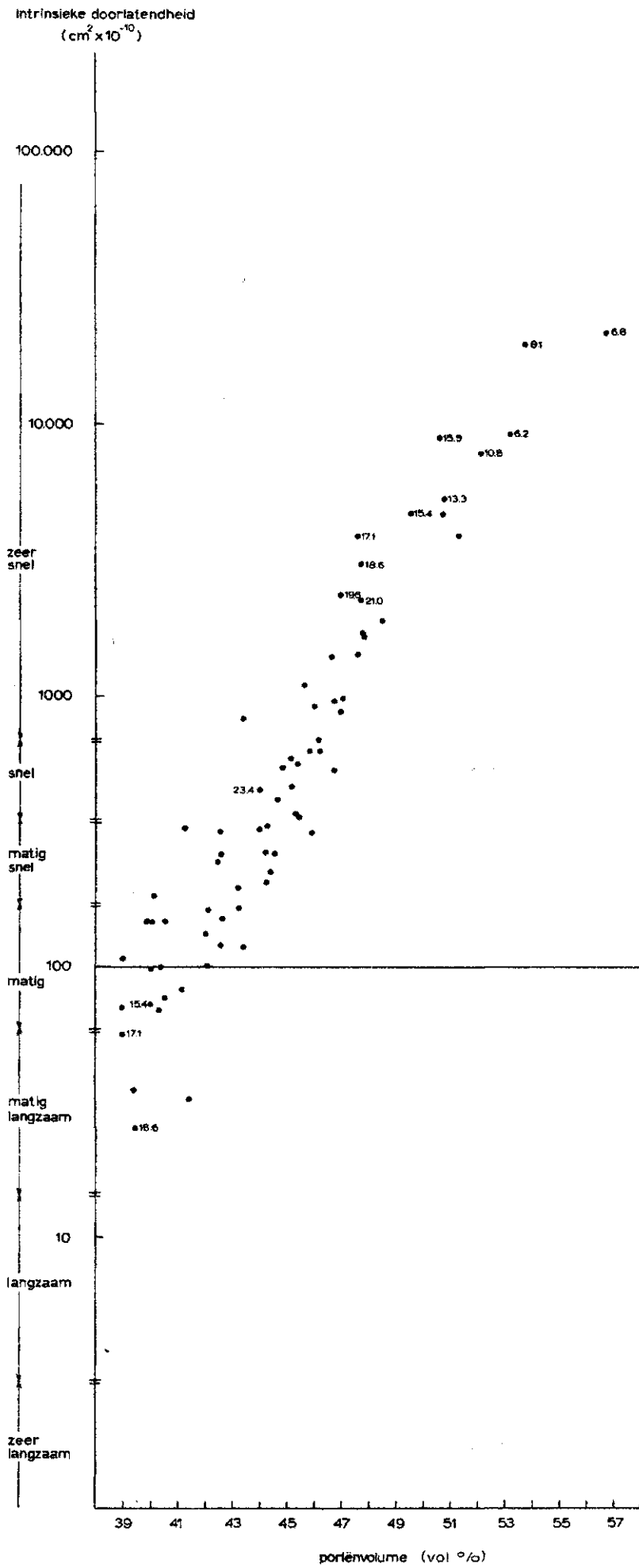


Relatie doorlatendheid - porienvolume
voor löss

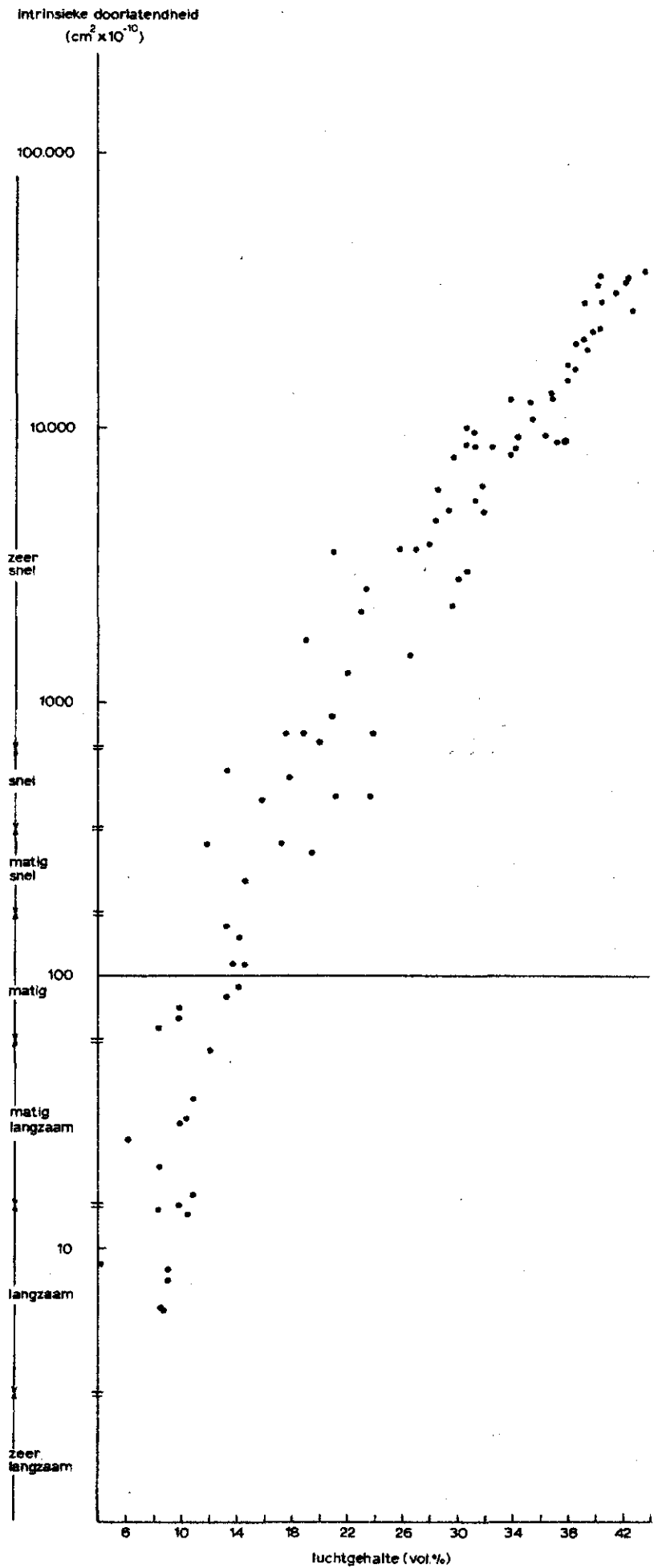


Relatie doorlatendheid-poriënvolume
voor zavel

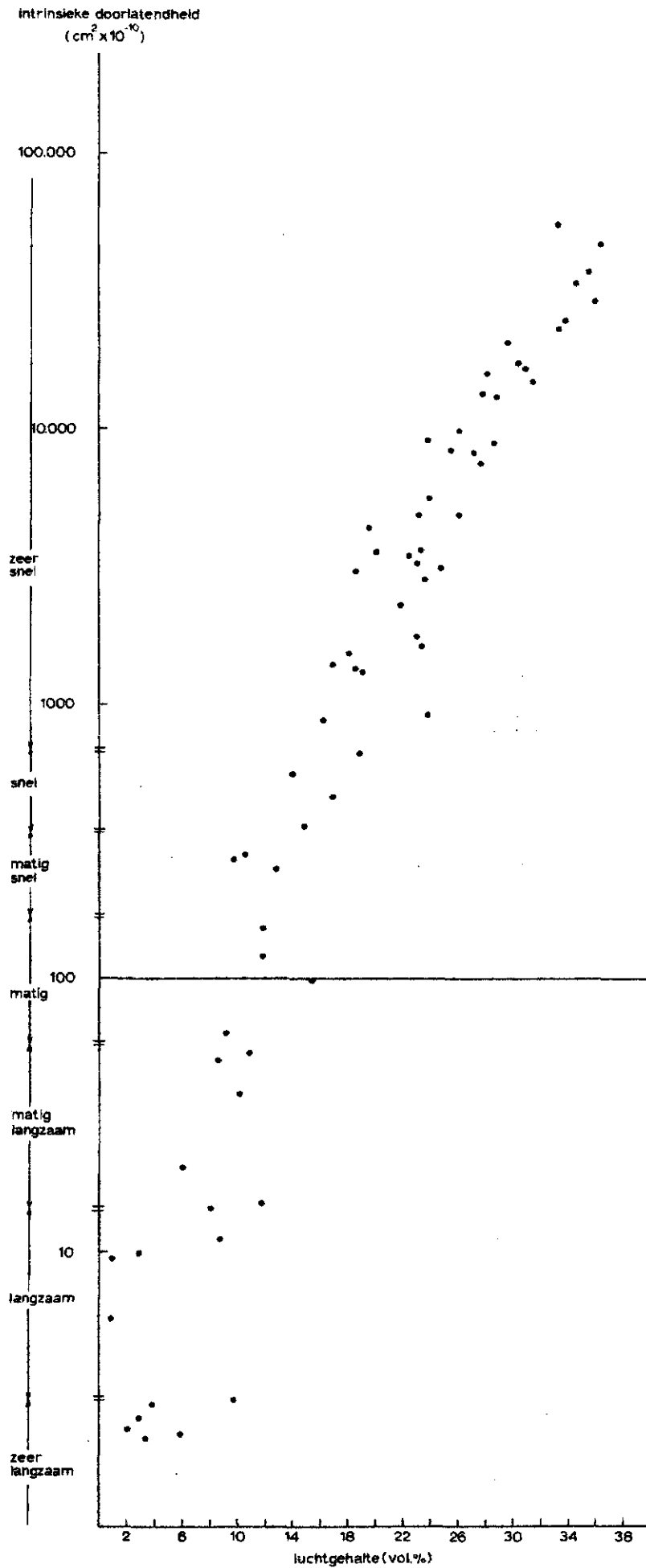
bijl. d5



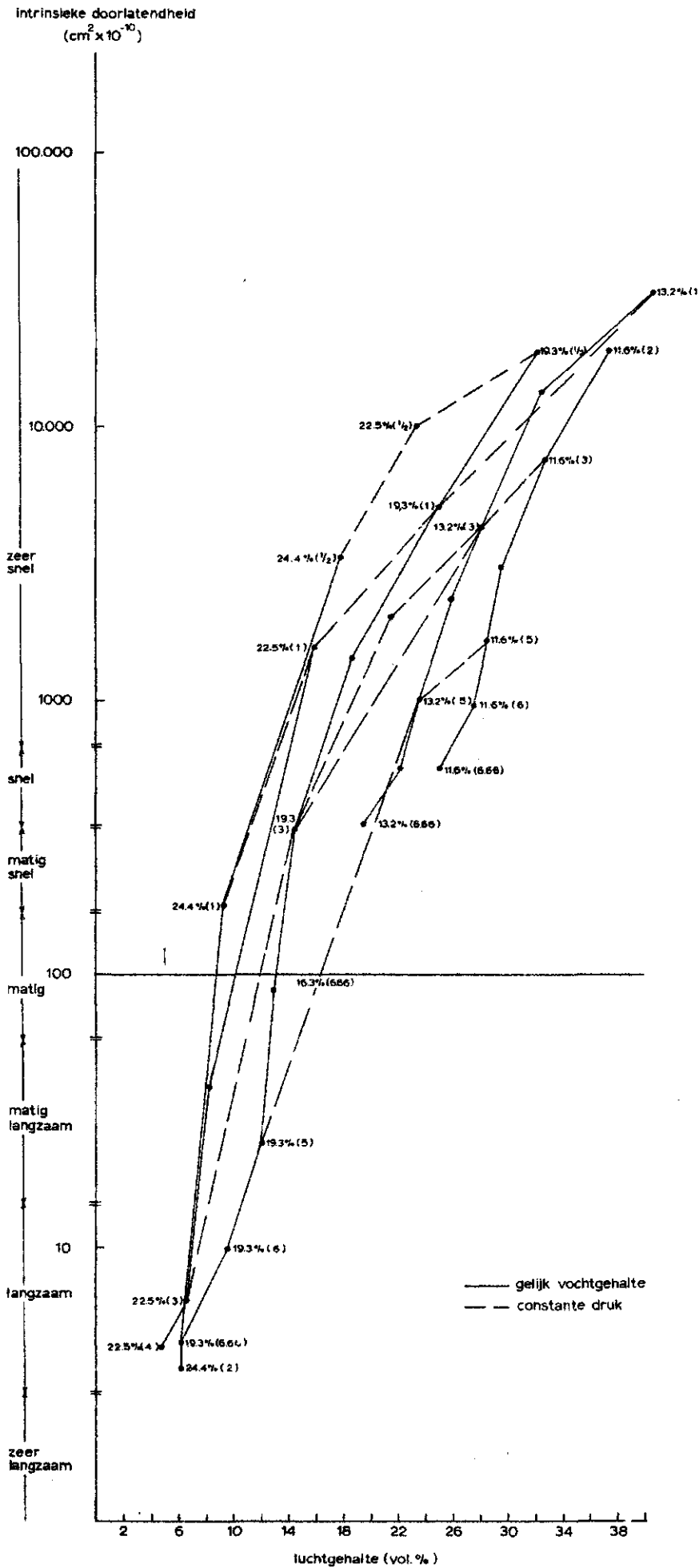
Relatie doorlatendheid luchtgehalte voor komklei



Relatie doorlatendheid-luchtgehalte
voor pikklei



Relatie doorlatendheid-luchtgehalte
voor klei



Relatie doorlatendheid - luchtgehalte voor löss

