

NN31545.1921

ICW Nota 1921
december 1988

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**



DOORBRAAKCURVEN IN ONDERZOEK AAN
DRAINAGEOMHULLINGSMATERIALEN

nota

ing. D.M. Bakker

— instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding . wageningen —



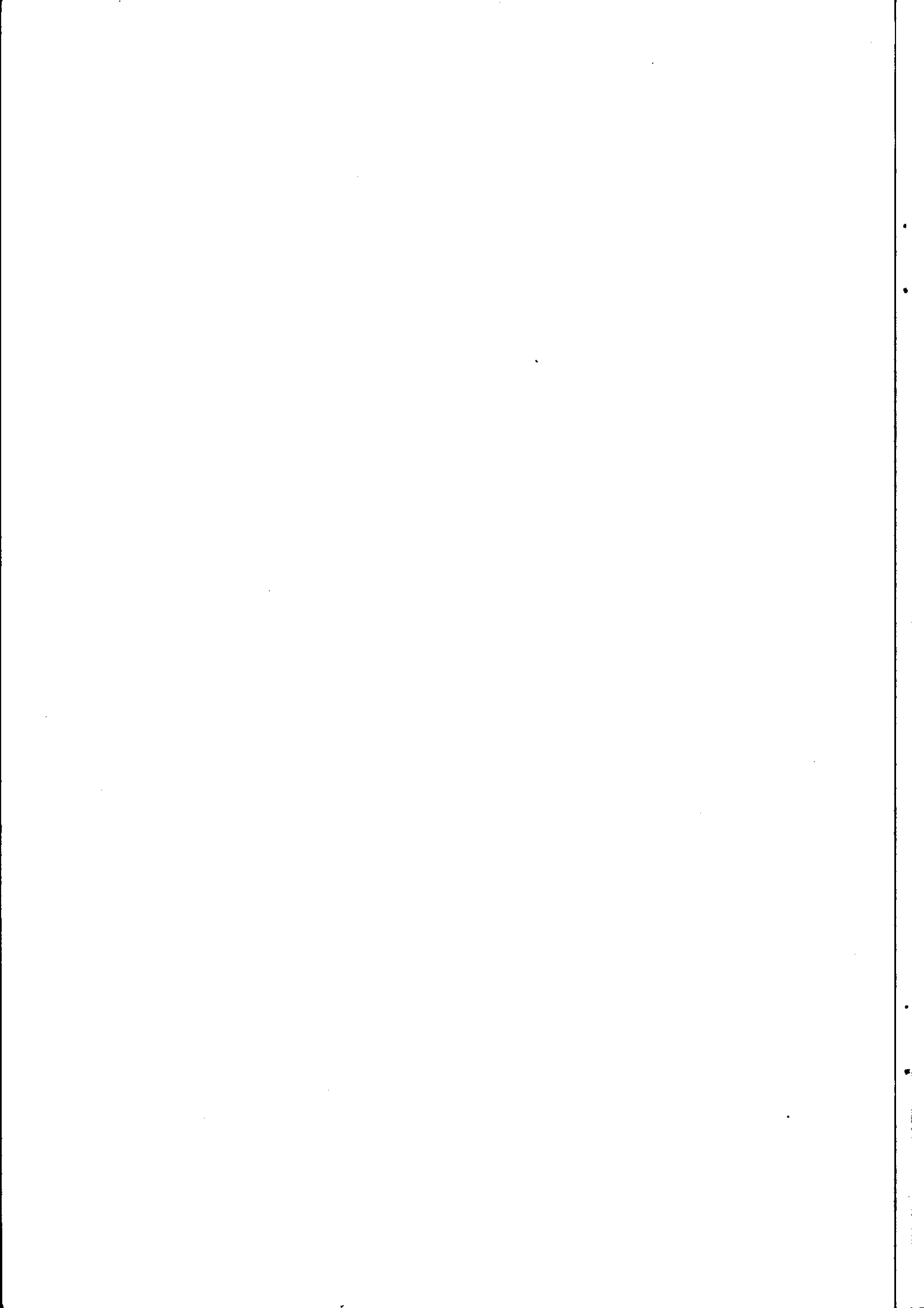
Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek
nog niet is afgesloten.

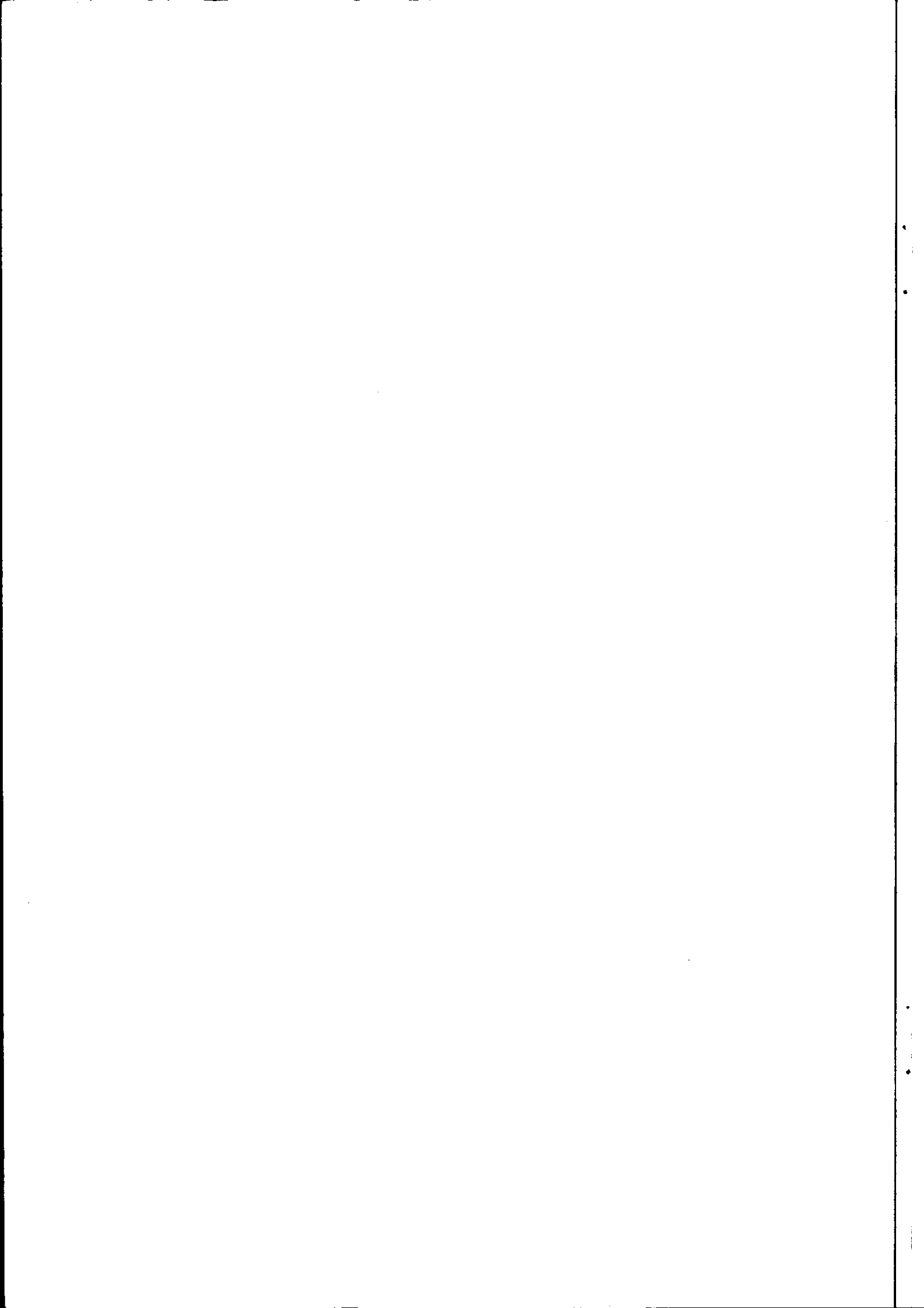
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

11 APR. 1989

JSN 279 294 *



INHOUD :	blz.:
1. INLEIDING	2
2. PROBLEEMSTELLING	
2.1. Inleiding	3
2.2. Bevindingen	4
3. DOORBRAAKCURVEN	
3.1. Principe	5
3.2. Uitvoering	6
4. VERWERKING	
4.1. Doorbraakcurven	8
4.2. Cumulatieve Effectieve Poriëndiameter Verdeling	9
5. RESULTATEN	12
6. CONCLUSIES	21
7. LITERATUUR	23



1 INLEIDING

Aan het belang van omhullingsmaterialen van buisdrainage wordt in veel gevallen niet meer getwijfeld. De vraag welk materiaal waar gebruikt moet worden, blijft in discussie. Een belangrijk aspect is de grondsoort waarin de vooromhulde buis gelegd moet worden, want de invloed daarvan op het functioneren van het omhullingsmateriaal is aanzienlijk.

In het onderzoek aan drainageomhullingsmaterialen worden diverse materialen getest in combinatie met bepaalde grondsoorten. De keuze van de grondsoort hangt af van het functioneren van buisdrainage in de desbetreffende grondsoort. Het onderzoek aan de omhullingsmaterialen zoals dat op het I.C.W. plaatsvindt heeft met name betrekking op "probleem" gronden. Over het algemeen zijn dit cohesieloze- tot zwak cohesieve gronden. In cohesieve gronden zoals kleigronden, is de noodzaak tot omhullen van de buisdrainage niet aanwezig. Cohesieloze- tot zwakcohesieve gronden hebben daarentegen vaak een dusdanige textuur en structuur dat daar het gevaar voor verstopping en/of inspoeling aanwezig is. De "probleem" gronden zoals die in Nederland voorkomen worden gekenmerkt als zwak- cohesieve gronden (Zeyts van, 1986)

De textuur van de zwak cohesieve grond wordt gekarakteriseerd door een hoog percentage aan silt (2 - 50 μ) en een laag percentage aan lutum (<2 μ). Bij de classificatie valt deze grond onder lichte zavel, lemig zand of zandig leem, en kan zowel van mariene als alluviale oorsprong zijn.

Al geruime tijd heeft de Landinrichtingsdienst in haar onderzoek naar het functioneren van omhullingsmaterialen, in verschillende gebieden waar deze probleemgronden voorkomen, proefvelden in gebruik. De locaties van de proefvelden die nu in onderzoek zijn, liggen in Uithuizermeeden (Gr.), Valthermond (Dr.) en Willemstad (NBr.). Parallel aan deze proefveldobservaties werd tot februari 1988 ook door het I.C.W. onderzoek verricht aan drainageomhullingsmaterialen en het functioneren onder laboratoriumomstandigheden. Het bodemmateriaal dat gebruikt werd in het laboratorium, was bodemmateriaal van de proefvelden.

De gebruikte technieken en het bodemmateriaal in de laboratorium opstelling hebben in de loop der tijd nogal wat veranderingen ondergaan (Stuyt, 1983). Een verticaal cilindrisch model met radiale stroming en gevuld met homogeen matig fijn zand, heeft lange tijd dienst gedaan als stromingsmodel op het Instituut. In 1977 is deze opzet vervangen door een verticaal cilindrisch model met tweedimensionale stroming. In dit model werden de verschillende omhullingsmaterialen getest met elf verschillende bodemfracties, variërend in korreldiameter van 30 tot 2000 μ . (Seijger, 1978). De fracties werden verkregen door verschillende zandgronden uit te zeven en vervolgens los in de cylinder te storten en te belasten met een gewicht dat de gronddruk op een meter diepte moest simuleren. In 1980 werden een aantal veranderingen aan gebracht aan dit model. Er werd onder andere afgezien van het gebruik van aparte bodemfracties en ging

over op het gebruik van structuurloos Almeresand. Gedurende het onderzoek dat in 1980 opgestart was, bleek dat het uitgangsmateriaal verre van ideaal was. Het structuurloze bodemmateriaal was niet te vergelijken met het materiaal zoals dat rond een drain in het veld werd aangetroffen en bij het gebruik van volumineuze omhullingsmaterialen leverde dit type bodemmateriaal problemen op, nog voordat met de proef begonnen kon worden (Stuyt, 1983). Aan het begin van het daaropvolgende onderzoek (1983) is toen besloten om andere typen bodemonsters te gebruiken, ongeroerd en geroerd van structuur. Deze proefopstelling is tot en met februari 1988 in gebruik geweest.

Uit de hele ontwikkeling van het laboratoriumonderzoek aan drainageomhullingsmaterialen blijkt dat het gebruikte bodemmateriaal nogal veranderd is. Dit is vooral te danken aan de toegenomen kennis omtrent de invloed van de bodemstructuur op het stromingspatroon van het water naar de drain. In deze nota zal nader worden uitgewerkt hoe de bodemstructuur van invloed is op het stromingspatroon in cilindervormige model en de mogelijke consequenties daarvan op het omhullingsmateriaal.

2 PROBLEEMSTELLING

2.1 Inleiding

In veel gevallen werd bij het laboratoriumonderzoek aan drainageomhullingsmaterialen gebruik gemaakt van bodemmateriaal dat structuurloos gemaakt was (Stuyt, 1983) of waarvan de structuur grotendeels verdwenen was, semi-structuurloos (Dierickx, 1982). In veel gevallen zijn dit nog steeds de gebruikte uitgangsmaterialen (Dierickx, 1987; Dierickx, Lenz-Gratin en Stuyt, 1987; Davies, Henderson en Dennis, 1987)

Structuurloos bodemmateriaal wordt verkregen door het oorspronkelijke materiaal te drogen bij 105 C en vervolgens te vermalen in een grondmolen. Alle aanwezige structuur elementen worden op deze manier vernietigd. Het semi-structuurloze materiaal wordt verkregen door het vochtige bodemmateriaal te zeven in fracties van 0-2, 2-3, 3-4 mm. Er is dan nog steeds sprake van kleine aggregaten. Beide bodemmaterialen worden op een zelfde manier verwerkt in de meetopstelling. Er wordt op deze manier getracht om een reproduceerbaar homogeen medium te krijgen. Het gebruik van structuurloos uitgangsmateriaal heeft als voordeel dat een bijzonder "slechte" situatie gecreeerd wordt voor het omhullingsmateriaal, dat dan getest zal worden onder de minst gunstige omstandigheden. Deze manier van testen komt de reproduceerbaarheid ten goede en als meet-medium voldoet het bodemmateriaal goed, daar het erg homogeen is. Bij het gebruik van semi-structuurloos materiaal wordt de invloed van de structuur onderkend maar homogeniteit wordt ook hier nagestreefd. Het is echter de vraag of het gebruik van dit type grond als uitgangsmateriaal voor doorstromingsproeven met omhullingsmaterialen een vergelijk gemaakt kan worden met de veldsituatie. Een situatie die vooral direct na installatie gekenmerkt wordt door een grote

variabiliteit in structuur en doorlatendheid. Het omhullingsmateriaal wordt tenslotte ontworpen om te kunnen functioneren in het veld.

De invloed van de structuur van de bodem op het functioneren van drainageomhullingsmaterialen is door diverse onderzoekers onderkend (Dierickx, 1982, 1986; Lagacé, 1983; Stuyt, 1986; Willardson, 1983). Dierickx onderkende de invloed van de structuur en de stabiliteit van de aggregaten bij het functioneren van de filters. Hij stelde dat het inspoelen van grond voornamelijk afhing van de structurele kracht in een cohesieve grond. Lagace vond dat, wanneer naast de de textuurverdeling ook de aggregaatgroteverdeling gebruikt werd in het voorspellen van de verwachte inzanding, een significant betere voorspelling gedaan kon worden. Willardson ontwikkelde een theorie over de Hydraulic Failure Gradient (HFG) van een bodem waarin de PlasticiteitsIndex (PI) betrokken werd. De PI is een maat om een fysische eigenschap van de grond te karakteriseren. Hij ontwikkelde een vergelijking waarmee voor een groot aantal grondsoorten de HFG beschreven kan worden:

$$HFG = \exp (0.332 - 0.132K + 1.07 \ln PI),$$

De K en de PI werden bepaald via standaardmethoden. De achterliggende gedachte is dat de intree gradient die optreedt bij een drain, de HFG van de aanliggende grond niet mag overschrijden. De gradient is echter een grootheid die rond de drain niet betrouwbaar te meten is.

Het onderkennen van de invloed van de structuur resulteerde in een andere opzet bij de laboratoriumopstelling van het I.C.W. In 1983 initieerde het I.C.W. met deelname van het bedrijfsleven, een vervolg op het lopende onderzoek aan drainageomhullingsmaterialen waarbij werd afgeweken van het gebruik van structuurloos bodemmateriaal (Stuyt, 1983). Er werd besloten om geroerd en ongeroerd bodemmateriaal te gebruiken. De gekozen opzet had als doelstelling om de structuur zoals die in het veld zowel in als rond de drainsleuf voorkomt, te simuleren. Een aantal nadelen die kleefde aan een dergelijke opzet, waren : i) de ruimtelijke variabiliteit zoals die in het veld voorkomt, werd in het laboratorium "meegenomen" en was nadelig voor de reproduceerbaarheid en ii) het bodemmateriaal met structuur had een nadelig effect op de betrouwbaarheid van de gemeten waarden indien in het monster gemeten werd. Het simuleren van de veld situatie was echter van doorslaggevende betekenis.

2.2 Bevindingen

Het effect van de structuur op de stroming door de grondkolommen bleek al vrij spoedig na het opstarten van het onderzoek. Gedurende de uitvoering van de proeven bleek dat de uitspoeling van het bodemmateriaal door het omhullingsmateriaal zich vaak beperkte tot slechts enkele plaatsen. Dit verschijnsel werd later nog verduidelijkt door het gebruik van kleurstof die onderin de

grondkolom, waarin een naar boven gerichte stroming plaats vond, gespoten werd. Na verloop van tijd bleek dat de kleurstof op slechts enkele plaatsen door het omhullingsmateriaal heen brak. Dit was ook vaak het geval indien er geen uitspoeling plaatsvond. Bij het gebruik van deze bodemonsters met structuur was er sprake van preferente stroombanen, zowel in het geroerde- als in het ongeroerde bodemmateriaal. Deze constatering was van belang daar het aansluit op constateringen die in het veld zijn gedaan. Uit veldonderzoek is gebleken dat de stroming zoals die plaats vindt naar de drain per plaats nogal verschillend is. In dat geval blijkt de stroming plaats te vinden op plaatsen waar sprake is van een hogere doorlatendheid die zorgen voor preferente stroombanen.

Het is van belang te weten hoe deze stroming naar de drain toe plaats vindt. Indien de stroming plaats vindt door een groot oppervlak hetgeen het geval is bij homogeen bodemmateriaal, zal bij een gelijk blijvend debiet het water trager stromen. Als er sprake is van preferente stroombanen in de vorm van macroporieren kan de stroming snel afnemen indien een van deze porieren geblokkeerd raakt. Een ander aspect is ook dat op die plaatsen waar het omhullingsmateriaal contact maakt met een stroombaan, het omhullingsmateriaal zwaarder belast zal worden.

Om dit aspect van preferente stroombanen wat verder te quantificeren, is gebruik gemaakt van zoutdoorbraakcurven. Doorbraakcurven worden bepaald door het injecteren van een zoutoplossing onder de grondkolom. Het concentratie verloop waarop de zoutoplossing de kolom aan de andere kant weer verlaat, is een indicatie voor het stromingspatroon zoals die in de kolom plaats vindt. Het gebruik van zoutdoorbraakcurven kon zonder problemen in gelast worden in het bestaande meetprogramma. Na afloop van het onderzoeksprogramma aan de omhullingsmaterialen zijn nog twee proeven uitgevoerd met structuurloos bodemmateriaal. Dit was noodzakelijk om de twee typen bodemmateriaal: structuurloos en met structuur te kunnen vergelijken.

3 DOORBRAAKCURVEN

3.1 Principe

De techniek van het gebruik van zoutdoorbraakcurven om zodoende een idee te krijgen van het stromingspatroon dat beïnvloed wordt door de structuur, is welbekend uit de bodemkunde en bodemfysica (Bouma, 1979; Nielsen and Biggar, 1961; Rao, 1987).

Het berust op het principe dat een in de grond dringende vloeistof de daar reeds aanwezige vloeistof zal verdringen. De manier waarop dat gebeurt en de mate van verdringing in verhouding tot de in de grond aanwezige hoeveelheid vloeistof, is een indicatie van het stromingspatroon binnen de grondkolom. Aan de hand van Fig.1 wordt hierop een korte toelichting gegeven.

De bodem wordt voorgesteld als een bundel capillairen die aan het

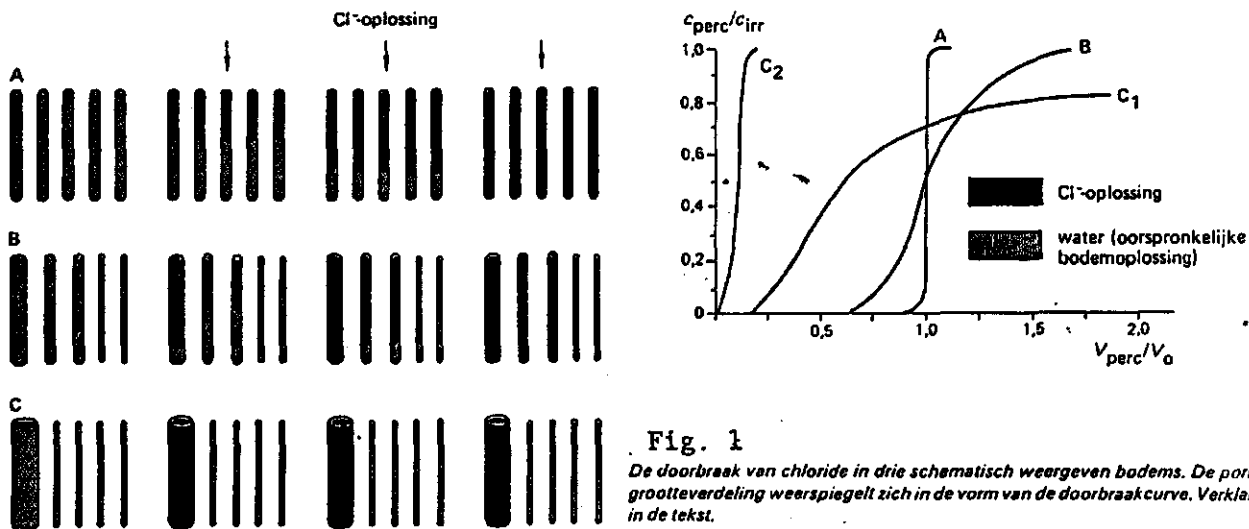


Fig. 1
 De doorbraak van chloride in drie schematisch weergegeven bodems. De poriën-grootteverdeling weerspiegelt zich in de vorm van de doorbraakcurve. Verklaring in de tekst.

begin allemaal gevuld zijn met water. Op tijdstip, $t=0$, wordt er een zout-oplossing (5% CaCl_2 -opl.) in gebracht. Het gebruik van zout-oplossingen kan in sommige gevallen nadelig zijn. In principe zijn voor dit soort toepassingen alle niet-reagerende en/of absorberende en kwantitatief meetbare "tracers" geschikt. Indien alle capillairen een even grote diameter hebben zal nadat alle aanwezige vloeistof verplaatst is de zout-oplossing als een "front" doorbreken (A). De eenheden zijn dimensieloos. Op de X-as is het volume aan binnendringende vloeistof gedeeld door het volume van de in de grondkolom aanwezige vloeistof. Op de Y-as is de toename van de concentratie gedeeld door de maximale concentratie. Het geval (B) komt overeen met een homogene grond, waarin de de capillairen met verschillende diameters log normaal verdeeld zijn. Indien er sprake is van een erg scheve poriënverdeling, zal de doorbraakcurve er uitzien zoals in C2 is weergegeven. Een snelle doorbraak nadat slechts een klein gedeelte van het aanwezige volume verplaatst is (Bouma, 1987).

Uit het bovenstaande blijkt dat het gebruik van doorbraakcurven in de kolomproeven een nuttige bijdrage kan leveren in het verkrijgen van inzicht van het stromingspatroon op een non-destructieve manier. Met behulp van deze techniek was het mogelijk om de verandering van het stromingspatroon gedurende een proef aan te tonen en het totaal verschillende verloop van het stromingspatroon in de structuurloze grond, vergeleken met het stromingspatroon dat optreedt in een grond met structuur.

3.2 Uitvoering

De grond die gebruikt is in het I.C.W. onderzoek was afkomstig uit de drie eerder genoemde proefvelden. Als vierde grondsoort werd Almerzand gebruikt, gewonnen in de buurt van Lelystad. Zie tabel 1 voor de belangrijkste textuur eigenschappen.

Tabel 1: Tabel van de belangrijkste textuur eigenschappen
 (Percentage minerale delen)

Bodemmateriaal	Mediaan (mu.) zand fractie	Leem (%)	Lutum (%)
Uithuizermeeden	76	11	8
Lelystad	75	13	1
Valthermond	120	4	4
Willemstad	69	26	9

De grond was gestoken op draindiepte. Op die diepte werden metalen ringen de grond in gedreven vóór het nemen van de ongeroerde monsters. De geroerde monsters bestonden uit grond die rond de ringen was weg gestoken en vervolgens in een zak gedaan. Er werd naar gestreefd om de monsters nog dezelfde dag in de meetopstelling te plaatsen. De ongeroerde monsters hadden een lengte van 10 cm., een diameter van 16 cm. en werden met een spindel de meetcilinder in gedrukt. De cilinders met de geroerde monsters werden opgevuld met het enigzins verkruimeld materiaal tot een dikte van 10 cm. en vervolgens licht aan gedrukt.

Het structuurloze materiaal werd verkregen nadat het bodemmateriaal op draindiepte was gestoken, gedroogd bij 105 C en vermalen in een grondmolen zodat alle structuur elementen verdwenen waren. De droge "poeder" werd vervolgens in de meetcilinder gestort tot een dikte van 10 cm.

Na het installeren van de bodemmonsters werd een laagje grind op het bodemmonster gestort met daarin een poreuze ringleiding die door middel van een dunne slang verbonden was met de buitenkant van de cilinder, zie Fig. 2.

Op de grindlaag werden achtereenvolgens een dun filter, een geperforeerde plaat en een veer gelegd. Als laatste werd de deksel geplaatst. De veer diende om de gronddruk te simuleren die op draindiepte verwacht mag worden. Na het omdraaien van de de meetcilinder werd begonnen met het van onderen naar boven bevochtigen van de monsters en werd boven de doorstroomplaat een kleine meetruimte gecreëerd. In deze meetruimte kon een EC-meter gehangen worden die de doorgebroken zout-oplossing, boven de kolom, direct kon meten. De zout-oplossing (5% CaCl₂-opl.) werd in een zeer korte tijd onderin de kolom toegediend door middel van een injectie-spuit via de dunne slang en de ringleiding in de grindlaag. Het debiet was tijdens de hele meting constant.

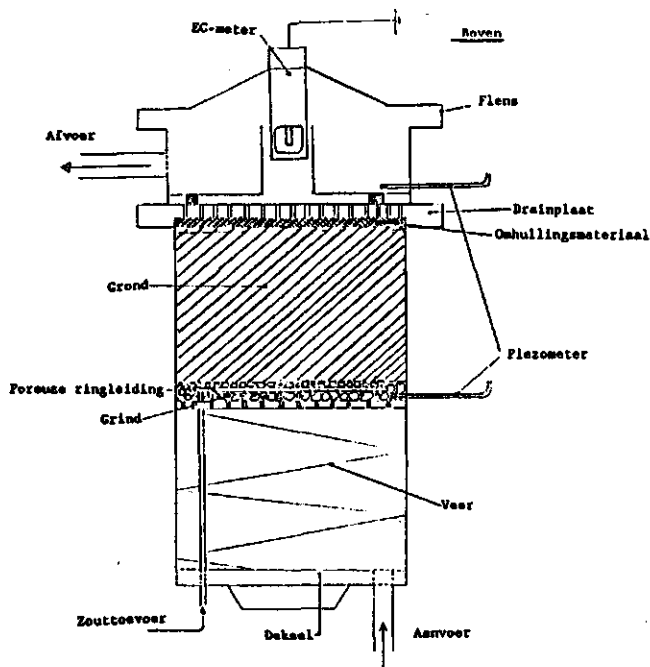


Fig. 2: Dwarsdoorsnede van het cilindrische model zoals gebruikt op het I.C.W. tot februari 1988

4 VERWERKING

4.1 Doorbraakcurven

Gedurende een zeer korte tijd werd de CaCl_2 -oplossing geïnjecteerd, een z.g.n. "pulse-injectie", die gedacht kan worden als een schijf die de kolom binnen dringt. Direct na de injectie werd begonnen met het meten van de geleidbaarheid dat een indicatie is van het verloop van de zout concentratie. De begin concentratie (C_0) werd gesteld op nul ($C_0 = 0$) en de toename van de concentratie (C_t) werd bepaald. Om een vergelijk tussen de verschillende concentratieverlopen mogelijk te maken werd de relatieve toename bepaald: $(C_t - C_0) / (C_{\text{max}} - C_0)$, C_{max} = de maximaal gemeten concentratie tijdens de meting.

Het totaal aanwezige porienvolume waardoor stroming zou kunnen plaatsvinden en dat relevant is voor de meting d.w.z. het totale porienvolume tussen de ringleiding en het meetpunt van de EC - meter werd bepaald (V_0). Er werd uitgegaan van een porienvolume van 40 % ($V_0 = 40\%$). Daar het debiet constant gehouden werd, kon aan de hand van de verstreken tijd de binnengedrongen hoeveelheid op het tijdstip van de meting bepaald worden (V_t). Om ook hier weer een vergelijk te maken met de verschillende proeven onderling werd ook hier met het relatief verplaatst volume bepaald: $(V_t - V_0) / V_0$. De relatieve concentratie werd vervolgens op de Y - as uitgezet, en op de X - as het relatieve volume. De "pulse-injectie" of te wel een zonale doorbraakcurve bepaling wijkt in die zin af van de doorsnee doorbraakcurve bepaling dat bij een normale doorbraakcurve bepaling, de frontale doorbraakcurve, de binnenkomende vloeistof de aanwezige vloeistof op den duur geheel zal verdringen. Bij een zonale doorbraakcurve bepaling is dat niet het geval. Er is sprake van slechts een kleine hoeveelheid zout-oplossing die als een zone de

grondkolom passeert. Hierbij is er sprake van een ingaande tak en een uitgaande tak, zie fig.3. Bij het interpreteren van de resultaten is alleen gekeken naar de ingaande tak.

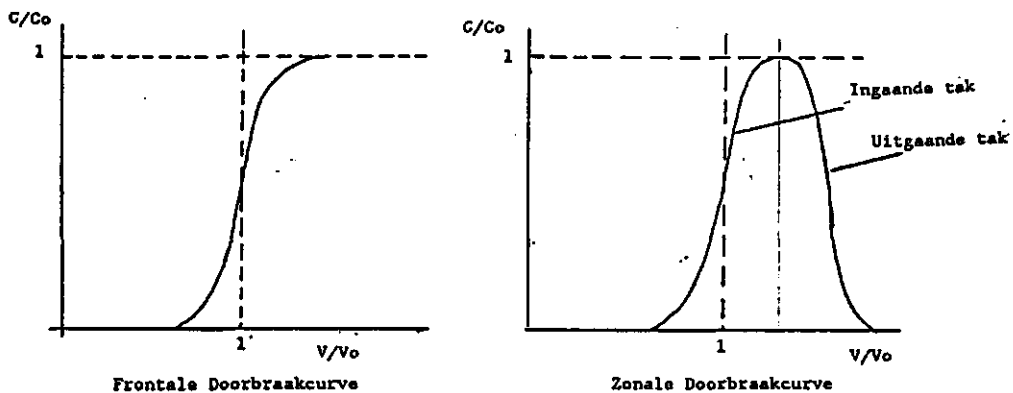


Fig. 3: De frontale en de zonale doorbraakcurve

4.2 Cumulatieve Effectieve Poriëndiameterverdeling

Van de gebruikte geroerde en ongeroerde bodemonsters met structuur en de bodemonsters zonder structuur werden ook effectieve poriëndiameterverdelingen gemaakt door een methode te gebruiken die beschreven is door Klinkenberg (1957). De geometrie van de poriën is in werkelijkheid zo ingewikkeld dat een exacte wiskundige beschrijving niet mogelijk is. Daarom wordt uitgegaan van een aantal vereenvoudigde veronderstellingen. De bodem wordt beschreven als een bundel van rechte capillairen die niet onderling verbonden zijn en met een groot bereik van verschillende karakteristieke diameters. Een cumulatieve effectieve poriëndiameterverdeling is een cumulatieve verdeling van die poriëndiameters waarvan gesteld wordt dat door die poriën de stroming plaats vindt, de effectieve poriën. De poriëndiameterverdeling is afgeleid van het experimenteel bepaalde verband tussen de verdrongen en de hoeveelheid binnendringende vloeistof op de volgende manier.

Het concentratieverloop van de binnendringende vloeistof (2) wordt direct afgelezen uit de doorbraakcurve. Door dit verloop te spiegelen in de $C_{rel} = 0.5$ -as wordt het verloop verkregen van de verdrongen vloeistof. De hoeveelheid verdrongen vloeistof R (1) wordt verkregen door de oppervlakte onder de gespiegelde curve te integreren. Het verkregen verloop van dit volume wordt uitgezet tegen het aanwezige totale volume, (V) . R_x , V_x en $(dR/dV)_x$ kunnen experimenteel bepaald worden. $R_x - V_x(dR/dV)_x$ kan grafisch bepaald worden van de $R - V$ curve. Het intercept van een raaklijn aan de $R - V$ as in een bepaald punt (x) is gelijk aan: $R_x - V_x(dR/dV)_x$. Ter verduidelijking wordt verwezen fig. 4 waar een voorbeeld gegeven is hoe de cumulatieve effectieve poriëndiameterverdeling verkregen wordt uit het verloop van de doorbraakcurve.

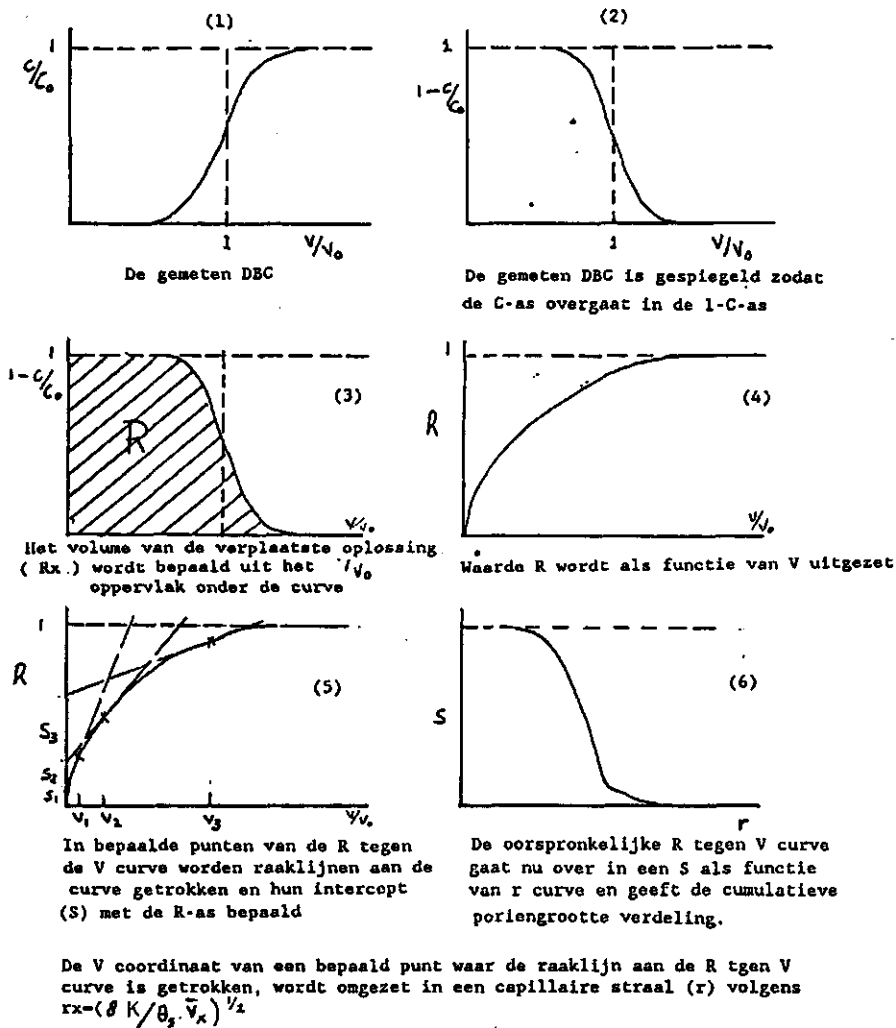


Fig. 4: De grafische bepaling van de cumulatieve effectieve poriëndiameter verdeling uit het verloop van de doorbraakcurve.

De theoretische achtergrond van de gevolgde procedure wordt hieronder verduidelijkt.

De bundel capillairen wordt gekarakteriseerd door een functie $F(r)$ zodat $F(r)dr$ de fractie is van de totale porienvolume ingenomen door capillairen met stralen tussen r en $r + dr$. r_0 = de straal van de kleinste capillair en r_{max} = de straal van de grootste capillair. Als het druk verschil is Δp , de lengte van de capillair = l en de doorsnede van de bundel A , de hoeveelheid verdringende vloeistof (V_x) dat de bundel is binnengedrongen tot op het tijdstip t , is volgens de wet van Poiseuille :

$$v_x = \frac{A f \Delta p t}{8 \eta l} \int_{r_0}^{r_{max}} F(r) r^2 dr \quad (1)$$

waar n = viscositeit van de vloeistoffen, f = porienvolume. Stel

nadat t seconden de vloeistof 1 in alle capillairen met radii rx (en groter) volledig verplaatst is door vloeistof 2, dan kan de tijd t bepaald worden als we een capillair nemen met straal rx. De verplaatsende vloeistof 2 = rx2l dan

$$\pi r_s^2 l = \frac{\pi r_s^4}{8\eta l} \Delta p \quad (2)$$

Door formule 2 te combineren met formule 1 krijgt men :

$$v_s = \frac{Afl}{r_s^2} \int_{r_s}^{r_{max}} F(r) r^2 dr \quad (3a)$$

als Vx en alle andere volumina uitgedrukt zijn in totaal volume als eenheid dan mogen we schrijven:

$$V_s = \frac{1}{r_s^2} \int_{r_s}^{r_{max}} F(r) r^2 dr \quad (3b)$$

De hoeveelheid verplaatste vloeistof 1 op het tijdstip (Rx) (uitgedrukt in porienvolume) bestaat uit totale porienvolume met stralen van rx en groter en de hoeveelheid vloeistof verkregen uit de capillairen (r<rx) in welke vloeistof 1 gedeeltelijk verplaatst is.

$$R_s = \int_{r_s}^{r_{max}} F(r) dr + \frac{1}{r_s^2} \int_{r_s}^{r_s} F(r) r^2 dr \quad (4)$$

Uit formule 3b en 4 kan F(r)dr direct worden afgeleid. Om dit te kunnen doen, is een uitdrukking dR/dV, met rx het gedeelte van de verplaatste vloeistof in het totale volume, afgeleid door formule 3b en 4 te differentieren naar rx. Formule 3b wordt nu:

$$\frac{dV_s}{dr_s} = - \frac{2}{r_s^3} \int_{r_s}^{r_{max}} F(r) r^2 dr \quad (5)$$

en formule 4

$$\frac{dR_s}{dr_s} = - \frac{2}{r_s^3} \int_{r_s}^{r_s} F(r) r^2 dr \quad (6)$$

Formule 3, 4, 5, en 6 resulteren samen in:

$$V_s \left(\frac{dR}{dV} \right)_s = \frac{1}{r_s^2} \int_{r_s}^{r_s} F(r) r^2 dr = R_s - \int_{r_s}^{r_{max}} F(r) dr \quad (7a)$$

$$R_s - V_s \left(\frac{dR}{dV} \right)_s = \int_{r_s}^{r_{max}} F(r) dr \quad (7b)$$

Het verloop van de binnendringende vloeistof (2) wordt direct afgelezen uit de doorbraakcurve. Door dit verloop te spiegelen in de Crel = 0.5-as wordt het verloop verkregen van de verdrongen vloeistof. De hoeveelheid verdrongen vloeistof R (1) wordt verkregen door de oppervlakte onder de gespiegelde curve te integreren. Het verkregen verloop van dit volume wordt uitgezet tegen het aanwezige totale volume, (V). Rx, Vx en (dR/dV)x kunnen experimenteel bepaald worden. Rx-Vx(dR/dV)x kan grafisch bepaald worden als van de R - V curve daar het intercept van de raaklijn aan de R - as gelijk is aan : Rx - Vx(dR/dV)x. Zie Fig.4.

Uit de grafische afleiding kan de fractie van het totale porienvolume bepaald worden dat in genomen wordt door poriën met stralen tussen de r_x en de r_{max} . Om de r_x te berekenen gaan we als volgt te werk. Als K de doorlatendheid is van het bodemmateriaal, de verplaatsende vloeistof V_x dan : $V_x = K \frac{A}{\eta l} \Delta p t$.

Dit gecombineerd met formule 2 geeft : $v_x = \frac{8l}{r_x^2} K A$

Als V_x weer is uitgedrukt in totaal porienvolume als eenheid dan mogen we schrijven:

$$V_x = \frac{8K}{f r_x^2}, \dots \dots \dots r_x^2 = \frac{8K}{f V_x}$$

(naar Klinkenberg, 1957)

Samengevat kan dus op deze manier aan de hand van het verband tussen de verplaatste en de verplaatsende vloeistof een idee verkregen worden hoe de cumulatieve effectieve poriëndiameterverdeling is van het monster. De resultaten worden weergegeven in een dimensionale eenheid van relatief volume (S) dat wordt ingenomen door een buis capillairen met verschillende diameters. Uit de grafiek kan dan een schatting gemaakt worden van het percentage "immobiel" water (1). Het "immobiele"-water bevindt zich in dat gedeelte van het volume dat van de stroming is uitgesloten, hetgeen blijkt uit het volume waarvoor de cumulatieve poriëndiameterverdeling (CPV) bepaald is (Bouma, 1979).

5 RESULTATEN

Met het bepalen van doorbraakcurven in het drainageonderzoek is pas in een later stadium begonnen, vandaar dat maar in vijftien proeven doorbraakcurven bepaald zijn. Naast het gebruikte bodemmateriaal dat verschillend van structuur was, werden ook verschillende omhullingsmaterialen gebruikt. Deze combinatie leverde telkens een unieke combinatie op. Ondanks de onderling grote verschillen zijn wat betreft het stromingspatroon wel overeenkomsten te constateren. Het stromingspatroon in het structuurloos bodemmateriaal was zo fundamenteel anders dan het patroon in het bodemmateriaal met structuur, dat dit duidelijk naar voren kwam in het verloop van de doorbraakcurven.

De curven kunnen worden onderverdeeld in doorbraakcurven van gronden met structuur en van structuurloze-gronden; elke doorbraakcurve is ook "vertaald" naar een cumulatieve effectieve poriëndiameterverdeling. Elke doorbraakcurve wordt gekarakteriseerd door een tweetal punten namelijk i) het punt (V / V_0) voor $C / C_0 = 1$ en ii) het punt (V / V_0) voor $C / C_0 = 0.5$. Het debiet waarbij de bepaling heeft plaats gevonden, de gemiddelde poriediameter van het gedeelte dat meedoet aan de stroming, het percentage "immobiel"-water en de uitspoelings-status worden ter verdere informatie bijgevoegd.

De uitspoelings-status is een indicatie van de mate van uitspoeling gedurende de proef, oplopend van 0 tot 6, resp. geen uitspoeling tot een uitspoelingslaag van 2cm. op de drainplaat. Naarmate de curve meer naar links verschuift, V / V_0 voor $C/C_0 = 1.0$ wordt dus kleiner, is er meer sprake van een heterogeen stromingspatroon. Ter verduidelijking zie figuur 1. Voor elke curve zijn deze gegevens samengevat in tabel 2.

Tabel 2: De karakteristieke punten van de doorbraakcurven .

BODEMMATERIAAL met STRUCTUUR								
Proef	Kolom	Debiet (cc/sec)	C/C ₀ =0.5 (V/V ₀)	C/C ₀ =1.0 (V/V ₀)	Gem. Diam. (* 10 ⁻⁴ m)	Immo. water (%)	Uitspoel status	
1 Valther. Dun geroerd	2	0.85	0.75	0.9	0.217	30	0	
		0.95	0.50	0.6	0.222	45	0	
		2.2	0.4	0.8	0.209	55	1	
3	3	0.7	0.9	1.6	0.180	10	0	
		11.9	0.1	0.2	1.360	95	3	
		11.9	0.1	0.15	1.578	95	4	
2 Uithuiz. Dun geroerd	2	0.02	0.2	0.4	0.040	5	2	
		4.05	0.2	0.3	0.397	75	2	
		3.70	0.1	0.2	0.448	85	2	
		4.45	0.1	0.2	1.205	85	2	
3 Uithuiz. Dun ongeroid	2	2.95	0.15	0.4	0.508	70	0	
		2.90	0.25	0.7	0.244	80	0	
		4	0.60	0.85	1.5	0.134	20	0
1.75	0.35		0.60	0.309	65	0		
1.60	0.35		0.60	0.301	60	0		
4 Uithuiz. Dun geroerd	1	1.00	0.2	0.35	0.311	80	1	
		3	1.70	0.15	0.25	0.368	75	1
			1.30	0.25	0.50	0.284	85	1
5 Lelystad Volumineus ongeroid	4	4.85	0.25	0.40	1.440	75	0	
		2.50	0.15	0.25	1.170	80	0	
		1.05	0.25	0.30	0.414	75	0	

BODEMMATERIAAL met STRUCTUUR							
Proef	Kolom	Debiet (cc/sec)	C/Co=0.5 (V/Vo)	C/Co=1.0 (V/Vo)	Gem. Diam. (* 10 ⁻⁴ m)	Immo. water (%)	Uitspoel status
6	3	0.42	0.80	1.80	0.156	15	2
Lelystad		0.60	0.80	1.60	0.161	15	2
Volumineus		1.00	0.70	0.90	0.128	40	2
geroerd		1.95	0.75	0.85	0.145	45	2
7	2	9.31	0.10	0.20	3.800	90	3
Uithuiz.							
Volumineus	3	11.26	0.20	0.30	3.300	80	4
geroerd		11.33	0.21	0.30	3.300	80	4
8	2	0.48	1.0	1.75	0.017	0	0
Lelystad		1.95	0.55	0.70	0.019	50	6
volumineus							
geroerd	3	5.10	0.20	0.30	2.24	85	4
		8.75	0.20	0.25	2.73	85	5
9	2	0.23	0.15	0.25	0.174	85	0
Willemstad		0.80	0.15	0.25	0.163	80	0
Volumineus							
ongeroid	3	0.35	0.20	0.30	0.193	80	0
		1.30	0.25	0.35	0.190	75	1
10	2	6.26	0.15	0.35	3.30	85	2
Willemstad		7.44	0.10	0.25	2.85	85	3
Volumineus		11.00	0.10	0.25	4.17	85	5
geroerd	3	3.65	0.15	0.30	1.80	85	2
		4.75	0.10	0.20	2.86	90	3
		10.2	0.10	0.20	3.48	90	5
11	2	1.15	0.40	0.6	0.216	55	0
Valther.		1.40	0.45	0.6	0.184	50	0
Volumineus		2.60	0.40	0.6	0.209	65	0
ongeroid	3	1.15	0.55	0.75	0.203	40	0
		2.75	0.55	0.65	0.205	40	0

STRUCTUURLOOS BODEMMATERIAAL							
Proef	Kolom	Debiet (cc/sec)	C/Co=0.5 (V/Vo)	C/Co=1.0 (V/Vo)	Gem. Diam. (* 10 ⁻⁴ m)	Immo. water (%)	Uitspoel status
12	2	1.3	0.62	0.75	0.203	25	0
Valtherm		12.00	0.10	0.20	1.58	90	6
Vol. geroerd							
13	3	0.32	0.45	0.5	0.166	50	0
Lelystad		1.90	0.85	1.05	0.188	5	0
Dun		2.85	0.90	1.05	0.183	5	0
		3.45	0.90	1.05	0.187	5	0
	4	0.6	0.80	0.95	0.159	15	0
		1.3	0.90	1.0	0.162	5	0
		2.3	0.95	1.1	0.167	0	0
		2.7	1.00	1.1	0.157	0	0
14	1	0.45	0.8	1.2	0.151	10	0
Lelystad		2.15	0.8	1.0	0.214	10	0
Dun (zonder drainplaat)		4.00	0.9	1.0	0.250	5	0
15	2	1.40	0.7	0.85	0.381	20	0
Valtherm.		5.46	0.75	0.85	0.415	20	0
Dun		10.49	0.75	0.85	0.394	20	0
	3	1.35	0.75	0.9	0.352	25	0
		5.35	0.80	0.9	0.344	20	0
		9.88	0.8	0.9	0.369	20	0

De resultaten van de doorbraakcurven (DBC) van het bodemmateriaal met structuur vertonen grote onderlinge verschillen die echter onder te verdelen zijn in vier groepen: i) DBC blijft het zelfde en de effectieve poriëndiameterverdeling verandert (fig.5), ii) DBC verandert maar niet de poriëndiameterverdeling (fig. 6), iii) beide karakteristieken veranderen (fig. 7) en iv) beide veranderen nauwelijks (fig. 8, 9a, b en 10a, b). Aan de hand van een aantal voorbeelden, die min of meer representatief zijn, zullen de vier groepen besproken worden.

1. Zie Fig.5. Nadat 20% van het totale porienvolume verplaatst is, blijkt de zout-oplossing door te breken hetgeen duidt op een erg heterogeen stromingspatroon, zie fig. 1. Het percentage "immobiel"-water (I) is erg hoog ~ 80 %. Er is echter een ontwikkeling te zien in de poriëndiameterverdeling. Voor het debiet van 0.02 cc/sec. valt de verdeling buiten de schaal . Uit eigen observatie bleek dat de verandering van de gradient het gevolg te zijn van het ontsnappen van luchtballen die de stroming beïnvloedden. Het debiet is van het begin af aan erg laag maar wel een heterogeen patroon, na het ontsnappen van de luchtballen

neemt het debiet aanzienlijk toe.

2. Zie Fig.6. Er vindt veel uitspoeling plaats (zie tab.2) hetgeen een verandering in het stromingspatroon veroorzaakt. Het debiet wordt aanzienlijk hoger. Parallel aan deze toename loopt ook de gradient op, toch verandert er weinig aan de poriënverdeling. De uitspoeling schijnt niet veel effect te hebben op de poriënverdeling die het stromingspatroon bepaalt. Het percentage "immobiel"-water (I) verandert echter wel.
3. Zie Fig.7. Hier vindt geen uitspoeling plaats maar vindt wel een grote verschuiving naar links plaats. Onder een toename van de druk treedt er toch een verandering in het stromingspatroon op en een verandering in de poriënverdeling terwijl er uiterlijk weinig aan het monster verandert.
4. Zie Fig.8; Fig. 9a, b en Fig. 10a, b. Bij verhoging van het debiet verandert er weinig aan de DBC's en de effectieve poriëndiameterverdeling blijft onveranderd. Dit beeld werd bij het bodemmateriaal met een structuur waargenomen. Het stromingspatroon duidde op een erg heterogene structuur, zie fig.8. In deze categorie vallen ook de DBC's die gemeten zijn van structuurloos materiaal, zie fig. 9a, b. Bij een aanzienlijke toename van het debiet verandert het stromingspatroon nauwelijks. Het type stromingspatroon is echter duidelijk verschillend. Het verloop van de doorbraakcurve duidt op een homogeen patroon. Deze doorbraakcurven hebben veel weg van de doorbraakcurve (A) in fig. 1. Zelfs bij een aanzienlijke verhoging van het debiet verandert het stromingspatroon weinig. De steilheid van de cumulatieve poriëndiameterverdeling duidt op een zeer evenredige verdeling van de poriën.

Het verschil dient opgemerkt te worden tussen fig.10a en fig.10b. De doorbraakcurve duidt in beide gevallen op een heterogene situatie, het debiet blijkt echter totaal verschillend te zijn. Het bodemonster van fig. 10a is een ongeroerd monster terwijl fig. 10b de doorbraakcurve in een geroerd monster weer geeft. Er is sprake van een groot structuurverschil dat echter niet wordt aangetoond door het gebruik van doorbraakcurven daar er in beide gevallen sprake is van een heterogeen stromingspatroon. De invloed van macroporiën in het ongeroerde monster is hier ook duidelijk aantoonbaar maar resulteert niet in een hoog debiet.

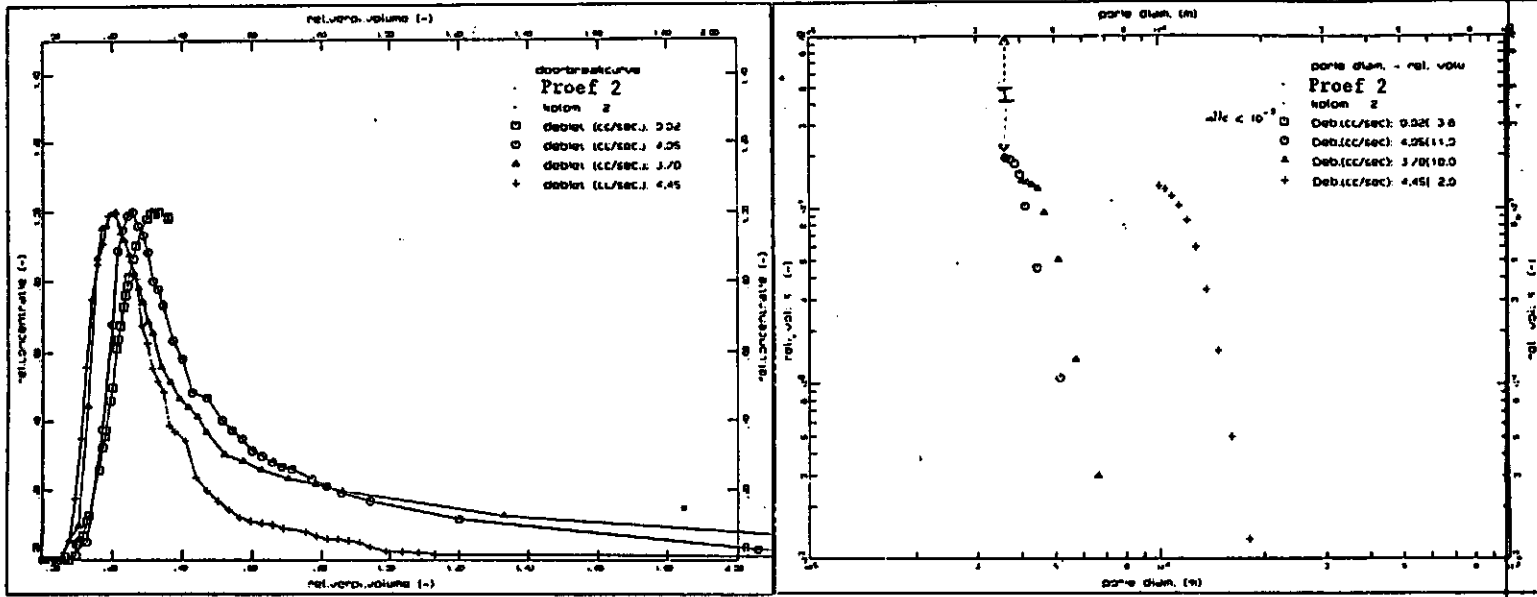


Fig. 5: Voorbeeld waarbij geen verandering optreedt in de doorbraakcurve maar wel in de poriënverdeling.

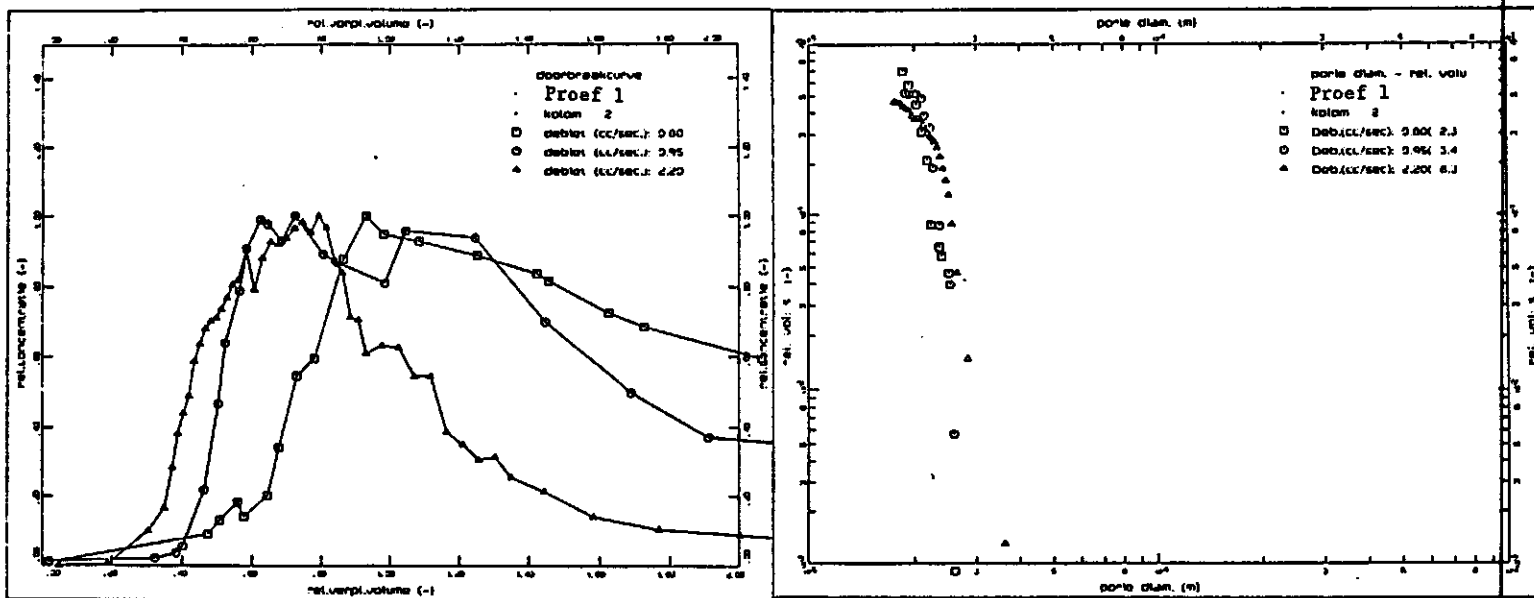


Fig. 6: Voorbeeld waarbij er verandering optreedt in de doorbraakcurve maar waarbij de poriënverdeling het zelfde blijft.

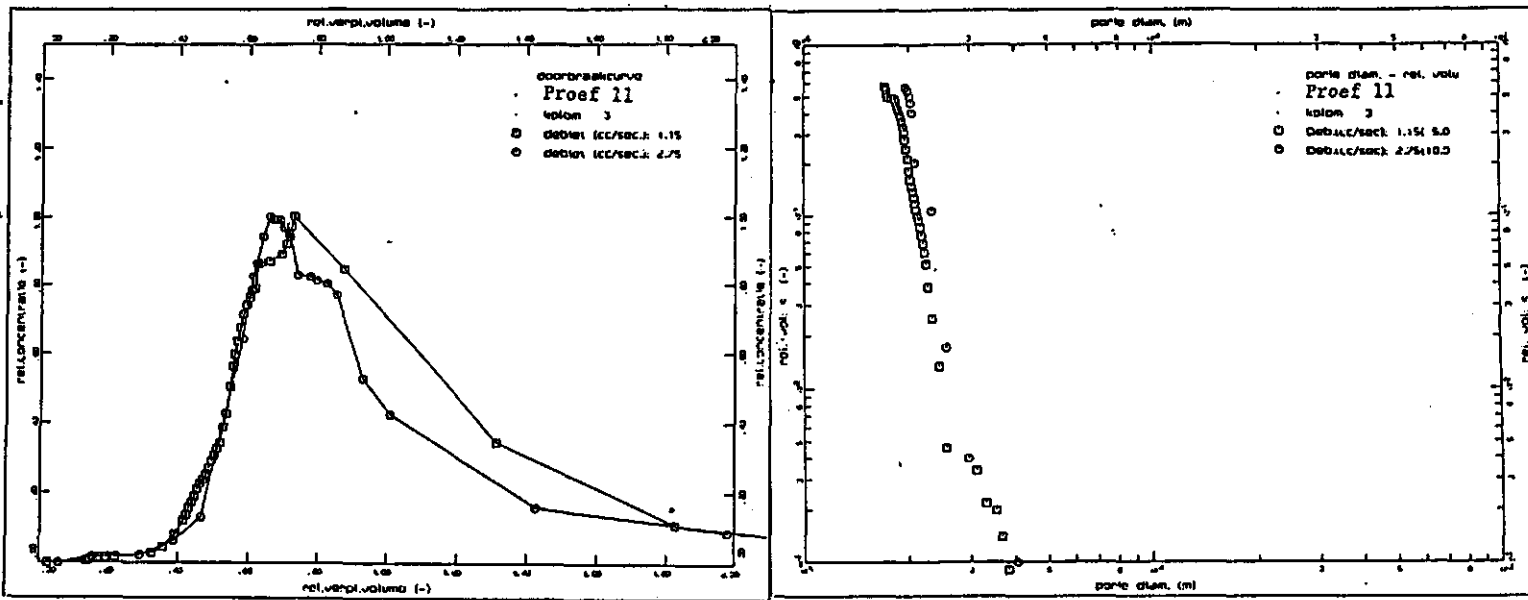


Fig. 7: Voorbeeld waarbij er zowel verandering in de doorbraakcurve als in de poriënverdeling optreedt.

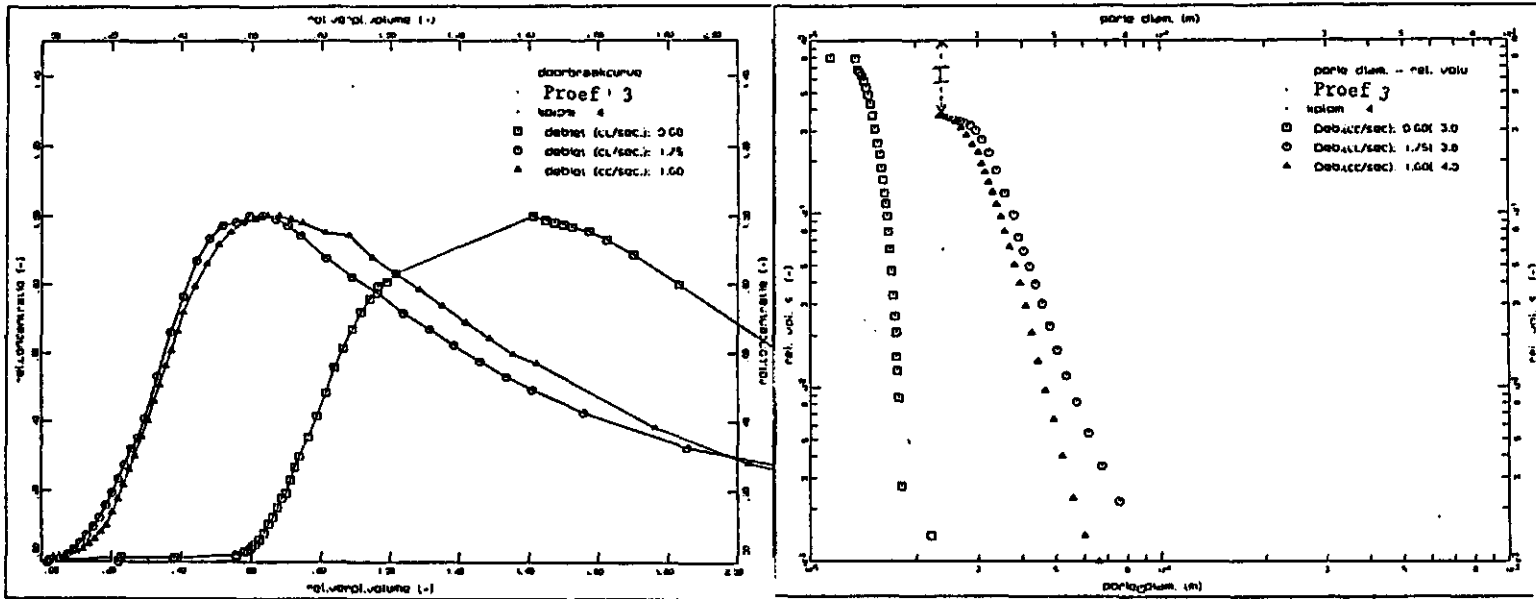


Fig. 8: Voorbeeld waarbij zowel in de doorbraakcurve als in de poriënverdeling geen verandering optreedt.

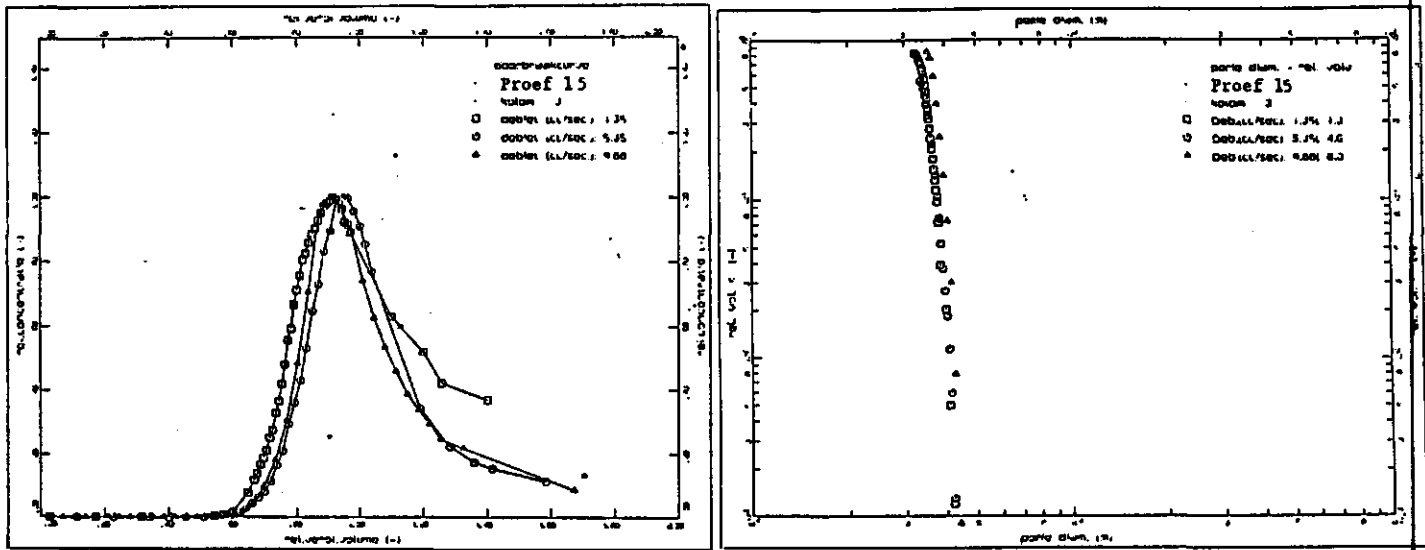


Fig. 9a: Voorbeeld waarbij zowel in de doorbraakcurve als in de porieverdeling geen verandering optreedt.
 STRUCTUURLOOS BODEMMATERIAAL

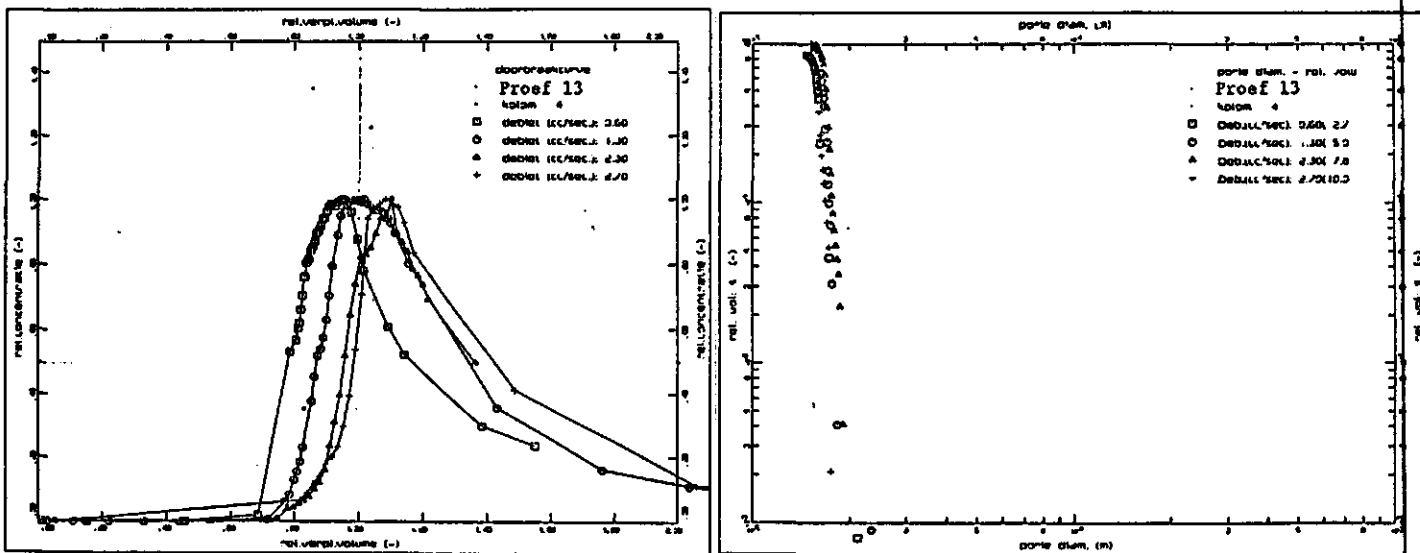


Fig. 9b: Voorbeeld waarbij zowel in de doorbraakcurve als in de porieverdeling geen verandering optreedt.
 STRUCTUURLOOS BODEMMATERIAAL

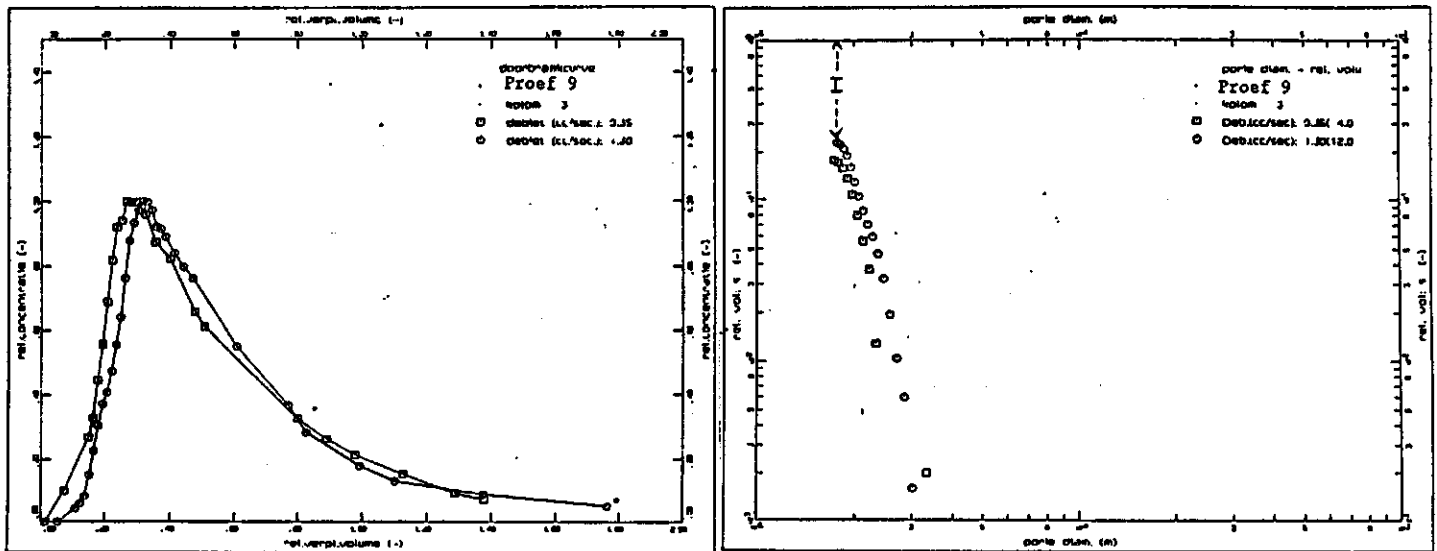


Fig. 10a: Voorbeeld waarbij zowel in de doorbraakcurve als in de porienverdeling geen verandering optreedt.
 BODEMMATERIAAL met STRUCTUUR (ONGEROERD)

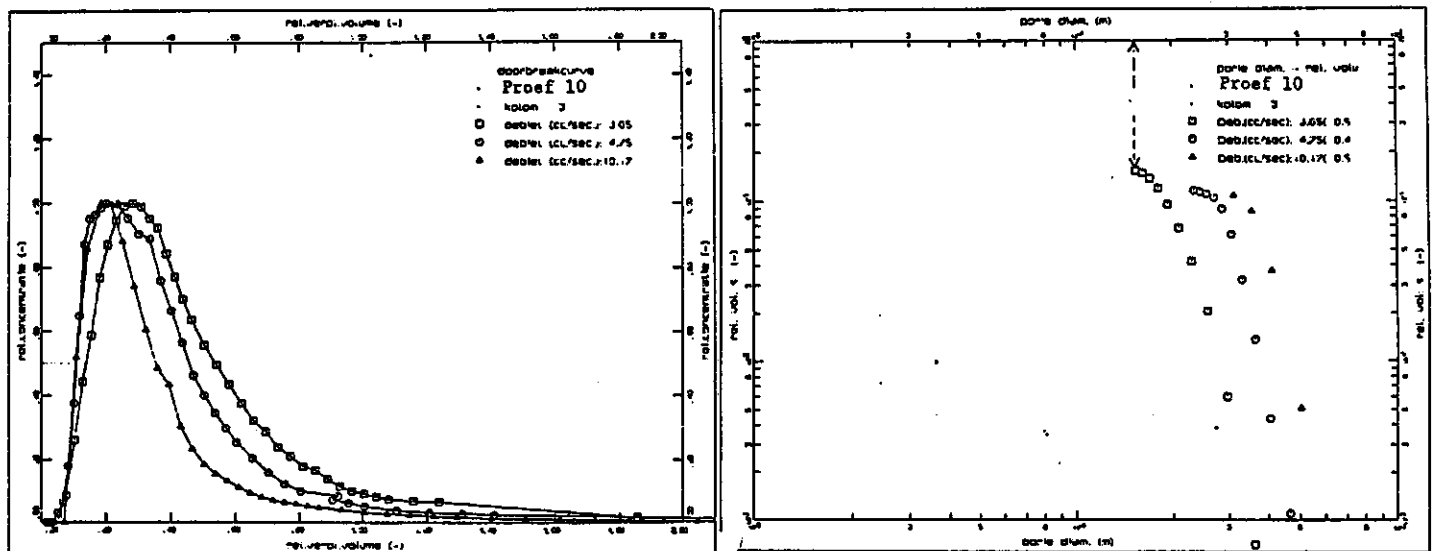


Fig. 10b: Voorbeeld waarbij zowel in de doorbraakcurve als in de porienverdeling geen verandering optreedt.
 BODEMMATERIAAL met STRUCTUUR (GEROERD)

6 CONCLUSIES

De doorbraakcurven van de grondmonsters met structuur, zowel geroerd als ongeroerd kunnen worden ingedeeld in vier categorieën. Deze geven allemaal een indicatie van de ontwikkeling van of het al aanwezig zijn van een heterogene structuur. De mate van heterogeniteit wordt bepaald door de mate van verschuiving van de doorbraakcurve naar links.

De aanwezigheid van een heterogeen stromingspatroon blijkt sterk afhankelijk te zijn van het debiet. De invloed van de grotere poriën blijkt dan toe te nemen. Bij een hoog debiet zal de doorbrekende zout-oplossing minder de kleinere poriën in diffunderen. Er zullen dan bepaalde stroombanen preferenter worden. Dit blijkt ook uit een toename van het percentage "immobiel"-water (I).

Indien de mate van heterogeniteit, uitgedrukt in percentage "mobiel"-water (M) ($= 100\% - I$), uitgezet wordt tegen het debiet waarbij de doorbraakcurve bepaald is, blijkt dat daar tussen een duidelijk verband bestaat, zie fig. 11.

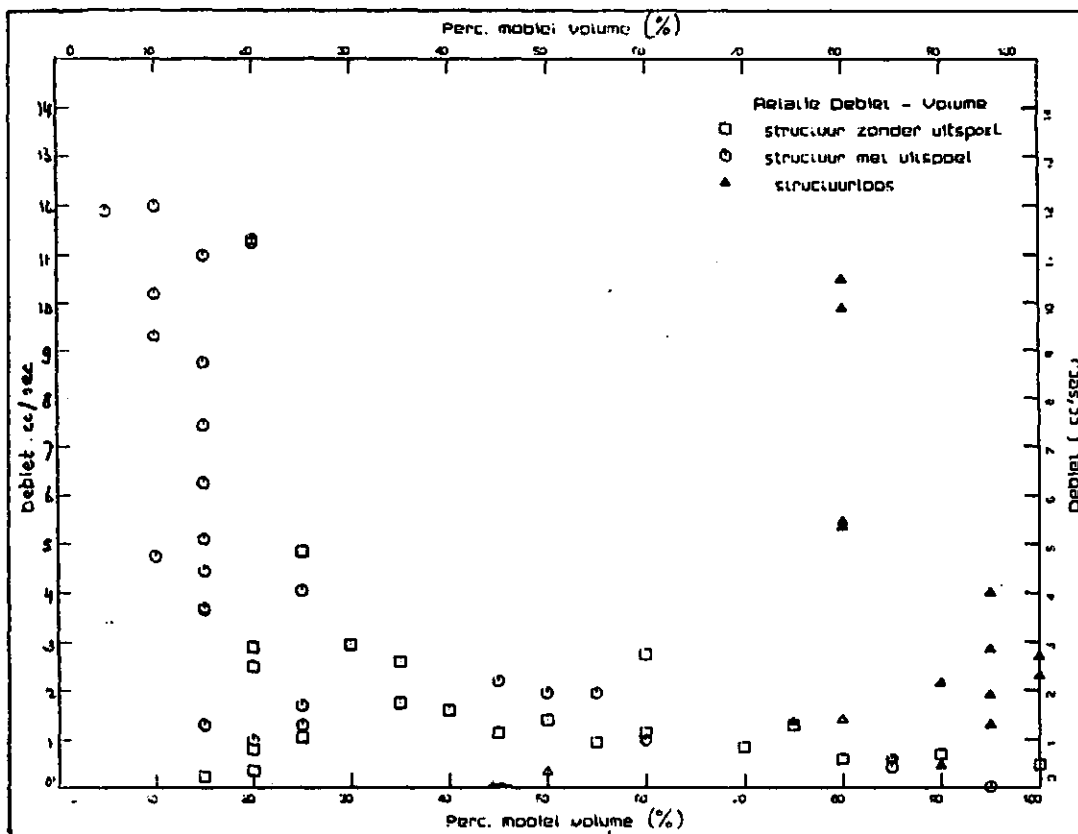


Fig. 11: Relatie tussen het volume "mobiel"-water en het debiet

Bij een toename van het debiet blijkt dat het percentage "mobiel"-water afneemt. Dit verband is alleen van toepassing op het bodemmateriaal met structuur. De proeven die gedaan zijn met structuurloos Valthermond en Lelystad materiaal vertonen een heel andere relatie. Bij een vrij uniforme poriënverdeling vindt de doorbraak plotseling plaats. Ook bij het verhogen van het debiet vindt er geen verandering plaats van het stromingspatroon, er blijft sprake van een homogeen patroon. Uitgezet in figuur 11 blijkt dat er een afwijkende relatie bestaat. Dit ondersteunt de gedachte dat het gebruik van structuurloos materiaal wezenlijk iets anders is dan het gebruik van bodemmateriaal met een duidelijke structuur.

Bij een gelijkblijvend totaal volume van de kolom en een vergelijkbaar debiet ($> 3\text{cc/sec.}$) neemt t.o.v. de structuurloze monsters het "mobiel"-water percentage van de monsters met bodemmateriaal met structuur met 70 % af. Bij het zelfde debiet en een afname van het doorstroomde oppervlak zal een toename van de gradient optreden. Hier uit kan geconcludeerd worden dat de grond, die zich rond de preferente stroombanen bevindt en het filter, dat op plaatsen waar het in contact staat met die stroombanen onder een verhoogde stromingsdruk zal komen te staan. Deze plaatselijke verhoogde stromingsdruk zal het omhullingsmateriaal dan ook plaatselijk zwaarder belasten. Als gevolg hiervan resulteert dit in een hoger risico van het onvoldoende functioneren van het omhullingsmateriaal. Bij een heterogeen stromingspatroon zal ook een grotere kans bestaan op verstopping van de stroombanen, daar de stroming beperkt wordt tot een klein oppervlak, zie groep 1 (fig. 5).

Bij het gebruik van structuurloos materiaal zal het omhullingsmateriaal erg regelmatig belast worden, ook bij hoge debieten. Het bodemmateriaal heeft een dussdanige structuur dat het onder extreme omstandigheden wordt getest. Deze omstandigheden worden echter weer in hoge mate "verzacht" door het homogene stromingspatroon en de regelmatige belasting.

Het gebruik van bodemmateriaal met of zonder structuur in het onderzoek aan drainageomhullingsmaterialen levert een duidelijk aantoonbaar verschillend stromingspatroon op. Deze verschillende patronen, die bij het bodemmateriaal met structuur afhankelijk zijn van het debiet, maken duidelijk dat het omhullingsmateriaal niet los gezien mag worden van het bodemmateriaal waarin het omhullingsmateriaal gebruikt wordt. Toekomstige onderzoeksactiviteiten zijn er dan ook op gericht om de combinatie bodem en omhullingsmateriaal in ongestoorde toestand te bestuderen (Stuyt, 1986). Bij het gebruik van grondkolommen zal het noodzakelijk zijn om na te gaan of het stromingspatroon al of niet van invloed is op hetgeen dat onderzocht wordt. De structuur van het bodemmateriaal in de grondkolom is van grote invloed op het patroon en dus zal de aard van het te gebruiken bodemmateriaal goed overwogen moeten worden.

7 LITERATUUR

- Bouma, J. 1987. Stroming van water, Bodemkunde van Nederland, Stiboka, Hfst. 10, blz.:155
- Bouma, J. and J.H.M. Wösten, 1979. Flow pattern during extended saturated flow in two, undisturbed swelling clay soils with different macro structures. Soil Sci. Soc. Am. J. 43:16-22
- Davies, P.A., J.N. Henderson, C.W. Dennis, 1987. Filters for pipe drains: - bridging factors. Research and Development in Agriculture 4, 2(1987) pp. 109-115
- Dierickx, W., 1987. Field experience and laboratory research on drainage envelopes. Prod. 3th. International Drainage Workshop, Columbus, Ohio. Dec. 1987.
- Dierickx, W., Ch. Lennoz-Gratin, L.C.P.M. Stuyt, 1987. Joint European Research into Land Drainage Envelopes. Prod. 3th. International Drainage Workshop, Columbus, Ohio. Dec. 1987.
- Dierickx, W. and H. Yuncuoglu, 1982. Factors effecting the performance of drainage envelope materials in structurally unstable soils. Agricultural Water Management 5,3:215-225.
- Lagacé, R., W. Skaggs, 1982. Prediction of drainsilting and filter requirement criteria. Prod. 2th. International Drainage Workshop, Washington, Dec. 1982.
- Klinkenberg, K.L., 1957. Pore Size Distribution of Porous Media and Displacements Experiments with Miscible Liquids. Petrol. Transactions AIME, 1957 vol.210:366-369
- Nielsen, D.R. and J.W. Biggar, 1961. Miscible Displacement in Soils: 1 Experimental Information. Soil Sci. Soc. Am. J. 25:1-4
- Seijger, L.G., 1978. Laboratorium onderzoek van omhullingsmaterialen voor drainagebuizen. Nota 1088, Nov. 1978, I.C.W.
- Seyfried, M.S. and P.S.C. Rao, 1987. Solute Transport in Undisturbed Columns of an aggregated Tropical Soil: preferential flow effects. Soil Sci. Soc. Am. J. 51:1434-1444
- Stuyt, L.C.P.M., 1983. Laboratorium onderzoek aan omhullingsmaterialen voor drainage buizen, een interim rapportage. Nota 1436, Aug. 1983, I.C.W.
- Stuyt, L.C.P.M., 1986. Developments in land drainage envelope materials. Proc. Symp. 25th. International Course on Land Drainage. Wageningen, Nov. 1986
- Willardson, L.S., 1982. Exit Gradients at drain openings. Prod. 2th. International Drainage Workshop, Washington, Dec. 1982.
- Zeijts van, T.E.J., 1986. Voorlopige aanbevelingen voor de keuze van drainageomhullingsmaterialen. Cultuurtechnisch Tijdschrift, jrg.25 nr. 5: blz.343-356

