

32/446(74) 2<sup>de</sup> ex

# Vergelijking van de verdampingsmethode, korstenmethode en hangende waterkolom voor bepaling van doorlatendheids- en waterretentiekaracteristieken

LANDBOUW  
STARINGGEBOUW

J. Stolte  
G.J. Veerman

Rapport 74

STARING CENTRUM, Wageningen, 1990



15 AUG. 1990

18n 521047\*

## REFERAAT

Stolte, J. & G.J. Veerman, 1990. Vergelijking van de verdampingsmethode, korstenmethode en hangende waterkolom voor bepaling van doorlatendheids- en waterretentiekarakteristieken. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 74. 38 blz.; 11 fig; 5 tab.

Doorlatendheids- en waterretentiekarakteristieken kunnen met verschillende methoden worden bepaald. Het is zinvol om de methoden onderling te vergelijken. Op initiatief van de commissie Bodemkwaliteit/Fysisch onderzoek van de onverzadigde zone, onderdeel van het Nederlands Normalisatie-Instituut, is in 1989 een onderzoek gestart naar de verschillende bepalingsmethoden van doorlatendheids- en waterretentiekarakteristiek. Het Bodemfysisch Laboratorium van het Staring Centrum heeft als bijdrage aan dit onderzoek bepalingen met de "verdampingsmethode volgens Wind", "korstenmethode" en "hangende waterkolom" uitgevoerd. Verder zijn door toepassing van bestaande analytische functies fits gemaakt van de meetresultaten. Het resultaat van het fitten is een parameterset die in verschillende modelstudies gebruikt kan worden. Op die manier kan de  $k-\theta$  relatie en de stijghoogtekarakteristiek afgeleid worden.

Trefwoorden: waterretentie, pF-curve, doorlatendheid, onverzadigde zone, bepalingsmethoden, analytische functie, stijghoogte, Staringreeks, Rijternareeks.

ISSN 0924-3070

©1990

STARING CENTRUM Instituut voor onderzoek van het Landelijk Gebied

Postbus 125, 6700 AC Wageningen

Tel.: 08370-19100; telefax: 08370-24812; telex: 75230 VISI-NL

Het Staring Centrum is een voortzetting van:

- het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW),
- het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu,
- de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp",
- de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

Het Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm en op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Staring Centrum.

project nr. 'fyslab 3'

# INHOUD

	blz.
SAMENVATTING	7
1 INLEIDING	9
2 MATERIAAL	11
2.1 Bodemhorizonten	11
2.2 Granulaire samenstelling	11
2.3 Monstername	12
3 METHODEN	13
3.1 Verdampingsmethode	13
3.1.1 Meting	13
3.1.2 Berekening	14
3.1.3 Verwerking meetgegevens	15
3.1.4 Discussie verdampingsmethode	15
3.2 Korstenmethode	15
3.2.1 Bepaling van de verzadigde doorlatendheid	16
3.2.2 Korstenmethode met vrije uitstroom	17
3.2.3 Korstenmethode op grondkolom	17
3.3 Methode hangende waterkolom	18
4 RESULTATEN	21
4.1 Doorlatendheidskarakteristiek	21
4.2 Waterretentiekarakteristiek	21
5 TOEPASSING RESULTATEN	25
5.1 Analytische functies	25
5.2 Wegingsfactoren	26
5.3 Gefitte curven	27
5.4 k- $\theta$ -relatie	30
5.5 Stijghoogtekarakteristiek	30
6 CONCLUSIE	35
LITERATUUR	37
FIGUREN	
1 Opstelling geautomatiseerde k-h- $\theta$ relatie : verdampingsmethode volgens Wind	14
2 Opstelling voor de bepaling van de verzadigde doorlatendheid	16
3 Opstelling voor de bepaling van de onverzadigde doorlatendheid m.b.v. de korstenmethode met vrije uitstroom	17
4 Opstelling voor de bepaling van de onverzadigde doorlatendheid m.b.v. de korstenmethode op grondkolom	18
5 Opstelling voor het meten van vocht karakteristieken : de hangende waterkolom	19
6 Meetresultaten doorlatendheid van de vier monsters	22
7 Meetresultaten waterretentie van de vier monsters	23
8 Waterretentiekarakteristieken van de vier monsters	28

9	Doorlatendheidskarakteristieken van de vier monsters	29
10	k- $\theta$ relatie van de vier monsters	31
11	Stijghoogtelijnen bij een flux van 0,1 en 0,2 cm/dag van de vier monsters	32

#### TABELLEN

1	Herkomst en diepte monsters	11
2	Granulaire samenstelling	12
3	Parameters van de verschillende monsters	30
4	Indeling van de vier monsters in Rijtema- en Staringreeks klassen	33
5	Stijghoogte waarden bij $h = -16\ 000$ cm van de vier monsters en overeenkomende klassen van de Staring- en Rijtemareeks	33

## SAMENVATTING

In dit rapport zijn de resultaten samengevat van de bepalingen van de doorlatendheids- en waterretentiekarakteristieken van vier bodemhorizonten die op het Bodemfysisch Laboratorium van het Staring Centrum zijn uitgevoerd. Het doel is om de methoden met elkaar te vergelijken en de resultaten te combineren, waardoor de karakteristieken zo volledig mogelijk kunnen worden vastgesteld.

Het onderzoek is een initiatief van de commissie Bodemkwaliteit/Fysisch Onderzoek van de onverzadigde zone, onderdeel van het Nederlands Normalisatie-Instituut. Het doel van de commissie is om tot een normalisatie van meetmethoden te komen.

De bepalingen betreffen de waterretentiekarakteristiek en onverzadigde doorlatendheid met de "verdampingsmethode volgens Wind", de onverzadigde doorlatendheid met de "korstenmethode" (inclusief de verzadigde doorlatendheid), en de waterretentiekarakteristiek met behulp van de "hangende waterkolom".

Het meettraject van de methoden voor de doorlatendheidskarakteristiek is verschillend waardoor een vergelijking niet is te maken. De resultaten sluiten wel op elkaar aan.

De bepaling van de waterretentiekarakteristiek levert met de verschillende methoden een nagenoeg zelfde resultaat.

Door toepassing van het Van Genuchten-Mualem model is het mogelijk om een goede waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek door de verschillende meetresultaten te fitten. Deze 'curve fitting' heeft plaatsgevonden nadat de meetresultaten kritisch waren bekeken en zonodig voorzien van een wegingsfactor.

De fit van de verschillende curven levert een parameterset op waarmee de stijghoogtekarakteristiek en de  $k$ - $\theta$ -relatie van de verschillende monsters is bepaald.

## 1 INLEIDING

Het doel van het onderzoek was de bepalingsmethoden van de doorlatendheids- en waterretentiekarakteristiek zoals die door het Bodemfysisch Laboratorium van het Staring Centrum worden toegepast te vergelijken en te combineren. Daartoe zijn van vier bodemhorizonten de doorlatendheids- en waterretentiekarakteristiek bepaald. De monsters waren afkomstig uit een zand-, löss-, zavel-, en kleiprofiel.

Doorlatendheids- en waterretentiekarakteristieken kunnen met verschillende methoden worden bepaald. Iedere methode is slechts te gebruiken voor de bepaling van een beperkt traject van deze karakteristieken. Het is daarom zinvol de methoden met elkaar te vergelijken en de resultaten te combineren, waardoor de karakteristieken zo volledig mogelijk kunnen worden vastgesteld. Dit rapport geeft het resultaat weer van een onderzoek daartoe, waarbij gebruik wordt gemaakt van methoden zoals die op het Bodemfysisch Laboratorium van het Staring Centrum worden toegepast.

De aanleiding tot het onderzoek was een initiatief van de commissie Bodemkwaliteit/Fysisch Onderzoek van de onverzadigde zone, onderdeel van het Nederlands Normalisatie-Instituut. Om de verschillende bepalingsmethoden te inventariseren heeft genoemde commissie afdelingen van universiteiten en het Staring Centrum, als gebruikers van de methoden, uitgenodigd hun kennis bij elkaar te brengen. Het doel hiervan is om tot normalisatie van de bepalingsmethoden te komen. Bijdragen zijn geleverd door:

- Universiteit van Amsterdam, Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium;
- Rijks Universiteit Utrecht, vakgroep Fysische Geografie;
- Landbouw Universiteit Wageningen, vakgroep Hydraulica en Afvoerhydrologie;
- Staring Centrum Wageningen, afdeling Bodemfysisch Laboratorium.

Bij de kennisuitwisseling zijn de verschillende methoden gepresenteerd en bediscussieerd. Het bleek dat niet elke gebruiker ervaring heeft met alle besproken methoden. Om tot een betere afstemming van meetmethoden te komen, is besloten dat van vier bodemhorizonten door ieder genoemde instantie de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek wordt bepaald. Deze bepaling wordt uitgevoerd met behulp van de methode die door de betreffende instantie het meest gebruikt wordt.

In het tweede hoofdstuk worden de monsters beschreven waarna de verschillende meetmethoden besproken worden.

Het betreft de bepalingen van:

- de waterretentiekarakteristiek en onverzadigde doorlatendheid met de "verdampingsmethode volgens Wind";
- de onverzadigde doorlatendheid met de "korstenmethode" (inclusief de verzadigde doorlatendheidsbepaling);
- de waterretentiekarakteristiek met "de hangende waterkolom".

De resultaten van deze bepalingen worden in het vierde hoofdstuk samengevoegd. Deze hoofdstukken vormen de bijdrage aan de studie van de commissie Bodemkwaliteit/Fysisch onderzoek van de onverzadigde zone van het N.N.I.

Wij hebben in het vijfde hoofdstuk door toepassing van het Van Genuchten-Mualem model curven door de meetresultaten gefit. Deze fit levert een parameterset op die gebruikt wordt voor het afleiden van een  $k-\theta$ -relatie en stijghoogtekaracteristiek van de verschillende monsters.

## 2 MATERIAAL

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van vier verschillende monsters. Dit hoofdstuk beschrijft de monsters en de manier van monsternamen.

### 2.1 Bodemhorizonten

Om voldoende inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van de verschillende methoden is het noodzakelijk om metingen te doen aan grondmonsters met een groot verschil in bodemfysische eigenschappen. Om dit te realiseren zijn horizonten van uiteenlopende textuur bemonsterd. Herkomst en diepte van de monsters staat vermeld in tabel 1.

Tabel 1 Herkomst en diepte monsters

aard materiaal	herkomst	diepte (cm)
stuifzand	Kootwijk	60-80
lichte klei	Wageningen	40-60
löss	Groesbeek	30-50
zavel	Colijnsplaat	60-80

### 2.2 Granulaire samenstelling

De granulaire samenstelling van de verschillende monsters staat vermeld in tabel 2. De gegevens zijn afkomstig van de Universiteit van Amsterdam, Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium.

Het monster Colijnsplaat is in twee horizonten verdeeld omdat uit de textuuranalyse bleek dat de laag van 60-70 cm nogal afweek van de laag van 70-80 cm. Doordat er verschillende monstergroottes gebruikt zijn is het dus mogelijk dat de monsters gestoken zijn in lagen met verschillende textuur. Toch gaan we er in de verdere bewerking van uit dat er homogene monsters zijn gebruikt.



Tabel 2 Granulaire samenstelling (%)

korrelgrootte- klassen  (µm)	monster				
	Kootwijk (leemarm zand)	Groesbeek 60-70 cm (zandig leem)	Colijnsplaat 70-80 cm (zware zavel)	Colijnsplaat (lichte zavel)	Wageningen (lichte klei)
< 2	0,69	10,71	19,59	15,25	26,84
2-16	0,10	7,87	7,86	5,61	27,38
16-63	0,44	64,64	26,71	18,40	25,33
63-125	9,18	4,16	42,07	50,45	3,60
125-250	48,58	6,40	3,63	9,99	3,99
250-500	31,89	4,96	0,12	0,27	9,73
500-2000	9,12	1,25	0,02	0,04	3,12

### 2.3 Monstername

De grootte van de grondmonstercylinders varieert afhankelijk van de gebruikte methode. De cylinders worden aan de onderkant voorzien van een ijzeren snijring. Vervolgens worden ze op de te bemonsteren horizont gezet en verticaal de grond ingedrukt. Dit gebeurt of hydraulisch of door de grond om de cylinder weg te snijden en gelijktijdig de cylinder met de hand rechtstandig naar beneden te drukken.

De monsters werden in mei en juni 1989 genomen. De weersomstandigheden waren met uitzondering van Colijnsplaat gunstig.

- In Kootwijk zijn de monsters gestoken in het onderzoeksgebied van de Universiteit van Amsterdam. Omdat dit een bosperceel is, werd wat hinder ondervonden van wortels. De grond was zeer droog en lastig niet verstoord in de cylinders te krijgen.
- In Wageningen was de monstername binnendijks van de Grebbedijk (monsterplaats LUW). Het betreft hier een overslaggrond. Het profiel is erg heterogeen, d.w.z. er zijn plekken puur zand aanwezig. Bij de monstername zijn die plekken zoveel mogelijk vermeden.
- Het profiel in Groesbeek heeft geen mooie egale kleur (gevekt), maar lijkt wel homogeen van samenstelling.
- In Colijnsplaat werd bemonsterd op de proefboerderij Rusthoeve. De homogeniteit van het profiel werd als matig beoordeeld, wat wordt bevestigd door de textuurbepaling (zie tabel 2). De natte weersomstandigheden verhinderden optimale bemonstering.

### 3 METHODEN

De doorlatendheids- en waterretentiekarakteristieken van de vier verschillende bodemhorizonten zijn bepaald volgens de verdampingsmethode, de korstenmethode en de hangende waterkolom.

De verschillende methoden worden in dit hoofdstuk beschreven.

#### 3.1 Verdampingsmethode

##### 3.1.1 Meting

Uit een met water verzadigd homogeen grondmonster verdampt het water. Op regelmatige tijden wordt het totale gewicht van het monster gemeten, waardoor de verdamping kan worden berekend.

De verdamping vindt alleen plaats aan de bovenzijde van het monster.

Gelijktijdig met de gewichtsafname worden op vier diepten de drukhoogten gemeten met behulp van tensiometers. Gedurende de verdamping zullen de drukhoogten afnemen.

In ons geval is de meting uitgevoerd aan grondmonsters van 8 cm hoogte en 10,3 cm diameter. De tensiometers (lengte 65 mm, diameter 6 mm) zijn horizontaal geplaatst op afstanden van resp. 1, 3, 5 en 7 cm van de bovenkant van het grondmonster. Van elke horizont zijn 2 monsters doorgemeten.

De meting eindigt als de tensiometer in het bovenste compartiment doorslaat ( $h = -800$  mbar). Voor een zware kleigrond duurt dit 1 à 2 dagen, voor een grove zandgrond kan dit 2 à 3 weken duren. De verdamping kan worden versneld door boven het monster te ventileren.

Na het experiment wordt het monster gedroogd (105 °C), waarna het gemiddelde watergehalte op elk meettijdstip kan worden berekend.

Deze bepalingmethode is door Boels et al. (1978) geautomatiseerd, waarbij gelijktijdig aan de 8 beschikbare monsters kan worden gemeten. De grondmonsters zijn op krachtopnemers geplaatst en de tensiometers zijn via een vloeistofschakelaar verbonden met een drukopnemer. De meetgegevens worden d.m.v. een datalogger vastgelegd op een cassettape (zie figuur 1).

Voor een optimaal resultaat zal de bepaling aan een aantal condities moeten voldoen, zoals:

- validiteit van de flux theorie
- gelijkmatige verticale stroming
- geen zwel en geen krimp
- luchtdruk in de grond gelijk aan atmosferische druk
- osmotische druk is te verwaarlozen
- isothermische condities
- damtransport in de grond is te verwaarlozen
- homogeen monster
- afmeting monster
- metingen zijn reëel

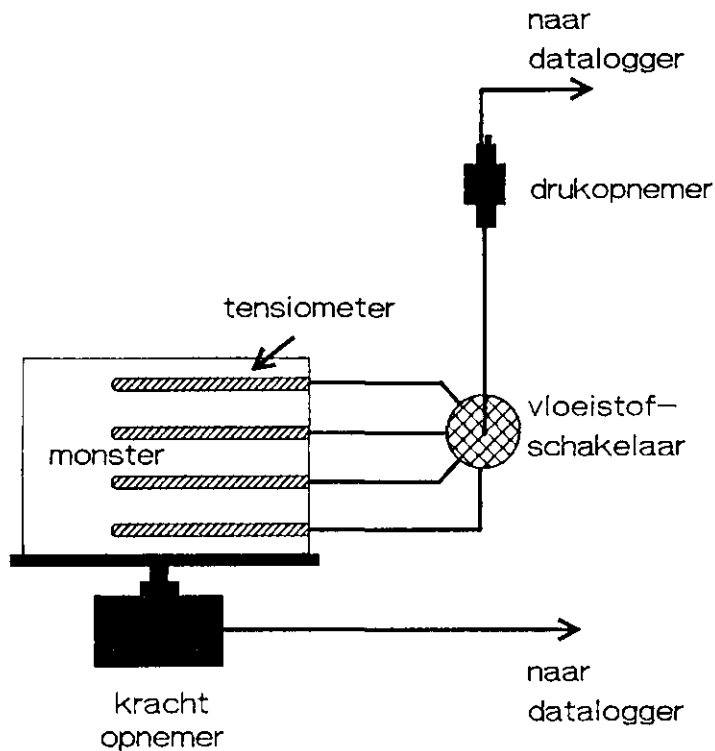


Fig. 1 Opstelling geautomatiseerde k-h- $\theta$  bepaling : verdampingsmethode volgens Wind

### 3.1.2 Berekening

Eerst wordt een waterretentiekarakteristiek bepaald uit het gemiddelde watergehalte en de gemiddelde drukhoogten van het grondmonster op de verschillende meettijdstippen.

Vervolgens wordt uit de meetgegevens met een iteratieve methode (Wind, 1966) de waterretentiekarakteristiek berekend. Daarbij wordt op elk meettijdstip in elk compartiment het watergehalte bepaald uit de gemeten drukhoogten. Aangenomen wordt dat voor het hele compartiment, waarin de drukhoogte wordt gemeten, het watergehalte en de drukhoogte gelijk zijn. De onverzadigde doorlatendheid wordt bepaald uit de berekende fluxdichtheden en de drukhoogtegradiënten tussen de compartimenten. De fluxdichtheid is aan de onderkant van het monster nul en wordt aan de bovenkant gemeten.

De drukhoogtegradiënten tussen de compartimenten worden bepaald uit de gemeten drukhoogten.

De onverzadigde doorlatendheid is nu te berekenen met behulp van de wet van Darcy (vergelijking (1)).

$$q = -k \left( \frac{dh}{dz} - 1 \right) \quad (1)$$

waarin:

- q : flux (cm/dag)
- k : doorlatendheid (cm/dag)
- h : drukhoogte (cm)
- z : diepte (cm)

### 3.1.3 Verwerking meetgegevens

De meetgegevens worden van de cassette-tape via floppy ingelezen op een PDP 11/73. Met behulp van een Fortran programmapakket vindt verwerking plaats. In eerste instantie wordt gerund in automatic mode. Hierbij worden de k-h en de k- $\theta$  relaties beschreven met 2<sup>e</sup> graads polynomen. Resultaten die theoretisch onmogelijk zijn, kunnen worden verbeterd door in manual mode te runnen. De k-h- $\theta$  relaties kunnen daarbij worden beschreven met polynomen van een andere orde, of handmatig m.b.v. polygonen (Fyslab.ICW, 1988).

### 3.1.4 Discussie verdampingsmethode

De verdampingsmethode heeft als voordeel dat meting van het watergehalte op verschillende diepten in het grondmonster niet nodig is (iteratie volgens Wind).

Een nadeel van de methode is dat metingen van drukhoogten lager dan de luchtintree-waarde van de tensiometers (ca. - 800 mbar) niet mogelijk zijn. De resultaten worden weergegeven in plots, met een beschrijving van de k-h- $\theta$  relaties door middel van polynomen.

Een foutenanalyse van de k-h- $\theta$  relaties met de methode van Wind is niet eenvoudig te geven. Hiernaar moet nog verder onderzoek worden gedaan.

Wel is m.b.v. numerieke simulaties aangetoond dat de k waarden die met de methode Wind worden uitgerekend gemiddeld niet significant afwijken van de bekende k waarden (Tamari, 1988).

In het natte traject, bij kleine gradiënten van de stijghoogte, kan echter wel een aanzienlijke ruis optreden.

Een niet perfecte beschrijving van de h- $\theta$  relatie met een polynoom spreekt door in de berekening van de k waarden (Tamari, 1988). Dit is soms te zien in oscillerende k waarden.

De fluxen zijn cumulatief vanaf de bodem. De fouten in de fluxen worden dus opgeteld, waardoor berekeningen van doorlatendheden boven in het monster minder betrouwbaar zijn.

## 3.2 Korstenmethode

De korstenmethode bepaalt de onverzadigde doorlatendheid. Dit gebeurt in twee verschillende opstellingen. Dat zijn de korstenmethode met vrije uitstroom en de korstenmethode op grondkolom. Voor een gedetailleerde

beschrijving van beide methoden zie Bouma (1987). Voordat we deze methoden hebben toegepast hebben we eerst een extra meting aan het monster zonder korst uitgevoerd wat de verzadigde doorlatendheid oplevert.

### 3.2.1 Bepaling van de verzadigde doorlatendheid

De verzadigde doorlatendheid van de verschillende monsters is in dit experiment bepaald met dezelfde opstelling als bij de korstenmethode met vrije uitstroom alleen zonder gebruik te maken van een korst.

Dit is gebeurd in een niet-geconditioneerde laboratorium bij de daar heersende temperatuur (20-30 °C). Gebruik is gemaakt van monsters met een hoogte en diameter van 20 cm. Zie voor een gedetailleerde beschrijving Bouma (1987).

De monsters zijn gedurende ongeveer twee maanden verzadigd door de ringen in een bak met water te plaatsen. Hierna werd op elk monster een dunne waterschijf gezet (zie figuur 2).

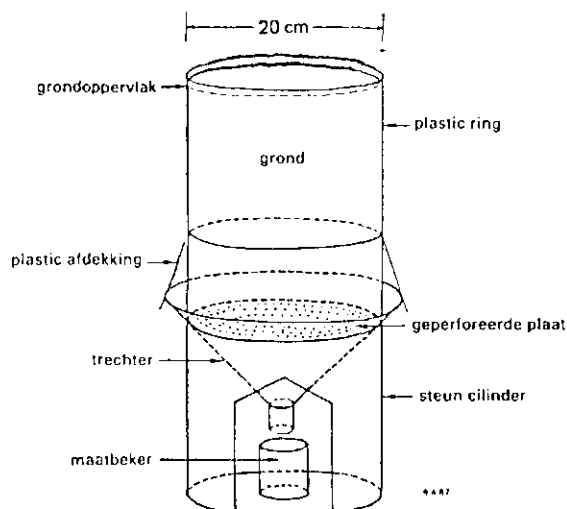


Fig. 2 Opstelling voor de bepaling van de verzadigde doorlatendheid

Aangenomen wordt dat er tijdens de meting in het monster een stijghoogtegradiënt ontstaat die gelijk is aan één. De  $k_s$  is dan gelijk aan de hoeveelheid uitgestroomd water (flux) per tijdseenheid per oppervlakteëenheid. Dit wordt in de opstelling gemeten. De meting is per grondsoort in tweevoud uitgevoerd.

Dit is een betrouwbare methode voor het vaststellen van de verzadigde doorlatendheid, er van uitgegaan dat er wordt gemeten aan een niet verstoord monster. Ook moet het monster verzadigd zijn bij begin van de meting omdat anders het risico van luchtinsluiting optreedt (Verlinden en Bouma, 1983). De waterlaag op het monster moet zo klein mogelijk zijn om aan de voorwaarden te voldoen dat de stijghoogtegradiënt één is. In ons geval was de waterlaag maximaal 2 cm wat resulteert in een fout van - 10 % in de gemeten waarde.

### 3.2.2 Korstenmethode met vrije uitstroom

Bij de korstenmethode met vrije uitstroom wordt op het monster een korst van cement aangebracht en hierop water gezet. Er moet een mengverhouding CEBAR/zand genomen worden waarbij de doorlatendheid van de korst kleiner is dan de doorlatendheid van het monster. Er zal dan in het monster een negatieve drukhoogte ontstaan. Deze drukhoogte wordt met behulp van een tensiometer gemeten. De tensiometer wordt ongeveer 5 cm onder de rand van het monster geplaatst (zie figuur 3). Ook deze bepaling is uitgevoerd in een niet-geconditioneerde ruimte bij de daar heersende temperatuur. Er is gemeten aan dezelfde monsters als bij de verzadigde doorlatendheidsbepaling. Aangenomen wordt dat de stijghoogtegradiënt één is. Door verschillende korsten aan te brengen kan bij verschillende onderdrukken gemeten worden. Onderaan het monster vindt vrije uitstroom plaats. De flux kan dan gemeten worden.

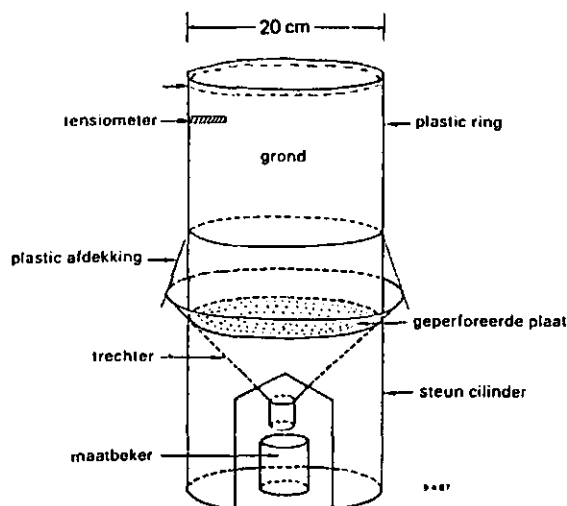


Fig. 3 Opstelling voor bepaling van de onverzadigde doorlatendheid m.b.v. korstenmethode met vrije uitstroom

Doordat er gemeten is met maar 1 tensiometer is de aanname dat de stijghoogtegradiënt één is voorbarig. Door gebruik te maken van twee of meer tensiometers kan de schatting van de gradiënt nauwkeuriger zijn. Het voordeel van de methode is dat op een relatief gemakkelijke manier een doorlatendheidskarakteristiek in het natte traject bepaald kan worden. De grenswaarde van de drukhoogte waarbij nog betrouwbare waarden verkregen wordt is bij gebruik van één tensiometer -5 cm. De mogelijke fout is dan maximaal 25 %.

### 3.2.3 Korstenmethode op grondkolom

De korstenmethode op grondkolom berust op het zelfde principe als die met vrije uitstroom. Doordat het monster op een kolom gevuld met grof zand van ongeveer 1 meter hoogte geplaatst wordt kan hierbij doorgedaan worden tot  $h = -60$  cm. De flux wordt bepaald met behulp van een buret met

mariot-opstelling (zie figuur 4). De drukhoogte wordt 5 cm onder de korst met behulp van één tensiometer gemeten. Ook hier wordt aangenomen dat de stijghoogtegradiënt één is. De bepaling is uitgevoerd in een niet-geconditioneerde ruimte en aan dezelfde monsters als bij de verzadigde doorlatendheidsbepaling.

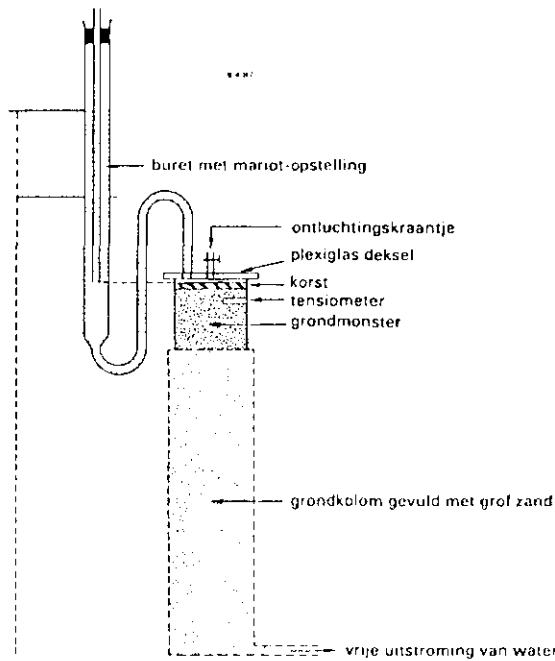


Fig. 4 Opstelling voor de bepaling van de onverzadigde doorlatendheid m.b.v. korstenmethode op grondkolom

Ook hier geldt dat het voorbarig is om ervan uit te gaan dat de stijghoogtegradiënt één is bij gebruik van 1 tensiometer. De nauwkeurigheid van de meetpunten zou beter kunnen door gebruik te maken van meerdere tensiometers.

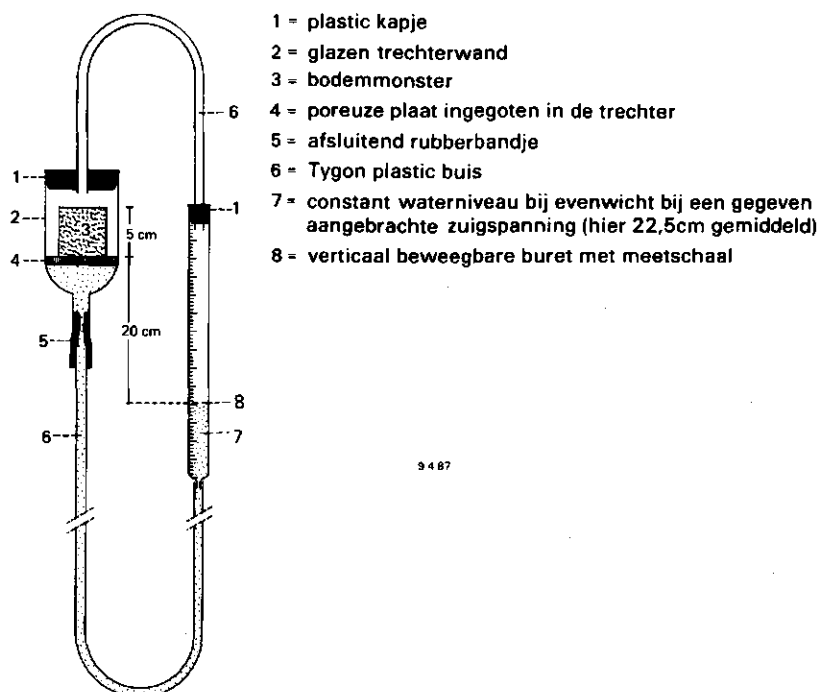
De grens waarbij nog betrouwbaar een flux te meten is hebben wij bij 1 cm per dag gelegd. Bij lagere fluxen wordt het risico van verstoring van de meting door andere factoren groter. Dit kan bijvoorbeeld verdamping van water door de slang zijn.

### 3.3 Methode hangende waterkolom

De waterretentie karakteristiek van de vier verschillende grondsoorten is in deze proef bepaald volgens de hangende waterkolommethode (zie Bouma en Locher, 1987). Bij deze proef wordt het verzadigde monster (in ringen van 293 cm<sup>3</sup>) geplaatst op een poreuze plaat. Deze plaat laat alleen vloeistof door. Dit geheel zit in een glazen stolp waaronder een slang zit die in verbinding staat met een buret (zie figuur 5). De bepaling is uitgevoerd in een geconditioneerde laboratorium bij ongeveer 20 °C. Voordat de bepaling werd uitgevoerd hebben de monsters ongeveer twee maanden in een bak met water gestaan.

De aflezing van de buret vond steeds ongeveer een dag nadat evenwicht was

geconstateerd plaats.



9487

Fig. 5 Opstelling voor het meten van vocht karakteristieken : de hangende waterkolom

Door nu de afstand tussen waterpeil in de buret en de onderkant van het monster te vergroten is de drukhoogte in het monster te verlagen. Dit is gedaan tot  $h = -150$  cm.

Met behulp van het programma VOCHTKAR zijn de meetgegevens verwerkt. De verschillende grondsoorten zijn in tweevoud bepaald.

De methode levert een desorptiecurve op. Het is een relatief gemakkelijke methode om een deel van de waterretentiekarakteristiek te bepalen. Het bereik is beperkt tot een drukhoogte van  $-150$  cm. Het bepalen van de evenwichtsinstelling is lastig vast te stellen. Dit vergt veel tijd, afhankelijk van de grondsoort.



## 4 RESULTATEN

Dit hoofdstuk toont de resultaten van de bepalingen die met de methoden uit het vorige hoofdstuk zijn uitgevoerd. De resultaten worden grafisch weergegeven.

### 4.1 Doorlatendheidskarakteristiek

De meetresultaten van de verschillende doorlatendheidsbepalingen zijn te zien in figuur 6. Alle gegevens zijn in deze grafiek weergegeven. De waarde van de verzadigde doorlatendheid staat weergegeven bij een  $h$ -waarde van 0,1 cm. Dit is niet helemaal juist, de  $k_s$  is bepaald bij  $h = 0$  cm. Door de logaritmische assen is dit punt niet weer te geven.

Niet alle punten zijn even betrouwbaar. Zo neemt de betrouwbaarheid van de meetpunten van de korstenmethode met vrije uitstroom die bij een drukhoogte lager dan -5 cm gemeten zijn af. Dit wordt veroorzaakt doordat de methode is toegepast met maar één tensiometer. Deze punten krijgen bij het fitten van een lijn door middel van analytische functies (zie 5.1) een lagere wegingsfactor.

### 4.2 Waterretentiekarakteristiek

De resultaten van de bepaling van de waterretentiekarakteristiek m.b.v. de hangende waterkolom en de verdampingsmethode staan in figuur 7. Ook hier zijn punten die minder betrouwbaar zijn. De waarde van  $\theta_s$  is een berekende waarde aan de hand van een schatting van de textuur. Deze waarde krijgt dus ook een lagere wegingsfactor bij het fitten van de curve.

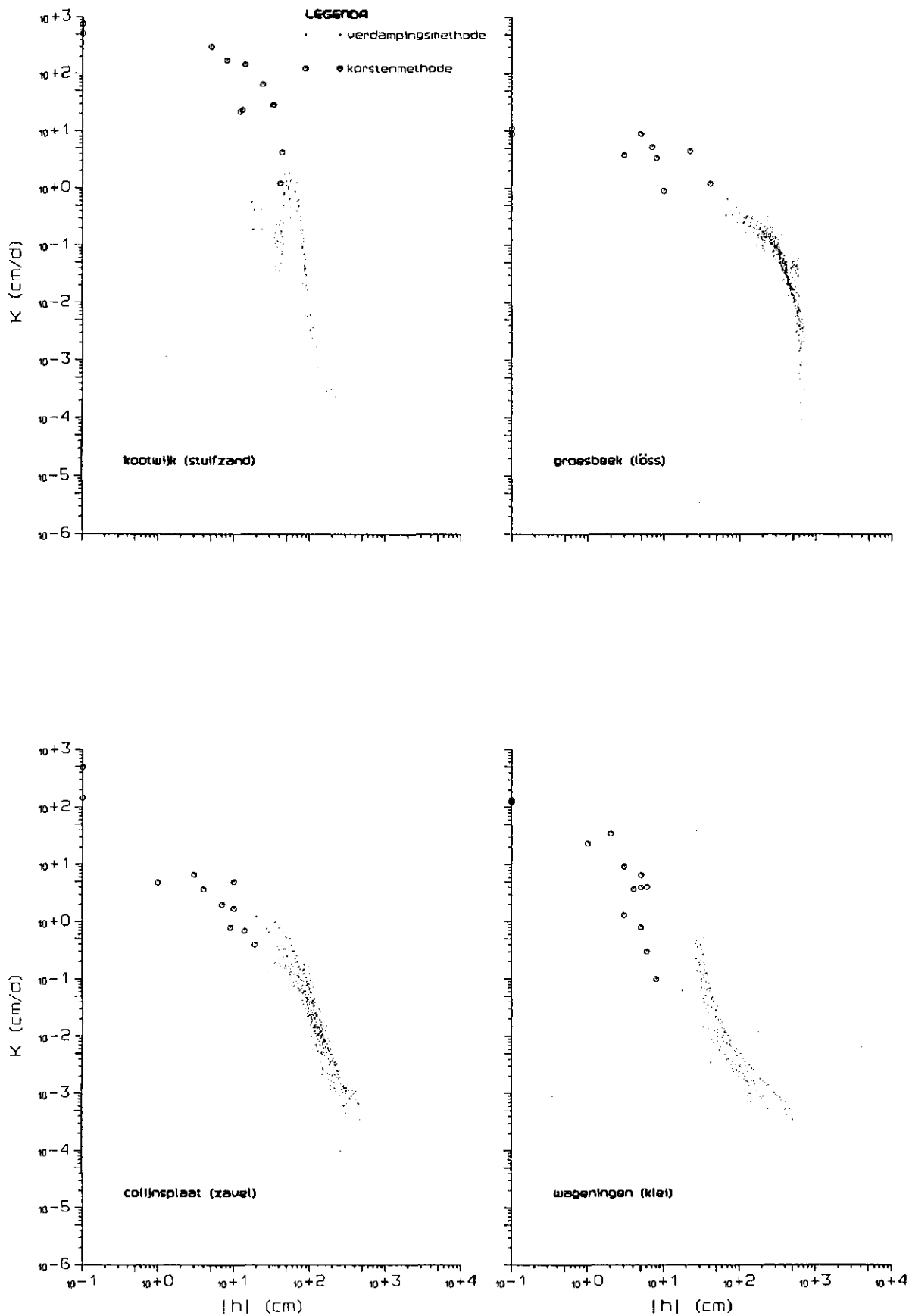


Fig. 6 Meetresultaten doorlatendheid van de vier monsters

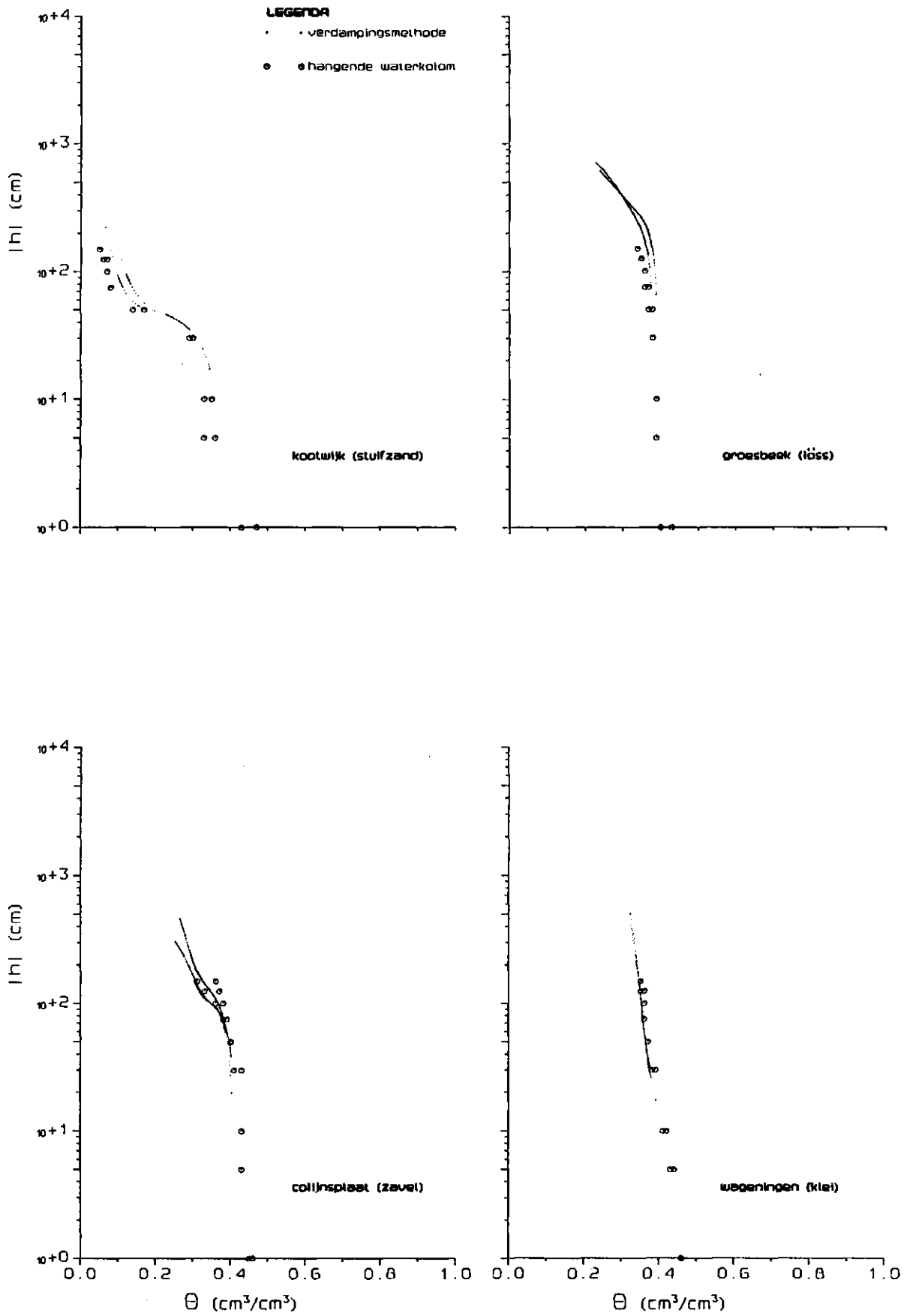


Fig. 7 Meetresultaten waterretentie van de vier monsters

## 5 TOEPASSING RESULTATEN

Door middel van analytische functies opgesteld door Van Genuchten en Mualem kunnen waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken simultaan gefit worden. De fit is afhankelijk van de vooraf vastgestelde wegingsfactoren.

Met behulp van de verkregen parameterset is de  $k$ - $\theta$  relatie en de stijghoogte karakteristiek van de monsters bepaald.

### 5.1 Analytische functies

De meetgegevens zoals die bepaald zijn met de in hoofdstuk 3 genoemde methoden zijn verwerkt met een model van Van Genuchten en Mualem. Van Genuchten (1980) stelt een empirische vergelijking op voor de  $\theta$  als functie van de drukhoogte. De vergelijking luidt als volgt:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h^n|)^m} \quad (2)$$

waarin:

$\theta_r$  = residuair watergehalte

$\theta_s$  = verzadigd watergehalte

$\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  zijn parameters die de vorm van de curve beschrijven

Het residuair watergehalte is het watergehalte van het monster waarbij de gradiënt  $d\theta/dh$  0 is. De parameter  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) is de inverse van de drukhoogte bij het inflectiepunt (is punt waar  $d\theta/dh$  het grootst is).

De dimensieloze parameter  $n$  bepaalt de snelheid waarmee de S-vormige curve bij lage  $h$ -waarden tot de  $y$ -as nadert.

De parameter  $m$  heeft door Van Genuchten de waarde  $1-1/n$  meegekregen om vergelijking (2) te combineren met de door Mualem (1976) opgestelde theoretische poriëngrootte verdeling. Die luidt als volgt:

$$k(h) = k_s S^l \left[ \frac{\int_0^s \frac{1}{h(x)} dx}{\int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx} \right]^2 \quad (3)$$

waarin:

$k_s$  = verzadigde doorlatendheid

$x$  = hulpvariabele

$l$  = parameter

$S$  = relatieve verzadiging

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

Van Genuchten heeft de vergelijkingen (2) en (3) gecombineerd en is tot een nieuwe vergelijking voor de  $k(h)$  gekomen. Die luidt als volgt:

$$k(h) = k_s \frac{[(1 + |\alpha h|^n)^m - |\alpha h|^{n-1}]^2}{(1 + |\alpha h|^n)^{m(l+2)}} \quad (5)$$

Vergelijkingen (2) en (5) heeft Van Genuchten verwerkt in het programma RETC (niet gepubliceerd). Dit is een niet-lineair optimalisatie programma die de parameters  $l$ ,  $\alpha$ , en  $n$  als ook de grootheden  $\theta_s$ ,  $\theta_r$  en  $k_s$  optimaliseert. Deze parameters en grootheden kunnen naar eigen inzicht worden ingevoerd of door het programma worden geoptimaliseerd. Wat de invloed van de grootte van de verschillende parameters en grootheden op de curve is is door Wösten en Van Genuchten (1988) onderzocht.

In deze studie hebben wij de  $\theta_r$  vastgelegd op  $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Dit in navolging van Wösten en Van Genuchten (1988) die bij analyse van  $\theta_r$  tot de conclusie komen dat bij weinig meetgegevens in het droge traject  $\theta_r$  bij optimalisatie nagenoeg 0 wordt. Verder kan in het programma RETC wegingsfactoren aan verschillende meetpunten worden meegegeven. Ook kan een wegingsfactor aan de doorlatendheidskarakteristiek gegeven worden ten opzichte van de waterretentiekarakteristiek.

Hoewel het resultaat van een fit een lijn is moet deze lijn niet als vaststaand beschouwd worden. De parameterset die verkregen wordt beschrijft wel het monster maar moet toch bij gebruik kritisch bekeken worden. De set is afhankelijk van de wegingsfactor die aan verschillende punten wordt gegeven. Het toekennen van deze wegingsfactoren vergt kennis van de bodemfysica en de gebruikte bepalingmethoden. Het vaststellen van de wegingsfactoren moet met zorg gebeuren en zal in de rapportage verantwoord moeten worden.

## 5.2 Wegingsfactoren

Zoals al eerder is opgemerkt is het mogelijk om in het programma RETC de meetgegevens een wegingsfactor mee te geven. Deze wegingsfactor bepaalt dan de mate waarin het betreffende punt meedoet in de fit van de curve. Daarnaast is het ook mogelijk om bepaalde parameters en grootheden een vaste waarde te geven. Het programma zal die waarde dan als vaststaand beschouwen en de curve altijd door dat punt fitten. Zo neemt Wösten (1987) voor zijn curven vaste waarden voor  $k_s$  en  $\theta_s$ .

Omdat in onze studie de waarde van  $k_s$  is gebaseerd op twee metingen willen we deze waarde niet dwingend opleggen. De  $\theta_s$  is gebaseerd op een schatting van de textuur. De conclusie is dat deze waarde over het algemeen te hoog is en dat de werkelijke waarde lager zal zijn. Dus ook deze waarde

willen we niet dwingend opleggen. Doordat de waarde gebaseerd is op een schatting laten we hem zelfs minder zwaar meewegen in de fit van de waterretentie curve. Wij hebben deze waarde een wegingsfactor 0.5 gegeven.

Ook is het mogelijk de zwaarte van de weging van de doorlatendheidskarakteristiek ten opzicht van de waterretentiekarakteristiek te laten variëren. Nadat alle wegingsfactoren voor de individuele punten waren vastgesteld bleek dat verandering van de wegingsfactor een zeer geringe invloed had op de fit. Wösten (1987) konkludeert dat er voor zand wel een hogere wegingsfactor voor de waterretentie moet zijn omdat anders de 'stoel' in de curve niet duidelijk genoeg is. Dat dat in ons onderzoek niet het geval is komt vermoedelijk door het grote aantal meetpunten. De curve 'dwingt' zichzelf daar toch door. Ook in de fits van de stijghoogte blijkt er weinig tot geen verschil te zijn in het variëren van deze wegingsfactor. Wij hebben daarom geen verschil gemaakt in zwaarte van weging en dus de wegingsfactor op 1 gezet.

De verdampingsmethode levert een grote hoeveelheid meetpunten op. Wanneer deze punten even zwaar zouden meewegen dan de beperkte hoeveelheid punten van de hangende waterkolom en korstenmethode zal de fit hoofdzakelijk door de verdampingsmethode worden vastgesteld. Om dit te voorkomen hebben we deze punten voor de helft ten opzichte van de andere punten laten meewegen. Deze wegingsfactor is vastgesteld door te kijken wat de beste fit oplevert.

Verder zijn er nog enkele individuele punten die minder zwaar of zelfs helemaal niet worden meegewogen.

Voor het monster 'Colijnsplaat' zijn dat de punten van de korstenmethode bij een drukhoogte van -10 en -9 cm (met bijbehorende  $k$  van resp. 0,5 en 0,8 cm/dag).

Voor het monster 'Kootwijk' zijn dat de punten van de kortstenmethode bij een drukhoogte van -12 en -13 cm en voor het monster 'Groesbeek' de punten bij een drukhoogte van -10 en -8 cm. Al deze meetpunten hebben een wegingsfactor 0.5 meegekregen. Dit omdat de betrouwbaarheid van deze punten niet zo groot is (veroorzaakt door gebruik te maken van maar één tensiometer in de opstelling van de korstenmethode).

Bij het monster 'Kootwijk' hebben we verder nog alle meetpunten van de verdampingsmethode bij een drukhoogte groter dan -50 cm weggelaten. Deze punten zijn namelijk onbetrouwbaar door de beschrijving van de waterretentiekarakteristiek met een polynoom (zie 3.1.6).

### 5.3 Gefitte curven

Het resultaat van het simultaan fitten van de waterretentiekarakteristiek en de doorlatendheidskarakteristiek is te zien in de figuren 8 en 9. De bijbehorende parameters staan vermeld in tabel 3.

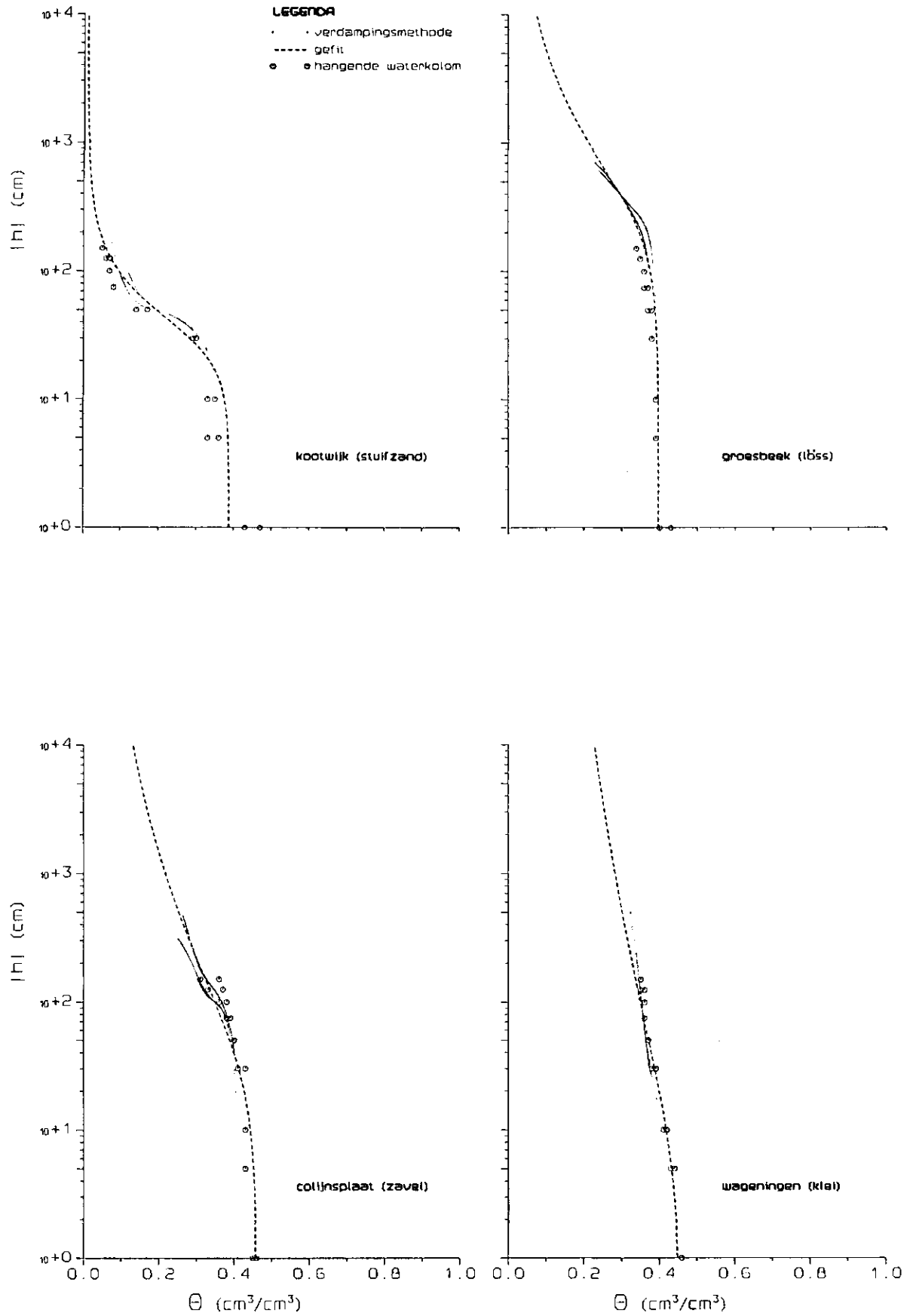


Fig. 8 Waterretentiekarakteristieken van de vier monsters

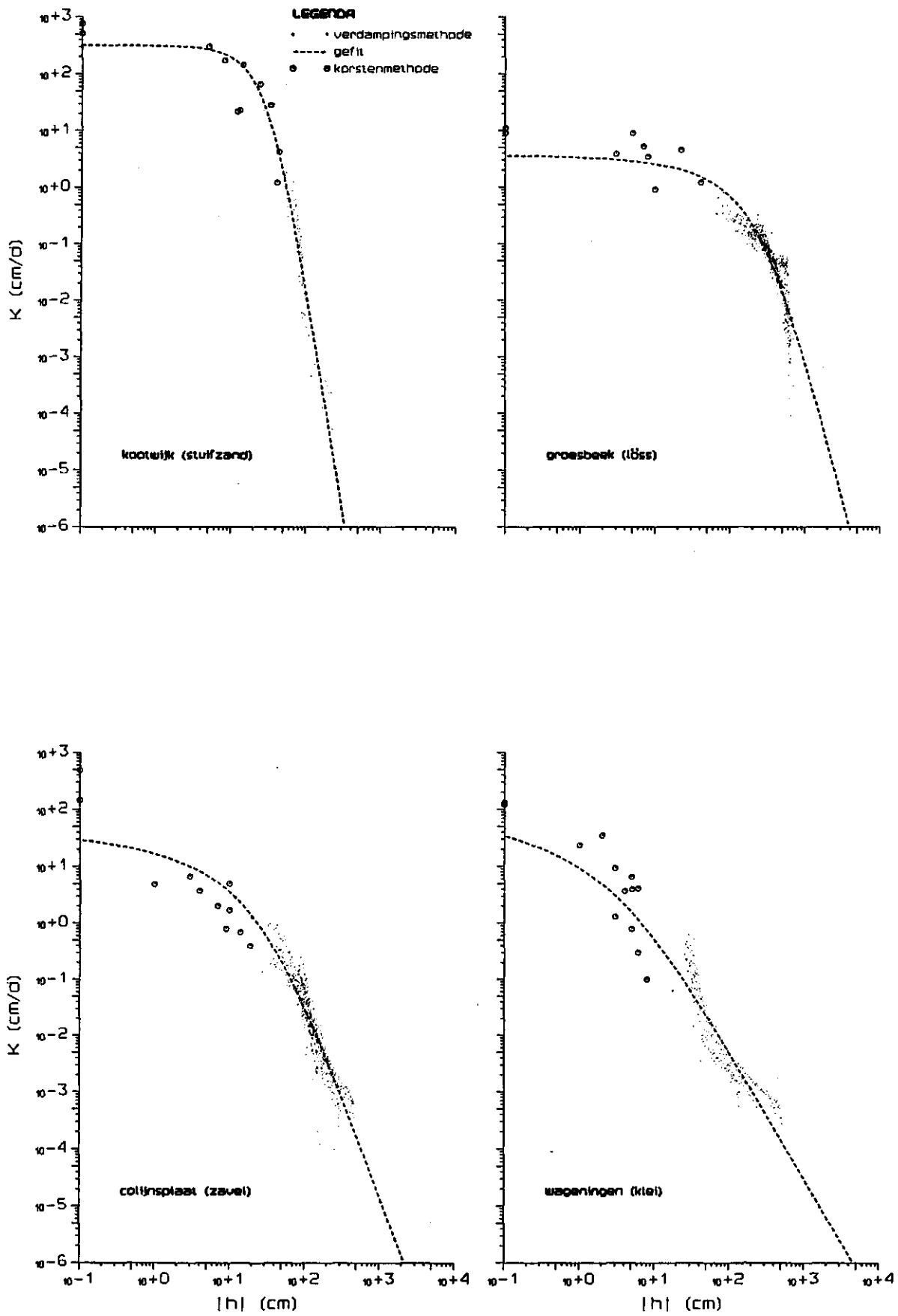


Fig. 9 Doorlatendheidskarakteristiek van de vier monsters



Tabel 3 Parameters van de verschillende monsters

parameter	monster			
	Kootwijk	Groesbeek	Colijnsplaat	Wageningen
$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0,38745	0,39671	0,45876	0,45378
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,02952	0,00311	0,02760	0,15438
$n$	2,33788	1,51732	1,22996	1,09644
$l$	2,52517	4,09933	4,60119	0,47066
$k_s$ (cm/dag)	319,01673	3,65343	53,28019	311,27738

#### 5.4 k- $\theta$ relatie

Naast de doorlatendheidskarakteristiek weergegeven als k(h)-relatie is het ook mogelijk om de doorlatendheidskarakteristiek weer te geven als k- $\theta$  relatie. Met behulp van de parameterset uit tabel 3 is het mogelijk om deze relatie te bepalen. Van Genuchten (1980) combineerde vergelijking (2) en (3) tot de volgende vergelijking:

$$k(S) = k_s S^l \left[ 1 - \left( 1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (6)$$

Hiermee is de k- $\theta$  relatie te berekenen. Het resultaat van deze berekening staat grafisch weergegeven in figuur 10.

#### 5.5 Stijghoogte karakteristiek

Met behulp van de parameterset uit tabel 3 kan voor elke willekeurige drukhoogte een k berekend worden. Een praktische vertaling van deze k(h) relatie is de stijghoogte karakteristiek. Deze karakteristiek geeft aan tot welke hoogte boven de grondwaterstand water in betreffende horizont kan opstijgen bij een vastgestelde fluxdichtheid. De stijghoogte karakteristiek is te bepalen door gebruik te maken van een simulatiemodel (de Laat, 1980). Het model berekent bij verschillende fluxen de stijghoogte (z) ten opzichte van de grondwaterspiegel. Deze berekening gebeurt met behulp van vergelijking (7).

$$z_n = - \int_0^{h_n} \frac{dh}{1 + \frac{v}{k}} \quad (7)$$

waarin:

- $z_n$  = stijghoogte (cm)
- $h_n$  = drukhoogte (cm)
- $v$  = fluxdichtheid (cm/dag)
- $k$  = doorlatendheid (cm/dag)

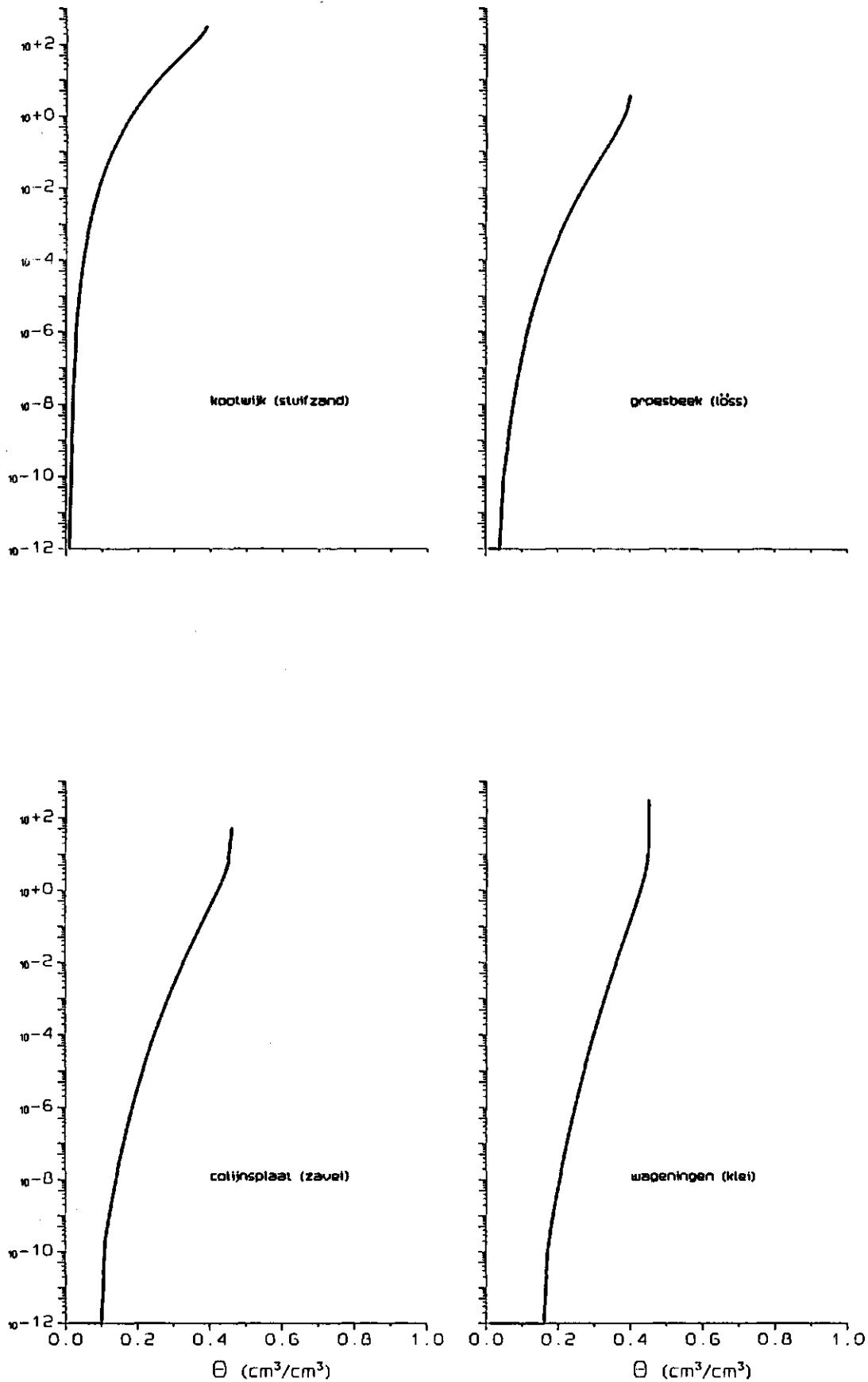


Fig. 10  $k$ - $\theta$  relatie van de vier monsters

Wij hebben de stijghoogte berekend bij twee verschillende fluxen, in navolging van de Staringreeks (Wösten et al., 1987). Het resultaat is te zien in figuur 11.

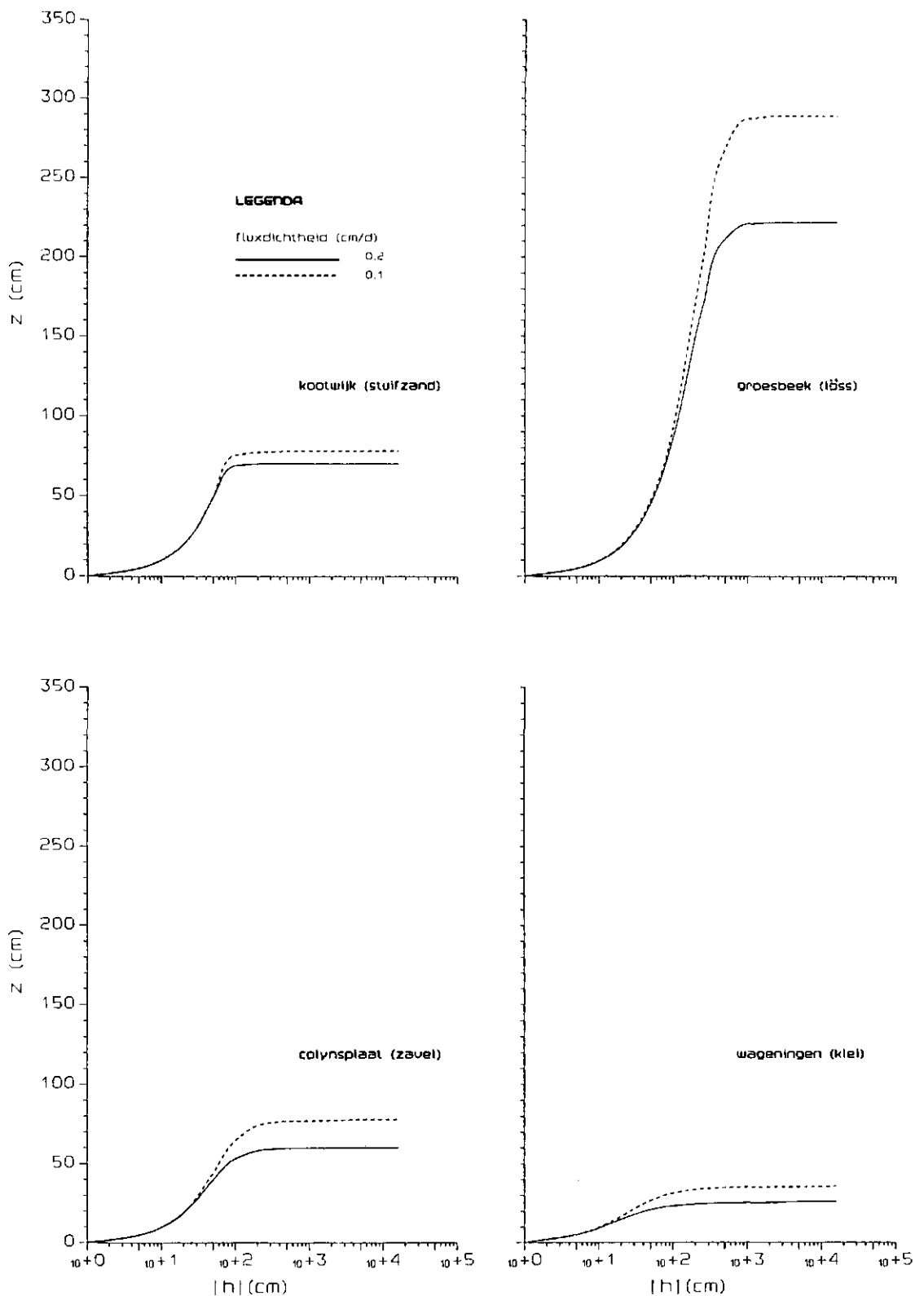


Fig. 11 Stijghoogtelijnen bij een flux van 0,1 en 0,2 cm/dag van de vier monsters

Om het resultaat van de stijghoogte berekening te kunnen plaatsen hebben we de resultaten naast de stijghoogten uit de Staringreeks en de Rijtemareeks (Rijtema, 1969) gelegd. Omdat de beide reeksen een gemiddelde van vele monsters weergeven is een vergelijking met onze gegevens niet mogelijk. De tendensen die optreden zijn wel te vergelijken. Om dat te kunnen doen moeten de monsters ingedeeld worden in klassen uit de Staring- en Rijtemareeks. Dit is te zien in tabel 4.

Tabel 4 Indeling van de vier monsters in Rijtema- en Staringreeksklassen

monster	Staringreeks- klasse	Rijtemareeks- klasse
Kootwijk	O1	medium fine sand
Groesbeek	O14	silt loam
Colijnsplaat	O10	sandy loam
Wageningen	O11	clay loam

De klasse O14 staat niet met meetgegevens in de Staringreeks vermeld omdat daar nog te weinig gegevens van zijn. Er blijken in totaal drie meetgegevens te zijn. Wij hebben deze drie gegevens gebruikt om een vergelijking te kunnen maken. Hoewel de spreiding in stijghoogtewaarden erg groot (100 cm) is zijn we toch van een gemiddelde waarde uitgegaan.

Een vergelijking tussen de verschillende waarden is gemaakt bij een h waarde van - 16 000 cm. De stijghoogte waarden bij deze h-waarde staan voor de twee fluxen vermeld in tabel 5.

Tabel 5 Stijghoogte waarden (cm boven grondwaterstand) bij h = -16 000 cm van de vier monsters en overeenkomende klassen van de Staring- en Rijtemareeks

klasse/ monster	flux (cm/dag)	
	0,1	0,2
O1	100	85
medium fine sand	94	81
Kootwijk	78	70
O14	250	175
silt loam	283	213
Groesbeek	289	222
O10	161	102
sandy loam	70	60
Colijnsplaat	78	60
O11	104	66
clay loam	99	73
Wageningen	36	26

De grootste uitschieter in tabel 4 is Wageningen. Zowel de Rijtema- als de Staringreeks verwachten een veel grotere stijghoogte. De oorzaak voor dit verschil kan liggen in het feit dat de monsterplek niet erg homogeen was. De textuurcijfers zijn afkomstig van de monsters die door de Universiteit van

Amsterdam zijn gebruikt. Het is mogelijk dat zij een monster gebruikt hebben die qua textuur afwijkt van onze monsters. Het monster zou dan in een andere klasse vallen.

Verder blijkt uit tabel 4 dat klasse O10 van de Staringreeks afwijkt in vergelijking met sandy loam en het monster Colijnsplaat. Ook wanneer de klasse O9 van de Staringreeks (lichte zavel) zou worden genomen blijft de afwijking groot. Hierbij moet opgemerkt worden dat de waarde uit de Staringreeks een gemiddelde waarde van een groot aantal monsters is waarbij de spreiding erg groot is.

## 6 CONCLUSIE

De bepaling van de waterretentiekarakteristiek met de hangende waterkolom of met de verdampingsmethode levert een nagenoeg zelfde resultaat. Alleen is het traject van de meetresultaten van de verdampingsmethode groter. Deze methode meet namelijk in het traject van  $h = -20$  cm tot ca.  $-500$  cm (afhankelijk van het monster) terwijl de hangende waterkolom meet in het traject van  $h = -5$  cm tot  $h = -150$  cm.

Bij de bepaling van de doorlatendheidskarakteristiek blijkt het traject van meetresultaten voor de toegepaste methoden verschillend te zijn. Hierdoor is een vergelijking tussen de methoden niet te maken. Wel sluiten de resultaten van de doorlatendheidskarakteristiek van de twee gebruikte methoden goed op elkaar aan. Alleen het monster "Wageningen" laat enig verschil in de aansluiting van beide methoden zien.

De korstenmethode bepaalt het natte traject (tot  $h = -40$  cm) en de verdampingsmethode het droge traject (van  $h = -20$  cm tot  $h = -800$  cm). Wanneer men dus van een monster de doorlatendheidskarakteristiek tot  $h = -800$  cm wil bepalen kan goed gebruik worden gemaakt van de verdampingsmethode en de korstenmethode.

Met behulp van Van Genuchten en Mualem vergelijkingen is een goede fit van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek te geven. Er moet dan wel veel zorg besteed worden aan het vaststellen van de verschillende wegingsfactoren. Dit vereist inzicht in de bodemfysica en de toegepaste bepalingmethoden.

Met behulp van de verkregen parameterset is dan de stijghoogte- en de doorlatendheidskarakteristiek, weergegeven als de  $k-\theta$  relatie, te berekenen.

## LITERATUUR

- Boels, D., J.B.H.M. van Gils, G.J. Veerman en K.E. Wit, 1978. Theory and systems of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivities. *Soil Sci.* 126, 4:191-199.
- Bouma, J. 1987. Stroming van water. In: *Bodemkunde van Nederland deel 1*, 139-157. Den Bosch, Stichting voor Bodemkartering/Malmberg.
- Bouma, J. en W.P. Locher 1987. Binding van Water. In: *Bodemkunde van Nederland deel 1*, 121-137. Den Bosch, Stichting voor Bodemkartering/Malmberg.
- Fyslab.ICW 1988. "KH/KH directory" : A directory of fortran programs for the calculation of soil hydraulic properties (User Manual), version 1.1. Wageningen, ICW. Nota 1886.
- Genuchten, M. Th. Van 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Laat, P.J.M. de 1980. Model for unsaturated flow above a shallow water table, applied to a regional sub-surface flow problem. *Agric. Res. Rep.* 895. Wageningen, Pudoc.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12: 513-522
- Rijtema, P.E. 1969. Soil moisture forecasting. Wageningen, ICW. Nota 513.
- Tamari, S. 1988. Comparison of two procedures for the determination of soil hydraulic properties: An instantaneous profile method and a nonlinear parameter estimation method. Part I (theory), part II (numerical simulation of the experiments), part III (numerical experiments) and part IV (experimental data). Wageningen, ICW. Nota's 1987, 1988, 1989 and 1990.
- Verlinden, H.L. en J. Bouma 1983. Fysische bodemonderzoeksmethoden voor de onverzadigde zone. 's-Gravenhage, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieuhygiëne. VOMIL-rapport BO 22.
- Wind, G.P. 1966. Capillary conductivity data estimated by a simple method. *Water in the unsaturated zone*, Symp. 1966, Wageningen, The Netherlands. *Proc. UNESCO/IASH*, 181-191
- Wösten, J.H.M. 1987. Beschrijving van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken uit de Staringreeks met analytische functies. Wageningen, Stiboka. Rapport 2019.

Wösten, J.H.M., M.H. Bannink en J. Beuving 1987. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland : de Staringreeks. Wageningen, Stiboka. Rapport 1932. Wageningen, ICW. Rapport 18.

Wösten, J.H.M. en M.Th. Van Genuchten 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:1762-1770