

32/446(71) 2^e ex.

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

**Bodemfysische karakterisering van potgrond voor teelt op eb-
en vloedstelsel**

J.A. Bakker
P. Kabat

Rapport 71

STARING CENTRUM, Wageningen, 1990

18 DEC. 1990

REFERAAT

Bakker, J.A. en P. Kabat, 1990. Bodemfysische karakterisering van potgrond voor teelt op eb- en vloedsysteem. Wageningen, Staring Centrum, Rapport 71. 59 blz.; 32 fig.; 8 tab.; aanh.

In de tuinbouwplantenteelt neemt de belangstelling voor teelt op kunstmatig substraat de laatste jaren steeds meer toe. Er wordt gezocht naar nieuwe teeltmethoden en teeltmedia. Een van de teeltmethoden is eb- en vloedsysteem (wisselinfiltratie), waarbij de planten worden opgekweekt op tafels of betonvloeren. Water en voedingsstoffen worden een of meerdere keren per week toegediend door een laag voedingsoplossing op de tafel/vloer te zetten. Eb- en vloedsysteem wordt toegepast vooral bij kapitaalintensievere teelten, zoals de teelt van potplanten en plantmateriaal voor glasgroentebedrijven. Voor het optimaliseren van water- en voedingsgift bij eb- en vloedsystemen met behulp van een simulatiemodel is informatie nodig over de hydrologische eigenschappen en de transporteigenschappen van de groeimedia.

In dit onderzoek is gekeken naar waterretentie, hydraulische doorlatendheid en krimp en zwel van de potgrond. De waterretentiekarakteristiek is gemeten met een aangepaste drukevenwichtsmethode waarbij ook zwel en krimp van het materiaal werden gevolgd. De onverzadigde doorlatendheid is onderzocht met behulp van een verdampingsmethode. Voor de bepalingen in het nattere gebied met de drukhoogte tussen -5 en -100 cm is een nieuwe methode en opstelling ontwikkeld, de zogenaamde dubbele-filtermethode.

De manier waarop de potgrondmonsters werden gemaakt en de wijze van de verzadiging hadden een grote invloed op de relatie tussen vochtgehalte, drukhoogte en onverzadigde doorlatendheid. De potgrond vertoonde sterke hysteresis en de dichtheid bleek in de tijd te veranderen.

Trefwoorden: tuinbouwplantenteelt, potgrond, eb- en vloed, waterretentiekarakteristiek, hydraulische doorlatendheid, zwel/krimp.

ISSN 0924-3070

Copyright 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, en de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp" en 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 verveelvoudigd 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 75007

010cis/09.90

INHOUD

	Blz.
SAMENVATTING	9
1 INLEIDING	11
2 ALGEMENE BESCHRIJVING VAN DE GEBRUIKTE POTGROND	13
3 FYSISCHE KARAKTERISERING VAN POTGROND	15
4 WATERRETENTIEMETING VOLGENS DE DRUK- EVENWICHTSMETHODE	17
4.1 Methode	17
4.1.1 Vervaardiging van de monsters	18
4.1.2 Informatie over de monsters	18
4.2 Resultaten	19
4.2.1 Resultaten eerste monster	19
4.2.2 Resultaten tweede monster	19
4.3 Nabeschouwing	21
5 ONVERZADIGDE DOORLATENDHEID	23
5.1 De dubbele-filtermethode	23
5.1.1 Het bepalen van de doorlatendheid	24
5.1.2 Het maken van de monsters	24
5.1.3 Resultaten	25
5.1.4 Nabeschouwing	27
5.2 De verdampingsmethode	27
5.2.1 Het maken van de monsters	28
5.2.2 Resultaten en discussie	28
6 VERGELIJKING VAN VERKREGEN RESULTATEN	31
7 SUGGESTIES VOOR VERVOLGONDERZOEK	33
LITERATUUR	35
GEBRUIKTE SYMBOLEN EN RELATIES	37
AANHANGSELS	
1 Overzicht van de opstelling voor bepaling van de waterretentie via de drukevenwichts- methode	39
2 Beschrijving van de opstelling voor de doorlatendheidsmeting met behulp van de dubbele filtermethode	41
3 De afzonderlijke resultaten van de met de verdampingsmethode onderzochte monsters	49

TABELLEN

1	Beschrijving van de gebruikte potgrond	13
2	Vochtgehalte (θ) en dichtheid ρ_b (kg dr.st/m ³) van de monsters (na 3 weken eb en vloed). De drukhoogte h is afgeleid uit de plaatshoogte van het monster ten opzichte van de onderzijde van de cylinder, waarbij is aangenomen dat h daar 0 cm was. De krimp is bepaald nadat de monsters in een droogstoof waren gedroogd. Bij de berekening van de krimp, de dichtheid en het vochtgehalte is uitgegaan van het volume (147 ml) van de monsters op het moment van monsternamen	16
3	Overzicht van de resultaten van waterretentiemeting volgens de drukevenwichtsmethode aan het eerste monster van verzadigd naar droog	19
4	Overzicht van de resultaten van waterretentiemeting volgens de drukevenwichtsmethode aan het tweede monster	20
5	Resultaten van doorlatendheidsmetingen aan het eerste monster met behulp van de dubbele filtermethode. De drukhoogten h_1 (drukhoogte bij bovenste tensiometer) en h_2 (drukhoogte bij onderste tensiometer) laten het gemeten drukhoogteverschil zien. Naast de doorlatendheid van de grond is ook enkele malen de weerstand van de filters (W_f) berekend en is de tijd (T_e in min.) gegeven die nodig was voordat zich, nadat de drukhoogte in de filters was veranderd, in het monster een nieuw evenwicht (gewicht van het monster en de flux veranderen niet meer) had ingesteld	26
6	Resultaten van doorlatendheidsmetingen aan het tweede monster met behulp van de dubbele filtermethode. De drukhoogten h_1 (drukhoogte bij bovenste tensiometer) en h_2 (drukhoogte bij onderste tensiometer) laten het gemeten drukhoogteverschil zien. Naast de doorlatendheid van de grond is ook enkele malen de weerstand van de filters (W_f) berekend en is de tijd (T_e in min.) gegeven die nodig was voordat zich, nadat de drukhoogte in de filters was veranderd, in het monster een nieuw evenwicht (gewicht van het monster en de flux veranderen niet meer) had ingesteld	26
7	Overzicht van de verschillende monsters voor de doorlatendheidsbepaling volgens de verdampingsmethode. De nrs. 1-3 zijn de droog, en de nrs. 4-6 zijn de nat ingevulde monsters. Bij de methode is ook het gewicht vermeld waarmee de grond tijdens het invullen werd aangedrukt. De monsterdichtheid is berekend als kg droge stof per m ³ . De dichtheid (D) is aan het begin (drukhoogte 0 tot -8 cm) en aan het einde (h tussen -200 (onderste tensiometer) en -700 cm (bovenste tensiometer)) van de metingen bepaald. Het % poriën heeft betrekking op het begin van de metingen. De krimp is berekend als de afname van het monstervolume aan het eind ten opzichte van het volume van het verzadigde monster bij het begin van de metingen	28

Blz.

- 8 Overzicht van de verschillende monsters voor de doorlatendheidsbepaling volgens de verdam[ings-
methode. De nrs 1 en 3 zijn de droog (drg)
ingevulde monsters en de nrs 4-6 zijn de nat
ingevulde monsters 49

FIGUREN

- 1 Waterretentiekarakteristiek van het eerste
monster, bepaald met de drukevenwichtsmethode.
De volumefracties vaste delen, lucht en krimp
zijn met stippellijnen aangegeven 19
- 2 Waterretentiekarakteristiek van het tweede
monster, bepaald met de drukevenwichtsmethode.
De volumefracties vaste delen, lucht en krimp
zijn met stippellijnen aangegeven. De eerste
keer uitdrogen en weer verzadigen is weergegeven
met respectievelijk lijn 1 en 2. Lijn 3 geeft
het verloop van de karakteristiek tijdens de
tweede keer uitdrogen 20
- 3 Overzicht van de $h(\theta)$ relaties van de monsters
onderzocht met de verdampingsmethode. De getallen
hebben betrekking op de in tabel 7 genoemde
behandelingen. De resultaten van de droog
ingevulde monsters zijn met een ononderbroken
lijn, en de nat ingevulde monsters met stippel-
lijnen weergegeven 29
- 4 Overzicht van de $h(\theta)$ relaties (de drukhoogte
is lineair uitgezet) van de monsters onderzocht
met de verdampingsmethode. De resultaten van de
droog ingevulde monsters zijn met een ononder-
broken lijn, en de nat ingevulde monsters met
stippellijnen weergegeven 29
- 5 Overzicht van de $K(h)$ relaties van de monsters
onderzocht met de verdampingsmethode. De
resultaten van de droog ingevulde monsters
zijn met een ononderbroken lijn, en de nat
ingevulde monsters met stippellijnen weergegeven 30
- 6 Overzicht van de $K(\theta)$ relaties van de monsters
onderzocht met de verdampingsmethode. De resul-
taten van de droog ingevulde monsters zijn met
een ononderbroken lijn, en de nat ingevulde
monsters met stippellijnen weergegeven 30
- 7 Overzicht de met de dubbele-filtermethode
(monster 1, open cirkels; monster 2, gesloten
cirkels) en de verdampingsmethode (getrokken
lijn, gemiddelde van onderzochte monsters)
gevonden $K(h)$ relaties. Met pijltjes is het
verband tussen de bij een monster horende
resultaten aangegeven 31
- 8 Overzicht van de met de dubbele-filtermethode
(monster 1, open cirkels; monster 2, gesloten
cirkels) en de verdampingsmethode (getrokken
lijn, gemiddelde van onderzochte monsters)
 $K(\theta)$ relaties. Met pijltjes is het verband
tussen de bij een monster behorende resultaten
aangegeven 32

9	Schematische tekening van de opstelling voor het meten van de waterretentie volgens de drukevenwichtsmethode. Het grondmonster is op een filter geplaatst, waaronder de drukhoogte van water kan worden gevarieerd (m.b.v. een onderdrukstelsel, zoals beschreven in aanhangsel 2). Via de buret en het capillair kan de hoeveelheid uit- of instromend water worden gemeten. Bovenop het monster is een PVC-plaat aangebracht waarop een verplaatsingsmeter steunt waarmee uitzetten en krimpen van het monster gemeten kan worden. Onder het filter is een buis aangebracht om eventuele luchtballen te kunnen verwijderen. Om verdamping tegen te gaan zijn de leidingen tussen de filtertrechter en buret/ capillair van koper en is de filtertrechter aan de bovenzijde met een plastic plaat afgedekt. Door het voorraadvat is het mogelijk water aan het systeem te onttrekken of toe te voegen	39
10	Schematische tekening van de opstelling voor het bepalen van de onverzadigde doorlatendheid volgens de dubbele-filtermethode	43
11	Schematische tekening van het vacuumsysteem	44
12	Detailtekening van de opbouw van het monster en de tensiometer voor de dubbele-filtermethode	45
13	$h(\theta)$ relatie van monster 1	50
14	$h(\theta)$ relatie van monster 1	50
15	$K(\theta)$ relatie van monster 1	51
16	$K(h)$ relatie van monster 1	51
17	$h(\theta)$ relatie van monster 3	52
18	$h(\theta)$ relatie van monster 3	52
19	$K(\theta)$ relatie van monster 3	53
20	$K(h)$ relatie van monster 3	53
21	$h(\theta)$ relatie van monster 4	54
22	$h(\theta)$ relatie van monster 4	54
23	$K(\theta)$ relatie van monster 4	55
24	$K(h)$ relatie van monster 4	55
25	$h(\theta)$ relatie van monster 5	56
26	$h(\theta)$ relatie van monster 5	56
27	$K(\theta)$ relatie van monster 5	57
28	$K(h)$ relatie van monster 5	57
29	$h(\theta)$ relatie van monster 6	58
30	$h(\theta)$ relatie van monster 6	58
31	$K(\theta)$ relatie van monster 6	59
32	$K(h)$ relatie van monster 6	59

SAMENVATTING

Gedurende drie maanden is gewerkt aan de karakterisering van een, bij teelt op eb- en vloedstelsel gebruikte, potgrond. De grond bij teelt op een eb- en vloedstelsel is vaak erg nat. De gebruikelijke hydrologische bepalingsmethoden zijn hiervoor niet zonder meer bruikbaar en moesten worden aangepast. Dit rapport bevat de beschrijving van de aangepaste bepalingsmethoden en de eerste daarmee gemeten waarden.

Bij het onderzoek is gekeken naar waterretentie, doorlatendheid voor water en krimp en zwel van de potgrond. De waterretentie is met de evenwichtsmethode gemeten waarbij ook zwel en krimp van het materiaal werd gevolgd. Gemeten is in het traject van verzadiging tot een drukhoogte (h) van -125 cm met vochtgehalten (θ) variërend van respectievelijk $0,88$ tot $0,30$ cm^3/cm^3 .

De onverzadigde doorlatendheid (K) is onderzocht met behulp van een verdampingsmethode en met behulp van een steady state methode.

Bij de verdampingsmethode is K gemeten in het traject met een drukhoogte tussen -50 en -600 cm. Bij $h = -50$ werd een K gemeten van $0,60$ cm/dag en bij $h = -600$ cm van $0,25 \cdot 10^{-3}$ cm/dag.

Voor de bepalingen in het nattere gebied werd de steady state methode gebruikt. Voor de steady state methode werd een grondmonster tussen twee filterplaten, met daartussen een drukgradiënt, geplaatst. Voor deze methode is een nieuwe opstelling gebouwd en uitgetest. Met de opstelling kon de doorlatendheid worden bepaald in het gebied met een drukhoogte tussen -5 en -100 cm, waarbij doorlatendheden (K) zijn gemeten van respectievelijk 30 tot $0,60 \cdot 10^{-2}$ cm/dag.

De manier waarop de monsters werden gemaakt (vochtgehalte, wel of niet aandrukken) en de wijze waarop de monsters daarna verzadigd werden had een grote invloed op de relatie tussen vochtgehalte, drukhoogte en onverzadigde doorlatendheid. De potgrond vertoonde zwel/krimp en hysteresis en de dichtheid bleek in de tijd te veranderen.

1 INLEIDING

In de tuinbouwplantenteelt neemt de belangstelling voor teelt op (kunstmatig) substraat de laatste jaren steeds meer toe. Er wordt voortdurend gezocht naar nieuwe teeltmethoden en teeltmedia. Een van die teeltmethoden is de teelt met wissel-infiltratie of eb- en vloedsysteem. Bij deze methode worden planten opgekweekt op tafels of betonvloeren. Water en voedingsstoffen worden een of meerdere keren per week toegediend door, gedurende een korte periode (5-15 min.), een laag voedingsoplossing (enkele cm's) op de vloer/tafel te zetten. Deze teeltmethode vindt tot nu toe vooral toepassing bij de kapitaalintensievere teelten zoals de teelt van potplanten en plantmateriaal voor glasgroentebedrijven (tomaten, komkommer, paprika's).

De indruk bestaat dat bij het gebruik van een eb- en vloedsysteem, meer water en voedingsstoffen worden verbruikt dan echt nodig is. Door het beter op elkaar afstemmen van watergift en de behoefte van een gewas zou niet alleen bezuinigd kunnen worden op water en kunstmest, maar kan ook de hoeveelheid afvalwater worden verminderd. Voor het optimaliseren van water- en voedingsgift is informatie nodig over vochthoudend vermogen van en water- en gastransport in de groeimmedia. Daarnaast (misschien wel het moeilijkste) zal moeten worden nagegaan welke omstandigheden leiden tot een optimale plantengroei en hoe afwijkende omstandigheden doorwerken op de ontwikkeling van de planten. Het Staring Centrum, IB Haren en PBN Aalsmeer zijn een onderzoek gestart naar water en nutriëntenbalans bij de teelt van potplanten op eb- en vloedsysteem. Het is de bedoeling in de toekomst met behulp van een model water- en voedingsgift te kunnen optimaliseren.

Om te kunnen modelleren zijn, onder andere, gegevens nodig van de hydrologische kenmerken van het gebruikte grondmengsel (Feddes et al. 1988). Dit soort (natte) mengsels wijkt echter sterk af van de "normale" landbouwgronden, de standaard meetmethoden zijn daarom niet zonder meer bruikbaar. Er moesten daarom meetmethoden worden ontwikkeld, aangepast en getest. Hierbij is door ir. J.W. Bakker en ing. G.J. Veerman (nu hoofdafdeling Fysisch Bodembeheer) een belangrijke bijdrage geleverd door het geven van advies, informatie en het beschikbaar stellen van materiaal.

2 ALGEMENE BESCHRIJVING VAN DE GEBRUIKTE POTGROND

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van potgrond zoals die door de fabrikant werd geleverd (tabel 1). Van het losse materiaal moesten dus steeds in de potten gestrooid (zonder de grond aan te drukken) en van bovenaf bevochtigd voordat de planten werden geplant. Bij het maken van de monsters is de grond daarom nauwelijks aangedrukt. Voor het verzadigen van de monsters zijn verschillende methoden gebruikt.

Tabel 1 Beschrijving van de gebruikte potgrond.

vochttoestand		Samenstelling: 75% witveen, 25% perliet			Dichtheid ρ_s		Fabrikant
h (cm)	F_w (g/g)	F_h (g/g dr.st.)	kalkgehalte (% dr.st.)	potgrondperlite g/cm ³	g/cm ³		
-110 - -120	1,78	0,63 \pm 0,04	0,8 \pm 0,2	1,04	0,68	Ego Anjerweg 34 Bleiswijk (01892-13740)	

De drukhoogte van het water in de grond is gemeten door een tensiometer in het midden van de zak met potgrond te plaatsen. Omdat tijdens drogen bij een temperatuur van 105 C (zoals gebruikelijk bij het drogen van grondmonsters) een deel van de organische stof oxydeert, is F_w (gezien het hoge organische stofgehalte van de potgrond) bepaald door de grond gedurende 48 uur bij 75 C te drogen.

F_h is gevonden door gedroogde grond te gloeien bij 500 C. Het gevonden gewichtsverschil tussen gedroogde en gegloeide grond is gedeeld door het gewicht van de droge grond voor het gloeien. Door het, na de eerste keer gloeien overgebleven materiaal te gloeien bij 800 C is een schatting van het kalkgehalte (% van anorganische stof) verkregen door de gewichtsafname te delen door het gewicht van het materiaal na de eerste maal gloeien.

Het soortelijk gewicht ρ_s van droge Perlite en de droge grond is bepaald door het meten van het volume in een maatcilinder van een bekende hoeveelheid (gram) materiaal nadat dit onder vacuum met water was verzadigd (en ontlucht).

3 FYSISCH KARAKTERISERING VAN POTGROND

Om iets over de beschikbaarheid van water en zuurstof voor planten te kunnen zeggen is informatie nodig over de voorkomende water- en luchtgehalten. Bij de fysische karakterisering van een grond gaat de aandacht vooral naar:

1. De vochtkarakteristiek (pF-curve of waterretentie-karakteristiek).
 Waarbij wordt gezocht naar het verband tussen de volumefracties vocht en de drukhoogte van het water in de grond. Deze informatie geeft een indruk van het vochtbergend en vochtleverend vermogen van de grond maar ook van de hoeveelheid voor de wortels beschikbare lucht (zuurstof). (De som van de volumefracties van water, lucht en grond is steeds 1).
2. De hydraulische doorlatendheidskarakteristiek. Hiervoor wordt gekeken naar het verband tussen de drukhoogte en het vochtgehalte en de doorlatendheid voor water van de potgrond.

De hier bovengenoemde karakteristieken worden beïnvloed door hysteresis, zwel en krimp en door verweren en inklinken van grond. Zelfs bij het invullen van de potten kunnen al variaties ontstaan als gevolg van de manier van invullen (wel of niet aandrukken, schudden) of het vochtgehalte van de grond op het moment van vullen.

Er is daarom geen sprake van een karakteristiek van de potgrond maar van meerdere relaties, afhankelijk van voorgeschiedenis van het materiaal.

Dit heeft tot gevolg dat, voor de karakterisering van de potgrond een groot aantal situaties (te beperken tot de in de praktijk voorkomende) zullen moeten worden onderzocht om de grenzen aan te kunnen geven waarbinnen de hydrologische eigenschappen variëren.

Uiteindelijk zal dit moeten resulteren in het parameteriseren van de potgrond, zodat met behulp van een simulatiemodel het gedrag van water in de potgrond verklaard en voorspeld kan worden.

Om een eerste indruk te krijgen van de situatie in een pot zijn 6 wit PVC-ringen (volume 147 ml, 3 cm hoog met een diameter van 7,94 cm) aan elkaar bevestigd met behulp van tape. In de zo ontstane cylinder is potgrond gestrooid zonder deze aan te drukken, vervolgens is een eb- en vloedsysteem geïmiteerd door het waterniveau, normaal gelijk aan de onderzijde van de cylinder, dagelijks tijdelijk (10 min) 2 cm te verhogen.

Na 3 weken zijn de ringen losgemaakt en zijn vochtgehalte (grond gedurende 3 dagen gedroogd bij 50 C en dichtheid van de grond in de onderste 5 ringen bepaald (tabel 2).

Tabel 2 Vochtgehalte (θ) en dichtheid ρ_b (kg dr.st/m³) van de monsters (na 3 weken eb en vloed). De drukhoogte h is afgeleid uit de plaatshoogte van het monster ten opzichte van de onderzijde van de cylinder, waarbij is aangenomen dat h daar 0 cm was. De krimp is bepaald nadat de monsters in een droogstoof waren gedroogd. Bij de berekening van de krimp, de dichtheid en het vochtgehalte is uitgegaan van het volume (147 ml) van de monsters op het moment van monstername.

Laag (cm)	Gemiddelde hoogte	θ (krimp)	θ	ρ_b
0- 3	- 1,5	0,25	0,852	124
3- 6	- 4,5	0,20	0,766	118
6- 9	- 7,5	0,18	0,498	94
9-12	-10,5	0,20	0,423	93
12-15	-13,5	0,20	0,369	93

4 WATERRETENTIEMETING VOLGENS DE DRUKEVENWICHTSMETHODE

4.1 Methode

De drukevenwichtsmethode is een methode waarbij een grondmonster op een filter wordt geplaatst waaronder een onderdruk wordt aangelegd (zie aanhangsel 1). Met de drukevenwichtsmethode kon, afhankelijk van de gebruikte filter, een waterretentiekarakteristiek worden bepaald tot een onderdruk van -250 cm. Bij het onderzoek met de potgrond is gemeten bij drukhoogten tussen 0 en -125 cm. Het bijzondere van de methode is dat de aangelegde onderdruk niet constant blijft maar dat deze afneemt door het uit het monster onttrokken water. Waardoor de tijd, nodig voor het bereiken van evenwicht, korter is dan bij methoden waarbij gebruik gemaakt wordt van een gefixeerde onderdruk. Daarnaast leent de methode zich voor het meten van hysteresisverschijnselen. Bij de oorspronkelijke opstelling (Veerman, 1987) werd de onderdruk gerealiseerd door een kolom water onder het filter. Om de onderdruk te variëren werd de hoogte van het grondmonster en filter ten opzichte van het waterniveau veranderd. Hiervoor moest worden gewerkt met flexibele, lange slangen. Bovendien moesten maatregelen worden genomen om verdamping via die slangen tegen te gaan. Omdat de temperatuurverdeling tussen de vloer en het plafond van het lab niet homogeen was, werden de meetresultaten ook beïnvloed door hoogteveranderingen van het monster.

Bovenbeschreven problemen zijn opgevangen door met behulp van een bellenvat (zie beschrijving van het onderdrukstelsel in aanhangsel 2) een onderdruk aan te leggen via de buret en het capillair (aanhangsel 1). Hierdoor kon het monster op dezelfde plaats blijven staan en konden alle leidingen die door waterverlies de meetresultaten zouden kunnen beïnvloeden worden vervangen door leidingen van koper. Om kleine luchtballen te verwijderen die tijdens metingen zouden kunnen ontstaan onder het filter is, om doorspoelen mogelijk te maken, een extra buis aangebracht tot vlak onder het filter.

Tijdens het verzadigen van een nieuw monster nam het volume af door inklinken van de potgrond (de grond zakte onder zijn eigen gewicht een beetje in elkaar). De grootste volume-afname als gevolg hiervan vond plaats binnen 12 uur. De volume-afname door inklinken is berekend als het produkt van oppervlakte en van de hoogte-afname, ervan uitgaand dat het volume alleen in in verticale richting was afgenomen. De volumeveranderingen die werden gemeten na het begin van de metingen zijn toegeschreven aan zwel of krimp als gevolg van veranderingen van het watergehalte zoals bijvoorbeeld bij zware klei (Bronswijk, 1987). Uitzetten en krimpen van het monster is gemeten met een verplaatsingsmeter die op een op het monster gelegde PVC-plaat steunde. Hierdoor werd op het monster continu een druk van $\pm 2 \text{ g/cm}^2$ uitgeoefend.

4.1.1 Vervaardiging van de monsters

Voor het monster werd potgrond (zoals beschreven in hfdst. 2) in een PVC-ring (30 mm hoog, inhoud 147 cm³) gestrooid en gedurende drie dagen onder water verzadigd. Tijdens het verzadigen nam het volume van het monster, door inklinken van de grond, met 12% af. Na het verzadigen is het (met lucht verzadigde) water vanaf de bovenkant van het filter weggezogen om de kans op vorming van luchtbellen onder het filter bij het verlagen van de drukhoogte te verkleinen.

Er zijn twee monsters onderzocht.

De metingen aan het eerste monster werden vroegtijdig beëindigd omdat het filter (G4, luchtintreewaarde 150 cm) al bij h = -90 cm doorsloeg. Bij het tweede monster is een G5 filter (luchtintreewaarde 250 cm) gebruikt. Beide filters waren van Duran borosilicaatglas.

4.1.2 Informatie over de monsters

Monster 1

Invulgewicht : 30,0 gram (drooggewicht 10,7 gram)
 Beginvolume na verzadigen: 98 ml
 Poriënfractie (Vt-Vs)/Vt : 0,89
 ρ_d : 109 (kg droge stof/cm³)

Monster 2

Invulgewicht : 30,0 gram (drooggewicht 10,5 gram)
 Beginvolume na verzadigen: 101 ml
 Poriënfractie (Vt-Vs)/Vt : 0,90
 ρ_d : 103 (kg droge stof/m³)

Het volume van het monster was, na drogen in de droogstoof, afgenomen tot 63 ml.

Voor het berekenen van volume-veranderingen als gevolg van zwel en krimp is aangenomen (niet onderzocht) dat dit proces, net zoals bijvoorbeeld bij zware klei (Bronswijk, 1987) isotroop verliep. De volumeverandering (daarbij uit de hoogteveranderingen als gevolg van zwel of krimp) is berekend volgens:

$$(1-dz/z)^3 = 1 - dV/V$$

waarin: V = het beginvolume (cm³)
 dV = de volumeverandering (cm³)
 z = de beginhoogte (cm)
 dz = de hoogteverandering (cm)

Voor de berekening van de verschillende volumefracties is bij beide monsters steeds uitgegaan van het volume van het verzadigde monster bij het begin van de eerste metingen.

4.2 Resultaten

4.2.1 Resultaten eerste monster

De resultaten van de meting aan het eerste monster zijn terug te vinden in tabel 3 en fig. 1.

Tabel 3 Overzicht van de resultaten van waterretentiemeting volgens de drukevenwichtsmethode aan het eerste monster van verzadigd naar droog.

h (cm)	θ	$\theta(k)$	h (cm)	θ	$\theta(k)$
0,0	0,887	0,0	-16,0	0,510	0,23
-1,9	0,879	-	-27,3	0,423	0,23
-2,2	0,871	0,01	-35,0	0,384	0,23
-2,8	0,861	0,03	-42,0	0,367	0,23
-3,0	0,854	0,04	-43,6	0,362	0,23
-5,3	0,762	0,13	-50,0	0,359	0,23
-7,2	0,692	0,21	-60,8	0,328	0,23
-9,9	0,611	0,23	-84,1	0,298	0,23
-11,9	0,564	0,23			

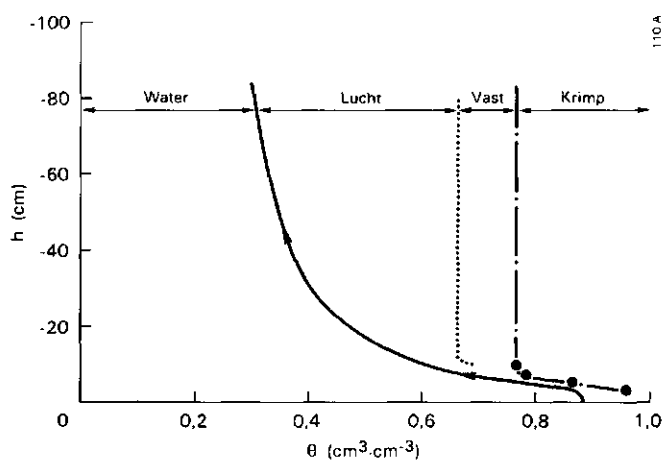


Fig.1 Waterretentiekarakteristiek van het eerste monster, bepaald met de drukevenwichtsmethode. De volumefracties vaste delen, lucht en krimp zijn met stippellijnen aangegeven.

4.2.2 Resultaten tweede monster

De resultaten van de meting aan het tweede monster zijn terug te vinden in tabel 4 en fig. 2.

Tabel 4 Overzicht van de resultaten van waterretentiemeting volgens de druk-evenwichtsmethode aan het tweede monster.

Bij uitdrogen (tot $h = -125,7$) lijn 1 fig. 2)			Bij bevochtigen (lijn 2 fig. 2)			Bij de tweede keer uitdrogen (lijn 3 fig. 2)		
h (cm)	θ	$\theta(k)$	h (cm)	θ	$\theta(k)$	h (cm)	θ	$\theta(k)$
0,0	0,867	0,0	-125,7	0,302	0,25	-0,0	0,792	0,11
- 2,4	0,845	-	-120,4	0,304	0,25	-2,6	0,773	0,12
- 3,7	0,788	0,07	-103,8	0,305	0,25	-6,8	0,657	0,2
- 6,0	0,742	0,10	- 95,9	0,307	0,25	-9,3	0,594	0,22
- 8,9	0,644	0,18	- 84,0	0,311	0,25	-12,8	0,505	0,25
-11,9	0,582	0,24	- 52,0	0,326	0,25	-17,7	0,446	0,25
-16,0	0,513	0,25	- 41,7	0,333	0,25	-19,6	0,425	0,25
-24,4	0,457	0,25	- 32,8	0,351	0,25	-25,3	0,357	0,25
-31,9	0,433	0,25	- 19,5	0,380	0,25			
-36,0	0,408	0,25	- 13,9	0,437	0,25			
-46,8	0,389	0,25	- 6,7	0,520	0,22			
-70,3	0,356	0,25	- 3,9	0,573	0,17			
-78,4	0,346	0,25	- 1,9	0,734	0,14			
-84,3	0,338	0,25	- 0,5	0,797	0,11			
-88,5	0,327	0,25						
-100,9	0,318	0,25						
-113,7	0,310	0,25						
-125,7	0,302	0,25						

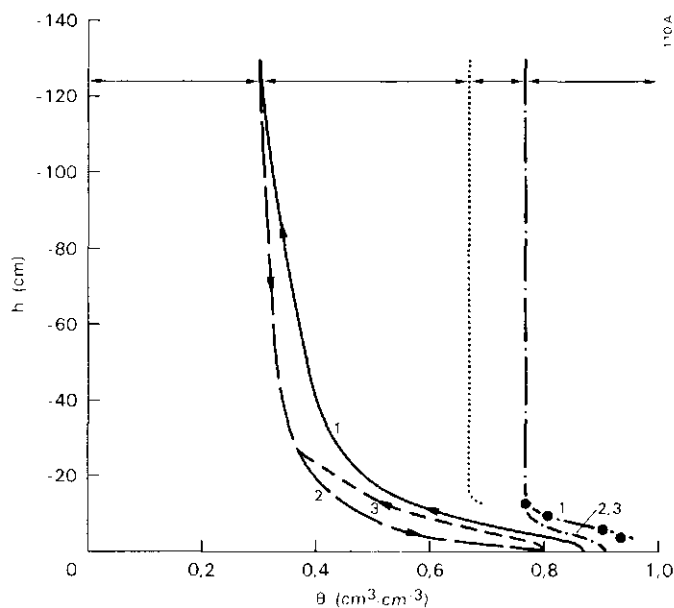


Fig. 2 Waterretentiekarakteristiek van het tweede monster, bepaald met de drukevenwichtsmethode. De volumefracties vaste delen, lucht en krimp zijn met stippellijnen aangegeven. De eerste keer uitdrogen en weer verzadigen is weergegeven met respectievelijk lijn 1 en 2. Lijn 3 geeft het verloop van de karakteristiek tijdens de tweede keer uitdrogen.

4.3 Nabeschouwing

Tijdens het onderzoek bleek dat de potgrond hysteresis vertoonde (fig. 2, lijn 1 en 2). Onder invloed van het vochtgehalte veranderde het volume van het monster. Bij de eerste keer uitdrogen nam het volume af tot een drukhoogte van -15 cm. Bij opnieuw bevochtigen viel op dat pas boven een drukhoogte van -8 cm weer een volumetoename werd gemeten, waarbij het oude volume niet meer werd bereikt. Tijdens een keer uitdrogen en verzadigen was het poriënvolume afgenomen. Vervolgonderzoek zal moeten uitwijzen wat (en hoe groot) de invloed is van de afname van het poriënvolume op de hydrologische eigenschappen van de potgrond en of deze bij het parameteriseren meegenomen moet worden. Het onderzoek en parameteriseren van hysteresis verdient in het vervolgonderzoek zeker een plaats.

5 ONVERZADIGDE DOORLATENDHEID

Er zijn in de loop der tijd een groot aantal methoden ontwikkeld voor het bepalen van de doorlatendheid (als functie van het vochtgehalte of drukhoogte) van grond, een overzicht wordt onder andere gegeven door Bouma (1977) en Klute (1972). Er is geen methode die geschikt is voor de bepaling van de doorlatendheid over het hele traject van verzadigd naar droog. Om deze gegevens te verzamelen moeten de resultaten van verschillende methoden worden gecombineerd.

Omdat bij de teelt van potplanten op een eb- en vloedstelsel watertransport vooral door onverzadigde grond zal plaatsvinden is in dit onderzoek gekeken naar de onverzadigde doorlatendheid. Om deze te meten zijn twee methoden toegepast:

1. Voor het nattere gebied (h tussen -10 en -100 cm) de dubbele-filtermethode.
2. Voor het droge gebied (h tussen -50 en -500 cm) een verdampingsmethode.

Bij deze methoden worden drukhoogtegradiënt en de flux (v) bepaald om, volgens de wet van Darcy, de doorlatendheid te berekenen. Voor de dubbele-filtermethode is een nieuwe opstelling gebouwd (aanhangsel 2). Voor de verdampingsmethode is gebruik gemaakt van een in het lab aanwezige opstelling.

5.1 De dubbele-filtermethode

Bij deze methode wordt een grondmonster tussen twee filterplaten geplaatst (aanhangsel 2, fig. 10, 11 en 12). Door tussen deze twee platen een stijghoogteverschil aan te leggen, ontstaat in het monster een gradiënt waardoor water gaat stromen. Door deze gradiënt (m.b.v. tensiometers) en de doorgestroomde hoeveelheid water te meten (wegen) kan de doorlatendheid van de grond worden berekend. Daarnaast is het, in principe, mogelijk een waterretentiekarakteristiek te bepalen. Het drukhoogtetraject waarvoor de methode bruikbaar is wordt bepaald door:

1. De doorlatendheid van de filters vergeleken met die van de grond.
Als deze van de filters veel minder is dan de grond wordt de drukhoogtegradiënt van het water in het monster te klein om te kunnen meten. (Bij de gebruikte opstelling kon een doorlatendheid tot 30 cm/dag worden gemeten).
2. De doorlatendheid van het monster.
In het natte gebied kan de doorlatendheid voor water zo hoog worden dat het water kleine gronddeeltjes meeneemt die het onderste filter kunnen verstoppen (bij een K groter dan 20 cm/dag). In het droge gebied kost het instellen van het evenwicht na verandering van de ingestelde drukhoogte, veel tijd en wordt de flux te klein om te kunnen meten. Dit gebeurde in dit onderzoek bij doorlatendheden kleiner dan $5 \cdot 10^{-3}$ cm/dag.
3. De dikte van het monster. Hoe dikker het monster, hoe langer het duurt voordat een evenwicht is ingesteld en hoe groter de weerstand van het monster tegen watertransport. Daarnaast is het realiseren van een homogene vochtverdeling moeilijker bij grote monsters.

4. De luchtintreewaarde van de filters.

Met een filter met een hoge luchtintreewaarde kan een lage drukhoogte worden ingesteld. Een hoge luchtintreewaarde gaat echter ook samen met een hoge filterweerstand (lage doorlatendheid).

Met de gebouwde opstelling was het gebied, waarbinnen de doorlatendheid van de potgrond bepaald kon worden, beperkt tot een drukhoogte tussen -15 en -100 cm.

5.1.1 Het bepalen van de doorlatendheid

De berekening van de doorlatendheid is gebaseerd op de wet van Darcy voor verticale stroming van water in grond. Deze luidt:

$$v = -K(dh/dz+1) \text{ of } v = -K(dH/dz)$$

waarbij v = flux (ml per cm^2/dag)

K = capillair geleidingsvermogen of doorlatendheid (cm/dag), waarbij K als functie van h of van het watergehalte θ

h = de drukhoogte

z = de plaatshoogte

H = de stijghoogte ($H = h + z$)

De stijghoogte van water in het monster is het resultaat van drukhoogte (h) en plaatshoogte (z). Door water van hoog naar laag te laten stromen kunnen verschillen van h in het monster zo klein mogelijk worden gehouden. In theorie is het mogelijk het water alleen onder invloed van de zwaartekracht te laten stromen, in praktijk bleek dit moeilijk te realiseren.

Om de doorlatendheid te kunnen berekenen moeten v en z gemeten worden. Tijdens het onderzoek is een enkele keer de weerstand W_f van de filters berekend. Bij het berekenen van W_f moest de stijghoogte aan de buitenzijde van het filter worden afgeleid uit de met de tensiometers gemeten waarden en de afstand tussen de tensiometers en het filter. De stijghoogte aan de binnenzijde van het filter was bekend omdat deze met het bellenvat en de Erlenmeyers kon worden ingesteld.

5.1.2 Het maken van de monsters

Er zijn twee monsters onderzocht. Voor het maken van beide monsters is een cylinder (zie aanhangsel 2, fig. 12) waar alleen aan de onderkant een filter was aangebracht gevuld met potgrond zonder daarbij de grond aan te drukken.

Het eerste monster is van bovenaf bevochtigd, door de bovenkant enkele malen met water te begieten. Hierna is het bovenste filter geplaatst (gewicht ongeveer 3,2 gram) en zijn de tensiometers aangebracht. De grond is verder via de filters gedurende drie dagen bevochtigd (drukhoogte bij het onderste filter 0 cm, de stijghoogte was bij beide filters gelijk).

Gegevens van het eerste monster

Invulgewicht 167,3 gram (droog 59,7 gram)
Afstand tussen filterplaten 11,1 cm
Afstand tussen tensiometers 8,5 cm
Afstand tussen filter 1 en tensiometer 1: 1,1 cm
Afstand tussen filter 2 en tensiometer 2: 1,5 cm
Volume grond (zonder tensiometers) 527 ml
Monsterdichtheid 113 g/m³.

Bij het tweede monster zijn beide filters geplaatst voor het verzadigen, waarbij tussen de filters en het monster een dunne laag blokzand is aangebracht om het contact tussen de filters en de grond te verbeteren. Anders dan bij het eerste monster is het tweede monster verzadigd door het gedurende drie dagen volledig onder water te zetten. Hierna zijn de tensiometers aangebracht.

Gegevens van het tweede monster

Invulgewicht 114,5 gram (droog 41,3 gram)
Afstand tussen filterplaten 6,8 cm
Afstand tussen tensiometers 3,7 cm
Afstand tussen filter 1 en tensiometer 1: 1,5 cm
Afstand tussen filter 2 en tensiometer 2: 1,6 cm
Volume grond (zonder tensiometers) 323 ml
Monsterdichtheid 124 g/m³.

Tijdens de metingen zijn aan de opstellingen enkele veranderingen aangebracht. Met de gewichtsveranderingen die hierdoor werden veroorzaakt is bij het berekenen van de doorlatendheid of het watergehalte rekening gehouden. Of door het aanbrengen van veranderingen de betrouwbaarheid van de meetresultaten is beïnvloed is niet bekend.

5.1.3 Resultaten

De resultaten van de metingen aan de twee monsters zijn weergegeven in tabel 5 en 6.

Tabel 5 Resultaten van doorlatendheidsmetingen aan het eerste monster met behulp van de dubbele-filtermethode. De drukhoogten h1 (drukhoogte bij bovenste tensiometer) en h2 (drukhoogte bij onderste tensiometer) laten het gemeten drukhoogteverschil zien. Naast de doorlatendheid van de grond is ook enkele malen de weerstand van de filters (Wf) berekend en is de tijd (Te in min.) gegeven die nodig was voordat zich, nadat de drukhoogte in de filters was veranderd, in het monster een nieuw evenwicht (gewicht van het monster en de flux veranderen niet meer) had ingesteld.

h1	h2	hgem	K	θ	Wf1	Wf2	Te
- 7,2	- 3,4	- 5,3	31,0	0,446	0,46	0,47	-
- 9,6	- 3,6	- 6,6	27,5	0,427	-	-	-
-10,1	- 3,7	- 6,9	28,3	0,417	-	-	-
-12,0	- 3,5	- 7,8	-	0,392	-	-	-
-15,9	- 9,2	-12,6	24,2	0,379	-	-	160
-18,0	-10,7	-14,4	20,1	0,356	-	-	120
-17,8	-11,9	-14,9	18,5	0,370	1,40	7,0	-
-23,4	-17,0	-20,7	8,1	0,340	-	-	200
-25,3	-19,2	-22,2	3,6	0,330	7,0	35	140
-26,7	-21,4	-24,1	1,8	0,320	7,8	78	-
-33,1	-27,5	-30,3	1,7	0,305	-	-	-
-50,8	-45,3	-48,1	$4,4 \times 10^{-1}$	0,273	10	350	2000
-69,3	-67,0	-68,1	$7,7 \times 10^{-2}$	0,268	78	700	1460
-55,6	-60,8	-59,2	$3,8 \times 10^{-2}$	0,271	-	-	-
-52,3	-55,0	-53,7	$2,8 \times 10^{-2}$	0,273	-	700	-
-73,5	-70,5	-72,0	-	0,269	-	-	-
-70,4	-80,3	-75,4	$1,8 \times 10^{-2}$	0,267	-	-	-
-81,5	-79,2	-80,4	$9,6 \times 10^{-3}$	0,262	-	-	-
-84,1	-95,0	-89,6	-	0,258	-	-	-
-99,5	-105,5	-102,5	$6,6 \times 10^{-3}$	0,256	-	-	-

Wf1 = weerstand bovenste filter (dag)

Wf2 = weerstand onderste filter (dag)

Tabel 6 Resultaten van doorlatendheidsmetingen aan het tweede monster met behulp van de dubbele-filtermethode. De drukhoogten h1 (drukhoogte bij bovenste tensiometer) en h2 (drukhoogte bij onderste tensiometer) laten het gemeten drukhoogteverschil zien. Naast de doorlatendheid van de grond is ook enkele malen de weerstand van de filters (Wf) berekend en is de tijd (Te in min.) gegeven die nodig was voordat zich, nadat de drukhoogte in de filters was veranderd, in het monster een nieuw evenwicht (gewicht van het monster en de flux veranderen niet meer) had ingesteld.

h1	h2	hgem	K	θ	Wf1	Wf2	Te
- 7,5	- 3,7	- 5,6	-	0,690	-	-	-
-15,7	-11,9	-13,8	-	0,653	-	-	-
-13,3	-11,5	-12,5	23,5	0,660	-	-	80
-33,4	-37,5	-35,5	10,5	0,464	0,25	0,32	120
-39,3	-46,5	-42,9	4,6	0,420	-	-	340
-48,3	-52,6	-50,3	1,6	0,394	-	-	200
-61,2	-63,5	-62,4	$2,6 \times 10^{-1}$	0,361	-	-	340
-62,5	-60,5	-61,5	$2,2 \times 10^{-1}$	0,360	-	-	90
-38,9	-47,3	-43,1	$1,1 \times 10^{-1}$	0,372	6,0	30,0	-
-36,3	-41,5	-38,9	$9,0 \times 10^{-2}$	0,378	-	-	-
-33,1	-37,0	-35,0	$1,1 \times 10^{-1}$	0,387	0,29	-	-
-27,9	-31,3	-29,6	$1,1 \times 10^{-1}$	0,394	-	0,46	-

Wf1 = weerstand bovenste filter (dag)

Wf2 = weerstand onderste filter (dag)

5.1.4 Nabeschouwing

Als de resultaten van de metingen aan het eerste en tweede monster naast elkaar worden gelegd, valt op dat de doorlatendheid bij een bepaalde drukhoogte bij de twee monsters nogal verschilt. Deze verschillen zijn waarschijnlijk veroorzaakt door de verschillende manieren waarop de monsters zijn vervaardigd waardoor uiteindelijk de twee monsters niet meer gelijk vergelijkbaar waren.

Omdat het eerste monster groter was dan het tweede, duurde daar het instellen van een evenwicht langer. Bij herhaling van deze metingen lijkt het beter om te werken met kleinere monsters, deze onder water te verzadigen en vanuit die uitgangssituatie enkele cycli van uitdrogen en verzadigen te laten doorlopen. Wanneer wordt gekeken naar de weerstand van de filters valt op dat deze tijdens de metingen bij het eerste monster sterker toenam dan bij het tweede monster.

Waarschijnlijk is het filter bij het begin van de meting aan het eerste monster (door de hoge stroomsnelheid van het water) gedeeltelijk verstopt met door het water meegevoerde kleine gronddeeltjes.

Naast verstopping heeft de weerstand van het contactoppervlak tussen grond en filter een belangrijke invloed op de berekende totale filterweerstand (hoe droger de grond hoe groter de weerstand). Het aanbrengen van een laagje blokzand tussen de filters en het tweede monster zorgde voor een kleinere totale filterweerstand.

Tijdens de metingen bleek bij het aanbrengen van veranderingen aan de opstelling dat hierdoor het gemeten gewicht werd beïnvloed. Tijdens de berekeningen kon hiervoor worden gecorrigeerd omdat plotselinge gewichtsveranderingen direct opvielen op de recorder. Door bij het vervolgonderzoek de verschillende onderdelen, die in verbinding staan met de te wegen onderdelen of die direct gewogen worden te fixeren, kan het aantal uit te voeren correcties verminderd worden waardoor tijd kan worden bespaard. Bovendien valt dan een mogelijke foutenbron weg.

5.2 De verdampingsmethode

Voor het bepalen van de doorlatendheid in het gebied, met drukhoogten lager dan -50 cm is gebruik gemaakt van de op het fysische lab aanwezige verdampingsopstelling (Fyslab, 1988). Deze methode bestaat uit het laten verdampen van water aan de bovenzijde van een monster. De drukhoogteverandering van het water in het monster (op verschillende diepten) en het vochtverlies van het monster worden als functie van de tijd gemeten. Uit de resultaten worden met behulp van een serie computerprogramma's de vocht- en doorlatendheidskarakteristieken berekend (voor achterliggende theorie en systeembeschrijving zie Wind (1969) en Boels et al. (1978)) waarna de doorlatendheid kan worden berekend. De methode bleek niet voor de gebruikte potgrond te voldoen bij drukhoogten hoger dan -50 cm. In dat gebied was de stijghoogtegradiënt van het water in het monster te klein en daarom niet meer nauwkeurig te bepalen.

5.2.1 Het maken van de monsters

Voor het maken van de monsters is gebruik gemaakt van de bij de opstelling behorende ringen (8 cm hoog, diameter 10 cm). Er zijn 6 monsters samengesteld (tabel 7). Bij het samenstellen van de ene helft (nr. 1-3) is bij het invullen uitgegaan van 'droge' potgrond (watergehalte 1,78 gram water per gram droge grond), bij het invullen van de andere helft (nr. 4-6) werd "natte" grond (watergehalte 2,70 gram per gram droge grond) gebruikt. Tijdens het invullen is de grond (per laag van ongeveer 1 cm) aangedrukt met 0, 3,4 of 7,0 gram per cm².

Tabel 7 Overzicht van de verschillende monsters voor de doorlatendheidsbepaling volgens de verdampingsmethode. De nrs. 1-3 zijn de droog, en de nrs. 4-6 zijn de nat ingevulde monsters. Bij de methode is ook het gewicht vermeld waarmee de grond tijdens het invullen werd aangedrukt. De monsterdichtheid is berekend als kg droge stof per m³. De dichtheid (D) is aan het begin (drukhoogte 0 tot -8 cm) en aan het einde (h tussen -200 (onderste tensiometer) en -700 cm (bovenste tensiometer)) van de metingen bepaald. Het % poriën heeft betrekking op het begin van de metingen. De krimp is berekend als de afname van het monstervolume aan het eind ten opzichte van het volume van het verzadigde monster bij het begin van de metingen.

Nr.	Methode	D (begin)	Poriën	Krimp %	D(eind)
1	drg + 0 g	108	89%	10,4	123
2	drg + 3,4 g	112	89%	9,1	124
3	drg + 7,0 g	116	88%	6,5	125
4	nat + 0 g	101	90%	15,4	120
5	nat + 3,4 g	110	90%	8,6	120
6	nat + 7,0 g	110	89%	6,5	118

De monsters zijn gedurende drie weken verzadigd door de ringen, continu, in een laag van 3 cm water te plaatsen, waarbij de bak was afgesloten met een glasplaat om verdamping tegen te gaan. Na 2 dagen verzadigen was de hoogte van de monsters respectievelijk 8, 8, 8, 18, 10 en 6 mm afgenomen. De hoeveelheid grond is eenmalig met nieuwe grond aangevuld (aangedrukt op dezelfde manier als de eerste keer).

5.2.2 Resultaten en discussie

Het meten van het tweede monster is door problemen met de aansluitingen mislukt. Bij de verdere verwerking is dit monster daarom buiten beschouwing gelaten. De resultaten van de overgebleven 5 monsters zijn bij elkaar gezet in fig. 3 tot en met 6. De resultaten (en de vergelijkingen van de gefitte curves) van elk monster afzonderlijk zijn opgenomen in aanhangsel 3. Omdat het volume van de monsters wordt gebruikt bij het berekenen van de verschillende relaties, is de nauwkeurigheid waarmee het volume gemeten wordt, direct van invloed op de nauwkeurigheid van de berekende resultaten. In dit onderzoek was de nauwkeurigheid, waarmee het volume kon worden gemeten, ongeveer 5%.

Bij een drukhoogte boven -15 cm, werd naarmate de invuldruk hoger was geweest, een hoger watergehalte gevonden. Het watergehalte van de droog ingevulde monsters was in dit gebied hoger dan dat van de nat ingevulde monsters. Waarschijnlijk is door het aandrukken vooral de volumefractie van de grotere, met lucht gevulde, poriën ten gunste van de kleinere (met

water gevulde) afgenomen en zijn tijdens het nat invullen van de monsters meer grote poriën ontstaan dan bij het droog invullen van de monsters. Vervolgonderzoek zal moeten uitwijzen of de gevonden verschillen inderdaad zijn veroorzaakt door de manier waarop de monsters zijn ontstaan en hoe nauwkeurig de gebruikte bepalingsmethode is. Tevens zal moeten worden gekeken wat de invloed van krimp tijdens de metingen is op de uiteindelijke resultaten.

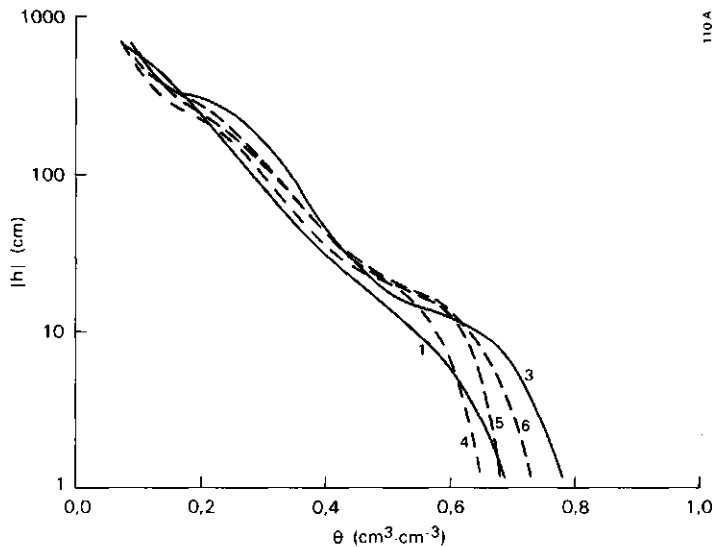


Fig. 3 Overzicht van de $h(\theta)$ relaties van de monsters onderzocht met de verdampingsmethode. De getallen hebben betrekking op de in tabel 7 genoemde behandelingen. De resultaten van de droog ingevulde monsters zijn met een ononderbroken lijn, en de nat ingevulde monsters met stippellijnen weergegeven.

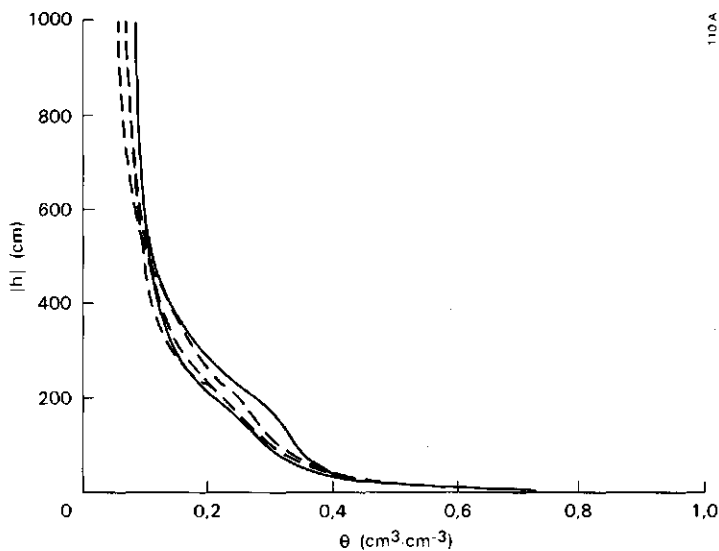


Fig. 4 Overzicht van de $h(\theta)$ relaties (de drukhoogte is lineair uitgezet) van de monsters onderzocht met de verdampingsmethode. De resultaten van de droog ingevulde monsters zijn met een ononderbroken lijn, en de nat ingevulde monsters met stippellijnen weergegeven.

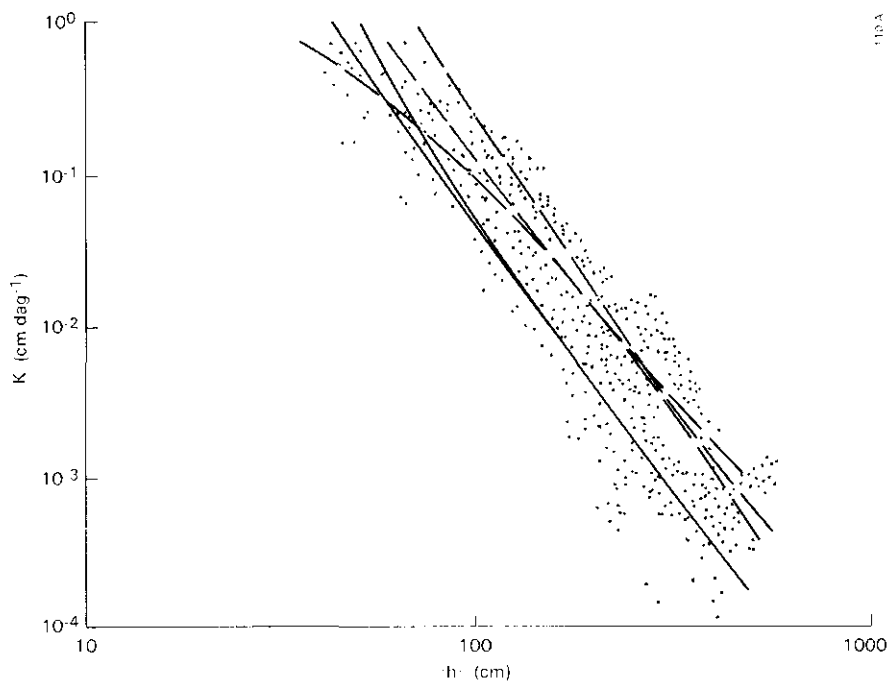


Fig. 5 Overzicht van de $K(h)$ relaties van de monsters onderzocht met de verdampingsmethode. De resultaten van de droog ingevulde monsters zijn met een ononderbroken lijn, en de nat ingevulde monsters met stippellijnen weergegeven.

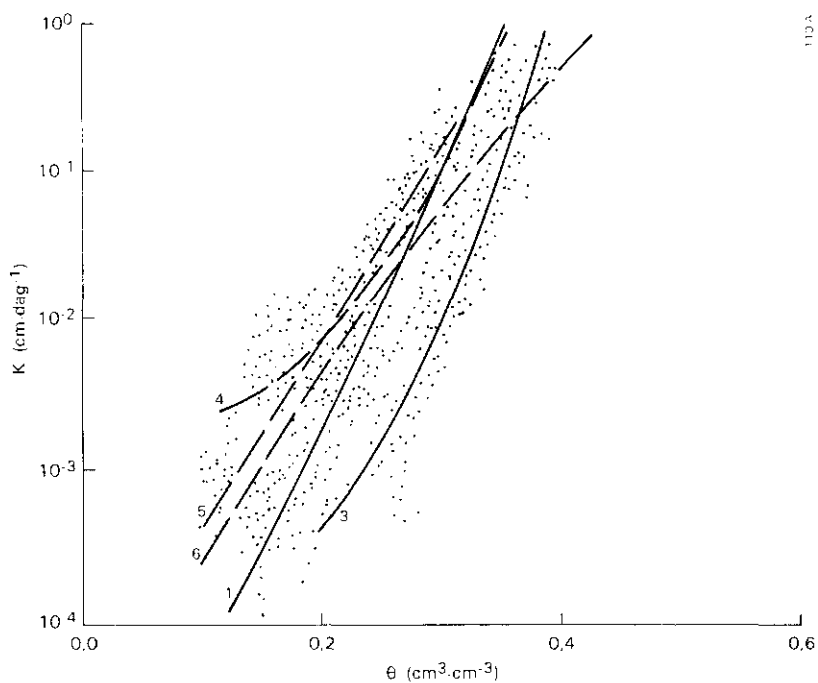


Fig. 6 Overzicht van de $K(\theta)$ relaties van de monsters onderzocht met de verdampingsmethode. De resultaten van de droog ingevulde monsters zijn met een ononderbroken lijn, en de nat ingevulde monsters met stippellijnen weergegeven.

6 VERGELIJKING VAN VERKREGEN RESULTATEN EN METHODEN

In fig. 7 en 8 zijn de resultaten van de gebruikte methoden voor het bepalen van de doorlatendheid bij elkaar gezet. Door de verschillende manieren van invullen en bevochtigingen bij het maken van de monsters zijn verschillen ontstaan die ook in de resultaten tot uitdrukking komen. In tegenstelling tot de verdampingsmethode, waar de doorlatendheid van een monster alleen tijdens uitdrogen wordt gemeten, is het bij de dubbele-filtermethode in principe mogelijk om te zoeken naar hysteresis effecten. De resultaten van de metingen aan het tweede monster dat met de dubbele-filtermethode werd onderzocht lijken te wijzen op een hysteresis effect bij de doorlatendheid. Om een goed verband tussen drukhoogte en doorlatendheid te kunnen afleiden zullen de hysteresis effecten in vervolgonderzoek beter moeten worden bekeken.

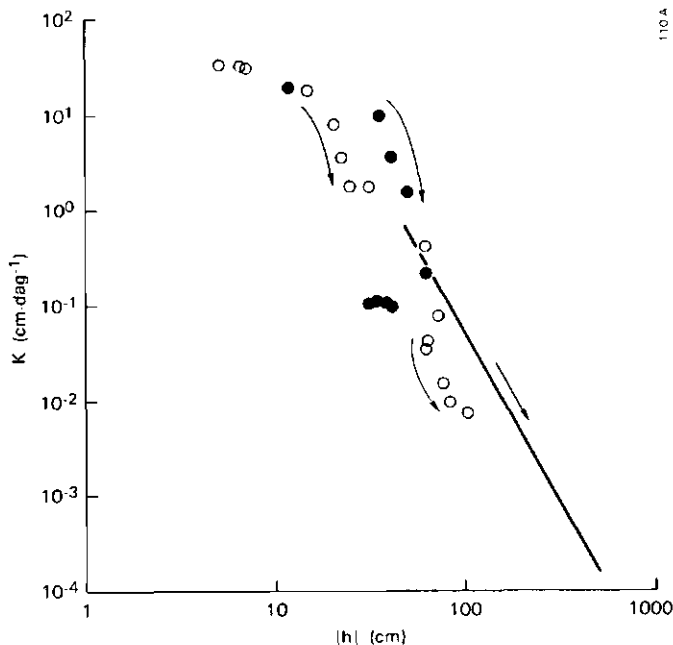


Fig. 7 Overzicht van de met de dubbele-filtermethode (monster 1, open cirkels; monster 2, gesloten cirkels) en de verdampingsmethode (getrokken lijn, gemiddelde van onderzochte monsters) gevonden $K(h)$ relaties. Met pijltjes is het verband tussen de bij een monster horende resultaten aangegeven.

De dubbele-filtermethode was bruikbaar voor het bepalen van doorlatendheden tussen de 10^{-3} en 30 cm/dag bij een drukhoogte tussen -15 en -100 cm.

Door de lage doorlatendheid van het monster en de hoge totale filterweerstand bij drukhoogten lager dan -100 cm, duurde het instellen van het evenwicht te lang en was de flux te klein om nog goed te kunnen meten. Voor verdere metingen zal, wat de filter betreft, gewerkt worden met een compromis tussen een hoge doorlatendheid/lage luchtintreewaarde (filters met een luchtintreewaarde van ongeveer 250 cm). Bij het maken van de

monsters moet extra aandacht worden besteed aan de overgang van filter naar monster omdat hier een hoge weerstand kan ontstaan. De betrouwbaarheid van de gevonden doorlatendheid en de waterretentiekarakteristiek is afhankelijk van de stijghoogtegradiënt in het monster. Is deze drukgradiënt zeer klein (bij hoge doorlatendheid van het monster vergeleken met die van de filters), ontstaat een fout omdat het meten van een stijghoogteverschil dan moeilijk is. Is de gradiënt in het monster groot dan wordt gemiddeld tussen twee veruitleggende h -waarden en omdat de $h(\theta)$ relaties niet lineair zijn, worden K en θ hierdoor onderschat. Bij het zorgvuldig registreren van alle gewichtsveranderingen biedt de methode ook de mogelijkheid hysteresisverschijnselen te onderzoeken. De verdampingsmethode was bruikbaar vanaf een drukhoogte van -60 cm, bij hogere druk was de stijghoogtegradiënt te klein om goed te kunnen meten.

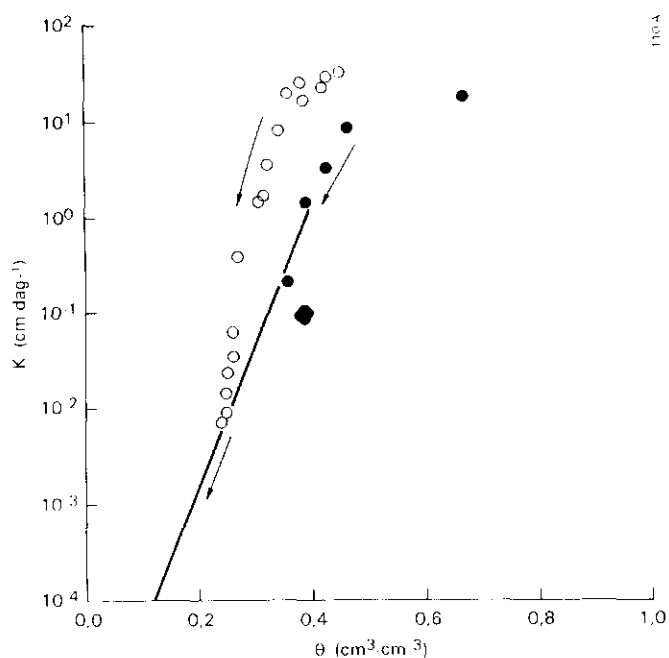


Fig. 8 Overzicht van de met de dubbele-filtermethode (monster 1, open cirkels; monster 2, gesloten cirkels) en de verdampingsmethode (getrokken lijn, gemiddelde van onderzochte monsters) $K(\theta)$ relaties. Met pijltjes is het verband tussen de bij een monster behorende resultaten aangegeven.

7 SUGGESTIES VOOR VERVOLGONDERZOEK

De uit dit onderzoek verkregen resultaten geven aan dat de hydrologische eigenschappen ($K(\theta)$, $K(h)$ en $h(\theta)$ relaties) van de potgrond afhankelijk zijn van de voorgeschiedenis. Vooral hysteresis, het verschijnsel dat het bij een bepaalde drukhoogte van het water in de grond gevonden vochtgehalte afhankelijk is van de manier waarop die drukhoogte is bereikt (uitdrogen of bevochtigen), maar ook verdichting en verwerking van het materiaal spelen hierbij een rol. Bij het karakteriseren van een potgrond hoort dan ook het aangeven hoe de hydrologische eigenschappen worden beïnvloed door deze factoren zodat een model kan worden opgesteld. Vragen die bij het karakteriseren van potgrond gesteld zouden moeten worden (vooral voor de in de praktijk voorkomende situaties) zijn:

1. Binnen welke limieten verandert het verband tussen de drukhoogte en het vochtgehalte als gevolg van hysteresis.
2. Hoe wordt de doorlatendheid (voor water en lucht) door hysteresis beïnvloed.
3. Hoe kan de hysteresis worden ondergebracht in een model en binnen welke grenzen moet hysteresis worden geparame-teriseerd.
4. Hoe verandert de potgrond tijdens de teelt (dichtheid, organische-stofgehalte).
5. Hoe worden hydrologische eigenschappen van potgrond door de aanwezigheid van plantewortels beïnvloed.

LITERATUUR

- Beuving, J., 1986. Vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, dichtheid en samenstelling van bodemprofielen in zand-, zavel-, klei- en veengronden. Wageningen, ICW. Rapport 10 (nieuwe serie) 26 p.
- Boels, D., J.B.H.M. van Gils, G.J. Veerman and K.E. Wit, 1978. Theory and system of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivities. Soil Sci. 126(4), 191-199. Verspreide overdruk 222. Wageningen, ICW.
- Bouma, J., 1977. Soil survey and the study of water in unsaturated soil. Paper 13, Soil Survey Institute, Wageningen. 107 pp.
- Bronswijk, J.J.B., 1987. Zwel en krimpprocessen in zware kleigronden. Mededelingen nieuwe serie nr. 46. Uit Cultuurtechnisch Tijdschrift 226,6, 1987.
- Feddes, R.A., P. Kabat, P.J.T. van Bakel, J.J.B. Bronswijk and J. Halbertsma, 1988. Modeling soil water dynamics in the unsaturated zone - state of the art. Journal of Hydrology 100: 69-111.
- Fyslab, 1988. KH/KH Directory, a directory of Fortran programs for the calculation of soil hydraulic properties. (User manual). Version 1.
- Graaf, M. de, 1985. Waterhuishouding Potplanten. Wageningen, ICW. Nota 1633. 12 pp.
- Klute, A., 1972. The determination of hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soil. Soil Sci. 113: 264-277.
- Richards, L.A., 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. Soil Sci. 66: 105-110.
- TFDL, 1978. Handleiding bij het gebruik van de tensiometer. in opdracht van A.L.M. van Wijk. Wageningen, ICW. Opdrachtnr. 8.2033.4, 11 pp.
- Veerman, G.J., 1987. Waterretentiemetingen volgens de drukevenwichtsmethode. Wageningen, ICW. Mei 1987 nota 1783, 13 pp.
- Wind, G.P., 1966. Capillary conductivity data estimated by a simple method. Sym. June 1966. Water in the unsaturated zone. Proc. UNESCO/IASH: 181-191. Wageningen, ICW. Verspreide Overdruk nr. 80.

GEBRUIKTE SYMBOLEN EN RELATIES

- Index s = vaste delen
 Index h = organische-stof
 Index w = water
 Index a = lucht
 Index t = totaal (s+w+a)
 Index d = droog
 Index k = krimp
- M = gewicht (kg)
 v = Volume. Een volume grond bevat een volume vaste delen V_s , water V_w en lucht V_a , $V_t = V_s + V_w + V_a$
 Bij het volume vaste delen is inbegrepen het volume van de mineraalstof, de organische-stof en het volume van de in de perlite ingesloten lucht.
- θ = Volume fractie vocht (cm^3/cm^3), $\theta = V_w/V_t$.
 F_h = Organische-stofgehalte, het verschil tussen het totaal droge stofgewicht en het gewicht van de gegloeide grond gedeeld door het totaalgewicht van de droge stof (g org. stof/g droge grond), $F_h = M_h/M_s$.
 F_w = Watergehalte, het gewichtsverschil tussen natte en ovendroge grond gedeeld door het gewicht van de ovendroge grond (gram water per gram droge grond), $W = M_w/M_s$.
 ρ_b = Dichtheid droge monster. Gewicht van ovendroog monster gedeeld door het oorspronkelijke volume van het monster (kg/m^3), $\rho_b = M_s/V_t$.
 ρ_s = Dichtheid vaste fase (kg/m^3), $\rho_s = M_s/V_s$.
 ρ_h = Dichtheid organische-stof (kg/m^3), $\rho_h = M_h/V_h$.
 h = Drukhoogte van het bodemwater (cm).
 z = Plaatshoogte (cm).
 H = Stijghoogte (cm), als gevolg van drukhoogte en plaatshoogte $H = h + z$.
 v = flux (cm/dag). De hoeveelheid water die per tijds eenheid een horizontale oppervlakte-eenheid passeerd.
 K = Doorlatendheid (cm/dag).
 Wf = Totale filterweerstand (dag), $Wf = (H_1 - H_2) \cdot v$, het stijghoogteverschil tussen binnen (ingesteld) en buitenkant (afgeleid van de met de tensiometers gemeten waarden) van het filter vermenigvuldigd met de flux.
 - = Geen gegevens.

AANHANGSEL 1 Overzicht van de opstelling voor bepaling van de waterretentie via de drukevenwichtsmethode

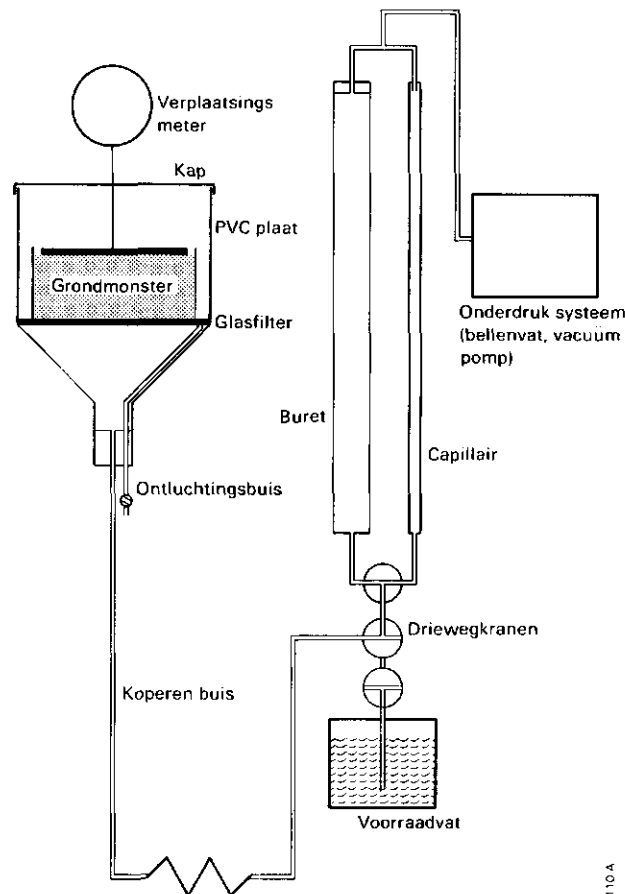


Fig. 9 Schematische tekening van de opstelling voor het meten van de waterretentie volgens de drukevenwichtsmethode. Het grondmonster is op een filter geplaatst, waaronder de drukhoogte van water kan worden gevarieerd (m.b.v. een onderdrukstelsel, zoals beschreven in aanhangsel 2). Via de buret en het capillair kan de hoeveelheid uit- of instromend water worden gemeten. Bovenop het monster is een PVC-plaat aangebracht waarop een verplaatsingsmeter steunt waarmee uitzetten en krimpen van het monster gemeten kan worden. Onder het filter is een buis aangebracht om eventuele luchtbelletjes te kunnen verwijderen. Om verdamping tegen te gaan zijn de leidingen tussen de filtertrechter en buret/capillair van koper en is de filtertrechter aan de bovenzijde met een plastic plaat afgedekt. Door het voorraadvat is het mogelijk water aan het stelsel te onttrekken of toe te voegen.

AANHANGSEL 2 Beschrijving van de opstelling voor de doorlatendheidsmeting met behulp van de dubbele-filtermethode

De voor de metingen gebruikte opstelling is schematisch weergegeven in fig. 10.

De hele opstelling is grofweg te verdelen in:

1. Een systeem voor het instellen van de onderdruk.
2. Het monster tussen de filterplaten.
3. De meetapparatuur.

Het onderdrukstelsel

De onderdruk wordt in dit systeem geleverd door een aquariumpomp (fig. 11). Deze pomp geeft, als de luchtinlaat is dichtgekit, een maximale onderdruk van -240 cm en levert voldoende vermogen om meerdere opstellingen van onderdruk te voorzien. Door tussen de pomp en de afzonderlijke opstellingen een weerstand (1 cm thermometercapillair) aan te brengen, wordt voorkomen dat bij het wegvallen van de onderdruk in een van de systemen ook de onderdruk in de andere aangesloten systemen wordt beïnvloed. Een shunt voor elke weerstand apart, maakt het mogelijk de hoeveelheid lucht die door een systeem stroomt te vergroten. Dit werkt makkelijk bij het snel instellen van een gewenste onderdruk.

Met behulp van een bellenvat (zie fig. 10) kan de door de pomp geleverde onderdruk worden ingesteld op een gewenste waarde, met een nauwkeurigheid van ongeveer 2 mm.

Een buffervat tussen de pomp en de rest van de opstelling vangt water uit het bellenvat of de rest van de opstelling op, voordat het in de pomp terecht kan komen.

Vanaf het buffervat lopen leidingen naar het voorraadvat en het opvangvat die op hun beurt weer in verbinding staan met respectievelijk het bovenste en het onderste filter. Een drukhoogteverschil tussen de beide filters ontstaat door een verschil in hoogte van de waterniveaus in de vaten. Het drukhoogteverschil tussen de filterplaten leidt uiteindelijk tot een gradiënt in het monster waardoor water gaat stromen. Door het water van hoog naar laag te laten stromen in plaats van andersom wordt in het monster een meer homogene vochtverdeling verkregen ($H=h+z$).

Het monster

Bij de bepaling van de waterretentie met behulp van de tegenkoppelingsmethode werd zwel en krimp waargenomen. Bij het bouwen van de opstelling voor het bepalen van de doorlatendheid volgens de dubbele-filtermethode is hiermee rekening gehouden door het bovenste filter en de bovenste tensiometer zo aan te brengen dat deze met het monster konden meebewegen (fig. 12).

Beschrijving van de filters

De filters die voor het meten van de doorlatendheid zijn gemaakt doorlatendheid zijn gemaakt bestonden uit 3 verschillende onderdelen die met behulp van Araldite aan elkaar zijn bevestigd:

1. Een glazen kapje (diameter 7,8 cm). Hiervoor zijn van glazen potten bodems afgezaagd met behulp van een fijne diamantzaag (Cabo). Het zaagvlak is met behulp van een diamantschijf (Stiboka) gladgepolijst. Elke bodem is met behulp van een diamantboor voorzien van twee gaten. Hardmetalen glasboren (KWB), verkrijgbaar bij ijzerhandel) bleken hiervoor ook zeer geschikt.
2. Twee roestvrijstalen buisjes. Door in glazen kapje 2 uitgangen aan te brengen konden tijdens de proef eventuele kleine luchtbelllen worden verwijderd door doorspoelen.
3. Een filterplaat. Voor het onderzoek zijn twee verschillende filterplaten gebruikt, namelijk:
 1. een keramische filterplaat met een luchtintree waarde van ongeveer 1 bar (high flow, soil moisture equipment);
 2. een glasfilter van Duran borosilicaatglas met een luchtintreewaarde van ongeveer 150 cm.

De filterplaten zijn na te zijn vastgelijmd op maatgeslepen met behulp van een langzaam draaiende, met water gekoelde slijpsteen.

Voor het bouwen van de filters zijn verschillende lijmen onderzocht. Problemen waren onder andere onvoldoende gasdichtheid (siliconenkit), onvoldoende hechting aan glas (smelthars, polyurethaamlijm), niet watervast (alle acrylaatlijmen). Op advies van Ciba Geigy is uiteindelijk gekozen voor Araldite (harder AV 144-2, hars HV 997). Deze lijm bleek sterk, water en luchtdicht en goed hechtend op al het gebruikte materiaal. Bij gebruik van filterplaten met een lage luchtintreewaarde (150 cm) was het, om doorslaan via de rand te voorkomen, nodig de rand dicht te smeren. Hiervoor is een watervast PVC-lijm gebruikt. Zonder deze lijm sloegen de filters bij een drukhoogte van -80 cm door. Tijdens het onderzoek kwam naar voren dat de meetmethode bruikbaar was tussen drukhoogte van -15 tot -100 cm.

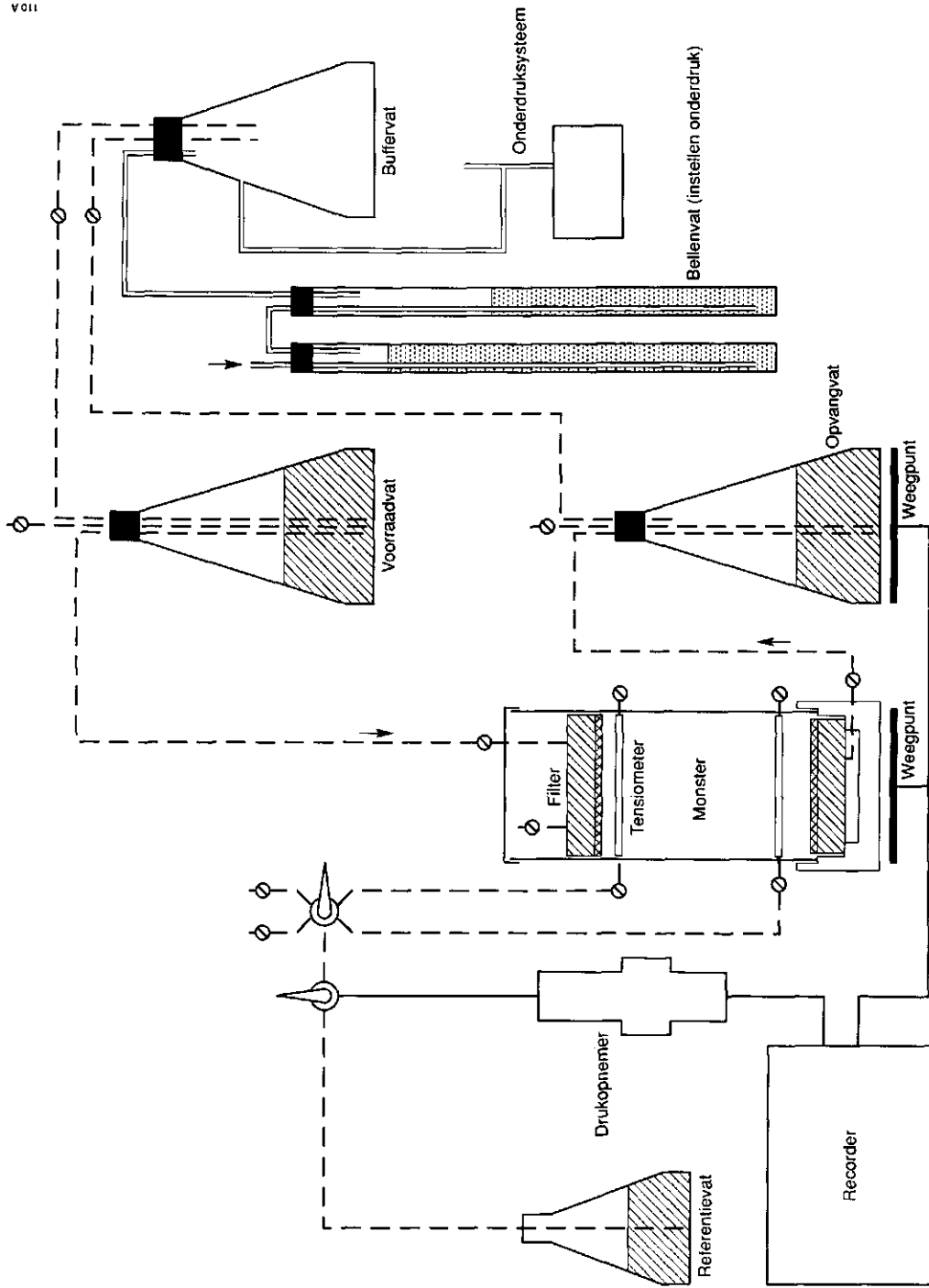


Fig. 10 Schematische tekening van de opstelling voor het bepalen van de onverzadigde doorlatendheid volgens de dubbele-filtermethode.

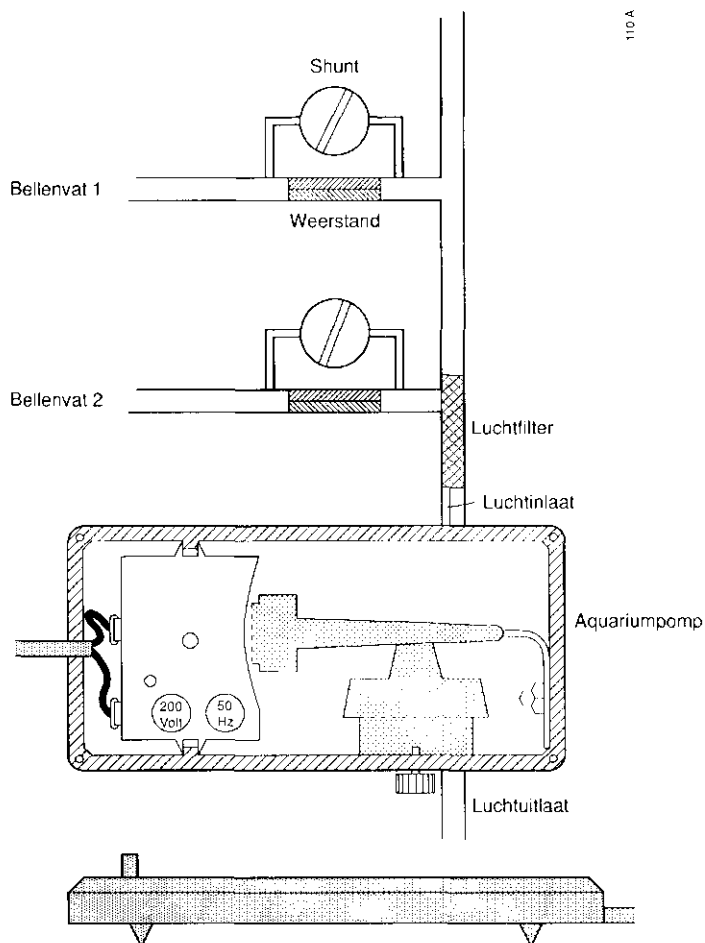


Fig. 11 Schematische tekening van het vacuumsysteem.

Het filter met een filterplaat met een luchtintreewaarde van 150 cm was te gebruiken tot een onderdruk van -90 tot -100 cm. Het filter met een filterplaat met een luchtintreewaarde van 1 bar sloeg nog niet door bij een onderdruk van -800 cm. Tijdens het gebruik bestaat het gevaar (vooral in het vochtige gebied waar het water nauwelijks door de grond wordt gefilterd) dat de doorlatendheid van de filters verminderd door de meegevoerde gronddeeltjes. Een laagje blokzijlzaam van ongeveer 0,5 mm tussen het monster en de filterplaat verminderde totale filterweerstand in vergelijking met de filters waarop geen laagje blokzijlzaam was aangebracht.

De meetapparatuur

Gedurende het onderzoek is de drukhoogte in het monster, het gewicht van het monster en het gewicht van het opgevangen water gemeten. De gemeten waarden werden via een recorder genoteerd. De tensiometers waren via een kraan aangesloten op een drukopnemer.

Het gewicht werd bepaald met behulp van een weegbrug. De weegbrug bestond uit 4 weegpunten waarlangs automatisch op de van tevoren vastgestelde tijdsintervallen, een drukopnemer werd bewogen.

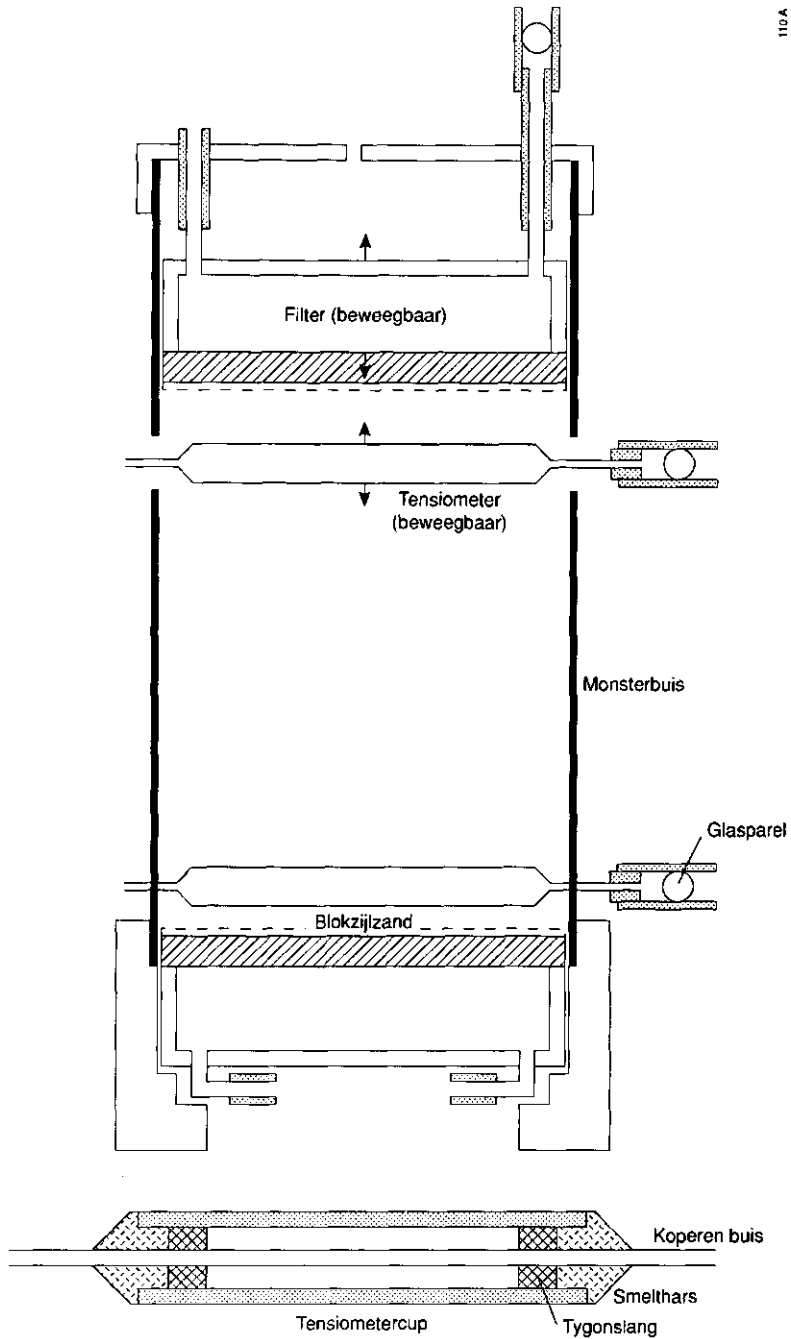


Fig. 12 Detailtekening van de opbouw van het monster en de tensiometer voor de dubbele-filtermethode.

Beschrijving meetkast met drukopnemer

Er is gebruik gemaakt van een door TFDL gebouwde meetbox die was aangesloten op een externe voeding van -12/+12 volt. De meetbox kon op 30, 100, 300 en 1000 mbar worden ingesteld (nauwkeurigheid 1% volle schaaluitslag). Voor meer details zie de handleiding voor deze meetbox (TFDL, 1978). Tijdens de metingen in drogere grond bleek dat verdamping via de nylon slang tussen meetkast en tensiometer een merkbaar drukverval veroorzaakte (bij $h = -100$ cm ongeveer 20 cm). Om de verdamping via de slangen tegen te gaan zijn ze omwikkeld met aluminiumfolie dat werd vastgesmolten. Op de meetbox konden in totaal 4 tensiometers worden aangesloten. Met behulp van een (handbediende) kraan werden de verschillende tensiometers met de drukopnemer verbonden.

Beschrijving tensiometers

Voor de metingen zijn tensiometers gemaakt met open uiteinden (aanslangsel 2, fig. 12). Hierdoor kon het systeem tijdens een meting worden doorgespoeld om eventuele lucht te verwijderen. De tensiometer was opgebouwd uit een doorlopende (voor de stevigheid) koperen buis met een diameter van 3 mm en voorzien van 2 gaten. Daaromheen was een keramische buis geplaatst (diameter 6 mm, luchtintreewaarde 1 bar). Om de uiteinden van de keramische buis af te sluiten is gebruikgemaakt van een stukje Tygon slang en van smelthars. De slang was nodig om te voorkomen dat de smelthars de tensiometer in zou lopen en zo de in de koperen buis gemaakte gaten zou afsluiten. De smelthars werd eerst aangebracht rond de koperen buis waarna de keramische mantel er omheen werd geschoven om vervolgens, met behulp van hete lucht, de uiteinden van de keramische buis dicht te smelten. De tensiometer is tot een onderdruk van -800 cm getest en sloeg toen nog niet door.

Nauwkeurigheid van de metingen

De nauwkeurigheid van de meetresultaten was afhankelijk van:

1. De weegbrug (absolute waarde op $\pm 0,25$ g per dag nauwkeurig). Van 0,5 g per dag of meer kan worden gemeten.
2. De tensiometers. Absolute waarden zijn ongeveer op 1 cm nauwkeurig te meten. Verschillen waren meetbaar tot ongeveer 0,5 cm.
3. De nauwkeurigheid waarmee de afstand tussen de tensiometers gemeten kan worden ± 2 mm.
4. De nauwkeurigheid waarmee de horizontale oppervlakte van het monster (nodig bij het berekenen van v) bepaald kan worden.

Om te voorkomen dat een van de vier hiervoor genoemde punten mee gaat spelen in de uiteindelijke nauwkeurigheid van de berekende relaties, moet het meetgebied zo worden gekozen dat de genoemde fouten klein zijn ten opzichte van de gemeten waarden. Aandere mogelijke foutenbronnen kunnen zijn:

1. Luchtbellen in het systeem van tensiometer en drukopnemer. Hierdoor kunnen afwijkingen ontstaan tussen de gemeten drukhoogte en de werkelijke drukhoogte in het monster. Deze fout kan worden voorkomen door regelmatig op de aanwezigheid van luchtbellen te controleren en door doorspoelen van het systeem.
2. Luchtbellen onder de filterplaten (lager gewicht monster en te hoge uitstroom). Kan visueel worden gecontroleerd. Eventuele luchtbellen kunnen door doorspoelen worden verwijderd.

3. Verplaatsing van het monster en of de aangekoppelde slangen. Wordt zichtbaar uit plotselinge gewichtsveranderingen op de recorder. Omdat de gemeten veranderingen geen betrekking hebben op veranderingen in het monster moeten ze bij de verschillende berekeningen niet worden meegenomen.
4. Bij een inhomogene vochtverdeling wordt gewerkt met een gemiddelde drukhoogte. Hierdoor bestaat de kans dat de doorlatendheid onderschat wordt.
5. Een verloop in de drukopnemer. Door via het referentievat regelmatig controlemetingen uit te voeren is het mogelijk de gemeten waarden te ijken.

Door het continu registreren met de recorder vallen plotselinge veranderingen van de gemeten gegevens in veel gevallen op waardoor gecorrigeerd kan worden.

AANHANGSEL 3 De afzonderlijke resultaten van de met de onderzochte monsters

Met behulp van de bij de verdampingsopstelling geschreven Fortran programma's zijn figuren verkregen van $h(\theta)$ (lineair en halflogaritmisch uitgezet), $K(h)$ en $K(\theta)$ relaties voor elk monster afzonderlijk.

Bij elke figuur is de vergelijking van de door de gevonden waarden gefitte curve gegeven en de grenzen van gebied waarin de curven zijn bepaald.

De bij de figuren gebruikte monsternummers zijn dezelfde als de nummers die in het hoofdstuk over de verdampingsmethode zijn gebruikt. In tabel 8 zijn de handelingen en de nummers nog eens op een rijtje gezet.

Tabel 8 Overzicht van de verschillende monsters voor de doorlatendheidsbepaling volgens de verdampingsmethode. De nrs 1 en 3 zijn de droog (drg) ingevulde monsters en de nrs 4-6 zijn de nat ingevulde monsters.

Nr.	Methode	Figuren
1	drg + 0 g	13, 14, 15, 16
3	drg + 7,0 g	17, 18, 19, 20
4	nat + 0 g	21, 22, 23, 24
5	nat + 3,4 g	25, 26, 27, 28
6	nat + 7,0 g	29, 30, 31, 32

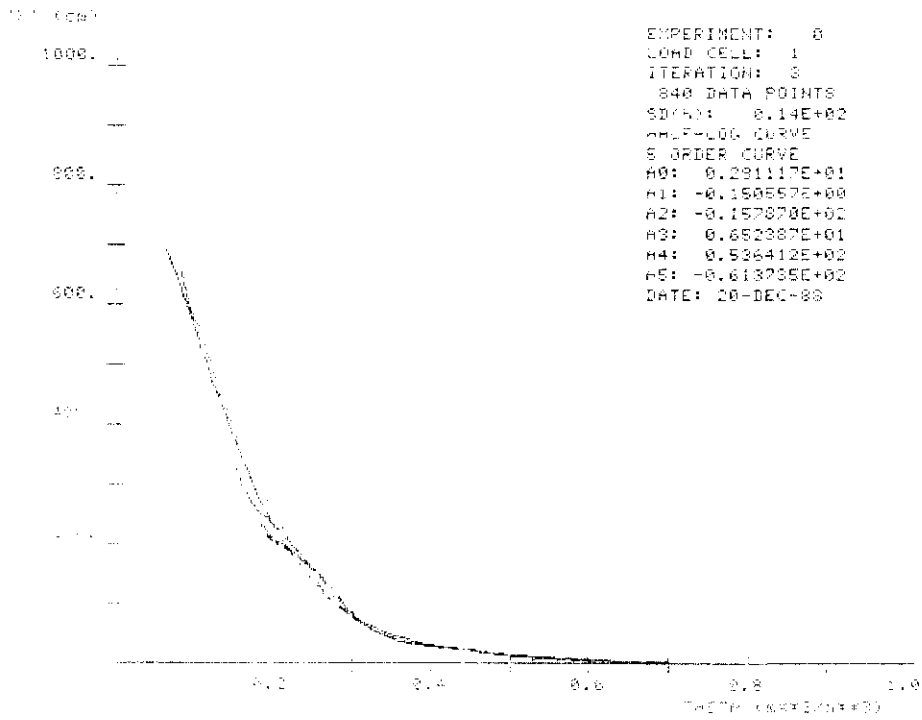
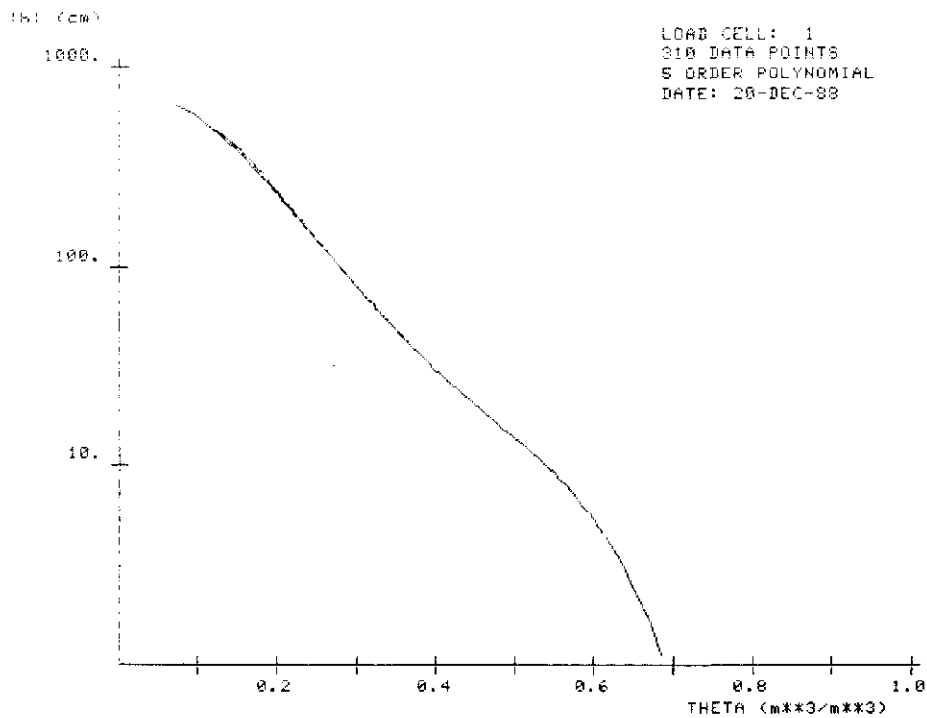


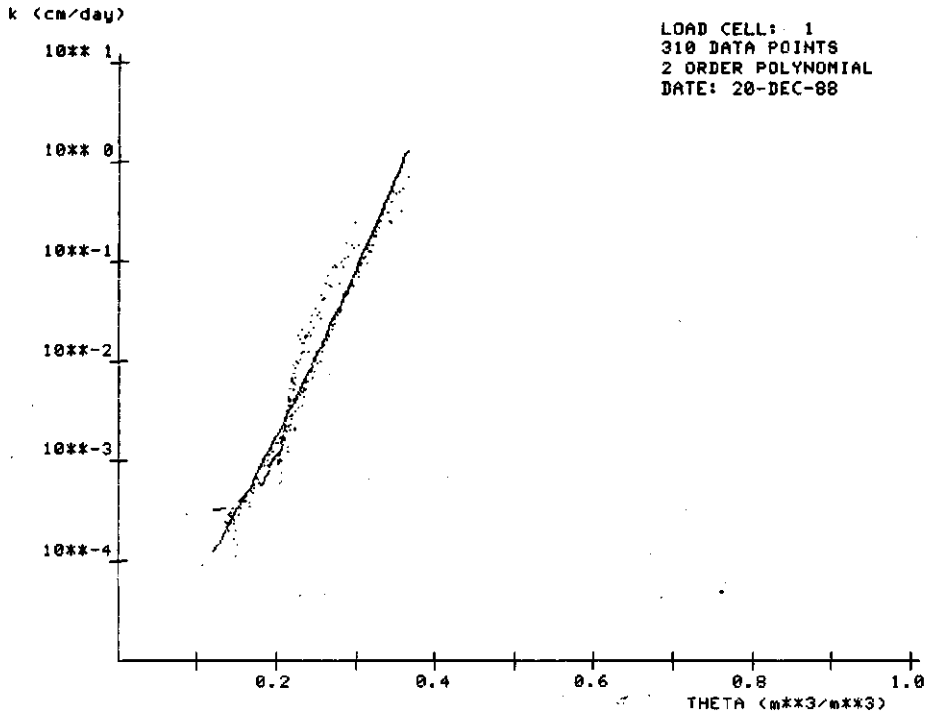
Fig. 13 h(θ) relatie van monster 1.



The water retention (h-THETA) curve was fitted with:
 $\log(h) = a_0 + a_1 \cdot \theta + \dots + a_n \cdot \theta^n$
 (h in cm and THETA in m³/m³)
 Permitted THETA range from 0.075 to 0.793

a0 = 0.2911169E+01
 a1 = -0.1505571E+00
 a2 = -0.1578695E+02
 a3 = 0.6523866E+01
 a4 = 0.5364117E+02
 a5 = -0.6137349E+02

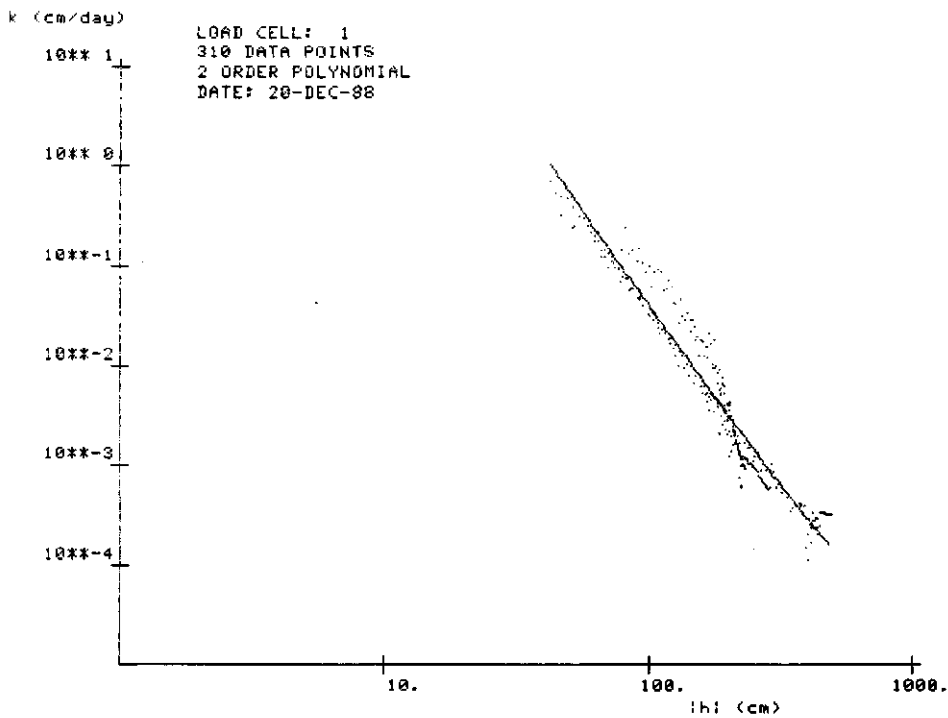
Fig. 14 h(θ) relatie van monster 1 (volgens semi-logaritmische schaal).



The k-THETA relation was fitted with:
 $\log(k) = c_0 + c_1 \cdot \text{THETA} + \dots + c_N \cdot \text{THETA}^N$
 (k in cm/day and THETA in m**3/m**3)
 Permitted THETA range from 0.120 to 0.364

$c_0 = -0.5385888E+01$
 $c_1 = 0.1092268E+02$
 $c_2 = 0.1154050E+02$

Fig. 15 K(θ) relatie van monster 1.



The k-h relation was fitted with:
 $\log(k) = b_0 + b_1 \cdot \log(h) + \dots + b_N \cdot [\log(h)]^N$
 (k in cm/day and h in cm)
 Permitted h range from 43. to 490.

$b_0 = 0.7283001E+01$
 $b_1 = -0.4947917E+01$
 $b_2 = 0.3027141E+00$

Fig. 16 K(h) relatie van monster 1.

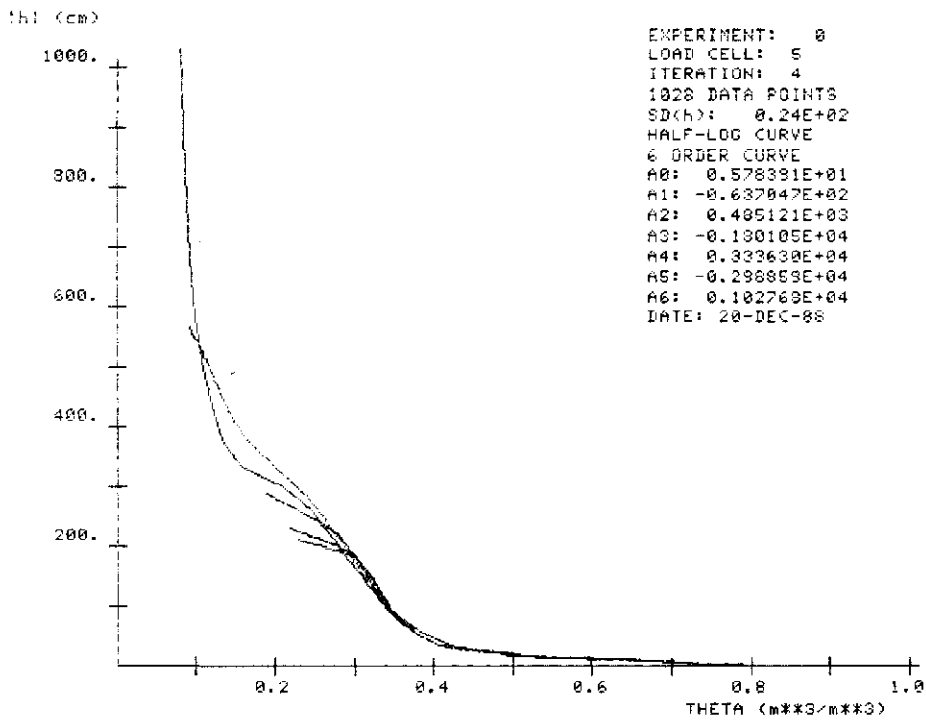
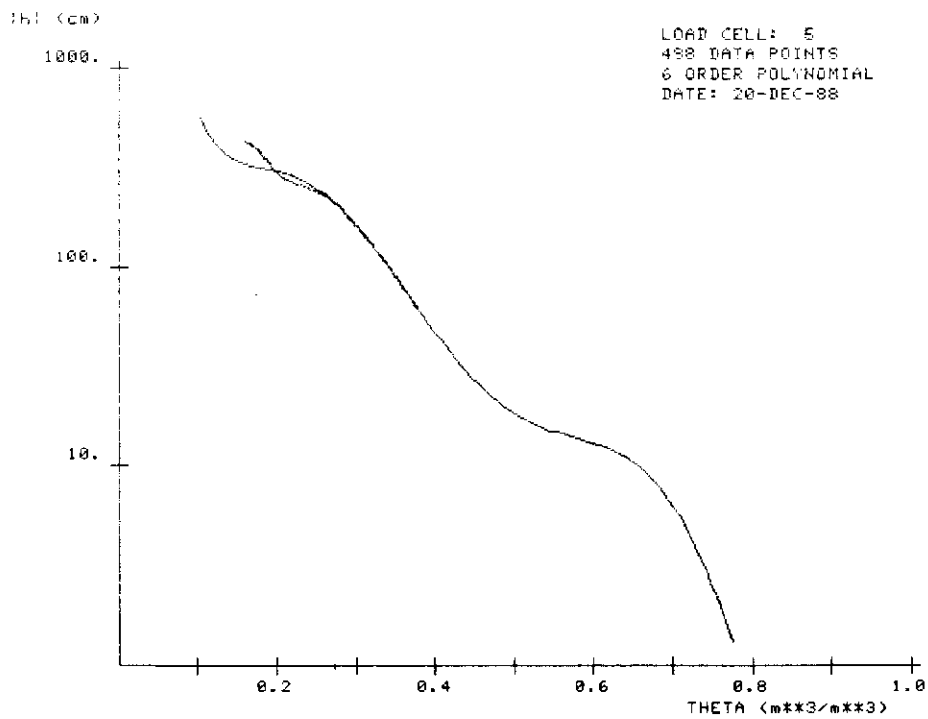


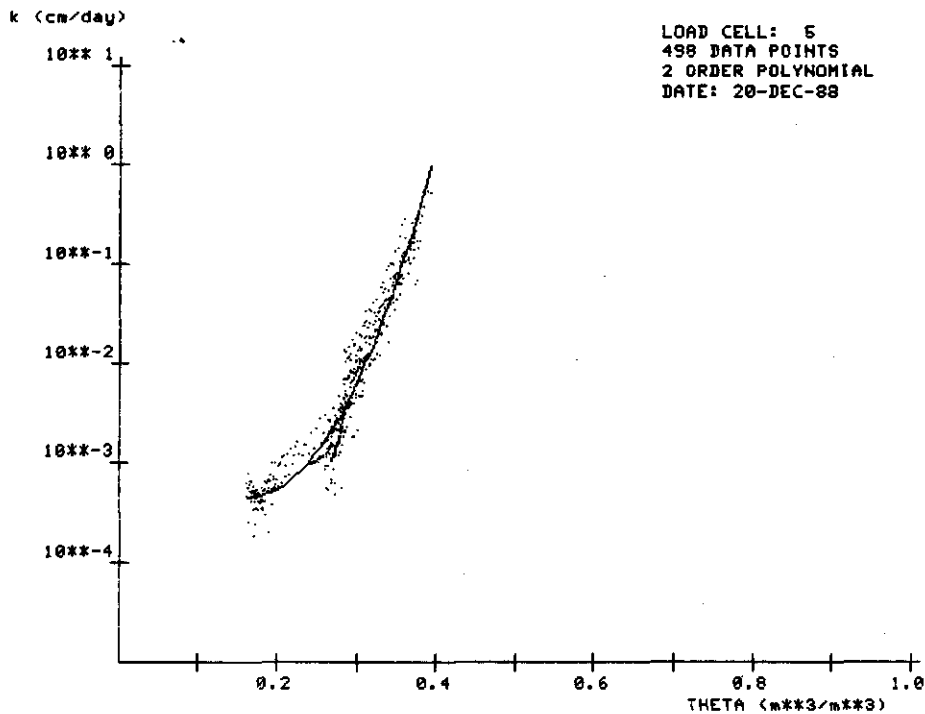
Fig. 17 h(θ) relatie van monster 3.



The water retention (h-THETA) curve was fitted with:

$\log(h) = a_0 + a_1 \cdot \text{THETA} + \dots + a_n \cdot \text{THETA}^n$	$a_3 = -0.1801052E+04$
(h in cm and THETA in m³/m³)	$a_4 = 0.3336304E+04$
Permitted THETA range from 0.102 to 0.775	$a_5 = -0.2988593E+04$
$a_0 = 0.5783908E+01$	$a_6 = 0.1027681E+04$
$a_1 = -0.6370467E+02$	
$a_2 = 0.4851210E+03$	

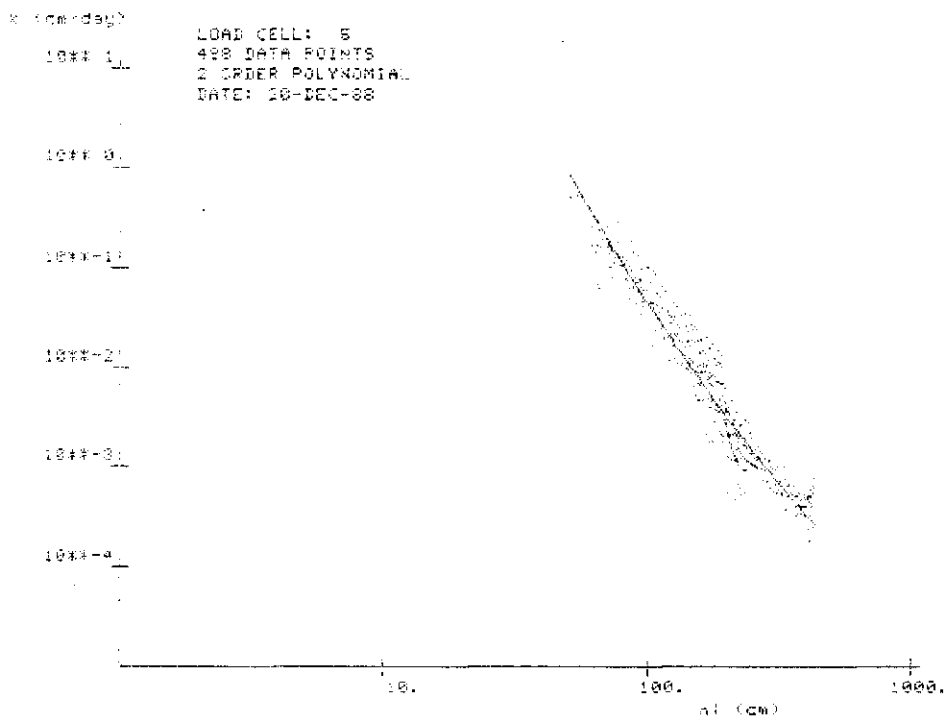
Fig. 18 h(θ) relatie van monster 3 (volgens semi-logaritmische schaal).



The k-THETA relation was fitted with:
 $\log(k) = c_0 + c_1 \cdot \text{THETA} + \dots + c_n \cdot \text{THETA}^n$
 (k in cm/day and THETA in m³/m³)
 Permitted THETA range from 0.162 to 0.394

c0 = -0.1589802E+01
 c1 = -0.2119936E+02
 c2 = 0.6405466E+02

Fig. 19 K(θ) relatie van monster 3.



The k-h relation was fitted with:
 $\log(k) = b_0 + b_1 \cdot \log(h) + \dots + b_n \cdot [\log(h)]^n$
 (k in cm/day and h in cm)
 Permitted h range from 51. to 426.

b0 = 0.1060052E+02
 b1 = -0.7874070E+01
 b2 = 0.9470998E+00

Fig. 20 K(h) relatie van monster 3.

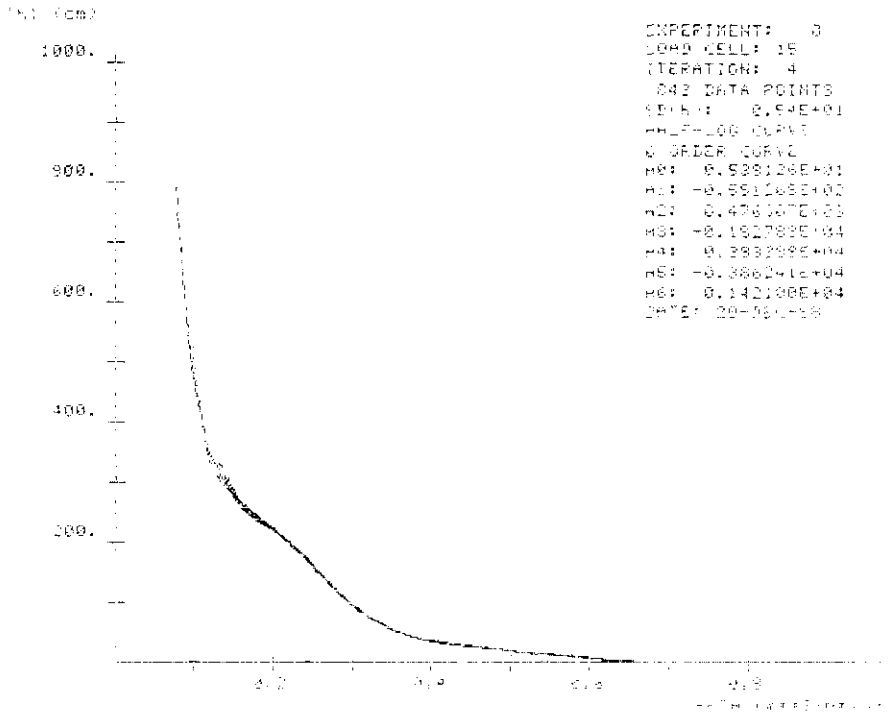
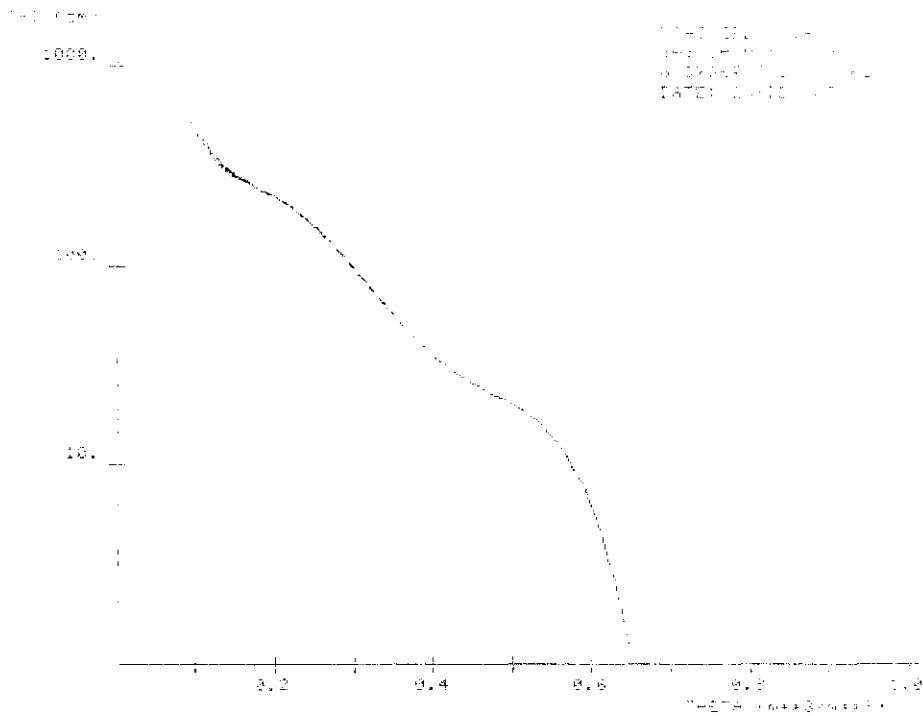
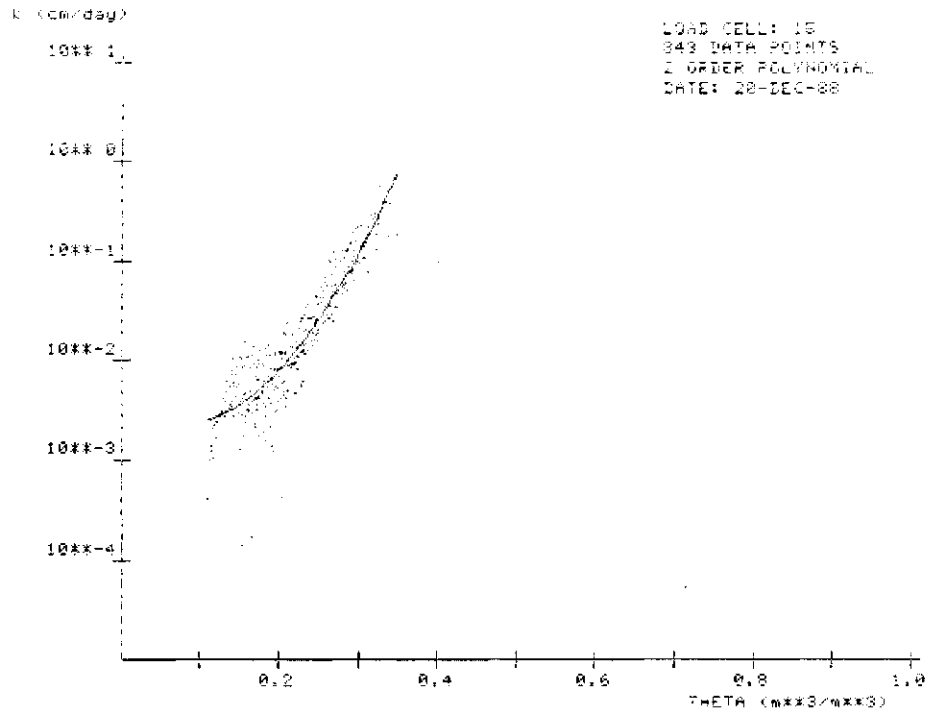


Fig. 21 h(θ) relatie van monster 4.



The water retention (h-θ) curve was fitted with:
 $\log(h) = a_0 + a_1 \theta + a_2 \theta^2 + a_3 \theta^3 + a_4 \theta^4 + a_5 \theta^5 + a_6 \theta^6$
 (h in cm and θ in m³/m³)
 Permitted θ range from 0.053 to 0.652
 a0 = 0.5391259E+01
 a1 = -0.5912685E+02
 a2 = 0.4763069E+03
 a3 = -0.1927833E+04
 a4 = 0.3932992E+04
 a5 = -0.3862405E+04
 a6 = 0.1421004E+04

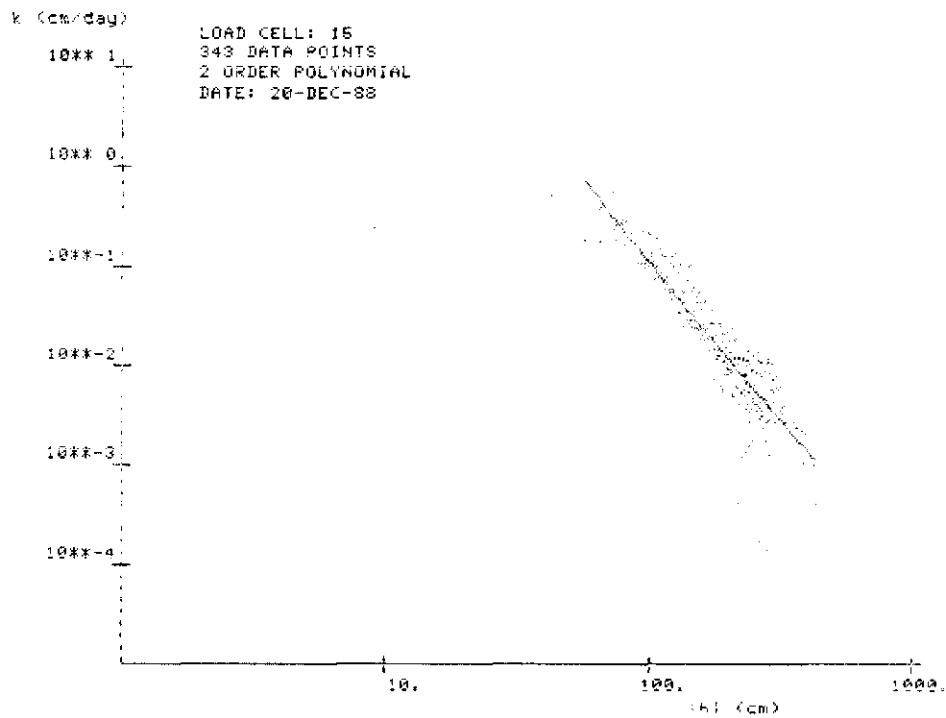
Fig. 22 h(θ) relatie van monster 4 (volgens semi-logaritmische schaal).



The k-THETA relation was fitted with:
 $\log(k) = c_0 + c_1 \cdot \text{THETA} + \dots + c_n \cdot \text{THETA}^n$
 (k in cm/day and THETA in m**3/m**3)
 Permitted THETA range from 0.110 to 0.348

$c_0 = -0.2519871E+01$
 $c_1 = -0.4318629E+01$
 $c_2 = 0.3225056E+02$

Fig. 23 K(θ) relatie van monster 4.



The k-h relation was fitted with:
 $\log(k) = b_0 + b_1 \cdot \log(h) + \dots + b_n \cdot (\log(h))^n$
 (k in cm/day and h in cm)
 Permitted h range from 58. to 430.

$b_0 = 0.6606910E+01$
 $b_1 = -0.4268334E+01$
 $b_2 = 0.2421660E+00$

Fig. 24 K(h) relatie van monster 4.

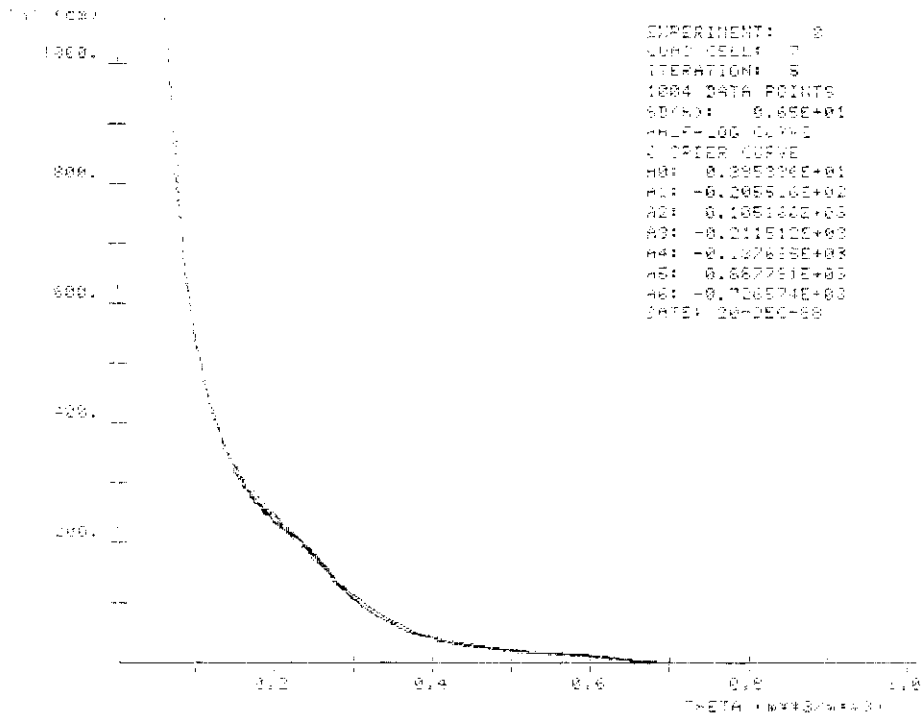
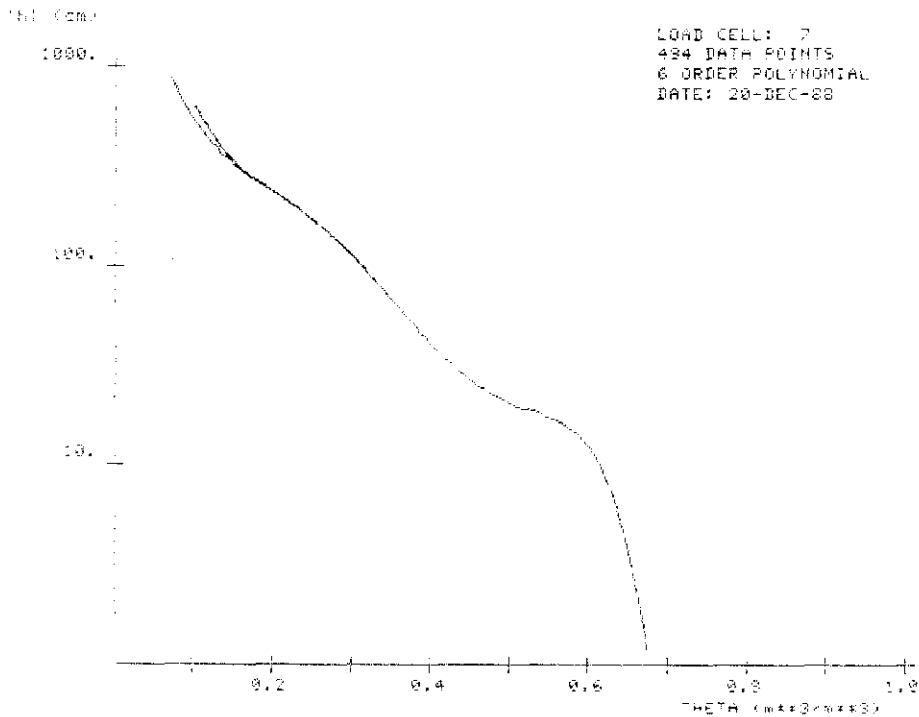


Fig. 25 h(θ) relatie van monster 5.



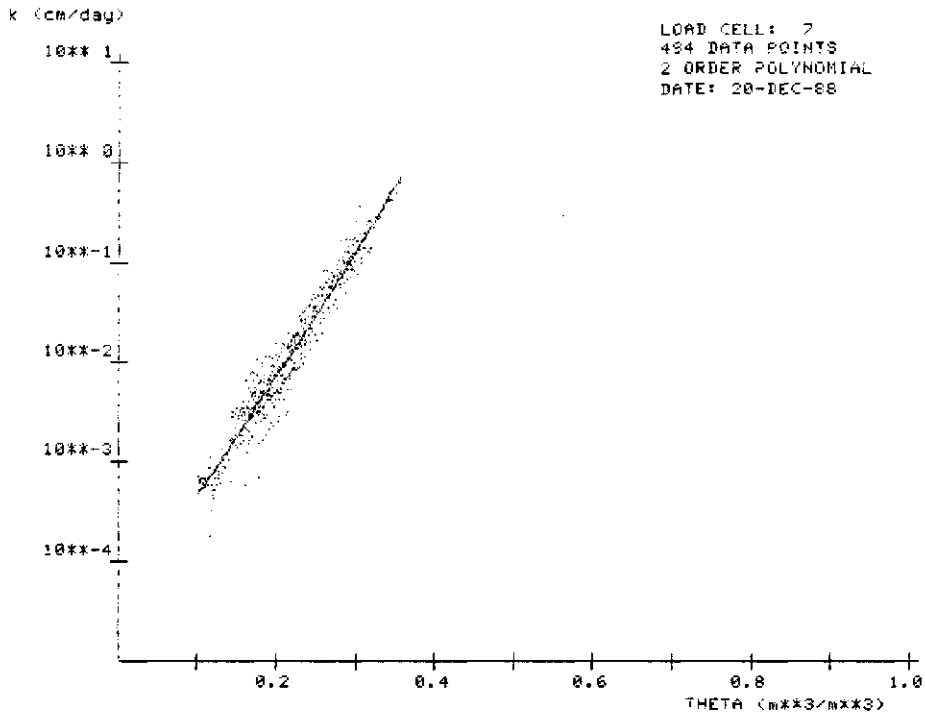
The water retention (h-θ) curve was fitted with:

$$\log(h) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4 + a_5\theta^5 + a_6\theta^6$$

(h in cm and θ in m³/m³)
 Permitted θ range from 0.072 to 0.699

a0 = 0.3953361E+01	a2 = 0.1051655E+03
a1 = -0.2055161E+02	a3 = -0.2115119E+03
	a4 = -0.1376851E+03
	a5 = 0.6877912E+03
	a6 = -0.7265739E+03

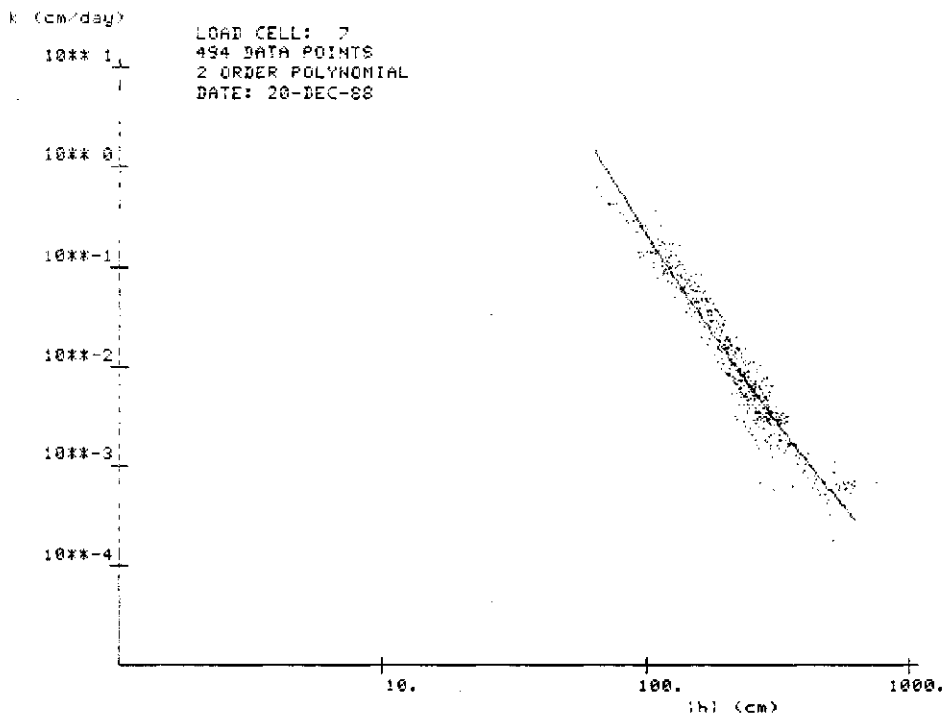
Fig. 26 h(θ) relatie van monster 5 (volgens semi-logaritmische schaal).



The k-THETA relation was fitted with:
 $\log(k) = c_0 + c_1 \cdot \text{THETA} + \dots + c_n \cdot \text{THETA}^n$
 (k in cm/day and THETA in m³/m³)
 Permitted THETA range from 0.101 to 0.357

$c_0 = -0.4461837E+01$
 $c_1 = 0.1091005E+02$
 $c_2 = 0.3349438E+01$

Fig. 27 K(θ) relatie van monster 5.



The k-h relation was fitted with:
 $\log(k) = b_0 + b_1 \cdot \log(h) + \dots + b_n \cdot [\log(h)]^n$
 (k in cm/day and h in cm)
 Permitted h range from 64. to 624.

$b_0 = 0.1021023E+02$
 $b_1 = -0.6746680E+01$
 $b_2 = 0.6525014E+00$

Fig. 28 K(h) relatie van monster 5.

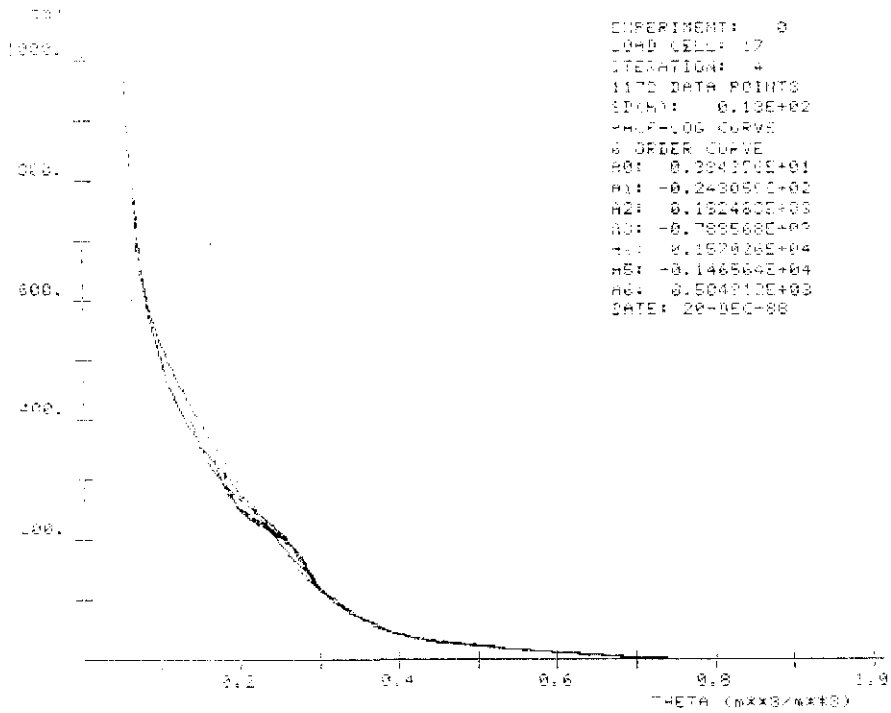
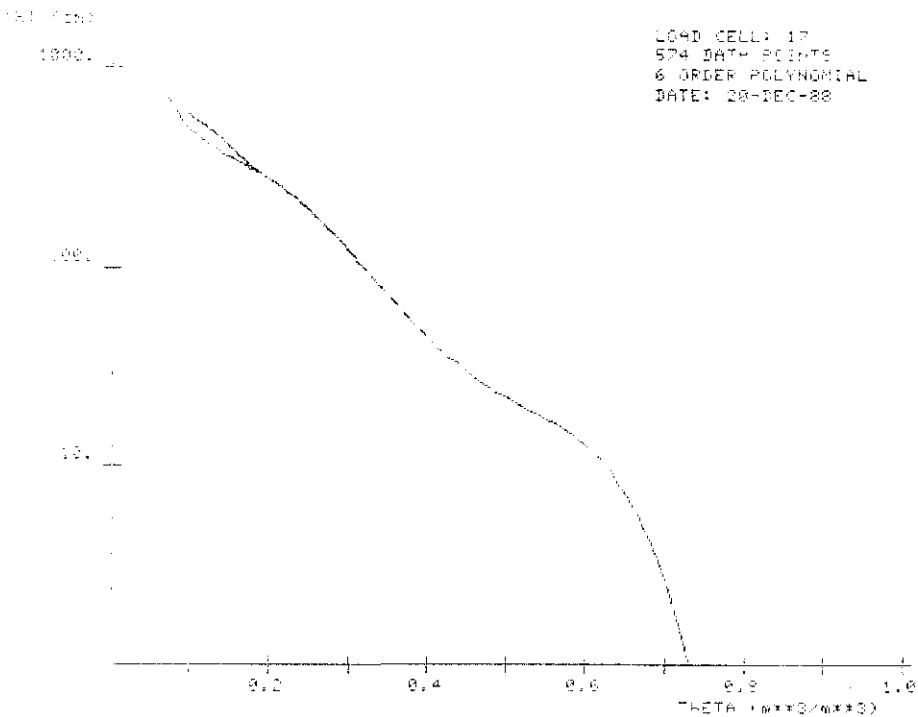
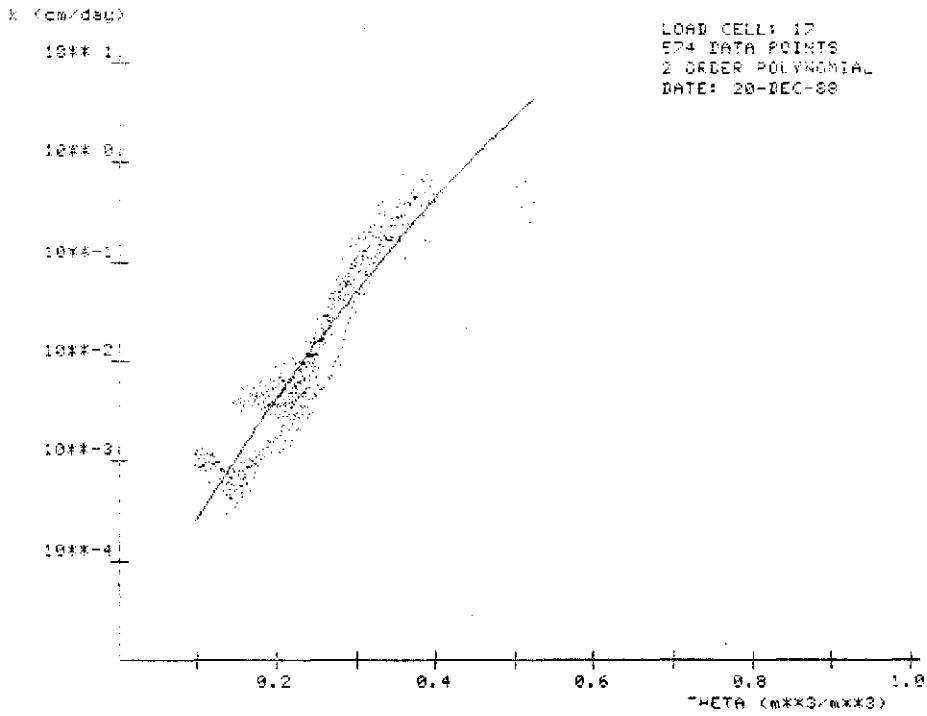


Fig. 29 $h(\theta)$ relatie van monster 6.



The water retention (h - θ) curve was fitted with: $a_2 = 0.1924826E+03$
 $log(h) = a_0 + a_1 \theta + \dots + a_n \theta^n$ $a_3 = -0.7895681E+03$
 (h in cm and θ in m^3/m^3) $a_4 = 0.1570258E+04$
 Permitted θ range from 0.064 to 0.730 $a_5 = -0.1465644E+04$
 $a_0 = 0.3843551E+01$ $a_6 = 0.5049116E+03$
 $a_1 = -0.2430551E+02$

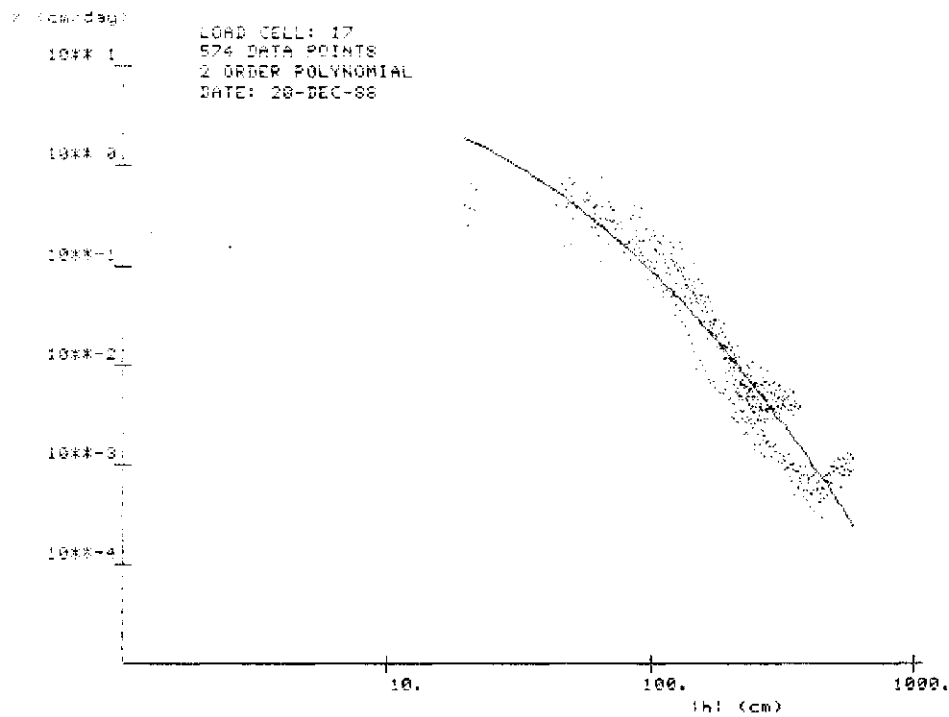
Fig. 30 $h(\theta)$ relatie van monster 6 (volgens semi-logaritmische schaal).



The k-THETA relation was fitted with:
 $\log(k) = c_0 + c_1 \cdot \text{THETA} + \dots + c_n \cdot \text{THETA}^n$
 (k in cm/day and THETA in m**3/m**3)
 Permitted THETA range from 0.096 to 0.523

c0 = -0.4870228E+01
 c1 = 0.1381683E+02
 c2 = -0.6262533E+01

Fig. 31 K(θ) relatie van monster 6.



The k-h relation was fitted with:
 $\log(k) = b_0 + b_1 \cdot \log(h) + \dots + b_n \cdot [\log(h)]^n$
 (k in cm/day and h in cm)
 Permitted h: range from 20. to 590.

b0 = 0.2012246E+00
 b1 = 0.1323424E+01
 b2 = -0.9734106E+00

Fig. 32 K(h) relatie van monster 6.