

32/uu6(261) 2^e ex

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

**Bepaling van de bodemfysische eigenschappen van twee soorten
vliegas**

**G.J. Veerman
J.H.M. Wösten**

Rapport 261



DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1993

13 JAN. 1994

LSn 589000 x

REFERAAT

Veerman, G.J. en J.H.M. Wösten, 1993. *Bepaling van de bodemfysische eigenschappen van twee soorten vliegas*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 261; 46 blz.; 8 fig.; 2 ref.; 2 bijl.

Aan twee soorten vliegas zijn bodemfysische eigenschappen bepaald. Het ging hierbij om de bepaling van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek, het hysteresise verband en de krimpeigenschappen. Uit de metingen blijkt dat er tussen de twee soorten vliegas geen grote verschillen bestaan in fysische eigenschappen. Uit de bepalingen blijkt dat vliegas een erg goed gesorteerd materiaal is met een uniforme poriënstructuur. Dit uit zich in een sterke afname in het vochtgehalte en in de doorlatendheid, indien vliegas verder uitdroogt dan een bepaalde drukhoogte. Op deze manier vertoont het fysisch gedrag van vliegas een grote overeenkomst met dat van grof zand met dit verschil dat de sterke afname van het vochtgehalte en de doorlatendheid in vliegas plaats vindt bij een veel lagere drukhoogte dan bij grof zand. De dichtheid blijkt een grote invloed te hebben op het al dan niet voorkomen van hysteresise. Dichte monsters (1 gr/cm^3) vertonen nauwelijks en losse monsters ($0,85 \text{ gr/cm}^3$) vertonen sterke hysteresise effecten. Krimp, zowel verticaal als horizontaal, treedt alleen op in het hele natte traject.

Trefwoorden: doorlatendheid, waterretentie, hysteresise, krimp, vliegas.

ISSN 0927-4499

©1993 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen
Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812; telex: 75230 VISI-NL

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp" (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

DLO-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 of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

Project 7314

[HW/05-93]

INHOUD

	Blz.
WOORD VOORAF	7
SAMENVATTING	9
1 INLEIDING	11
2 BEPALING VAN DE WATERRETENTIE- EN DOORLATENDHEIDSKARAKTERISTIEK MET DE VERDAMPINGSMETHODE	13
2.1 Monstername en werkwijze	13
2.2 Resultaten	14
2.3 Bespreking van de resultaten	14
3 BEPALING VAN DE DESORPTIE- EN ABSORPTIETAK VAN DE WATERRETENTIEKARAKTERISTIEK	21
3.1 Monstername en werkwijze	21
3.2 Resultaten	22
3.3 Bespreking van de resultaten	26
4 BEPALING VAN DE KRIMPEIGENSCHAPPEN VAN VLEGAS	29
4.1 Monstername en werkwijze	29
4.2 Resultaten	29
4.3 Bespreking van de resultaten	29
LITERATUUR	33
AANHANGSELS	
1 Determination of the conductivity and waterretention characteristic using the evaporation method of Wind	35
2 Determination of the waterretention characteristic using the hanging water column	41
FIGUREN	
1 Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek van vliegasoort 1	16
2 Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek van vliegasoort 2	18
3 Desorptie- en absorptietak van de waterretentiekarakteristiek van vliegasoort 1	23
4 Desorptie- en absorptietak van de waterretentiekarakteristiek van vliegasoort 2	24
5 Desorptie- en absorptietakken van de waterretentiekarakteristieken van de vliegasoorten 1 en 2	26
6 Desorptie- en absorptietakken van de waterretentiekarakteristieken van vliegass met een dichtheid van ongeveer 1 g/cm^3	27
7 Krimp ten gevolge van uitdroging van de vliegasoorten 1 en 2	30
8 Krimp ten gevolge van uitdroging van de vliegasoorten 1 en 2	32

WOORD VOORAF

In opdracht van N.V. KEMA te Arnhem heeft het DLO-Staring Centrum in de periode december 1992 tot en met maart 1993 de bodemfysische eigenschappen van twee soorten vliegias bepaald.

De dank van DLO-Staring Centrum gaat uit naar de heer L.P.D.M. van Hulst van N.V. KEMA voor de belangstelling die hij toonde voor het verloop van de bepalingen.

SAMENVATTING

Aan twee soorten vliegas zijn in de periode december 1992 tot en met maart 1993 de bodemfysische eigenschappen bepaald door het DLO-Staring Centrum. Het ging hierbij om de bepaling van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek, het hysteresis-verband en de krimpeigenschappen. Deze eigenschappen zijn belangrijke invoergegevens in modellen waarmee het water- en opgeloste-stoffentransport in vliegasdepots wordt berekend.

Uit de bepalingen blijkt dat er tussen de twee soorten vliegas geen grote verschillen bestaan in fysische eigenschappen. Dit geldt voor alle onderzochte eigenschappen. Verder blijkt dat vliegas een erg goed gesorteerd materiaal is met een uniforme poriënstructuur. Dit komt tot uiting in een sterke afname in vochtgehalte en in doorlatendheid, indien vliegas verder uitdroogt dan een vochtgehalte dat bij een kritieke drukhoogte van $h = -350$ cm hoort. De vorm van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken vertonen duidelijke overeenkomsten met de karakteristieken die voor grof zand zijn gemeten, met als duidelijk verschil dat in grof de sterke veranderingen in vochtgehalte en doorlatendheid optreden bij een drukhoogte van $h = -100$ cm.

De dichtheid blijkt een grote invloed te hebben op het al dan niet voorkomen van hysteresis. Dichte monsters (1 g/cm^3) vertonen nauwelijks en losse monsters ($0,85 \text{ g/cm}^3$) vertonen sterke hysteresis-effecten. Door dus de dichtheid van vliegas in depots te beïnvloeden, bijvoorbeeld door vliegas onder een grotere belasting te storten, is het mogelijk het fysisch gedrag van vliegas sterk te veranderen.

Krimp, zowel verticaal als horizontaal, treedt alleen op in het hele natte traject. De omvang van het krimpverschijnsel is, gemeten in cm^3 volumeverandering, nogal gering en bedraagt ongeveer 4% in volume.

1 INLEIDING

Poederkoolvliegias is een restprodukt van met kolen gestookte elektriciteits centrales. De poederkoolvliegias wordt grotendeels hergebruikt door toepassing in produkten zoals cement, beton, asphalt en dergelijke. Voor het geval dat volledige toepassing in de toekomst niet mogelijk zou zijn, wordt er een onderzoeksprogramma uitgevoerd om opslag in depots voor te bereid. Om te kunnen berekenen hoe het transport van water en de daarin opgeloste stoffen in dergelijke vliegiasdepots verloopt, zijn gegevens vereist over de bodemfysische eigenschappen van vliegias.

Specifiek zijn door het DLO-Staring Centrum in de periode december 1992 tot en met maart 1993 de volgende fysische eigenschappen bepaald:

- de waterretentie- (θ -h relatie) en doorlatendheidskarakteristiek (K-h relatie);
- hysteresis in de waterretentiekarakteristiek;
- krimp-karakteristiek (relatie tussen krimp en vochtgehalte).

Afhankelijk van de soort kolen die in een centrale wordt gestookt, zal ook de samenstelling van het resterende vliegias variëren. In dit onderzoek zijn 2 soorten vliegias onderzocht. Per soort vliegias zijn de bepalingen in duplo uitgevoerd.

In dit rapport wordt de werkwijze bij de drie bepalingen beschreven en worden de resultaten van de bepalingen gepresenteerd en besproken.

2 BEPALING VAN DE WATERRETENTIE- EN DOORLATENDHEIDS- KARAKTERISTIEK MET DE VERDAMPINGSMETHODE

Dit hoofdstuk beschrijft de werkwijze en de resultaten bij het gebruik van de verdampingsmethode. De gemeten waterretentiekarakteristiek geeft het verband aan tussen een aangelegde drukhoogte en het bijbehorend vochtgehalte. Op deze manier wordt een waarde verkregen voor het waterbergend vermogen van vliegass. De gemeten doorlatendheidskarakteristiek geeft het verband aan tussen de aangelegde drukhoogte en de watergeleidbaarheid van vliegass.

2.1 Monsternamen en werkwijze

Om de situatie in bestaande vliegassdepots zo goed mogelijk na te bootsen, zijn de monsterringen in het laboratorium gevuld met vliegass onder belasting met een gewicht. Voor deze bepaling zijn de monsterringen gevuld onder een belasting van $0,48 \text{ kg/cm}^2$. Deze belasting is 5 keer gedurende het vullen van de ringen aangebracht. Bij het vullen van de ringen bedraagt het vochtgehalte van beide soorten vliegass ongeveer 18%.

Voor de bepaling van de θ -h-K relaties met de verdampingsmethode zijn van iedere soort vliegass 2 pvc-ringen gevuld met een elk een inhoud van 666 cm^3 . De hoogte van de ringen is 8 cm en de doorsnede is $83,32 \text{ cm}^2$.

De dichtheden van deze monsters zijn:
vliegasssoort 1; $0,979$ en $0,982 \text{ g/cm}^3$;
vliegasssoort 2; $1,005$ en $0,999 \text{ g/cm}^3$.

De monsters zijn verzadigd door ze in een bak met enkele centimeters water te plaatsen. Na verzadiging is de verzadigde doorlatendheid bepaald door op de monsters een laagje water van 1 cm te handhaven en de uitgestroomde hoeveelheid water per tijdseenheid te bepalen.

Vervolgens is aan de 4 monsters de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek in het onverzadigde gebied (drukhoogte $< 0 \text{ cm}$) bepaald volgens de verdampingsmethode volgens Wind. Bij deze methode wordt een nat monster zo in het laboratorium opgesteld, dat aan de bovenkant via verdamping water het monster kan verlaten, terwijl het monster aan de onderkant is afgesloten. De gewichtsafname van het monster wordt geregistreerd door het monster periodiek te wegen, terwijl met behulp van tensiometers het verloop van de drukhoogte wordt geregistreerd op 4 dieptes ten opzichte van de bovenkant van het monster. De bepaling stopt als de bovenste tensiometer ongeveer -800 cm aangeeft.

De analyse van de meetgegevens gebeurt op de volgende, erg globaal beschreven wijze. Allereerst wordt een vochtgehalte (θ) - drukhoogte (h) relatie verondersteld.

Met behulp van de eerste schatting van de θ -h relatie worden de gemeten drukhoogten omgezet in vochtgehaltes. Sommatie van deze geschatte vochtgehaltes over de gehele hoogte van het monster geeft een waarde voor het gewicht van het monster. Dit geschatte gewicht wordt vergeleken met het werkelijk gemeten gewicht en indien die twee afwijken, vindt een tweede schatting van de θ -h relatie plaats. Deze procedure herhaalt zich net zo vaak totdat het verschil tussen het geschatte en gemeten gewicht minder is geworden dan een van te voren opgegeven waarde. Indien de procedure is voltooid, ligt de θ -h relatie vast. Uitgaande van deze θ -h relatie worden de gemeten drukhoogtes omgezet in vochtgehaltes. Uit de afname van het vochtgehalte in de tijd wordt de waterflux in het monster bepaald. Uitgaande van deze waterflux en gemeten gradiënt in drukhoogtes wordt vervolgens met de wet van Darcy de doorlatendheid (K) berekend.

Alle meetwaarden worden automatisch geregistreerd en opgeslagen. Voor de analyse van de meetwaarden is een computerprogramma beschikbaar.

Voor een uitgebreidere en exactere beschrijving van de verdampingsmethode volgens Wind, wordt verwezen naar aanhangsel 1.

2.2 Resultaten

De figuren 1a en 1b geven de resultaten voor de duplobepalingen van vliegasoort 1 (monsters 1.1 en 1.2). De figuren 2a en 2b geven de resultaten voor de duplobepalingen van vliegasoort 2 (monsters 2.1 en 2.2).

2.3 Bespreking van de resultaten

Voor het praktisch gebruik van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek in modelberekeningen is het raadzaam de meetwaarden te beschrijven met de volgende vergelijkingen van Mualem (1976) en Van Genuchten (1980). Hierin wordt de waterretentiekarakteristiek (de relatie tussen het vochtgehalte θ en de drukhoogte h) als volgt beschreven:

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

De doorlatendheidskarakteristiek (de relatie tussen de doorlatendheid k en de drukhoogte h) wordt beschreven als:

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

Hierin is:

- θ = vochtgehalte (cm^3/cm^3)
- θ_r = rest-vochtgehalte (cm^3/cm^3)
- θ_s = verzadigd vochtgehalte (cm^3/cm^3)
- h = drukhoogte (cm)
- α, n, m, l = parameters die de vorm van de curven beschrijven
- $k(h)$ = doorlatendheid (cm/d)
- k_s = verzadigde doorlatendheid (cm/d)

De waarde van de parameter m is gerelateerd aan de parameter n volgens: $m = 1 - 1/n$. De waarden voor de parameters van de afzonderlijke bepalingen staan in de figuren 1a tot en met 2b vermeld. Uit de figuren blijkt dat in alle gevallen zowel het vochtgehalte als de doorlatendheid de waarde bij verzadiging blijven behouden tot een drukhoogte van ongeveer -350 cm. Indien het vliegassysteem verder uitdroogt, nemen zowel het vochtgehalte als de doorlatendheid sterk af. Dit verloop duidt op een uiterst uniforme poriëngrootte verdeling in vliegassysteem.

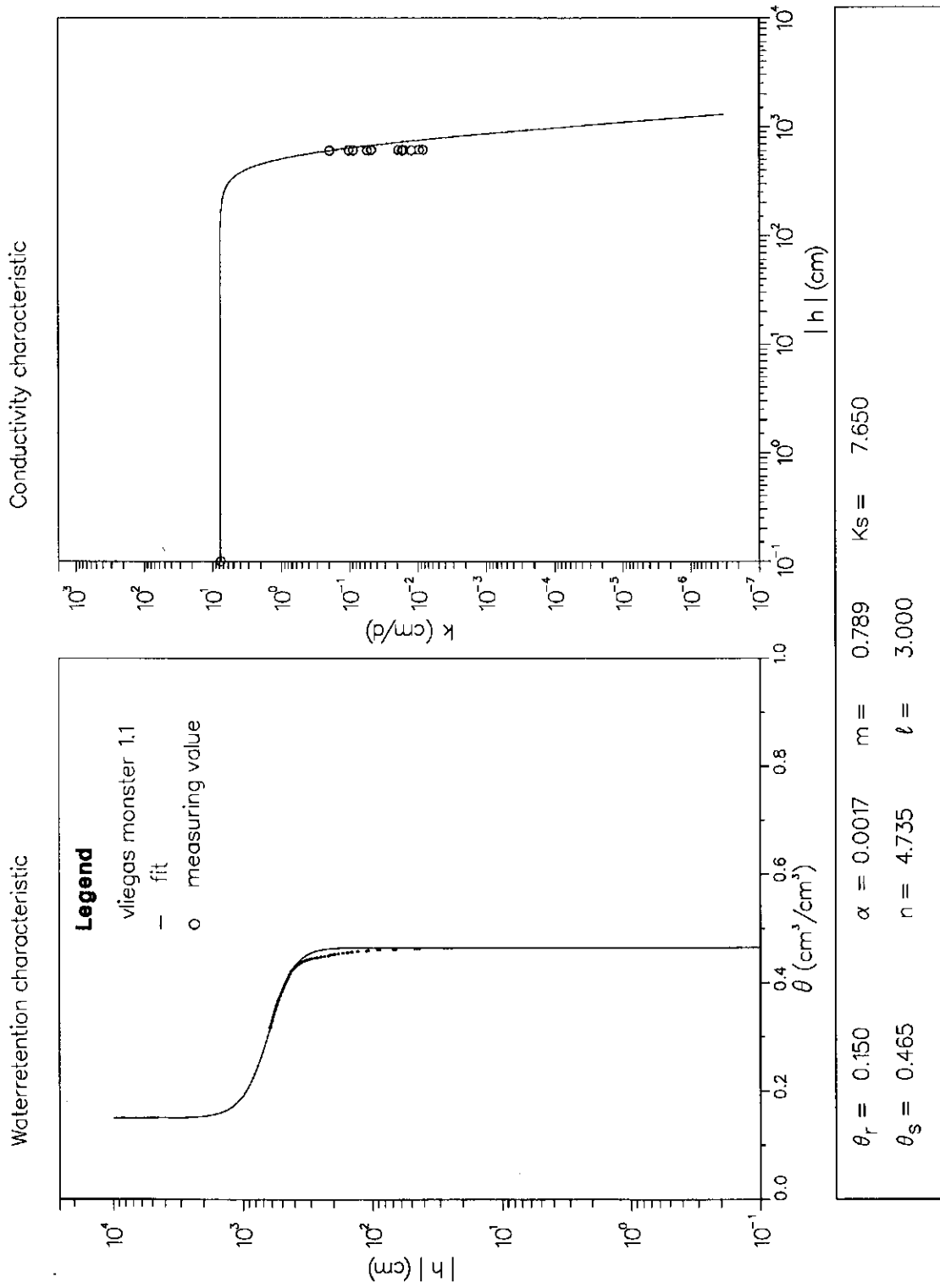
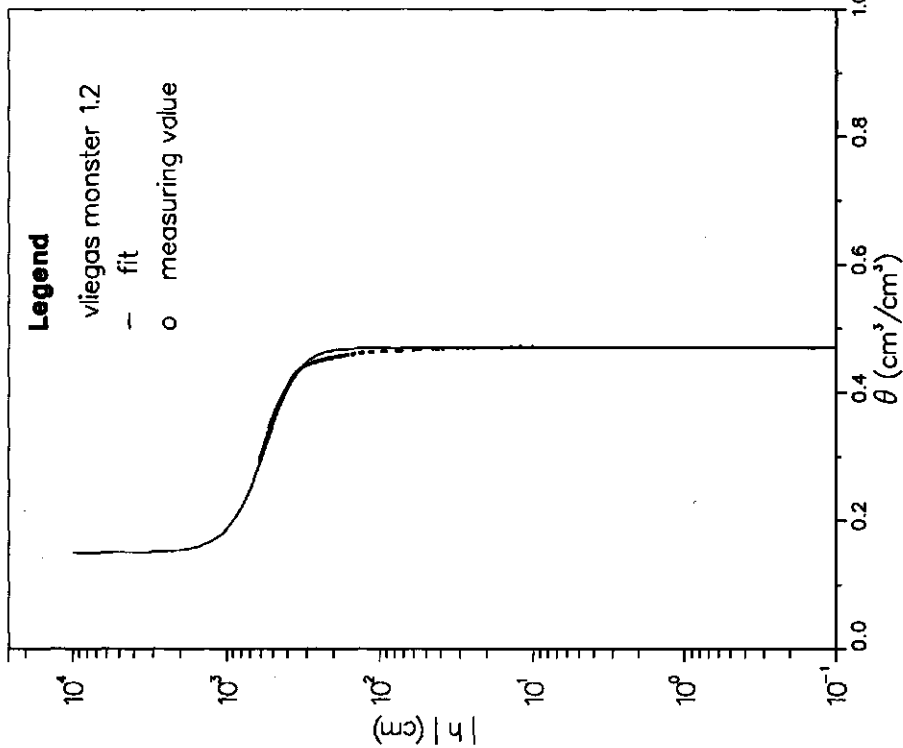
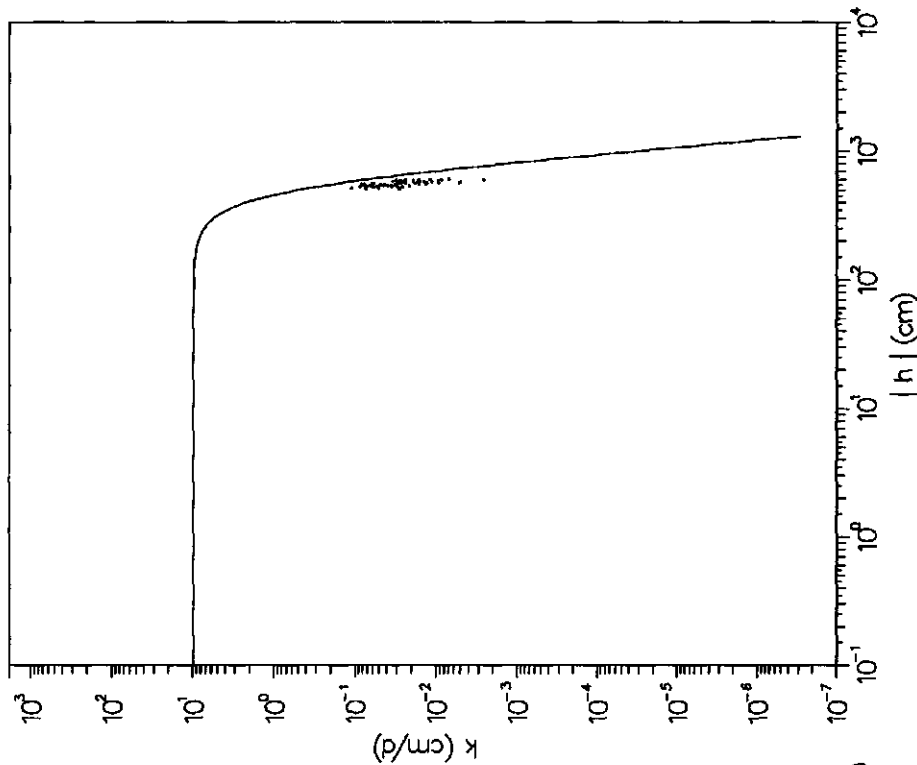


Fig. 1a Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek van vliegassoort 1, duplo 1

Waterretentie karakteristiek



Conductivity karakteristiek



$\theta_r = 0.150$	$\alpha = 0.0019$	$m = 0.763$	$K_s = 9.860$
$\theta_s = 0.470$	$n = 4.220$	$l = 3.000$	

Fig. 1b Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek van vliegsoort 1, duplo 2

Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek van vliegasoort 2, duplo 1

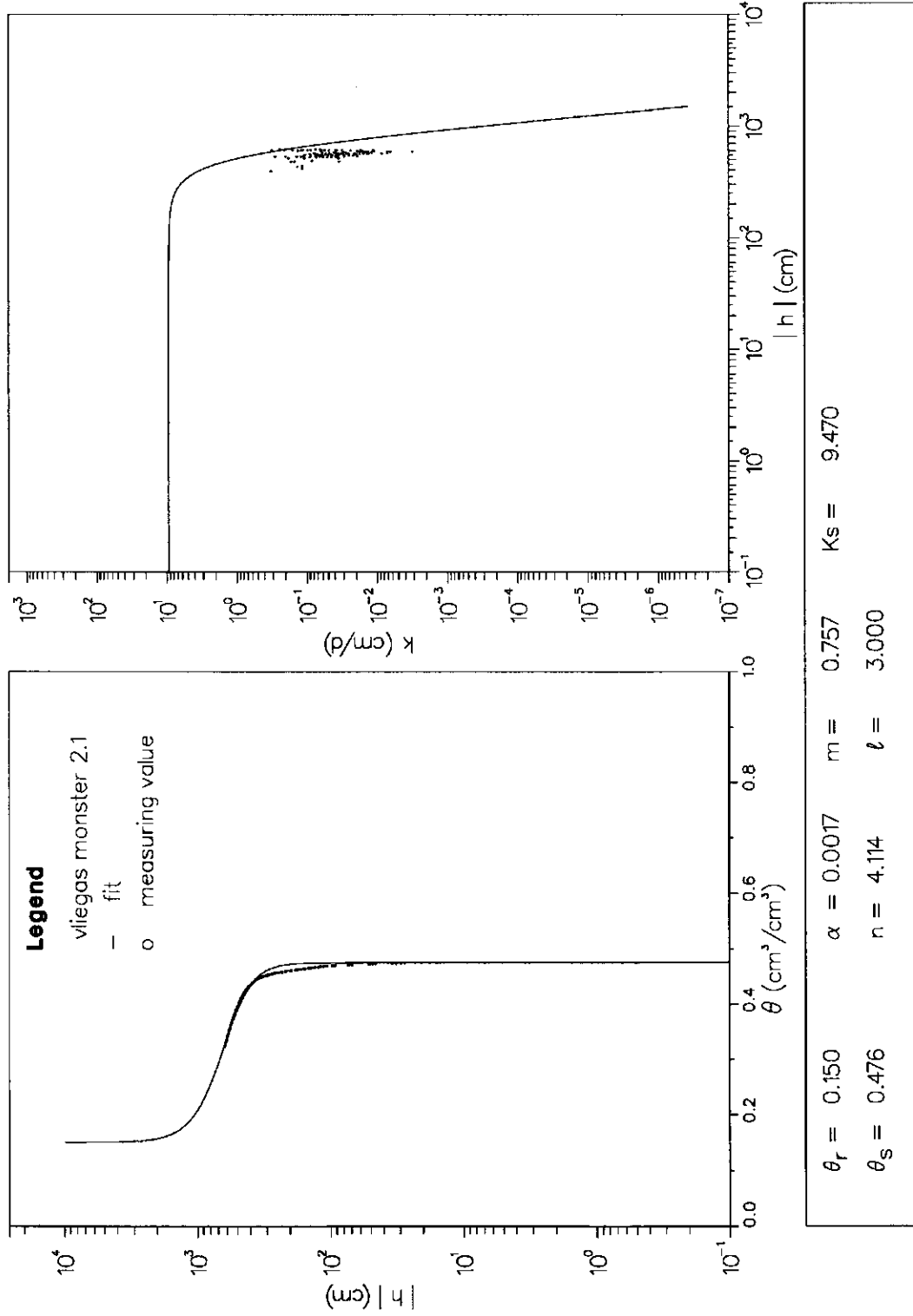
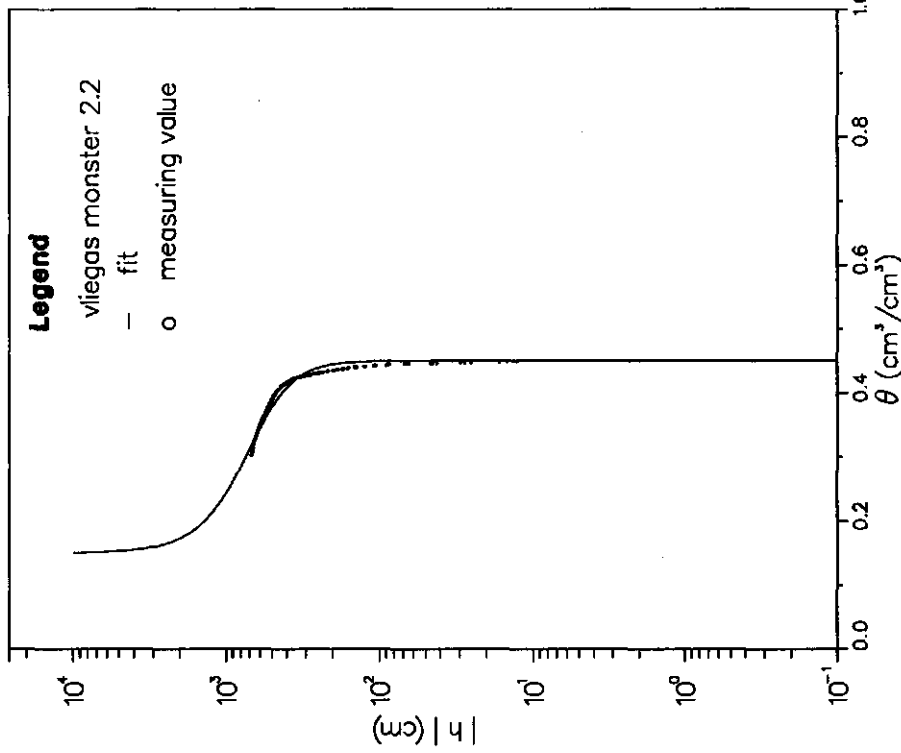
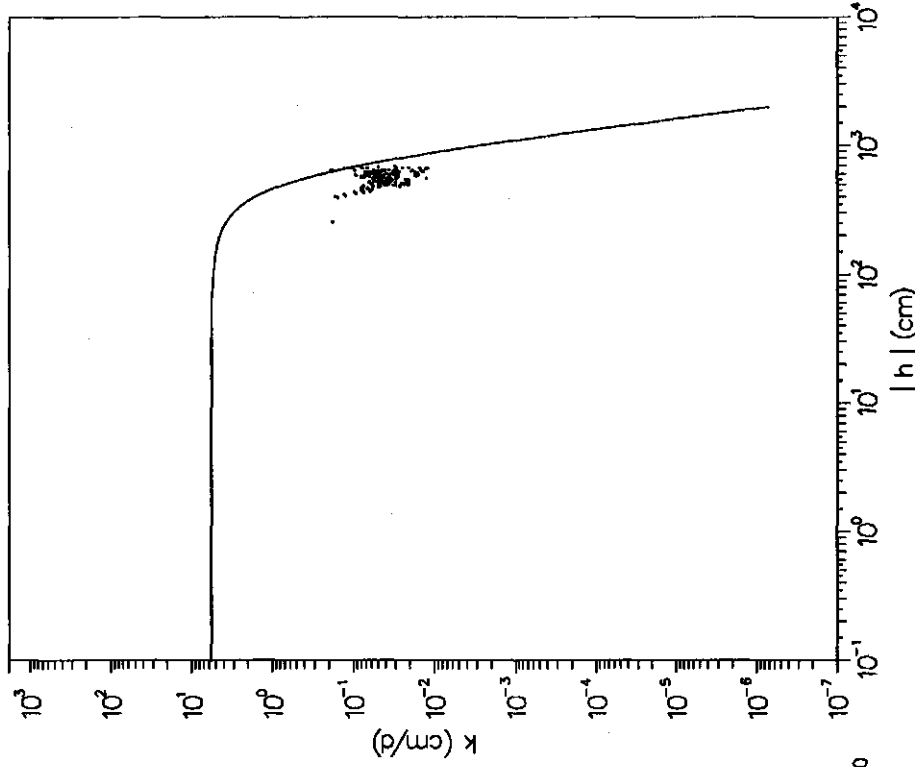


Fig. 2a Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek van vliegasoort 2, duplo 1

Waterretentie karakteristiek



Conductivity karakteristiek



$\theta_r = 0.150$	$\alpha = 0.0016$	$m = 0.685$	$K_s = 5.680$
$\theta_s = 0.450$	$n = 3.171$	$l = 3.000$	

Fig. 2b Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek van vliegassort 2, duplo 2

3 BEPALING VAN DE DESORPTIE- EN ABSORPTIETAK VAN DE WATERRETENTIEKARAKTERISTIEK

Het verschijnsel dat een poreus medium bij eenzelfde drukhoogte een verschillend vochtgehalte kan hebben, wordt hysteresis genoemd. In de praktijk kan dit er toe leiden dat de berekende vochtgehalten uitgaande van de desorptietak (uitdroging) aanmerkelijk hoger zijn, dan wanneer wordt uitgegaan van de absorptietak (bevochtiging) van de waterretentiekarakteristiek. Dit hoofdstuk beschrijft de werkwijze en de resultaten bij het gebruik van de methode van de hangende waterkolom voor de bepaling van de desorptie- en absorptietak.

3.1 Monsternamen en werkwijze

Om de situatie in bestaande vliegassedepots zo goed mogelijk na te bootsen, zijn wederom monsterringen gevuld onder een belasting van $0,48 \text{ kg/cm}^2$. De vochtgehalten van de vliegassesoorten 1 en 2 bedragen bij het vullen weer ongeveer 18%.

Voor de bepaling van de desorptie- en absorptietak van de waterretentiekarakteristiek met de methode van de hangende waterkolom zijn van iedere soort vliegassesoort 2 stalen ringen gevuld met elk een inhoud van 300 cm^3 . De hoogte van de ringen is $7,2 \text{ cm}$ en de doorsnede is $41,67 \text{ cm}^2$.

De dichtheden van deze monsters zijn:
vliegassesoort 1; $0,864$ en $0,848 \text{ g/cm}^3$;
vliegassesoort 2; $0,894$ en $0,854 \text{ g/cm}^3$.

Bij de methode van de hangende waterkolom wordt het droge monster op een poreuze plaat geplaatst. Met de buret wordt vervolgens een waterlaagje van 1 cm op de poreuze plaat gehandhaafd, waardoor het monster kan verzadigen. Na verzadiging wordt met een hangende waterkolom in een buret een serie onderdrukken aangelegd. Bij elke drukhoogte wordt het waterniveau in de buret afgelezen, nadat drukevenwicht is bereikt. In dit geval bedraagt de maximaal aangelegde drukhoogte -507 cm .

Door een toenemende onderdruk aan te leggen wordt de desorptietak van de θ -h relatie bepaald en door een afnemende onderdruk aan te leggen wordt de absorptietak bepaald. Hiermee zijn de hysteresis eigenschappen van het monster bekend.

Het volume water dat aan het monster wordt onttrokken (bij desorptie) of aan het monster wordt toegevoegd (bij absorptie) tot evenwicht bij een volgende onderdruk, is gelijk aan de verandering van het volume water in de buret.

Nadat het monster eerst het desorptie- en vervolgens het absorptietraject heeft doorlopen, wordt het verzadigd vochtgehalte gravimetrisch bepaald. De vochtgehalten

bij de overige drukhoogte-instellingen worden berekend uitgaande van het vochtgehalte bij verzadiging en de volumeveranderingen in de buret.

Voor een uitgebreidere en exactere beschrijving van de methode wordt verwezen naar aanhangsel 2.

3.2 Resultaten

Bij de bepaling aan vliegasoort 1, duplo 1 (monster 1.1) is lucht in de glazen trechter gekomen, waardoor de aflezingen in de buret onbetrouwbaar zijn geworden. De gegevens van dit monster zijn daarom niet verder geanalyseerd.

Figuur 3 geeft het resultaat voor de bepaling van vliegasoort 1 (monster 1.2). De figuren 4a en 4b geven de resultaten voor de duplo-bepalingen van vliegasoort 2 (monsters 2.1 en 2.2). Figuur 5 toont de 3 desorptie- en 3 absorptietakken van de vliegasoorten in één figuur.

De parameters die de vorm van de waterretentiekarakteristiek volgens de Mualem-Van Genuchten-vergelijkingen beschrijven, hebben in dit geval de volgende waarden:

	θ_r	θ_s	α	n	m
desorptietak vliegasoort 1 (monster 1.2, fig. 3b)	0,150	0,574	0,0041	3,263	0,693
absorptietak vliegasoort 1 (monster 1.2, fig. 3b)	0,150	0,574	0,0081	2,275	0,560
desorptietak vliegasoort 2 (duplo 1, monster 2.1, fig. 4a)	0,150	0,590	0,0041	3,182	0,686
absorptietak vliegasoort 2 (duplo 1, monster 2.1, fig. 4a)	0,150	0,590	0,0077	2,288	0,563
desorptietak vliegasoort 2 (duplo 2, monster 2.2, fig. 4b)	0,150	0,563	0,0041	3,145	0,682
absorptietak vliegasoort 2 (duplo 2, monster 2.2, fig. 4b)	0,150	0,563	0,0079	2,263	0,558

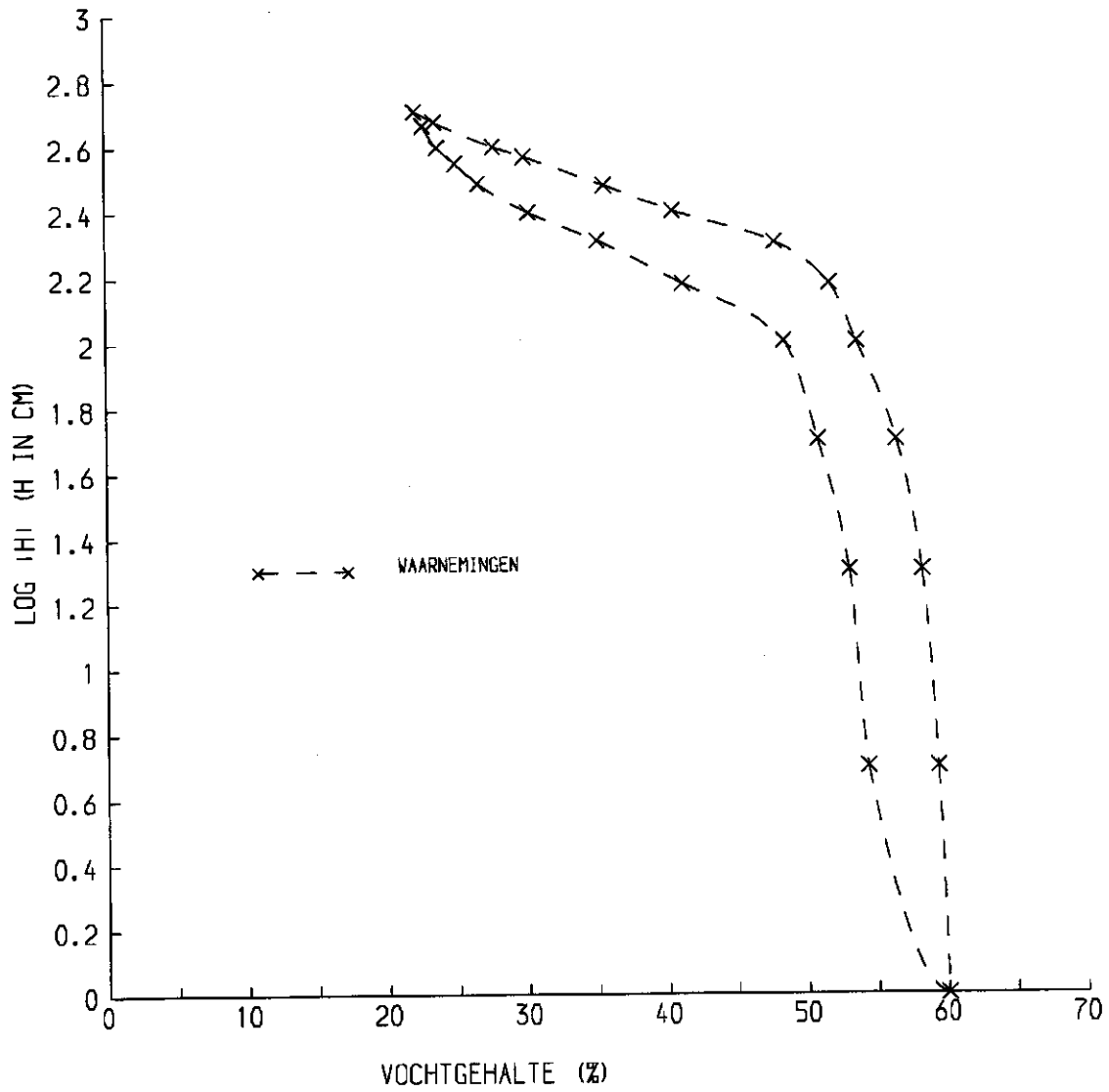


Fig. 3b Desorptie- en absorptietak van de waterretentiekarakteristiek van vliegassort 1

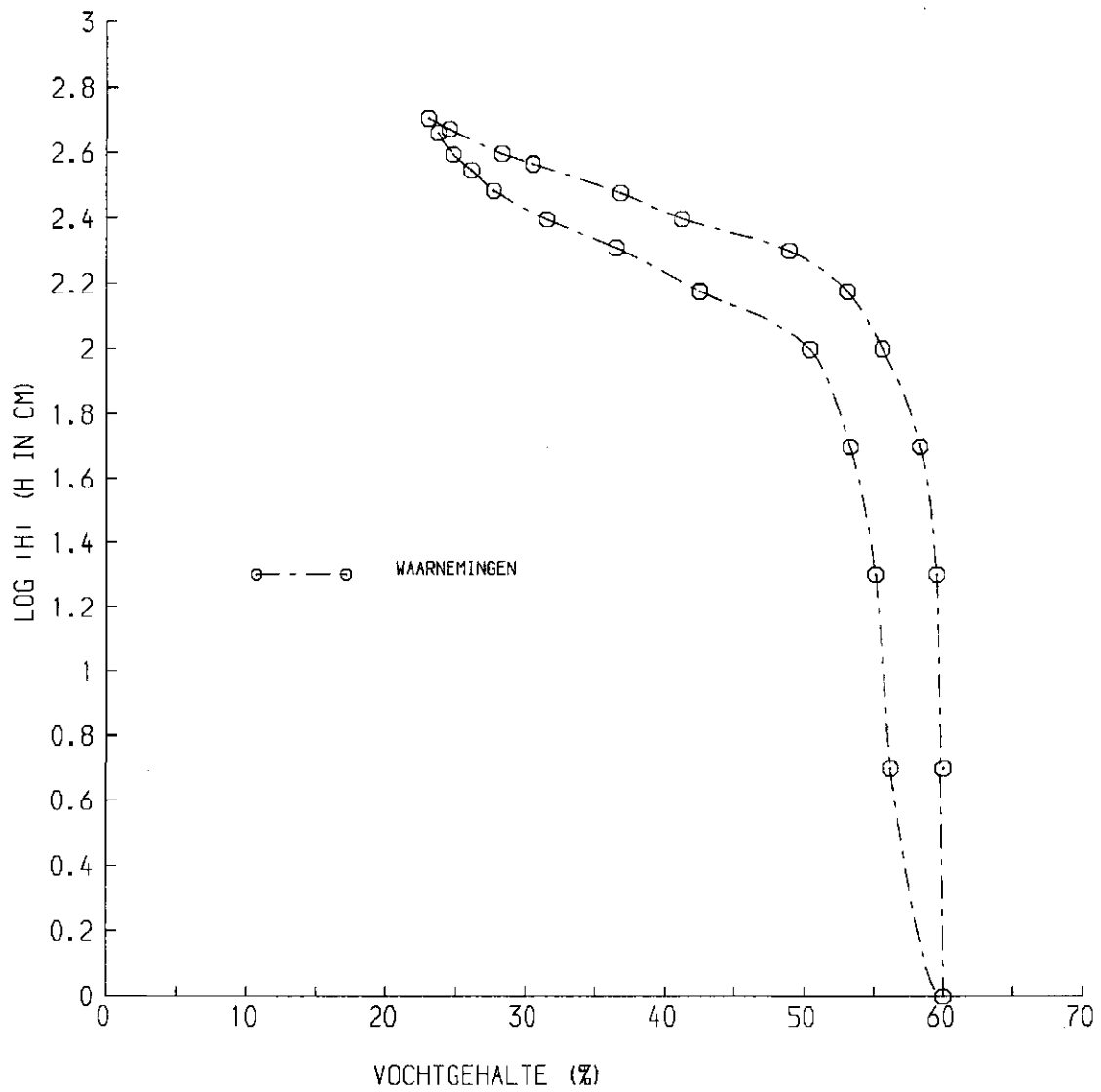


Fig. 4a Desorptie- en absorptietak van de waterretentiekarakteristiek van vliegasoort 2, duplo 1

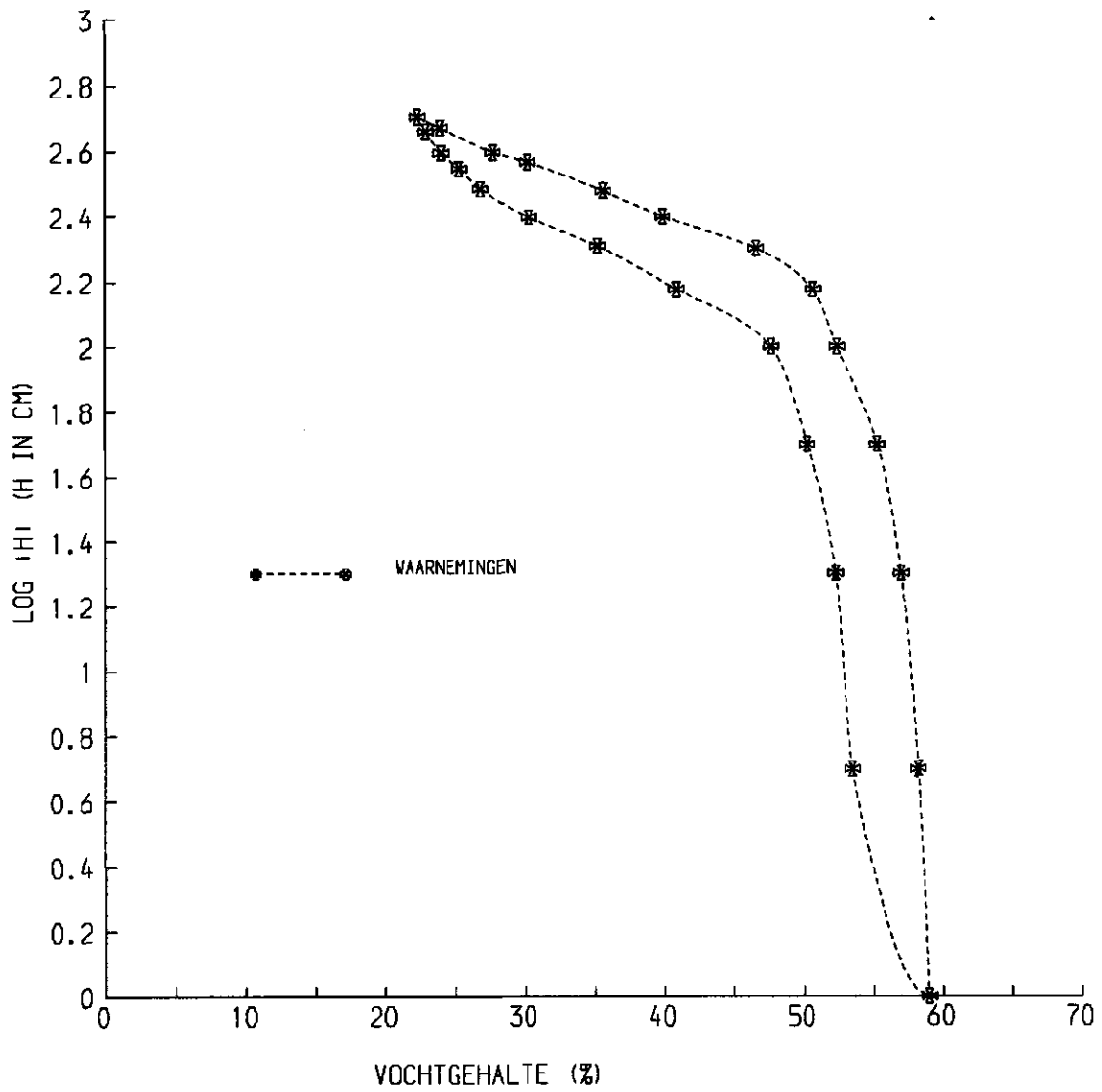


Fig. 4b Desorptie- en absorptietak van de waterretentiekarakteristiek van vliegassoort 2, duplo 2

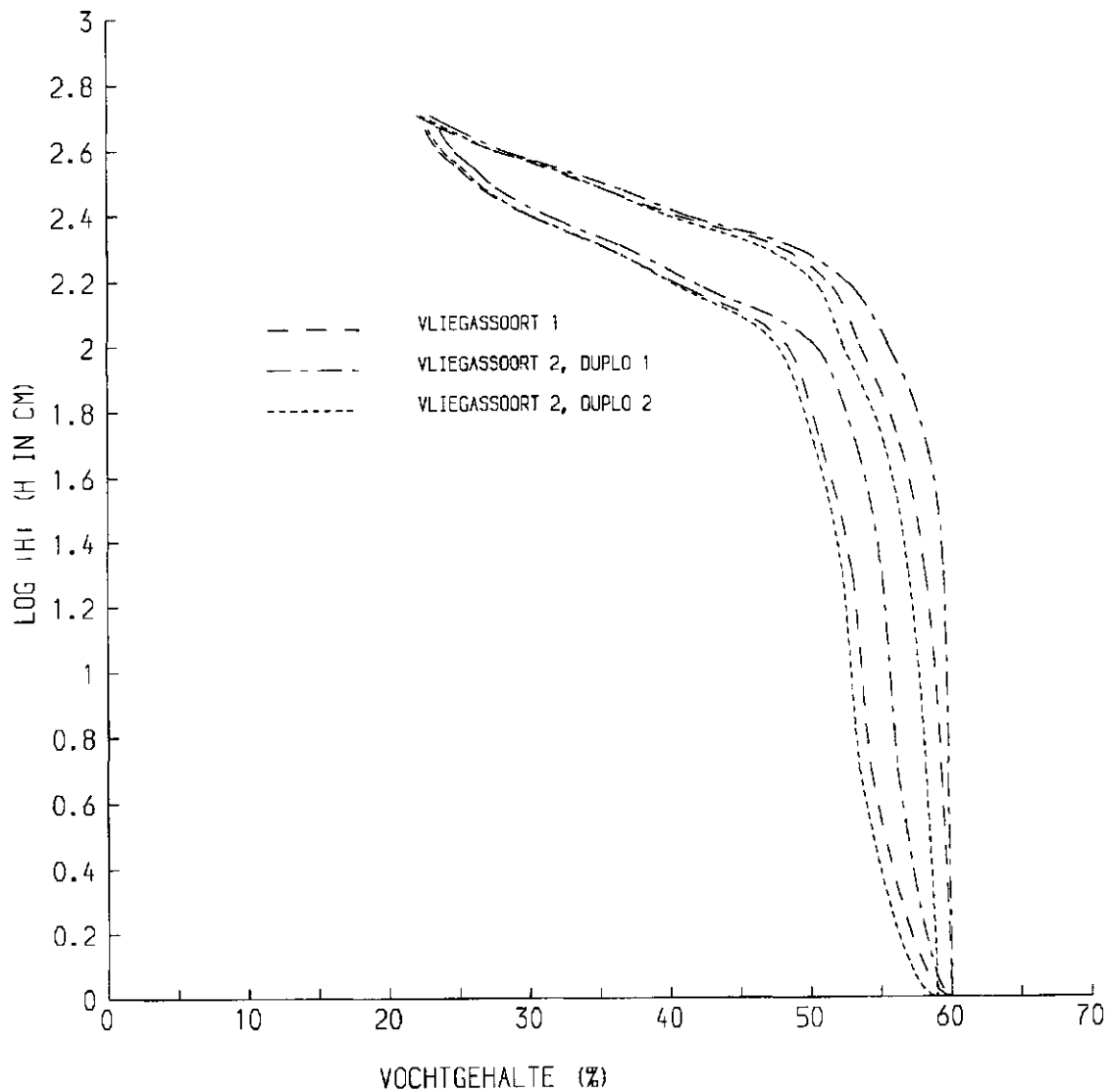


Fig. 5 Desorptie- en absorptietakken van de waterretentiekarakteristieken van de vliegassorten 1 en 2

3.3 Bespreking van de resultaten

De figuren 3 tot en met 5 laten zien dat er in vliegas een aanzienlijk hysteresis effect optreedt. De desorptietak is in het relatief natte traject tot ongeveer $h = -100$ cm zo'n 5% natter dan de absorptietak. In het drogere traject van ongeveer $-350 < h < -100$ cm bedraagt dit verschil zelfs meer dan 10%. Bij een drukhoogte van $h = -500$ cm is het vochtgehalte voor desorptie en absorptie gelijk.

Vergelijking van de desorptietakken in de figuren 3 tot en met 4b met de desorptietakken in de figuren 1a tot en met 2b toont aan dat in beide gevallen het vochtgehalte bij uitdroging aanvankelijk slechts weinig afneemt. In de figuren 3 t/m

4b neemt het vochtgehalte sterk af bij een drukhoogte van $h = -200$ cm terwijl dit in de figuren 1a t/m 2b optreedt bij een drukhoogte van $h = -350$ cm. Het vermoeden bestaat dat het verschil in dichtheid, $0,86 \text{ g/cm}^3$ voor set 1, ten opzichte van $0,99 \text{ g/cm}^3$ voor set 2 de belangrijkste oorzaak van deze verschillen is. Immers een lagere dichtheid geeft meer grote poriën die eerder zullen leeglopen dan de fijnere poriën in een dichtere grond.

Om dit nader te onderzoeken zijn nogmaals 2 monsterringen van 300 cm^3 met vliegassort 1 gevuld. Hierbij is een hogere belasting gebruikt, waardoor dichtheden zijn gerealiseerd van $1,033$ en $0,980 \text{ g/cm}^3$. Deze dichtheden komen overeen met de dichtheden van de monsters die voor de verdampingsmethode zijn gebruikt. Aan deze monsters zijn wederom de desorptie- en absorptietak van de waterretentiekarakteristiek bepaald met de methode van de hangende waterkolom.

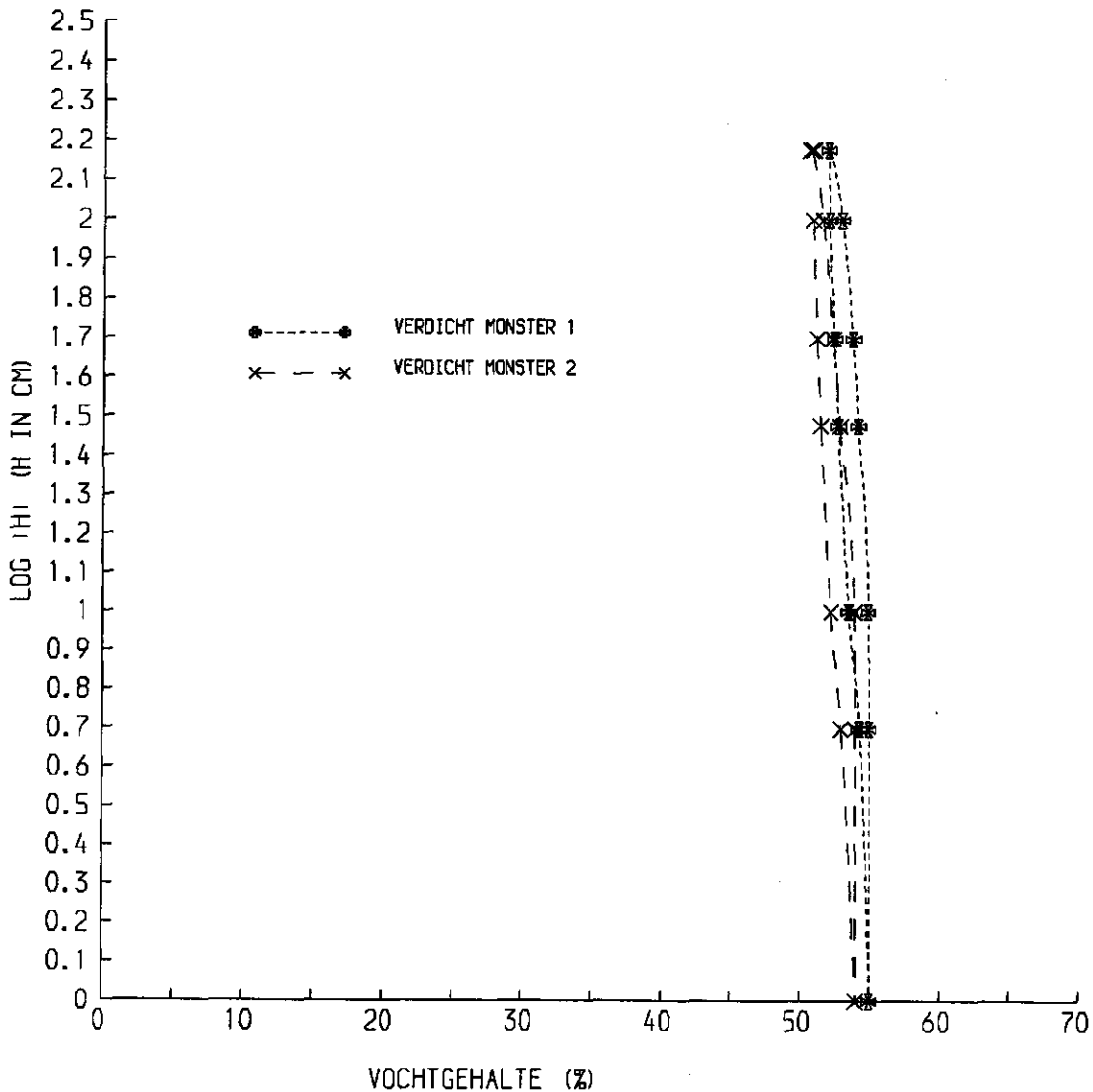


Fig. 6 Desorptie- en absorptietakken van de waterretentiekarakteristieken van vliegass met een dichtheid van ongeveer 1 g/cm^3

Figuur 6 toont aan dat de aldus bepaalde desorptietakken van de waterretentiekarakteristieken meer overeenkomen met de desorptietakken in de figuren 1a tot en met 2b dan met de desorptie takken in de figuren 3b tot en met 4b. Tevens blijkt uit figuur 6 dat in vliegasmonsters met een hogere dichtheid het hysteresis effect veel kleiner is dan in monsters met een lagere dichtheid.

Het waterbergend vermogen van vliegas, zoals wordt weergegeven door de waterretentiekarakteristiek, is dus sterk afhankelijk van de dichtheid van het vliegas.

Indien de verdampingsmethode wordt toegepast, neemt zowel het vochtgehalte als ook de doorlatendheid sterk af bij $h = -350$ cm (figuren 1a tot en met 2b). Indien de methode van de hangende waterkolom wordt toegepast, blijkt dat het vochtgehalte sterk afneemt bij $h = -200$ cm. Beide verschijnselen wijzen erop dat vliegas homogeen materiaal is met een uniforme poriëngrootte-verdeling. Indien de verdampingsmethode is gebruikt om bepalingen te verrichten aan monsters met een dichtheid van ongeveer 1 g/cm^3 , zal de uniforme poriëndiameter ongeveer $0,3/350 = 0,00086$ cm bedragen. Indien de methode van de hangende waterkolom is gebruikt om bepalingen te verrichten aan monsters met een dichtheid van ongeveer $0,85 \text{ g/cm}^3$, zal de uniforme poriëndiameter ongeveer $0,3/200 = 0,0015$ cm bedragen.

4 BEPALING VAN DE KRIMP EIGENSCHAPPEN VAN VLEGAS

Als vliegass wordt bevochtigd gaat het zwellen terwijl het omgekeerd bij uitdroging krimpt. Om na te gaan in welke mate dit verschijnsel optreedt bij de twee soorten vliegass, zijn oorspronkelijk natte monsters via natuurlijke verdamping langzaam gedroogd en is de krimp gemeten.

4.1 Monsternamen en werkwijze

Wederom zijn monsterringen gevuld onder een belasting van $0,48 \text{ kg/cm}^2$. De vochtgehalten van de vliegasssoorten 1 en 2 bedragen bij het vullen weer ongeveer 18%. Voor de bepaling van de krimpeigenschappen van vliegass zijn van iedere soort vliegass 2 stalen ringen gevuld met elk een inhoud van 300 cm^3 . De hoogte van de ringen is 7,2 cm en de doorsnede is $41,67 \text{ cm}^2$.

De dichtheden van deze monsters zijn:

vliegasssoort 1; $0,838$ en $0,835 \text{ g/cm}^3$;

vliegasssoort 2; $0,847$ en $0,824 \text{ g/cm}^3$.

De monsters zijn verzadigd door ze in een bak met enkele centimeters water te plaatsen. Na verzadiging zijn de monsters aan de lucht uitgedroogd bij een relatieve vochtigheid van 50% en een temperatuur van $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Tijdens het uitdrogen zijn de monsters periodiek gewogen. De krimp is gemeten door de afstand te meten tussen de bovenkant van het monster en de bovenste rand van de monsterring; hierbij is er rekening mee gehouden dat de bovenkant van het monster bolvormig is. Behalve met deze verticale krimp is ook rekening gehouden met de horizontale krimp die optreedt als het monster verder uitdroogt en van de binnenkant van de monsterring loslaat. De totale krimp is berekend als de som van de verticale en horizontale krimp.

4.2 Resultaten

De figuren 7a en 7b geven de resultaten voor het verloop van de krimp ten gevolge van uitdroging van respectievelijk de 2 duplo bepalingen van vliegasssoort 1 en de 2 duplo bepalingen van vliegasssoort 2. Figuur 8 toont de resultaten voor de 4 monsters samen.

4.3 Bespreking van de resultaten

Uit figuur 8 blijkt dat vliegass hoofdzakelijk krimpt in het natte traject. Uitgaande van verzadiging krimpen deze soorten vliegass ongeveer 4% in volume bij een achteruitgang van ongeveer 5% in vochtgehalte. Tussen de verschillende soorten vliegass bestaan geen grote verschillen wat hun krimp eigenschappen betreft.

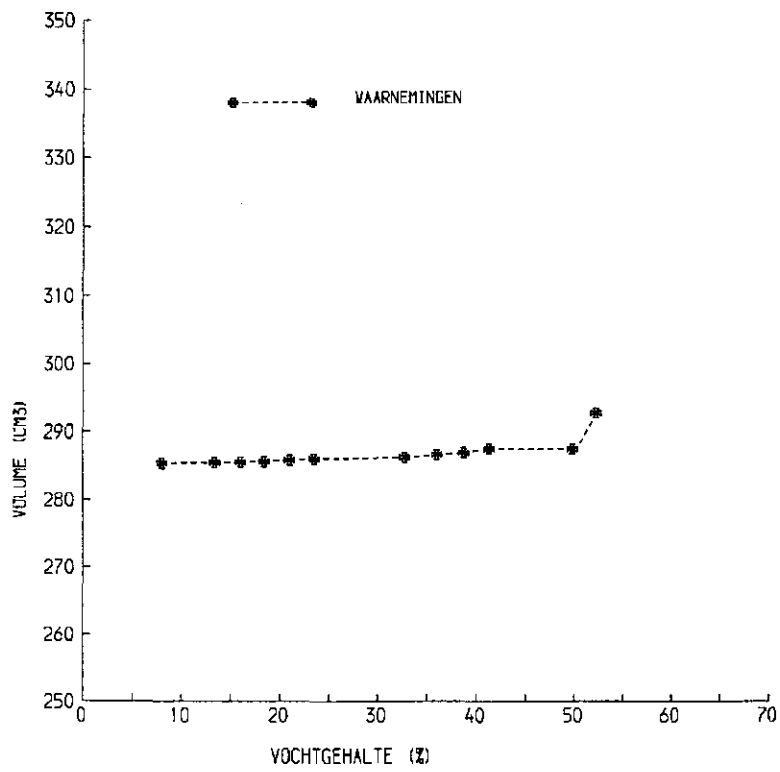
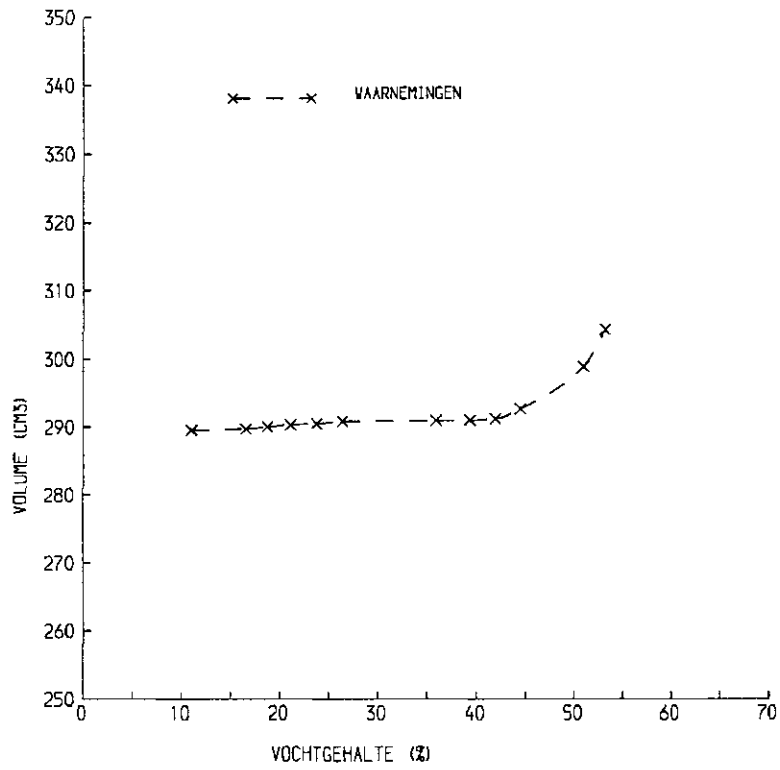


Fig. 7a Krimp ten gevolge van uitdroging van vliegasoort 1, duplo 1 boven en duplo 2 beneden

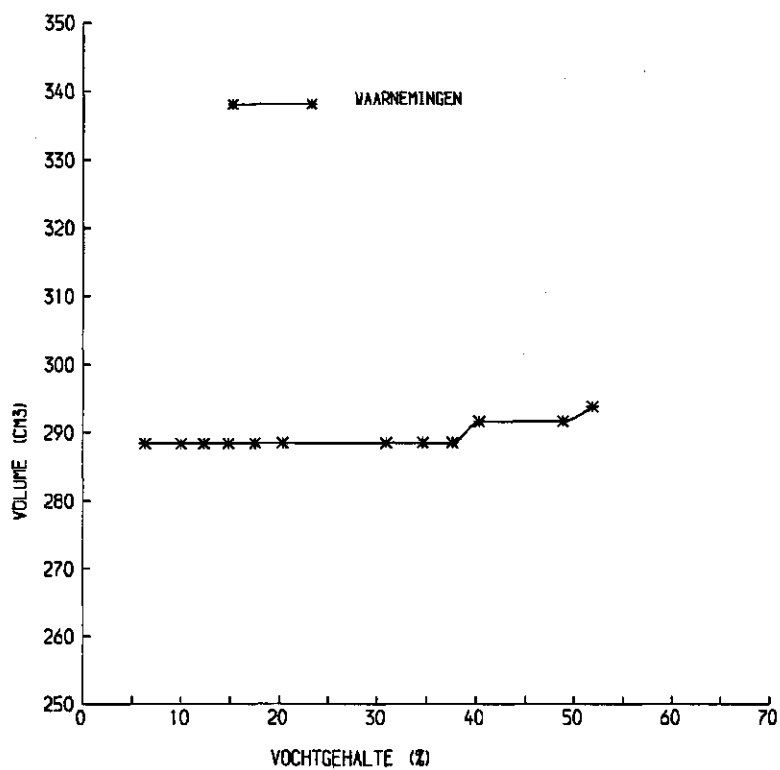
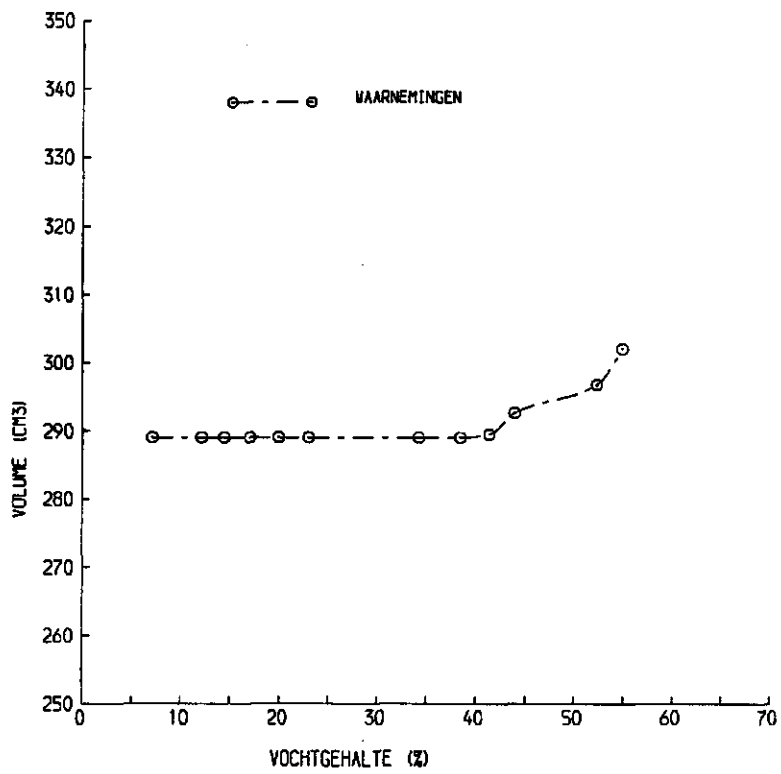


Fig. 7b Krimp ten gevolge van uitdroging van vliegassoort 2, duplo 1 boven en duplo 2 beneden

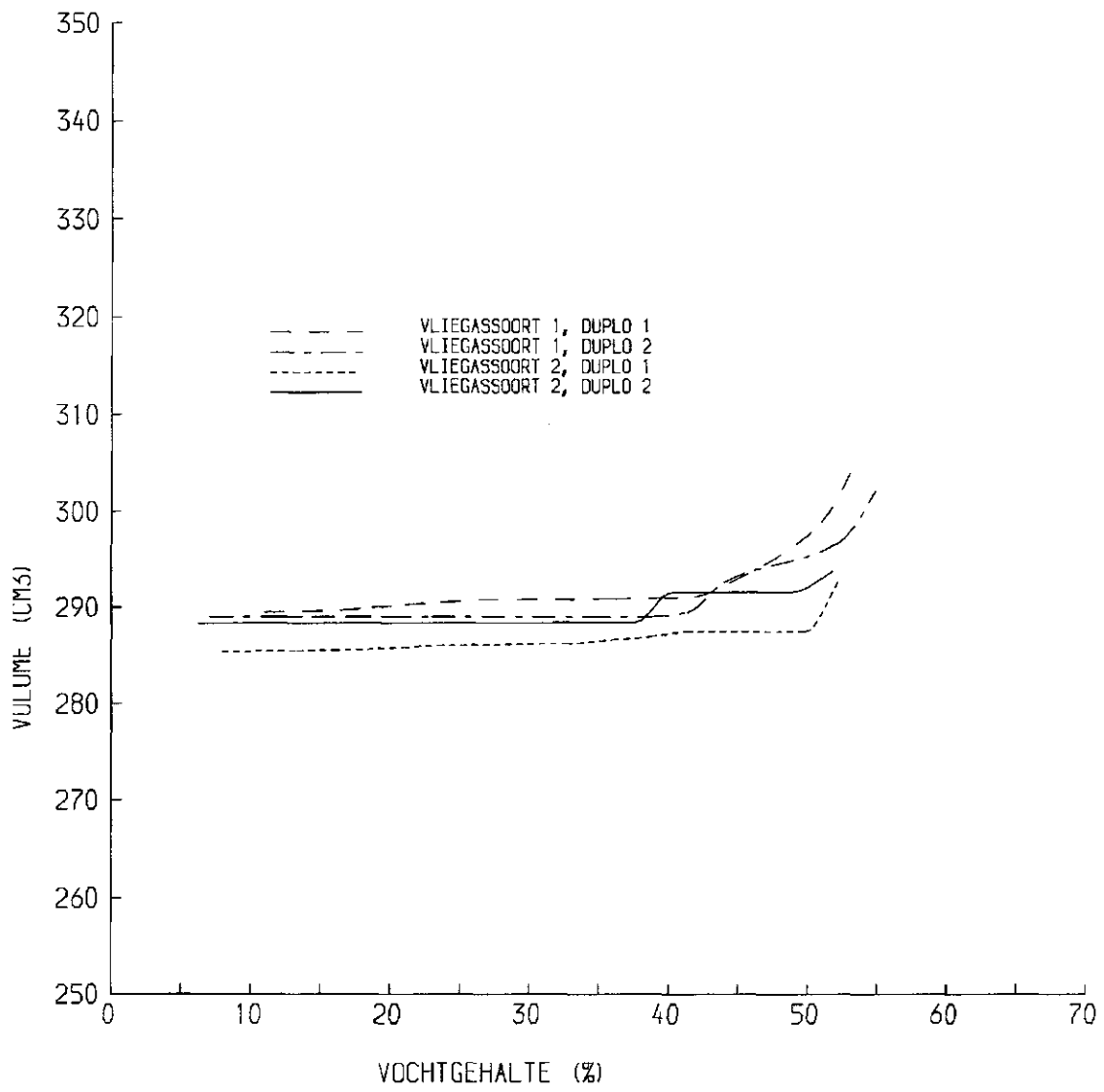


Fig. 8 Krimp ten gevolge van uitdroging van de vliegassorten 1 en 2

LITERATUUR

MUALEM, Y., 1976. "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." In: *Water Resour. Res.* 12: 513-522.

VAN GENUCHTEN, M. Th., 1980. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." In: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.

Determination of the conductivity and waterretention characteristic using the EVAPORATION METHOD OF WIND

Subject

A laboratory method is described to measure simultaneously both the waterretention and hydraulic conductivity characteristics from slow evaporation of an initially saturated soil sample.

Application

Application of soil-water flow theory, using simulation models, require estimates of the soil hydraulic properties (i.e. soil-water retention and hydraulic conductivity characteristics).

The pressure head range of the measurement of the conductivity depends on the soil type that is used. For sand the pressure head ranges from $h = - 100$ cm till $h = - 800$ cm. For clay the pressure head ranges from $h = - 20$ cm till $h = - 800$ cm. The pressure head range of the measurement of the waterretention characteristic is does not depend on soil type and ranges from $h = - 20$ cm till $h = - 800$ cm.

Expression and definition

waterretention characteristic: Relation between the pressure head h (kPa) and the water content θ (cm^3/cm^3) of the soil.

conductivity characteristic: Relation between the conductivity k (cm/day) and the pressure head h and the relation between the conductivity k and the water content θ of the soil.

Principle

A saturated soil sample is placed on a balance and at least four tensiometers are installed at regular depth intervals. The tensiometers are connected to a pressure transducer. The sample is left to evaporate and weight and pressure heads are recorded periodically.

The waterretention curve is determined by an iterative procedure. Hydraulic conductivities are then computed using an instantaneous profile method.

Time

The time of the determination depends on the soil type. To saturate the soil sample takes minimal 2 days (sand) and maximal 4 weeks (clay). The determination takes about 2 days for clay and about 3 weeks for course sand. Processing the data for use on a IBM-compatible personal computer will take a few hours.

Materials

- * Sampling rings : height 8 cm; outer diameter 11 cm; inner diameter 10.3 cm; 4 holes of 10 mm diameter is a spiral configuration in the cylinder at distances of respectively 1, 3, 5 and 7 cm of the top of the ring for tensiometer installation.
- * Cover : inner diameter 11 cm and height 0.5 cm.
- * Tensiometers : outer diameter 6 mm and length 65 mm.
- * Tensiometer case consisting:
 - pressure transducer;
 - manifold of 5 three-way stopcocks;
 - water bag made of aluminium laminate;
 - Air- and watertight tubing 1.0 x 2.7 mm (e.g. Poly Amide tubing in Poly Ethylene tubing).
- * Plate 12 x 12 cm.
- * Pieces of nylon-cloth.
- * Plastic sheet with diameter 10 cm.
- * Set of augers to make holes for installation of tensiometers.
- * Exsiccator.
- * Erlenmeyer flask.
- * Ventilated drying oven.
- * Balance with minimal range of 0 till 2000 g and an accuracy of 0.1 g.
- * IBM-compatible Personal Computer.

Procedures

Preparing soil samples

Take samples with as little disturbance as possible. Cover the holes in the sampling ring with waterproof tape. Cover the bottom of the samples with nylon cloth. Saturate the samples through capillary rise in a tray. Raise the water level in the tray gradually (daily) and maintain the water level at sample height for a few days. For sandy soils 2 days is sufficient, for clay soils this will take 2 weeks.

De-aerate and test the tensiometers.

De-aerate and test the tensiometer case.

After saturation, cover the top of the sample and turn it upside down. Replace the nylon cloth with a plastic sheet and a cover. Turn the sample in upright position and install air-free tensiometers.

Place the sample on the balance. Make sure that the tubing can not influence the measurement of the weight. Keep the sample covered. Remove drainage water from the balance. Measure with the hydraulic head H_h for all tensiometers until they are equal. Hydraulic equilibrium is then reached. Use a with de-aerated water filled erlenmeyer flask that is placed at a known height difference with the pressure transducer as reference. Measure the height difference for each tensiometer with the water level in this erlenmeyer flask

Starting measurement

Remove the cover from the top of the sample. Write down the date, time, initial sample weight, tensiometer readings, reference value, and temperature and relative humidity.

✓ For the sake of convenience try to establish a hydraulic head of $H_h = 0$ cm at the water level of the erlenmeyer flask.

Repeat these measurements with a time interval that depends on the speed of the hydraulic head decrease.

✓ For sandy soils a measurement of two times a day will be enough until the pressure head is about - 400 cm. From that time onwards every hour measurements are necessary. For clay soils from the start hourly measurements are necessary.

Stopping measurement

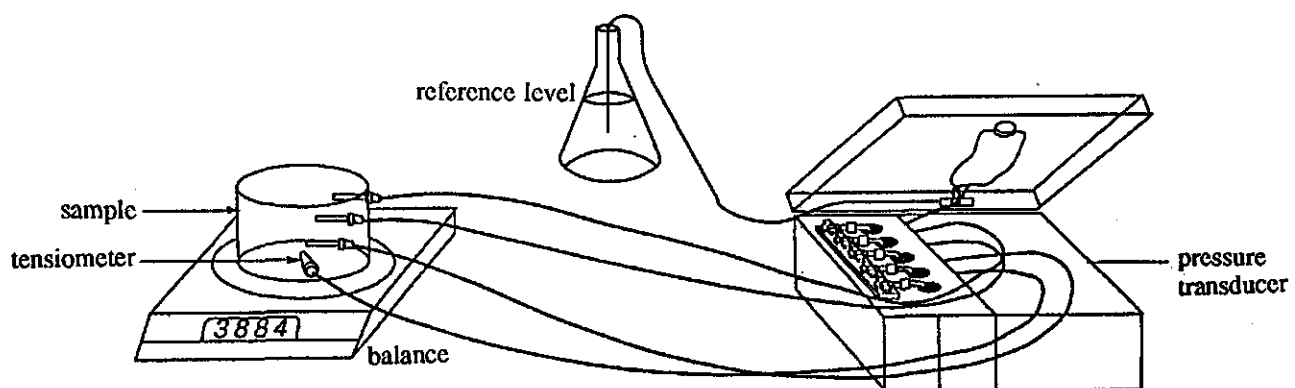
Stop the measurement if the air entry value of the upper tensiometer is exceeded (air bubbles start entering the tubing). Remove the tensiometers and place them in water.

Use a tray of wire gauze with filter paper to store the soil in and number the tray. Weigh the empty tray. Put the soil in the tray and dry until constant mass by 105 °C in a ventilated drying oven.

✓ Usually drying for 24 hours is enough.

Weigh the tray with content immediately after taking out of the oven and calculate the water content of the sample.

Set up



Calculation

For each measurement calculate the:

- time from the start of the measurement (min);
- volumetric water content (cm^3/cm^3);
- pressure head (cm water pressure).

✓ If the pressure transducer registers the hydraulic head in mbar, this figure can be converted in cm water pressure. 1 mbar is equivalent to 1.0197 cm water pressure. The pressure head can then be calculated from the hydraulic head as follows:

$$h = H_h - H_g$$

where:

- h = pressure head (cm);
- H_h = hydraulic head (cm);
- H_g = gravitational head (cm).

Use a computer program to process all the data.

The computer program first determines a waterretention characteristic from the mean water contents and the mean pressure heads of the soil sample at several measurement times. Next a waterretention characteristic is calculated iteratively from the measurement data. At each measurement time in each compartment the water content is determined from the pressure head. It is assumed that the water content and pressure head per compartment are constant.

The unsaturated conductivity is determined from the fluxdensities and the pressure head gradients between the compartments. The fluxdensity is zero at the bottom of the sample and is measured at top of the sample by the decrease in sample weight.

The pressure head gradient between the compartments is determined from the pressure heads that are measured.

The unsaturated conductivity can be calculated with Darcy's law:

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

where:

- q = fluxdensity (cm/day);
- $k(h)$ = conductivity (cm/day);
- h = pressure head (cm);
- z = depth (cm).

Use a spread sheet program to do the conversions from hours to minutes and from hydraulic head readings to pressure heads. Store all the data in one file according to a specific format and process the data with the computer program.

Accuracy

The accuracy of the determination depends strongly on the carefulness with which the measurements are carried out.

If at the start of the measurement an air bubble is present somewhere, this bubble will increase in size due to lowering of pressure heads during the experiment. This results in slower reaction time of the pressure transducer.

The accuracy also depends on the accuracy of the instruments that are used. Use a balance with an accuracy of 0.1 g and pressure transducers with an accuracy of 1 cm water pressure.

Especially in sandy soils, at small hydraulic head gradients, the calculated conductivities are very variable.

Fluxes are cumulative from the bottom. So the errors in measurement of the fluxes are added. This results in a less reliable measurement of the conductivity in the top of the sample.

A not-perfect description of the h - θ relationship with a polynome has an impact on the calculation of the k values. Sometimes this results in oscillated k values.

✓ A perfect description of the h - θ relationship with a polynome is not always possible (especially in sandy soils that show a sudden steep descent of pressure heads with decreasing water content). This can not be avoided and influences the calculation of the k values.

The error analyses for the evaporation method of Wind needs some more investigation. Some numerical simulation have already shown that the calculated k values do not systematically deviate from the conductivity that is sought (Tamari, 1988).

Reporting

Report by the presentation of the results:

- * name (sampling as well as determination);
- * sampling spot (coordinates if possible);
- * date of sampling and date of determination;
- * vegetation;
- * profile description;
- * sampling depth;
- * texture and density of the sample (and method of determination of the texture);
- * period of saturating the soil sample;
- * period of measurement;
- * name of data file;
- * data listing;
- * accuracy of instruments;
- * temperature and relative humidity during determination;
- * irregularities during determination (e.g. air in one tensiometer);
- * other for the evaluation of the determination important remarks (wether during sampling, field moisture, root canals etc.).

Literature

BOELS, D., J.B.H.M. VAN GILS, G. VEERMAN and K.E. WIT. 1978. "Theory and system of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivities." *Soil Sci.* 126: 191-199.

BURKE, W., D. GABRIELS and J. BOUMA (ed.). 1986. *Soil Structure Assessment*. A.A. Balkema, Rotterdam/Boston.

DIRKSEN, C. 1990. *Unsaturated hydraulic conductivity*. Wageningen, The Netherlands. Wageningen Agricultural University, Department of hydrology, Soil Physics and Hydraulics, Report 5.

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, The Netherlands. ICW. Notes 1987, 1988, 1989 and 1990.

WIND, G.P. 1966. "Capillary conductivity data estimated by a simple method." *Water in the unsaturated zone*, Symp. 1966. Proc. UNESCO/IASH, 181-191. Wageningen, The Netherlands.

Determination of the waterretention characteristic using the HANGING WATER COLUMN

Subject

A laboratory method is described to determine the waterretention characteristic of a soil sample.

Application

Knowledge of the waterretention characteristic of a soil is fundamental to soil- and water management studies, and for soil-water availability for plants.

The pressure head of the method ranges from $h = - 5$ cm to $h = - 150$ cm.

The method can determine an absorption as well as a desorption waterretention characteristic.

Expression and definition

waterretention characteristic: Relation between the pressure head h and the water content θ of the soil.

Principle

An as little as possible disturbed soil sample is placed on a saturated porous plate (e.g. glass filter). A step change in suction at the bottom of the plate is induced by lowering a hanging water column (usually a buret) connected to the plate. The sample is subjected to varying negative pressures and the amount of outflow is measured. At the end of the measurements, water contents at each applied suction are calculated from the buret readings and the final water content.

Time

The time of the determination depends on the soil type. To saturate the sample takes minimal 2 days (sand) and maximal 2 weeks (clay). The determination takes at least 2 weeks (sand) till more than 4 weeks (clay).

Materials

- * Stainless steel cylinders height 7.2 cm and diameter 7.3 cm (volume 300 cm³).
- * Glass filter funnel, inner diameter 90 mm.
- * Glass filter, diameter 90 mm, pore size 10 - 16 µm (e.g. Scott Duran porosity number 4).
- * Buret 100 cm³.
- * Three-way stopcock.
- * Poly Ethylene tubing 3 x 5 mm.
- * Stopper that fits the buret (with hole for PE tubing).
- * Cover for funnel (with hole for PE tubing).
- * Tygon O-ring that fits between cover and glass filter funnel.
- * Measuring tape.
- * Guide rod for buret.
- * Ventilated drying oven.

Method

Sampling and preparing set-up

Take samples with minimum disturbance.

✓ If measurements can not be carried out straight away, saturate the samples in a tray by capillary rise from below. Construct a set-up as shown in the figure. The funnel should be about 2 meters above the floor. One end of a clear flexible PE tubing is connected to the base of the funnel. The other end is connected to a buret. The funnel is connected with the top of the buret to minimize evaporation losses from the system. Make sure that the buret can move up and down along a guide rod. Attach a measuring tape next to the buret. Fill the space under the porous plate, the tubing and a part of the buret with water.

✓ New or dry glass filters have to be de-aerated first before use.

This can be done by disconnecting the funnel and tubing (without the three-way valve) from the buret. Disconnect the funnel from the tubing and turn it upside-down. Fill the tubing and the funnel with water and connect them again. Remove all air in PE tubing connected to the buret. Connect the funnel with PE tubing to the three-way valve and be sure that there is no air bubble left in the system.

Saturating porous plate and sample

Place the sample on the filter. Remove stopper from the buret (to avoid pressure build-up) and place a PVC cover over the funnel to avoid evaporative losses. Use a rubber O-ring between funnel and cover for an air-tight fit.

✓ Don't use a piece of cloth under the sample to ensure a good contact between soil sample and porous plate.

Pour water in the buret until the sample stands about 2 cm in water. Leave the sample to soak for at least two days. After that, pour water in the buret until water has reached the top of the sample. Leave it again for another two days (sand) to about one week (clay).

Remove the water above the filter by lowering the level in the buret up to 5 cm under the filter. All water above the filter will now flow into the buret. Set the water level in the buret equal to the level of the porous plate. Drain the water with help of the three-way stopcock.

Starting measurements

Adjust the buret height so that the water level is at 1.4 cm below the bottom of the sample. At a sample height of 7.2 cm the applied pressure then equals - 5 cm (half of the sample height + 1.4 cm). Water will now flow from the sample in the buret. Re-adjust the buret height to maintain the desired suction

as often as necessary (1 or 2 times a day). Equilibrium is reached if the buret water level does not change during 2 successive days (using a 100 cm³ buret). Write down the final buret level and lower the buret to apply a new larger suction.

- ✓ Pressure equilibrium is reached when the mass of the sample changes maximal 0.02 % a day (I.S.O. standard). That corresponds to 0.015 % change in water content what at a sample size of 300 cm³ corresponds to 0.05 cm³/day. This amount of water can be read at a buret of 100 cm³ (half a graduation stroke per two days). In other words: pressure equilibrium is reached when the water level in the buret (content 100 cm³) by reading once in two days does not change more then half a graduation stroke.
- ✓ Usually the following sequence of suction is applied: - 5, - 10, - 30, - 50, - 75, - 100, - 125 and - 150 cm.
- ✓ The pressure head always is set from the middle of the sample.
- ✓ At a pressure head of $h = - 5$ cm the pressure head at top of the sample is - 8.6 cm and at the bottom - 1.4 cm.
- ✓ Be sure to carry out the measurements at constant room temperature.

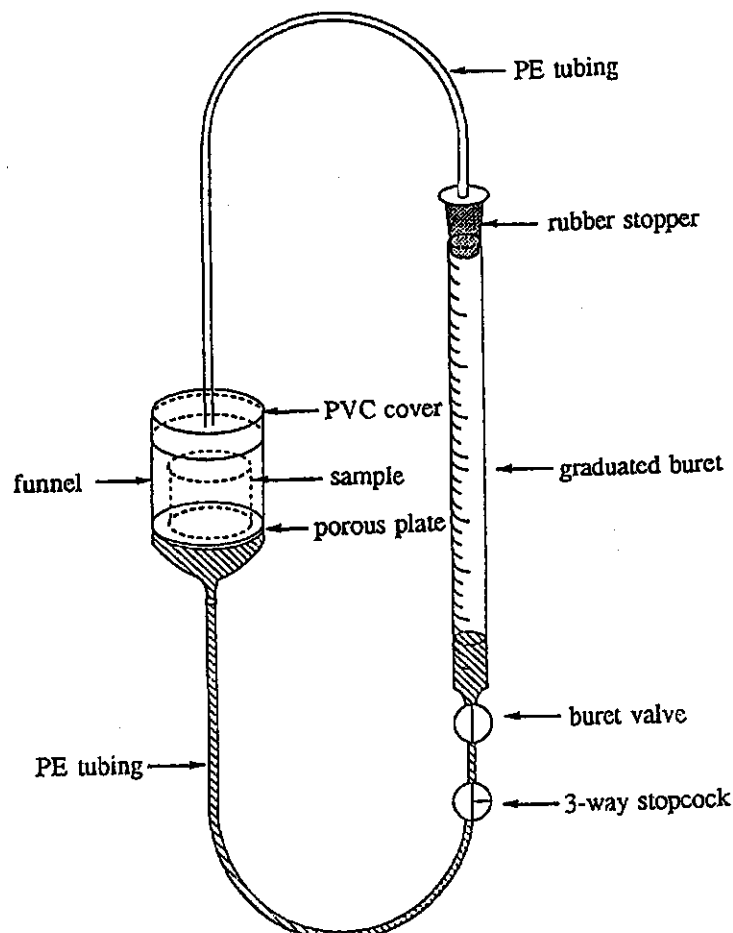
Ending measurements

Determine the final water content of the soil sample at the final pressure head setting by drying the sample at 105 °C until constant mass.

- ✓ Usually 24 hours drying is enough.
- ☛ Take the sample as complete as possible out of the filter funnel and weigh and dry the sample immediately after taking it out ☛

After the determination the water level in the buret must be 1 cm above the level of the filter to keep this saturated.

Set up



Calculation

A waterretention curve from - 5 cm to - 150 cm can be derived by calculating back from the final water content and adding the volumes collected in the buret at the various suctions applied.

The volumetric water content at the final pressure head can be calculated as:

$$\theta_e = \frac{m_e - m_d}{\rho_w * V}$$

where:

- θ_e = volumetric water content at the final pressure head setting (cm^3/cm^3);
- m_e = mass of the soil sample at the final pressure head setting (g);
- m_d = mass of the oven dried soil sample (g);
- ρ_w = density of the water (g/cm^3), $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ can be assumed;
- V = sample volume (cm^3).

Calculate the volumetric water content at a pressure head h according to:

$$\theta(h) = \theta_e + \frac{V_h - V_e}{V}$$

where:

- $\theta(h)$ = volumetric water content at a pressure head h (cm^3/cm^3);
- $\theta(h_e)$ = volumetric water content at the final pressure head (cm^3/cm^3);
- V_e = buret reading at the final pressure head (cm^3);
- V_h = buret reading at pressure head h (cm^3);
- V = sample volume (cm^3).

Accuracy

The accuracy of the determination of the final water content depends on the accuracy of the measurement of end weight and sample volume. This error is negligible when it is smaller than 0.1 % which will be the case if a balance is used with an accuracy of 0.1 g (± 0.05 g) and a callipers rule with an accuracy of 0.1 mm (± 0.05 mm).

The accuracy of the determination of the volumetric water content at a pressure head h depends on the accuracy of buret readings, of judging the equilibrium situation and of the determination of the volume of the sample. So the error in determination of the water content is:

$$\frac{\Delta \theta(h)}{\theta(h)} = \frac{\Delta \theta_e}{\theta_e} + \frac{\Delta V_h + \Delta V_e}{V_h - V_e} + \frac{\Delta V}{V}$$

where:

- $\Delta \theta(h)$ = error in measurement volumetric water content at a pressure head h ;
- $\Delta \theta_e$ = error in measurement final water content;
- ΔV_e = error in measurement volume of water at the last pressure head setting;
- ΔV_h = error in measurement water volume at a pressure head h ;
- ΔV = error in measurement volume of the sample.

- ✓ The error in measurement of the last water content is, as said before, negligible.
- ✓ When using a proper callipers rule the error of measuring the volume of the sample is also negligible.
- ✓ A buret of 100 cm³ has a reading error of ± 0.12 cm³.

The systematical error that is made when equilibrium is assumed is difficult to quantify. Preliminary studies indicate a possible systematic error of at least 2 volume % depending on soil type.

Report

Report by the presentation of the results;

- * name (sampling as well as determination);
- * sampling spot (coordinates if possible);
- * date of sampling and date of determination;
- * vegetation;
- * profile description;
- * sample depth;
- * texture and density of the sample (and method of determination of the texture);
- * time of saturating the soil sample;
- * time of reaching equilibrium (in hours or days);
- * the results of the several buret readings;
- * the volume of the sample;
- * the calculated θ - values including the maximum and minimum value (error analysis);
- * presentation of the waterretention characteristic as a graph;
- * other for the evaluation of the determination important remarks (wether during sampling, field moisture, root canals etc.)

Notes

To prevent algae-grow 5 cm³ copper sulphate solution (1 g CuSO₄ in 100 g 0.1 N HCL) can be added to the buret. Remove accumulated dirt under the filter by shaking with coarse sand. The filter can be cleaned by boiling it with concentrated sulphuric acid. Add a few grams potassium bichromate (2 g K₂Cr₂O₇ in 100 cm³ sulphuric acid). Be sure to do this in a fume-hood!!! Rinse the filter thoroughly with demineralised water afterwards.

Literature

BURKE, W., D. GABRIELS and J. BOUMA (ed.). 1986. *Soil Structure Assessment*. A.A. Balkema, Rotterdam/Boston.