DIFFUSIE VAN GASSEN IN GROND EN ZUURSTOFDIFFUSIE-COËFFICIËNTEN IN NEDERLANDSE AKKERBOUWGRONDEN

J.W. Bakker, F.R. Boone en P. Boekel

RAPPORT 20

INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING (ICW)

POSTBUS 35, 6700 AA WAGENINGEN 1987

F.R. Boone-Vakgroep Grondbewerking Landbouwuniversiteit, Wageningen
P. Boekel -Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren (Gr.)

130707

Copyright© 1987
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Postbus 35, 6700 AA Wageningen
Tel. 08370-19100

ISSN 0921-089X

INHOUD

IN KORT BESTEK I

1. INLEIDING 1

2. THEORIE 2
   2.1. Definiëring diffusiecoëfficiënt 2
   2.2. Mechanisme van diffusie 2
      2.2.1. Algemeen 2
      2.2.2. Invloed poriewanden 3
      2.2.3. Invloed gassamenstelling en diffusiefluxen 4
   2.3. Diffusiecoëfficiënten van gas in gas (D_{gg}) en van gas in water (D_{gw}) 7
   2.4. Gasdiffusiecoëfficiënt in grond (D_s) 8
      2.4.1. Definitie van D_s 8
      2.4.2. D_s berekend uit transport via water in de grond 9
   2.5. Invloed geometrie en vulling van de poriën op D_s, theoretische relaties 10
      2.5.1. Rechte poriën 10
      2.5.2. Grillige poriën 10
      2.5.3. Aanwezigheid van verschillende poriesystemen 12
   2.6. Empirische relaties tussen D_s en ϕ_g 16

3. METHODEN 19
   3.1. Voorkomende bepalingsmethoden D_s 19
   3.2. Gebruikte bepalingsmethoden D_s 19
      3.2.1. Meting 19
      3.2.2. Berekening 20
      3.2.3. Nauwkeurigheid van de metingen en van de best passende berekende lijn 21
   3.3. Testmetingen 21

4. MATERIAAL 22

5. RESULTATEN 23
   5.1. Algemeen 23
   5.2. Invloed van porositeit en drukhoogte van het bodemwater op het luchtgehalte van de grond 23
   5.3. Invloed van porositeit en vochtigheid van de bodem op $D_s(\phi_g)$-relaties van de onderzochte gronden 25

5.4. Overzicht $D_s(\phi_g)$-relaties in gronden met verschillende structuren 26
5.4.1. Representatieve relaties 26
5.4.2. Verdere relaties 30
5.5. Verband tussen textuur en voorkomende structuren 31
5.6 Conclusies 33

LITERATUUR 34

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN 36

BIJLAGEN 37
1. Beschrijving onderzochte gronden 37
2. Gegevens gronden met hun $D_s(\phi_g)$-relaties 40

IN KORT BESTEK

Het transport van gassen in de bodem heeft voornamelijk plaats door diffusie. Daarom zijn de diffusiecoëfficienten van gassen in grond D_s, dat zijn de verhoudingen tussen fluxen en concentratiegradiënten, onmisbare gegevens voor het kwantificeren van het mogelijke gastransport in diverse gronden. In dit rapport wordt nagegaan in hoever de waarden van D_s zijn te berekenen of te schatten uit gegevens zoals lucht en watergehalte, struktuur, textuur, vochtspanning of handelingen waardoor bepaalde strukturen ontstaan. Dit is gedaan aan de hand van literatuur, berekeningen en het rangschikken van relaties tussen D_s en luchtgehalte, bepaald uit diffusiemetingen die door ons in de loop van de jaren zijn uitgevoerd aan vele landbouwgronden met verschillende textuur, struktuur en vochtgehalten. Deze metingen werden verricht om het mogelijke transport van O_2 en CO_2 in diverse bodems en situaties te kunnen kwantificeren. De porositeit van de onderzochte gronden varieerde tussen 0,4 en 0,6.

In gronden met doorgaande luchtgevulde poriën is praktisch alleen transport via de gasfase van belang. In deze gronden wordt D_s bepaald door de hoeveelheid, vorm en continuïteit van de met gas gevulde poriën, en verder door D_0. D_0 is de diffusiecoëffciënt van het beschouwde gas in gas met dezelfde samenstelling als het gas in de bodemporiën en waarin ook dezelfde gasfluxen voorkomen. Het quotiënt D_s/D_0 is onafhankelijk van de diffundederende gassoort. Van in de bodem voorkomende gassen zijn de binaire diffusiecoëfficiënten gegeven, met de invloed daarop van temperatuur en druk. De invloed van gasfluxen op D_0 is te berekenen. Het blijkt dat bij de voorkomende fluxen van O_2 en CO_2 in de bodem D_0 van deze gassen tot 20% kan afwijken van hun binaire diffusiecoëfficiënten.

In grond met veel water, waar geen of weinig doorgaande gasgevulde poriën meer zijn, D_s is dan al zeer laag, wordt het transport via water relatief belangrijk. Dit transport is afhankelijk van vorm, hoeveelheid en continuïteit van de met water gevulde poriën, de D van het gas in water, D_w en de oplosbaarheid van het gas in water. De diffusiecoëfficiënten van gassen in water (D_w) bedragen circa 0,1‰ van die in gas. In water wat aan kleimineralen is geadsorbeerd, is D_w nog aanzienlijk lager. De oplosbaarheid van O_2 is circa 0,03x die van CO_2 welke ongeveer gelijk is aan de hoeveelheid CO_2, die in de gasfase aanwezig is.

D_s is een fractie van D_0, omdat het voor diffusie beschikbare oppervlak lucht in grond uiteraard slechts een fractie is van dat in 100% lucht. Verder zijn poriën kronkelig, sluiten slechts gedeeltelijk op elkaar aan en in vochtige grond zijn passages tussen de poriën verstopt met water. Ook wordt in poriën kleiner dan 1,5 µm de remming van de diffusie door de porie-

wanden van belang, dit remt de diffusie door zware gronden in drogere toestand (vochtspanning <-10 m).

Gebaseerd op theoretische beschouwingen worden relaties gegeven tussen het luchtgehalte, porositeit en D_s van grond met enkelkorrelstruktuur. Ook kan de invloed worden beredeneerd van aggregatie, het voorkomen van gangen in scheuren, de poriëngrootteverdeling en gelaagdheid van de grond.

D_s wordt bepaald door struktuur en luchtgehalte; het luchtgehalte door vochtspanning, textuur, organische stofgehalte en de porositeit. In grond met een hoge vochtigheid daalt bij afneming van de porositeit het luchtgehalte snel en D_s zeer snel.

Uit vergelijking van de gemeten $D_s(\phi_g)$-relaties van vochtige gronden met de uitkomsten van theoretische beschouwingen blijkt dat de gemeten relaties voor enkelkorrelstrukturen niet geheel samenvallen met de berekende relaties. De berekende invloed van de porositeit is in ons materiaal niet aanwezig. Dat aggregatie, gangen en scheuren D_s sterk doen toenemen, vooral in de vochtiger grond, is zeer duidelijk. De struktuuromschrijvingen zijn echter niet van dien aard dat daaruit kan worden afgeleid hoe groot de toename zal zijn. Dat D_s in materiaal met een meer uniforme poriëngrootte hoger zou zijn, is slechts zwak terug te vinden bij de lage luchtgehalten van humusloze zanden als deze worden vergeleken met struktuurloze zavels en humeuze zanden.

Voor de onderzochte gronden zijn de volgende relaties tussen D_s en ϕ_g te onderscheiden (D_s in $m^2 \cdot s^{-1}$ voor zuurstof bij 20°, waarbij D_o = 0,2 10^{-4} $m^2 \cdot s^{-1}$).

I $\quad D_s = 0{,}3.10^{-4}\ \phi_g^{3{,}0}$,

voor enkelkorrelstrukturen van humus en humarme zanden.

II $\quad D_s = 1{,}5.10^{-4}\ \phi_g^{4{,}0}$ of $D_s = 0{,}2.10^{-4}\ (\phi_g-0{,}1)^2/(1-0{,}1)^2$,

voor enkelkorrelstrukturen van lemige zanden en lichtere zavels.
Dit zijn gronden waarvan de aggregatie is vernield door b.v. malen, sterk frezen, verslempen of berijden. De grotere variatie in deeltjesgrootte veroorzaakt meer neiging tot blokkering van de poriën dan bij I.

III $D_s = 0{,}5.10^{-4}\ \phi_g^{3{,}0}$ of $D_s = 0{,}2\ 10^{-4}\ (\phi_g-0{,}05)^2/(1-0.05)^2$,

voor zwak en matig geaggregeerde bouwvormen van zavels en humeuze zanden en ondergronden van zavels.

IV $\quad D_s = 0{,}4.10^{-4}\ \phi_g^{2{,}5}$ of $D_s = 0{,}2.10^{-4}\ (\phi_g-0{,}025)^2/(1-0{,}025)^2$,

voor duidelijk geaggregeerde zavels en kleien.

V $D_s = 0{,}06.10^{-4}\ \phi_g^{1,5}$,

voor verdichte zavels en kleien waarin gangen en scheurtjes voorkomen, zoals in ploegzolen en langdurig niet bewerkte bouwvoren.
In duidelijk krimpende en scheurende gronden past geen van deze relaties. Hier kan één volumeprocent scheuren D_s doen toenemen van nul tot waarden die ruimschoots voldoende zijn voor het normaal noodzakelijke gastransport.

1. INLEIDING

Voor de groei van gewassen zijn in de grond niet alleen water en voedingsstoffen nodig, maar moet er ook zuurstof beschikbaar zijn. Zuurstof voor de plantenwortel en het bodemleven wordt vanaf het bodemoppervlak getransporteerd de grond in. Hierbij kan een onderscheid worden gemaakt tussen transport over grotere afstanden, het macrotransport, en over afstanden van enkele millimeters, het microtransport, vlak rond de wortels en in bodemaggregaten.

Een maat voor de snelheid van het microtransport is Oxygeen Diffusion Rate (ODR) beschreven door LEMON and ERICKSON (1952). De ODR is afhankelijk van het zuurstofgehalte in de bodemlucht en de transportweerstanden, voornamelijk in de met water gevulde poriën.

Het macrotransport van zuurstof, koolzuur en andere gassen van en naar het bodemoppervlak heeft voornamelijk plaats door diffusie via de met lucht gevulde poriën. De mogelijkheid daartoe wordt gekarakteriseerd door de gasdiffusiecoëfficiënt in de grond, zoals gedefinieerd en gemeten door PENMAN (1940), CURRIE (1960, 1961) en BAKKER and HIDDING (1970).

Voor de Werkgroep Grondbewerking Gewasreacties NRLO zijn de door ons gemeten gasdiffusiecoëfficiënten in vele akkerbouwgronden geordend en geanalyseerd om meer inzicht te verkrijgen in de factoren, die bepalend zijn voor de grootte van het zuurstoftransport, en in het bijzonder de rol van de bodemstruktuur hierbij. Het doel is indicaties te verschaffen over te verwachten diffusiecoëfficiënten in verschillende gronden onder specifieke omstandigheden. De nadruk ligt op de relatie tussen luchtgehalte en diffusiecoëfficiënt en de invloed daarop van de aanwezige structuur. Ter ondersteuning van de resultaten wordt eerst het verschijnsel diffusie behandeld en de theoretische relaties gegeven tussen luchtgehalte (=volume-fractie gas) en diffusiecoëfficiënt in gronden (Hoofdstuk 2).

Ook zijn de diffusiecoëfficiënten en oplosbaarheden gegeven, die nodig zijn voor de berekening van de diffusie van verschillende stoffen, die bij aëratie van gronden een rol kunnen spelen.

2. THEORIE

2.1. DEFINIERING DIFFUSIECOËFFICIËNT

Transport van een stof (gas, vloeistof of opgeloste stof) kan veroorzaakt worden door stroming waarbij de gehele aanwezige massa zich verplaatst als gevolg van verschillen in druk. Transport kan ook veroorzaakt worden door diffusie. Hierbij verplaatsen zich één of meer componenten van een stof als gevolg van concentratieverschillen; de totale druk is overal dezelfde. Er bestaan ook transportprocessen die diffusie worden genoemd waarbij transport plaats heeft als gevolg van verschil in temperatuur, van externe krachtenvelden en ook van verschillen in druk, maar deze zijn in dit kader niet van belang.

De diffusiecoëfficiënt van een stof i, D_i, wordt gedefinieerd als de evenredigheidsfactor tussen fluxdichtheid en concentratiegradiënt van stof i onder isobare omstandigheden.

$$f_i = - D_i \frac{dG_i}{ds} \qquad (1)$$

waarin:

f_i = massa flux dichtheid van stof i ($kg.m^{-2}.s^{-1}$)

G_i = massa concentratie ($kg.m^{-3}$)

s = afstand in diffusierichting (m)

De definitie van D zegt in principe niets over de wetmatigheden van relaties tussen gasflux en concentratiegradiënt. De wet van Fick die dezelfde vorm heeft als formule (1) doet dit wel. Hierin wordt gesteld dat het massatransport van een gas door diffusie rechtevenredig is met de concentratiegradiënt van die stof. De evenredigheidsfactor D is bij constant blijvende temperatuur en druk een constante. Zoals verder zal blijken kan dit voor vele transportsituaties van gassen in de grond als voldoend nauwkeurige benadering van de werkelijkheid worden gebruikt, maar niet voor alle.

2.2. MECHANISME VAN DIFFUSIE

2.2.1. Algemeen

Boven een temperatuur van nul Kelvin zijn moleculen in beweging. Diffusie is het transportproces dat als gevolg van deze beweging plaats heeft onder isobare omstandigheden. Bij een totale druk van 1 bar en een temperatuur van circa 283 K (10° C) botst een molecuul zuurstof in lucht gemiddeld iedere $0{,}07.10^{-6}$ m (= gemiddelde vrije weglengte) met een andere gasmolecuul, waardoor ondanks hoge gemiddelde snelheid $\bar{v}$ de plaatsverandering niet meer bedraagt dan 0.01 $m.s^{-1}$ (MARRERO and MASON, 1972). In vloeistoffen is deze verplaatsing nog veel kleiner als gevolg van grotere molecuuldichtheid en grotere onderlinge beïnvloeding.

Volgens de kinetische theorie van warmte geldt voor $\bar{v}$ van gasmoleculen:

$$\bar{v}^2 = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{RT}{M} \qquad (2)$$

waarin:

R = gasconstante = 8,311 $J.mol^{-1}.K^{-1}$

M = molair gewicht ($kg.mol^{-1}$)

Voor O_2 bij 10°C bijvoorbeeld is v = 433 $m.s^{-1}$ (PRINS, 1951; YOUNGQUIST, 1970).

2.2.2. Invloed poriewanden

In de bodem botsen de moleculen vaak met de wanden van de poriën. In zeer kleine poriën veroorzaakt dit een merkbare vertraging van de diffusie. Voor de gasdiffusiecoëfficiënt in een met gas gevulde porie, D_{gc}, geldt bij benadering:

$$1/D_{gc} = 1/D_o + 1/D_k \qquad (3)$$

waarbij:

D_o = de diffusiecoëfficiënt van een gas zonder invloed van poriewanden

D_k = de zogenaamde Knudsen diffusiecoëfficiënt

Onafhankelijk van soort en druk van de andere aanwezige gassen geldt: $D_k = 2/3\ r\ \bar{v}$ waarin r de straal is van de porie of het capillair (m) (YOUNGQUIST, 1970).

Figuur 1 geeft de diffusiecoëfficiënt van O_2 in de porïen D_{O_2c} als functie van de poriestraal r. In grond met een groter percentage kleine met luchtgevulde poriën (<1.5 µm) is de wandinvloed op de gemiddelde diffusiecoëfficiënt in de poriën goed merkbaar; bijvoorbeeld in droge komklei. Zand bevat praktisch geen poriën kleiner dan 1,5 µm; de wandinvloed van zand is daarom te verwaarlozen.

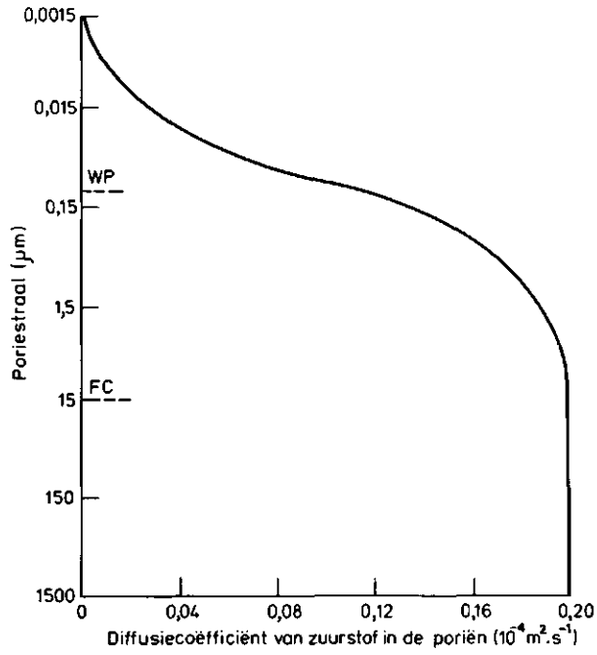

Fig. 1. Invloed van de afmetingen van poriën op de diffusiecoëfficiënt van O_2 in het gas in die poriën. Temperatuur = 20°C; WP = verwelkingspunt (h_m = -160 m); FC = veldcapaciteit (h_m = -1,0 m) (drukhoogte, h_m, waarbij het water in poriën met straal ≥r plaats maakt voor lucht is -15/r, waarbij r in µm).

In komklei is bij het verwelkingspunt D_{O_2c} nog circa 20% lager dan D_{O_2} zonder wandinvloed (Tabel 1). Bij vochtspanningen hoger dan -10 m (r ≥ 1,5 µm) is geen invloed van de wand meer merkbaar.

Tabel 1. Gemiddelde diffusiecoëfficiënten in de poriën, D_{O_2c}, van komklei en duinzand in droge toestand en bij verwelkingspunt als T = 20°C en $D_{O_2} = 0{,}2.10^{-4}\ m^2.s^{-1}$; ϕ_g = volumefractie lucht

		Duinzand		Komklei	
	h_m (m)	ϕ_g ($m^3.m^{-3}$)	D_{O_2c} ($10^{-4}\ m^2.s^{-1}$)	ϕ_g ($m^3.m^{-3}$)	D_{O_2c} ($10^{-4}\ m^2.s^{-1}$)
Droog	∞	0,47	0,191	0,47	0,077
Verwelkingspunt	-160	0,45	0,197	0,17	0,168

2.2.3. Invloed gassamenstelling en diffusiefluxen

De wetmatigheden waaraan met elkaar botsende moleculen voldoen, zijn geformuleerd in de zogenaamde Boltzmanvergelijkingen. Hiervoor zijn oplossingen ontwikkeld voor gasdiffusie (zie CHAPMAN and COWLING, 1970) waarmee de netto massaflux van een gassoort is te berekenen. Factoren hierin zijn snelheid, bewegingsrichting, dichtheden en massa's van de moleculen en de elasticiteit van de botsingen (MARRERO and MASON, 1972).
Uit berekeningen, die op kinetische theorieën zijn gebaseerd, blijkt dat het massatransport als gevolg van diffusie inderdaad correct met de wet van Fick is te beschrijven voor een aantal situaties:

- diffusie van twee gassen in elkaar (de z.g. binaire diffusie);
- diffusie van twee gassen in elkaar in aanwezigheid van een ander gas waarvan de flux nul is;
- diffusie van kleine hoeveelheden gas in gasmengsels, waarin verder geen concentratiegradiënten voorkomen (JAYNES and RAGOWSKI, 1983).

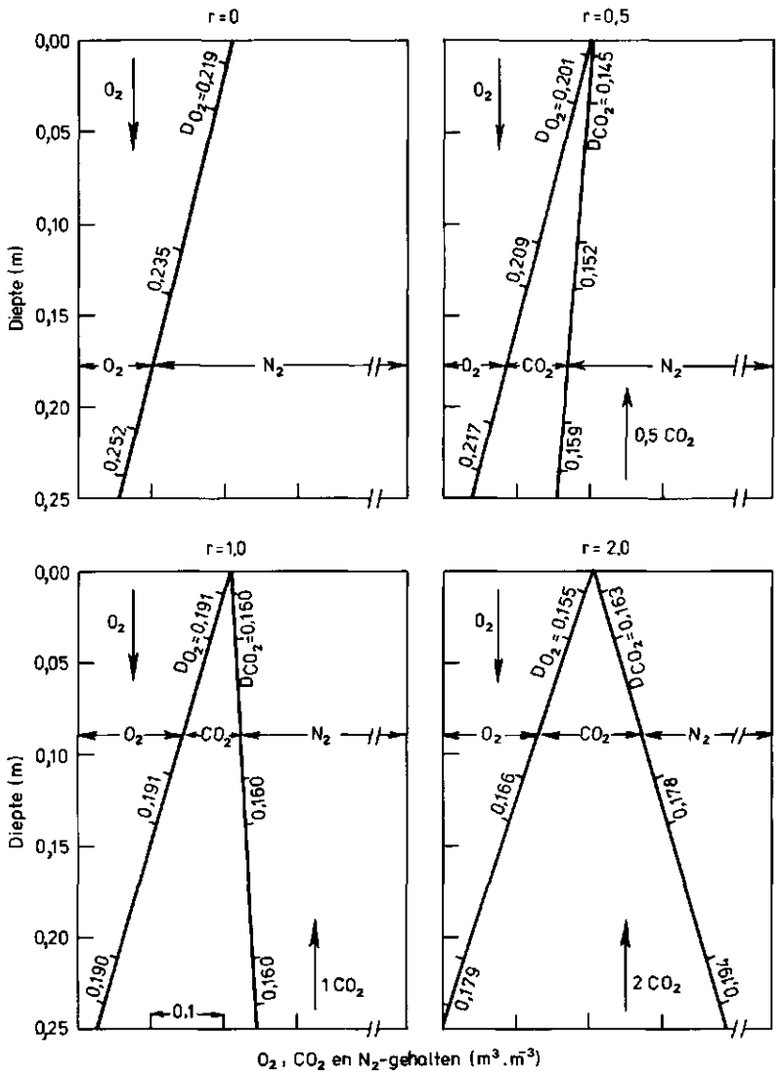

Fig. 2. Verloop van O_2, CO_2 en N_2-gehalten en de waarden van de diffusiecoëfficiënten D_{O_2} en D_{CO_2} (ingeschreven in 10^{-4} $m^2.s^{-1}$) in een laag van 25 cm gas. Boven deze laag is het O_2-gehalte 0,21 of 21 volume %, onder de laag wordt O_2 verbruikt en komt CO_2 vrij, per mol O_2 respectievelijk 0, 0,5, 1 en 2 mol CO_2 (r). Het O_2-verbruik is $57,8.10^{-5}$ mol O_2 $m^{-2}.s^{-1}$, temperatuur 20°C, p = 101,3 kPa. Berekening uitgevoerd met simulatiemodel (LEFFELAAR, 1987)

Het diffusieproces in bodems, waarin O_2 wordt verbruikt en CO_2 wordt geproduceerd, kan niet volkomen correct met de Wet van Fick worden beschreven. De diffusiecoëfficiënten zijn hier in principe geen constante waarden maar zijn afhankelijk van de voorkomende gasfluxen en gasconcentraties en kunnen zowel in positieve als negatieve zin van de binaire diffusiecoëfficiënten afwijken. WOOD and GREENWOOD (1971) geven correcte analytische oplossingen voor de stationaire diffusie in één systeem met drie diffunderende gassen. Voor diffusie van multi-component systemen geeft LEFFELAAR (1987) een dynamisch simulatieprogramma. Met dit programma zijn de in figuur 2 gegeven O_2, CO_2 en N_2-gehalten berekend. Voor constante fluxdichtheden, die voorkomen bijvoorbeeld in een laag grond met 0,005 m^2 doorlopende poriën per m2 grond ($D_s/D_o \approx 0{,}005$). Het aangegeven O_2-verbruik onder de laag komt overeen met 333 $mg.m^{-2}.uur^{-1}$ O_2 wat een vrij normaal gebruik is.

De diffusiecoëfficiënten van O_2 en CO_2, zoals gedefinieerd in formule 1, zijn ingeschreven. Ze blijken gelijk aan die welke kunnen worden berekend met de door JAYNES and RAGOWSKI (1983) gegeven oplossingen van D voor diffusie van twee gassen, hier CO_2 en O_2, in een stilstaand derde gas N_2.

$$D_{O_2} = \frac{D_{O_2CO_2} \cdot D_{O_2N_2}}{D_{O_2N_2}\,\Phi_{CO_2} + D_{O_2CO_2}\,\Phi_{N_2} + r_{CO_2O_2}\,D_{O_2N_2}\,\Phi_{O_2}} \qquad (4)$$

$$D_{CO_2} = \frac{D_{O_2CO_2} \cdot D_{CO_2N_2}}{D_{CO_2N_2}\,\Phi_{O_2} + D_{O_2CO_2}\,\Phi_{N_2} + (r_{CO_2O_2})^{-1}\,D_{CO_2N_2}\,\Phi_{CO_2}} \qquad (5)$$

$D_{O_2CO_2}$ = binaire diffusiecoëfficiënt van O_2 en CO_2 (zie Tabel 2)

Φ_{O_2} = volumefractie O_2 (= mol. fractie O_2)

$$r_{CO_2O_2} = \frac{\text{mol flux } CO_2}{\text{mol flux } O_2} = \frac{\text{vrijkomen } CO_2\ (\text{mol. } m^{-3}.s^{-1})}{\text{opname } O_2\ (\text{mol. } m^{-3}.s^{-1})}$$

De verhouding van de O_2- en CO_2-fluxen in grond r, is bij stationaire situaties gelijk aan het respiratie-quotiënt (RQ) = CO_2-produktie/O_2-consumptie. Bij de oxidatie van koolhydraten en andere organische stoffen in de bodem is de produktie aan CO_2 gemiddeld gelijk aan de O_2-consumptie. In anaërobe perioden is er alleen CO_2-produktie, terwijl in daarop volgende aërobe perioden de O_2-consumptie tijdelijk hoger is dan de CO_2-produktie (GRECHIN and IGNATIEV, 1969; GLINSKI and STEPNIEWSKI, 1985). In kalkrijke gronden wordt CO_2 bij stijgende CO_2-gehalten vastgelegd als bicarbonaat en wordt $r < RQ$. Daalt het CO_2-gehalte, dan komt door ontleding van bicarbonaat weer CO_2 vrij en is $r > RQ$. Bij de oxidatie van bijvoorbeeld CH_4 is RQ 0,5 en van FeS is RQ gelijk aan 0. Veelal ligt de waarde van r in grond tussen 0,5 en 1,5.

Uit figuur 2 blijkt dat de diffusiecoëfficiënten van O_2 en CO_2, zoals die in de gasgevulde poriën van de grond voorkomen (D_o) tot circa 20% kunnen afwijken van de binaire diffusiecoëfficiënten (Tabel 2). Voor N_2 is D_o zelfs steeds gelijk aan nul, de concentratiegradiënten zijn van gelijke orde als die van O_2 en CO_2, maar er wordt geen N_2 getransporteerd.

Bij de bepaling van D in grondmonsters (D_s), is sprake van binaire diffusie; er wordt in de monsters de diffusie gemeten

van twee gassen in elkaar. Produktie of consumptie van gassen is daarbij te verwaarlozen. De in dit rapport gegeven waarden van D_s zijn die van O_2 waarbij D_o gelijk is aan de binaire diffusiecoëfficiënt van O_2 bij 20°C en 1013 mbar druk, namelijk $0{,}2.10^{-4}$ $m^2.s^{-1}$ (zie tabel 2).Voor situaties in de bodem, waar D_o van deze waarde afwijkt, of door afwijkende temperatuur of druk of door gasflux-verhoudingen of wanneer transport van een ander gas berekend moet worden, dienen de in dit rapport gegeven waarden van D_s daarop gecorrigeerd te worden.

Tabel 2. Diffusiecoëfficiënten voor binaire diffusie van enkele gassen bij P = 101.3 kPa met temperatuurinvloed; coëfficiënt n van formule (7). Verder zijn diffusiecoëfficiënten van enkele gassen en stoffen in water aangegeven en van O_2 in wortelweefsel

Diffusiecoëfficiënt	0°C	10°C	20°C	n	Bron
(in 10^{-4} $m^2.s^{-1}$)					
O_2 - lucht*	0,179	0,190	0,202	1,72	I
CO_2 - lucht***	0,139	0,149	0,159	1,94	I
H_2O - lucht	0,209	0,225	0,241	1,07	I
CH_4 - lucht	0,186	0,198	0,210	1,75	I
C_2H_4 - lucht**	0,137	0,146	0,156	1,83	II
C_2H_6 - lucht**	0,128	0,137	0,146	1,83	II
N_2O - lucht**	0,143	0,153	0,162	1,84	II
NH_3 - lucht**	0,194	0,208	0,222	1,93	III
CO_2 - N_2***	0,139	0,149	0,159	1,87	I
CO_2 - O_2***	0,139	0,149	0,159	1,87	I
(10^{-9} $m^2.s^{-1}$)					
O_2 in water	1,1	1,6	2,1		III
CO_2 in water					
NO_3^- in water	0,9	1,3	1,7		III
NH_4^+ in water	0,9	1,3	1,7		III
fructose in water****	0,4	0,7	0,9		
O_2 in wortelweefsel			0,1 à 0,8		V

* D_{O_2} - lucht = D_{O_2} - N_2
** bepaald bij 20 à 25°C; n berekend met formule CHAPMAN en ENSKOG (REID et al., 1977)
*** Voor CO_2 is n niet constant, rond 100°C is n = 1.86, n = gemiddelde over de range van 0 - 30°C
**** Schatting met formule WILKE and CHANG (REID et al., 1977):

$$D_{iw} = \frac{5{,}9.10^{-17}(2{,}6\ M_w)^{0,5}\ T}{\eta_w\ V_i^{0.6}} \qquad (8)$$

waarin:
M = mol.gew. (kg), η_w = viskositeit water (Pa.s), V_i = mol./vol = M_i/dichtheid i (m^3).
I = MARRERO and MASON, 1972
II = PRITCHARD and CURRIE, 1982
III = REID et AL, 1977
IV = KRISTENSEN and LEMON, 1964
V = LEMON and WIEGAND, 1962

2.3. DIFFUSIECOËFFICIËNTEN VAN GAS IN GAS (D_{gg}) EN VAN GAS IN WATER (D_{gw})

Diffusiecoëfficiënten van gas in gas zoals deze in de literatuur worden opgegeven zijn de coëfficiënten voor binaire diffusie. Een zeer uitvoerig overzicht van gegevens plus de mogelijke bepalingsmethoden geven MARRERO and MASON (1972). Diffusiecoëfficiënten kunnen ook berekend worden uit de eigenschappen van de aanwezige moleculen (REID et al., 1977). Zij vinden dat de berekende binaire diffusiecoëfficiënten gemiddeld tot op circa 8% de gemeten waarden benaderen met enkele uitschieters tot circa 30%. Ook de diffusiecoëfficiënten van gassen en lage concentraties organische stoffen in water zijn redelijk te berekenen (gemiddelde afwijking circa 11%). Bruikbare berekeningswijzen voor diffusiecoëfficiënten in vloeistofmengsels vonden zij niet.

MARRERO and MASON (1972) verzamelden praktisch alle tot 1970 gepubliceerde gemeten gasdiffusiecoëfficiënten. Van de 74 gasparen, waarvan zij voldoende betrouwbare metingen vonden, geven zij de diffusiecoëfficiënt plus de invloed van temperatuur en druk daarop in de vorm van de functie:

$$D_{gg} = a\ T^{b}\ e^{-c/T}\ .\ \frac{1}{p} \qquad (6)$$

waarin:

a ($bar.m^2.s^{-1}.T^{-b}$); b en c (K) zijn constanten waarbij de functie het best past bij de gemeten waarden. Voor de diffusie van

O_2	in N_2	$a = 1{,}14.10^{-9}$	$b = 1{,}724$
		$c = 0{,}0$	
CO_2	in N_2	$a = 3{,}18\ 10^{-9}$	$b = 1{,}570$
		$c = 113{,}6$	
CO_2	in lucht	$a = 2{,}73.10^{-9}$	$b = 1{,}590$
		$c = 102{,}1$	

D_{gg} = diffusiecoëfficiënt ($m^2.s^{-1}$)
T = temperatuur (K) en
p = totaal druk (bar)

In Tabel 2 zijn voor in de bodem veel voorkomende gassen de diffusiecoëfficiënten gegeven die op deze wijze zijn bepaald. De nauwkeurigheid van de waarden van D_{gg} tussen 0 en 40°C is circa 2%.

De invloed van druk en temperatuur op de diffusiecoëfficiënt van gassen is ook weer te geven door:

$$D_1/D_2 = (T_1/T_2)^n\ \ (p_2/p_1) \qquad (7)$$

Hierin is n een constante, die onafhankelijk van de temperatuur kan zijn zoals bij N_2 en O_2. In die gevallen is n = b van formule (6) en is in formule (6), c = 0. Soms is n wel van de temperatuur afhankelijk, bijvoorbeeld bij diffusie van CO_2 in N_2. In het kleine temperatuurtraject dat bij bodemaëratie van belang is (0 tot 30°C), is n echter wel als constant te beschouwen.

De diffusiecoëfficiënten van gassen en stoffen in water in Tabel 2 hebben een nauwkeurigheid van circa 10%. Voor de temperatuurinvloed zie formule (8) bij Tabel 2.

Bij vergelijking van de mogelijkheid van gastransport in water en in lucht moet de oplosbaarheid van het gas in water mede in beschouwing worden genomen (Tabel 3).

Voorbeeld:
Het zuurstofgehalte in de gasfase daalt over een afstand van 0,01 m van 20 tot 10 volumeprocenten, dan is de concentratiegradiënt bij 20°C en een totale druk van 101,3 kPa: (0,2 - 0,1)x1,33 $mg.cm^{-3}.cm^{-1}$. In water wat daarmee in evenwicht is, is de gradiënt (0,2 - 0,1)x0,044 $mg.cm^{-3}.cm^{-1}$ of wel 0,044/1,33 = $3{,}3.10^{-2}$ keer die in lucht. De diffusiecoëfficiënt van O_2 in water is $2{,}1.10^{-9}$ $m^2.s^{-1}$ (Tabel 2) of $10{,}4.10^{-5}$ keer die in lucht. Door verschil in oplosbaarheid en in diffusiecoëfficiën-

Tabel 3. Concentraties van zuiver O_2, CO_2 en NH_3 in de gasfase en opgelost in water in $kg.m^{-3}$ (* voor NH_3 in water in kg per 1000 kg water) bij een druk van 101,3 kPa (SMITHONIAN TABLES, 1969).

	Gasfase			Waterfase		
	0°C	10°C	20°C	0°C	10°C	20°C
O_2	1,43	1,38	1,33	0,071	0,055	0,044
CO_2	1,90	1,84	1,78	3,35	2,32	1,69
NH_3	0,67	0,65	0,62	987.	689.	535.

Concentraties in water zijn rechtevenredig met de druk van het gas in de gasfase. De in Tabel 3 gegeven waarden van CO_2 zijn alleen bruikbaar in zure tot neutrale grond in basische grond lost CO_2 in de vorm van bicarbonaat op en doet in die vorm ook aan het diffusietransport via water mee. Vorming van bicarbonaat is afhankelijk van de pH volgens:

$$\frac{(H^+)(HCO_3^-)}{(CO_2)} = 10^{-6,343} \qquad (9)$$

(UMBREIT et al., 1959)

ten wordt de transportmogelijkheid van O_2 in water dus $3,3.10^{-2} \times 10,4.10^{-5} = 3,4.10^{-6}$ keer die in lucht.

Voor CO_2, wat veel beter in water oplost, wordt die factor in water $1,0.10^{-4}$. Voor NH_3, wat extreem goed in water oplost, is de transportmogelijkheid in water $6,6.10^{-2}$ keer die in lucht. Een goede illustratie van het verschil van transport van O_2 en CO_2 in water geven de metingen van GREENWOOD (1970) voor met water verzadigde grond.

2.4. GASDIFFUSIECOËFFICIËNT IN GROND (D_s)

2.4.1. Definitie van D_s

Bij de algemene definiëring van de diffusiecoëfficiënt van een stof, in dit geval gas,

$$f_g = D_g \, (dG_g/ds) \qquad (1)$$

is de concentratie G_g, de massa gas per eenheid van ruimte.

In het driefasensysteem grond is G_g de massa per m^3 (= m^3 grond) te beschouwen als de som van de hoeveelheden in de drie fasen: gas, vloeistof en vaste delen aanwezig in die m^3.

$$G_g = \phi_g \, \chi_{gg} + \phi_l \, \chi_{gl} + \phi_s \, \chi_{gs} \qquad (10)$$

waarin:

χ_{gg}, χ_{gl} en χ_{gs} de massa gas is resp. per m^3 gas, vloeistof en vast fase en ϕ_g, ϕ_l en ϕ_s de volumefracties die door deze fasen worden ingenomen.

In de evenwichtssituatie, die zich in grond waarschijnlijk snel instelt, zijn er afhankelijk van gassoort en temperatuur vaste verhoudingen tussen de gasconcentraties in de verschillende fasen. De hoeveelheid O_2 in of geadsorbeerd aan de vaste fase χ_{gs} is in vochtige grond niet aan te tonen (NAKAYAMA and SCOTT, 1962). In droge toestand is er wel adsorptie aan het oppervlak van kleimineralen. Aan bijvoorbeeld een stoofdroge klei met 54% van de minerale delen <2 µm, adsorbeert bij P_{O_2} = 101,3 kP_a, 12 cm^3 O_2 per 100 g en in luchtdroge toestand 1,4 cm^3 per 100 g. Dit betekent respectievelijk $\chi_{O_{2s}} = 0,33 \, \chi_{O_{2g}}$ en $0,04 \, \chi_{O_{2g}}$ (RUNKLES et al., 1958).

De verhoudingen tussen de gasconcentraties in water en gas zijn te herleiden uit Tabel 3 (bij 20°C is voor O_2 χ_{gl} =

0,033 χ_{gg} en voor CO_2 in neutraal milieu χ_{gl} = 0,95 χ_{gg}.

Door onder andere VAN BAVEL (1952) wordt de gasdiffusiecoëfficiënt in grond volgens formule (1) gedefinieerd. Als de hoeveelheid gas die aanwezig is in het water wordt verwaarloosd (wat voor O_2 wel verantwoord is), kan voor de gradiënt $d(G_g)/ds$ gebruikt worden $\phi_g.\chi_{gg}/ds$. Bij gelijke flux en gelijke concentratiegradiënt in de gasfase χ_{gg}/ds, varieert de volgens formule (1) gedefinieerde diffusiecoëfficiënt in de grond met de volume fractie gas in de grond ϕ_g, ofwel met het luchtgehalte. Velen (PENMAN, 1940; CURRIE, 1960; BAKKER and HIDDING, 1970) prefereren de diffusiecoëfficiënt in grond anders te definiëren, en wel naar de gradiënt van χ_{gg},χ_{gg} (kg.m^{-3} gas)/ds. χ_{gg} is direct te meten en is ook een directere maat voor de aëratietoestand in de grond.

Ook wij definiëren de diffusiecoëfficiënt voor gas in de grond als D_{gs} in:

$$f_g = -D_{gs}\ d(\chi_{gg})/ds \qquad (11)$$

Als er uitsluitend sprake is van diffusie van gas, dan wordt D_{gs} in formule (11) afgekort tot D_s.

2.4.2. D_s berekend uit transport via water in de grond

In welke fase het transport in grond plaats heeft, blijkt niet uit formule (11), ondanks het gebruik van χ_{gg}. De fluxdichtheid van gas in grond, f_g, is de som van de flux via de gasfase, f_{gg}, en die via de vloeistoffase, in grond praktisch altijd water dus, f_{gw}.

$$f_g = f_{gg} + f_{gw} \qquad (12)$$

De diffusiecoëfficiënt voor gasdiffusie via de gasfase in de grond, D_{gws}, wordt gedefinieerd volgens (11):

$$f_{gg} = D_{ggs}\ d(\chi_{gg})/ds \qquad (13a)$$

$$f_{gw} = D_{gws}\ d(\chi_{gw})ds \qquad (13b)$$

D_{ggs} wordt bepaald door de geometrie en hoeveelheid van de met gas gevulde poriën in de grond en door de diffusiecoëfficiënt van het beschouwde gas in gas met dezelfde samenstelling als het gas in de poriën D_o. Het quotiënt D_{ggs}/D_o karakteriseert een grond voor het mogelijke gastransport door diffusie via de met gas gevulde poriën, onafhankelijk van de gassoort. Hetzelfde geldt voor het quotiënt D_{gws}/D_{gw} met betrekking tot het mogelijke gastransport door diffusie via de waterfase van de grond. D_{gw} is de diffusiecoëfficiënt in puur water.

Is f_{gw} te verwaarlozen ten opzichte van f_{gg} dan wordt D_s/D_o bepaald door de geometrie van de met luchtgevulde poriën. Is f_{gg} te verwaarlozen dan wordt D_s/D_o bepaald door de geometrie van de met water gevulde poriën en de oplosbaarheid van het gas in water. Om bij de berekening van gastransport door gas- èn waterfase met formule (11) te kunnen werken moet χ_{gw} gegeven worden als functie van χ_{gg}, te weten $\chi_{gw} = \gamma\ \chi_{gg}$ (Voor evenwichtssituaties is γ af te leiden uit Tabel 3). Uit formule (11),(12) en (13) volgt dan:

$$D_{gs} = D_{ggs} + \gamma D_{gws} \qquad (14)$$

(voor het werken met partiële druk van een gas bij diffusieberekeningen zie GLINSKI and STEPNIEWSKI, 1985).

2.5 INVLOED GEOMETRIE EN VULLING VAN DE PORIËN OP D_s, THEORETISCHE RELATIES

2.5.1. Rechte poriën

Zouden alle poriën in een materiaal rechte doorlopende scheuren of gangen zijn, evenwijdig aan de diffusierichting, dan is de diffusiecoëfficiënt D_s een aan de porositeit of poriefractie, ϕ, gelijk deel van de diffusiecoëfficiënt in het materiaal waarmee de poriën zijn gevuld. Zijn alle poriën $\phi(m^3.m^{-3})$, gevuld met lucht, dus $\phi_g = \phi$, dan geldt:

$$D_{ggs}/D_o = D_s/D_o = \phi \qquad (15)$$

Zijn alle poriën gevuld met water, dus $\phi_w = \phi$, dan geldt:

$$D_{gws}/D_{gw} = \phi \qquad (16a)$$

D_s wordt gedefinieerd naar de concentratiegradiënt in de gasfase; in met water verzadigde grond volgt uit formule (11),(12) en (13):

$$D_s = \gamma D_{gws}, \text{ dus } D_s/D_{gw} = \gamma\phi \qquad (16b)$$

Zijn er in de verder met water gevulde rechte poriën ϕ_g niet doorlopende gasbellen aanwezig dan kan, omdat $D_o >> D_{gw}$, het luchtgehalte als verkorting van de diffusieweg door het water worden beschouwd en geldt:

$$D_s/D_{gw} = \gamma\phi.\phi/(\phi - \phi_g) = \gamma.\phi^2/\phi_w \qquad (17)$$

2.5.2. Grillige poriën

Poriën zijn gewoonlijk grillig, de diffusiecoëfficiënt is bij hetzelfde luchtgehalte lager dan in materiaal met rechte poriën.

Voor droge materialen met een enkelkorrelstructuur in isotrope pakking passen de gemeten waarden van D_s over een groot traject van ϕ (0,26 à 0,95) redelijk goed bij de functie (CURRIE, 1960; REIBLE and SHAIR, 1982):

$$D_s/D_o = \phi^{1,43} \qquad (18)$$

De theoretische benaderingen dat D_s/D_o gelijk moet zijn aan het oppervlak doorgaande poriën per m^2 bodemdoorsnede resulteren in ongeveer gelijke functies.
MILLINGTON (1959) komt tot:

$$D_s/D_o = (\phi^{2/3})^2 = \phi^{1,33} \qquad (19)$$

en later (MILLINGTON and QUIRK, 1961) tot:

$$D_s/D_o = \phi^{2s} \qquad (20)$$

waarin voor s geldt:

$$\phi^{2s} + (1 - \phi)^s = 1 \qquad (21)$$

Formule (21) is afgeleid van de veronderstelling dat in de doorsnede met het maximaal mogelijke porie-oppervlak, dit is de oppervlaktefractie, ϕ^s, beslaat. Het doorlopende oppervlak door twee aangrenzende vlakken beslaat de fractie ϕ^s van $\phi^s = \phi^{2s}$. Dit is het minimale porie-oppervlak wat in doorsnede kan voorkomen, waarin uiteraard het oppervlak vaste delen maximaal is. Wanneer we aannemen dat poriën en vaste fase dezelfde configuratie hebben, dan beslaat naar analogie van het maximale porie-oppervlak het maximale oppervlak vaste delen $(1 - \phi)^s$ m^2 per m^2 doorsnede. Voor $\phi = 0,10$ is $2s = 1,21$, voor $\phi = 0,40$ is $2s = 1,34$ en voor $\phi = 0,70$ is $2s = 1,48$.

Wij gebruiken in dit rapport verder alleen maar één waarde voor de exponent, namelijk 1,4. In droge anisotrope materialen met duidelijk gerichte pakkingen kan de diffusiecoëfficiënt - luchtgehalte relatie heel anders zijn. Zo meet CURRIE (1960) in droog micapoeder loodrecht op de oriëntatie-

richting van de plaatjes veel lagere diffusiecoëfficiënten, namelijk:

$$D_s/D_o = \phi^{10} \qquad (22)$$

Volledig met water gevulde grond is evenals droge grond een tweefasensysteem, en vooral in zanden zal de poriegeometrie niet van de droge grond verschillen. Naar analogie van de droge grond, en rekening houdend met de oplosbaarheid van het gas in water zal gelden :

$$D_s/D_{gw} = \gamma\phi_w^{1,4} \qquad (23)$$

Zijn er ingesloten luchtbellen (mogelijk van 1 tot circa 10 volumeprocenten) zonder dat er doorlopende met luchtgevulde poriën aanwezig zijn, dan is ook hier het luchtgehalte als wegverkorting voor de diffusie via water te beschouwen, en te beschrijven als:

$$D_s/D_{gw} = \gamma\phi^{1,4}\ \phi/\phi_w \qquad (24)$$

In met water verzadigde kleien gaan formules (23) en (24) niet op. In structuurloze pasta van kaoliën-klei met een porositeit van 59 volumeprocenten, meten SIDES and BARDEN (1970) een diffusiecoëfficiënt, die een kwart bedraagt van de waarde die volgens formule (23) te verwachten is. De diffusierichting door het monster is op de diffusiecoëfficiënten niet van invloed. In een illiet-klei (59% lutum) met een porositeit van 31 volumeprocenten is de gemeten diffusiecoëfficiënt nog slechts 5% van de verwachte waarde. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat in water, wat aan kleiplaatjes is geadsorbeerd, de zuurstofdiffusie veel lager is dan in vrij water. Ook in verkit materiaal zijn de diffusiecoëfficiënten lager. Metingen van diffusie van diverse ionen in verzadigde kalk (HILL, 1984) passen in de relatie:

$$D_{iws}/D_{iw} = 2\ \phi^{3,0} \quad (\phi = 0,24 \text{ à } 0,45) \qquad (25)$$

Wordt droge grond vochtig dan raken eerst de nauwste poriën gevuld met water. Hiertoe hoort ook, afhankelijk van de structuur en het vochtgehalte, een deel van de verbindingen tussen de grotere poriën. Hoe groter deel van de poriën gevuld is met lucht, hoe groter de kans dat een met lucht gevulde porie aansluit op een volgende met luchtgevulde porie. Voor een willekeurige rangschikking van de poriën (komt voor in enkelkorrelstructuren) wordt door MILLINGTON (1959) als gemiddelde kans van het doorlopen van poriën gegeven: $(\phi_g/\phi)^2$. Wanneer het transport via de waterfase nul wordt gesteld, geldt voor een grond met een enkelkorrelstructuur:

$$D_{ggs}/D_o = D_s/D_o = (\phi_g/\phi)^2\ \phi_g^{1,4} = \phi^{-2}\ \phi_g^{3,4} \qquad (26)$$

Als zowel de diffusie via de gasfase als door de waterfase van belang is, dan wordt D_s:

$$D_s = D_o\ (\phi_g/\phi)^2\ \phi_g^{1,4} + \gamma D_{gw}\ \phi^{1,4}\ \phi/\phi_w \qquad (27)$$

In Figuur 3 zijn de boven genoemde theoretische relaties (formules 15-27) in beeld gebracht voor D_s van O_2 en CO_2. Om verband te leggen met de bodemaeratie is aangegeven de waarde van D_s voor O_2 waar beneden in landbouwgronden praktisch altijd aëratieproblemen zijn te verwachten, $D_s$min en die waarboven dat praktisch nooit is te verwachten, $D_s$max.
(Bij $D_s$min is in een laag grond met een dikte (L) van 0,3 m waarin het zuurstofverbruik (α) laag is, te weten $9,26.10^{-8}$ $kg.m^{-3}.s^{-1}$ voor het zuurstoftransport een concentratieverval ($\Delta\chi$) nodig van 20 volumeprocenten zuurstof of 0,278 $kg.m^{-3}$. Bij

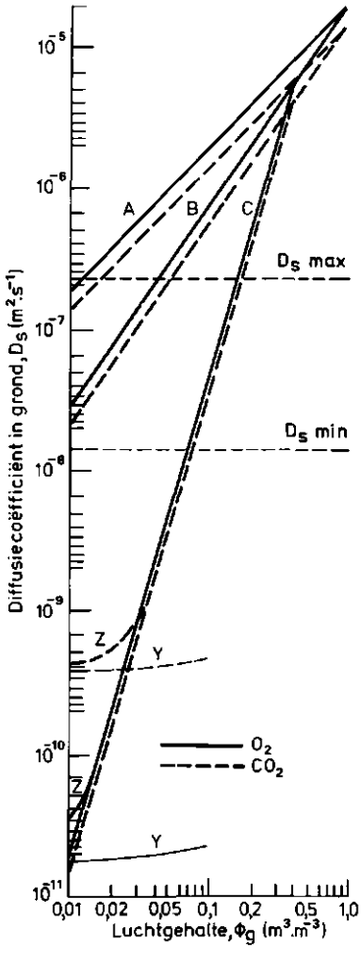

Fig. 3. Theoretische relaties tussen luchtgehalte, Φ_g, en diffusiecoëfficiënten van O_2 en CO_2:
A. In materiaal met rechte kanalen (formule 15).
B. In grond met enkelkorrelstructuur in droge toestand (formule 18).
C. idem met porositeit van 0,40 in vochtige toestand, transport via water verwaarloosd. (formule 26).
Y. In natte grond zonder doorlopende met luchtgevulde poriën, = de bijdrage van gastransport via water aan D_s (formule 24).
Z. In grond als in C, inclusief bijdrage transport via water (formule 27).
D_s min en D_s max = laag respectievelijk hoog kritisch niveau D_{O_2s} voor bodemaëratie.

$D_s$max is bij een 10 maal hoger verbruik, $\Delta\chi$ 10 volumeprocenten of 0,139 kg.m^{-3}. ($\Delta\chi$ berekend met: $\Delta\chi = \alpha\ 0{,}5L^2D_s^{-1}$).

Voor het transport van gassen over wat grotere afstanden is de diffusie via de waterfase, zoals te zien in Figuur 3 niet van belang. D_s voor O_2 in verzadigde grond is minder dan 0.2% van $D_s$min. Ook voor CO_2 is D_s in verzadigde grond nog relatief zeer laag, hoewel aanzienlijk hoger dan D_s van O_2.

Wanneer de laatste doorlopende luchtgevulde poriën door water geblokkeerd raken, dan daalt D_s vrij abrupt vanaf lijn C of Z naar de relatie Y van grond zonder doorlopende luchtgevulde poriën. In enkelkorrelstructuur gebeurt dit bij luchtgehalten tussen de 12 en 8 volumeprocenten (Voor vergelijking van deze relatie met de gemeten relaties bij verschillende dichtheden, zie hoofdstuk 5.3.).

2.5.3. Aanwezigheid van verschillende poriesystemen

Aggregatie

Het diffusietransport is te beschouwen als de som van twee parallel lopende diffusiefluxen: via poriën tussen de aggregaten (inter-aggregaatporiën) en via de poriën in de aggregaten (intra-aggregaatporiën) met transport van aggregaat tot aggregaat door de inter-aggregaatporiën (MILLINGTON and SHEARER, 1971). In materiaal, waarin drie poriesystemen zijn te onderscheiden kan het transport als resultaat van drie diffusiefluxen worden beschouwd (CURRIE and ROSE, 1985).

Voor enkelvoudig geaggregeerd materiaal geldt:

D_s/D_o = oppervlak doorlopende luchtgevulde poriën per m^2 bodemdoorsnede = oppervlak doorlopende inter-aggregaatporiën + oppervlak doorlopende intra-aggregaatporiën (28)

Voor het doorlopende oppervlak van de afzonderlijke poriesystemen geldt de relatie voor enkelkorrelstructuren: formule (26). Het doorlopende oppervlak intra-aggregaatporiën wordt verder gecorrigeerd voor de weerstand, die de flux ondervindt bij de passage van de inter-aggregaatporiën. Wordt een natte grond droger, dan raken de poriën tussen de aggregaten het eerst gevuld met lucht. Door de geringe relatieve vulling met water en dus de geringe blokkade van deze poriën is D_s bij lage ϕ_g-waarden hoger dan van enkelkorrelstructuur met hetzelfde luchtgehalte; en wel hoger naarmate het poriënvolume tussen de aggregaten kleiner is. Bij verder uitdrogen raken pas de poriën in de aggregaten leeg ; door het relatief lage luchtgehalte en poriënvolume van de aggregaten is de blokkering daarin groot. D_s neemt daardoor bij toename van het luchtgehalte in de aggregaten maar weinig toe. Uiteindelijk zal in droge geaggregeerde grond D_s lager zijn dan in droge grond met enkelkorrelstructuur en hetzelfde poriënvolume (Figuur 4).

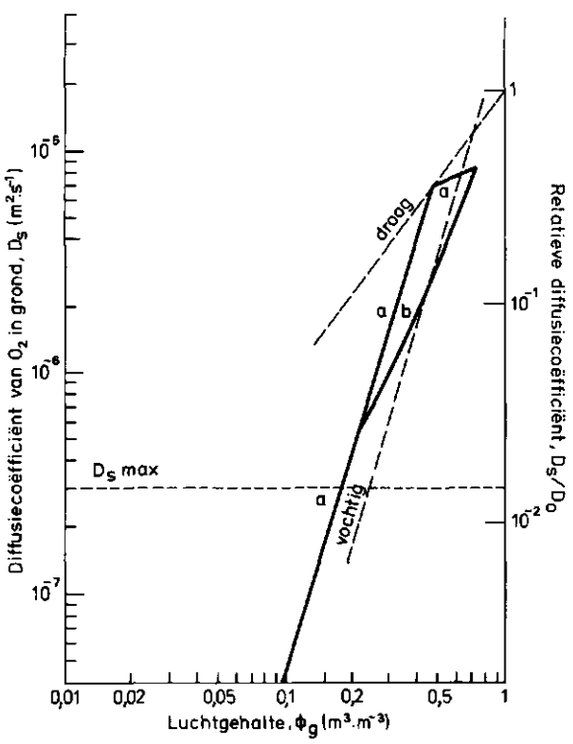

Fig. 4. Invloed aggregatie op diffusiecoëfficiënten; D_s van circa bolvormig geaggregeerd materiaal (———) berekend naar MILLINGTON and SHEARER (1971) voor materiaal met een porositeit, ϕ = 0,67. Volumefractie poriën, tussen de aggregaten ϕ_{vi} = 0,44 en volumefractie van de aggregaten ingenomen door poriën ϕ_{va} = 0,43 (m^3/m^3 aggregaat).
a = poriën in aggregaten gaan water verliezen als alle poriën tussen de aggregaten leeg zijn.
b = vanaf ϕ_g = 0,22 draineren de poriën in de aggregaten even snel als die ertussen.
----- = D_s in enkelkorrelstructuur naar formule (26), ϕ vochtig materiaal = 0,67.

Diffusiecoëfficiënten van harde geaggregeerde materialen, zoals puimsteenkorrels en lichtgebakken aggregaten van verschillende kleigronden, zoals gegeven door CURRIE (1961b) passen perfect in de op boven beschreven wijze berekende relaties (Figuur 5). In de $D_s(\phi_g)$-relaties van niet tot sterk samengedrukte aggregaten uit permanent klei-grasland (CURRIE, 1984) (zie Figuur 5) vindt men dezelfde tendenzen, maar het niveau van D_s ligt lager, ook van het luchtdroge materiaal. In deze droge zware klei-aggregaten zal de remming van de diffusie door de poriewanden zeker van invloed zijn.

Bioporiën

Bodemdieren, o.a. wormen, maar ook plantenwortels laten meer of minder doorlopende gangen in de grond achter. Deze worden praktisch niet door water geblokkeerd en hun aandeel in de totale diffusiemogelijkheid is vooral in nattere grond relatief hoog.

De totale diffusie is weer als som te beschouwen van de aanwezige poriënsystemen afzonderlijk. Aangenomen dat in grond met een enkelkorrelstructuur $D_s/D_o = \phi^{-2}\phi_g^{3,4}$ (formule (26)). Dan is in diezelfde grond

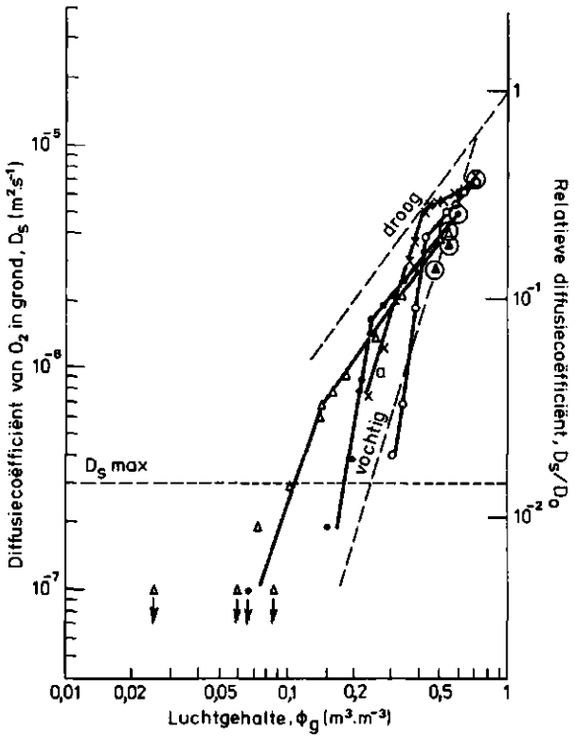

Fig. 5. Gemeten diffusiecoëfficiënten in geaggregeerde materialen.
(x) = gebakken aggregaten (meting CURRIE, 1961) met de berekende lijn a voor dezelfde porieverdeling (= lijn a, figuur 4).
o • Δ = monsters verschillend dicht gepakte aggregaten (diameter à 2 mm) zware klei (clay loam) uit permanent grasland.
Lijn 1, 2 en 3 voor ϕ = 0,67, 0,57 en 0,51. ϕ_{vi} = 0,42, 0,25 en 0,14 en ϕ_{va} is in alle gevallen 0,42 (meting CURRIE, 1984).
○ = totaal droog materiaal
⊘ = droge aggregaten zandige klei (siltloam) uit bouwvoor (BALL, 1981b).
----- = D_s in enkelkorrelstructuur naar formule (26), ϕ vochtig materiaal = 0,67.

met een fractie van ϕ_{gg} met luchtgevulde doorlopende gangen bij benadering

$$D_s/D_o = \phi_{gg} + (\phi - \phi_{gg})^{-2} (\phi_g - \phi_{gg})^{3,4}$$

en voor ϕ_{gg} <0,005

$$D_s/D_o = \phi_{gg} + \phi^{-2}\phi_g^{3,4} \qquad (29)$$

Zoals te zien in Figuur 6 blijkt deze theorie redelijk in overeenstemming met de waargenomen diffusiecoëfficienten.

Poriëngrootteverdeling

NIELSON and ROGERS (1982) en NIELSON et al. (1984) doen pogingen om de invloed te schatten van de poriëngrootteverdeling op de $D_s(\phi_g)$-relatie, voor het geval dat grote en kleine poriën willekeurig verdeeld voorkomen (dus geen apart stelsel van grotere poriën). D_s/D_o wordt berekend uit de frequentie van voorkomen van alle mogelijke

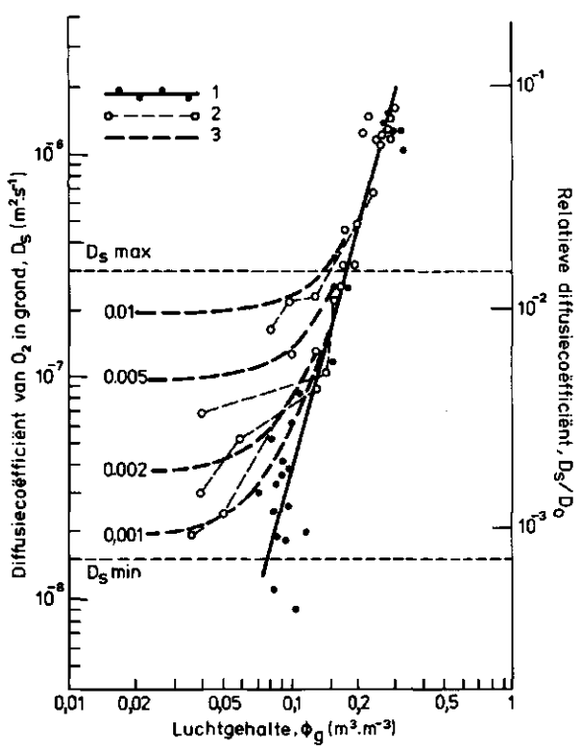

Fig. 6. Invloed doorlopende gangen of scheuren op D_s.
1 = fijnzandige zavel kunstmatig ingevuld ϕ = 0,50. Best passende relatie: $D_s/D_o = 4,9\ \phi_g^{3,4}$.
2 = zelfde zavel na intensieve doorworteling van een gewas stamslabonen (waarnemingen aan één monster met elkaar verbonden).
3 = relatie voor de zavel (1), waarin 0,001 tot 0,01 m^3 doorlopende gang/m^3 grond (= ϕ_{gg}), berekend met $D_s/D_o = \phi_{gg} + 4,9\ \phi_g^{3,4}$.

combinaties van op elkaar aansluitende poriën van de verschillende diameters en het al of niet gevuld zijn met water van de diverse poriënmaten. Aangenomen wordt dat als de grond vochtig is, het water zich in een film langs de wanden van alle poriën bevindt en de porie vult als de filmdikte gelijk wordt aan de straal van de porie. Zij vinden bij eenzelfde luchtgehalte dat de diffusiecoëfficiënt in een vochtige grond met een grote variatie in poriëngrootte gemiddeld 2 à 3 maal lager kan zijn dan in een grond met een meer uniforme poriëngrootte (Figuur 7). De verklaring hiervoor is dat bij gelijke volumenfracties grote en kleine poriën er een lager aantal grote poriën is; de kans dat grote poriën op elkaar aansluiten is daardoor ook lager. Als de kleine poriën waarop een grote porie wel aansluit gevuld raken met water dan wordt het relatief groot volume lucht in de grote porie voor gastransport afgesloten.

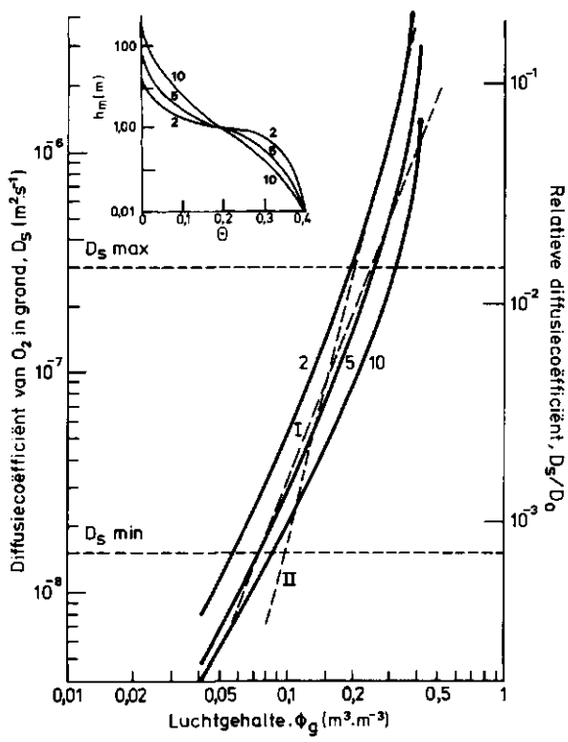

Fig. 7. Invloed poriëngrootteverdeling op D_{O_2s} (herleid uit berekeningen voor radon diffusie van NIELSON and ROGERS et al. (1982) en (1984). 2, 5 en 10 = geometrische standaard-deviatie van een log-normale poriëngrootteverdeling resulterend in bepaalde vochtkarakteristieken (inzet). 2 is kleine, 10 is grote variatie in poriëngrootte. Lijn I en II zijn representatieve relaties voor structuurloze zanden respectievelijk zavels (Zie ook Figuur 17).

Ook bevat de grond tussen de grote poriën een lager volume poriën dan wanneer alle poriën van dezelfde grootte waren. Het niveau van de berekende D_s-waarden tussen ϕ_g = 0,15 à 0,30 is wel reëel, maar bij hoge ϕ_g-waarden ligt de berekende D_s iets boven de normaal voorkomende waarden.

Testmetingen aan diverse gronden met sterk verschillende poriëngrootteverdeling geven NIELSON et al. (1984) niet.
Vergelijken we de relaties met door ons gemeten relaties voor zand en voor zavels (lijn I, respectievelijk lijn II, Figuur 7) met een enkelkorrelstructuur, dan is het feit dat bij lage ϕ_g-waarden D_s van zavels lager is dan van zand, met de theorie van NIELSON in overeenstemming. Bij hogere ϕ_g-waarden wordt de berekende tendens beslist niet teruggevonden.

Gelaagdheid

Een dunne laag dichtere grond in een monster, heeft een lager luchtgehalte en vaak een ongunstiger $D_s(\phi_g)$-relatie dan de rest van het monster. De diffusiecoëfficiënt over het hele monster berekend kan daardoor zeer sterk dalen (Figuur 8).

Verandering van structuur

In zwellende en krimpende grond kan bij toename van ϕ_g door uitdrogen de pakking dichter worden en kunnen scheuren ontstaan of groter worden. Verder kunnen variaties in ϕ_g het gevolg zijn van meer of minder

dicht zijn van de grond. Bij iedere waarde van ϕ_g hoort dan een andere waarde van ϕ en soms zelfs van de aggregatie-toestand. Bij het schatten van de $D_s(\phi_g)$-relaties moet hiermee terdege rekening worden gehouden.

In dit rapport wordt de nadruk gelegd op het voorspellen van de diffusiecoëfficiënt in een bepaalde grond vooral als functie van het luchtgehalte en de geometrie van de met luchtgevulde poriën. Het omgekeerde, namelijk dat de diffusiecoëfficiënt een aanwijzing is voor de geometrie van het poriënstelsel kan ook worden toegepast. Zo benut BALL (1981a) de waarden van D_s en ϕ_g in combinatie met de luchtdoorlatendheid om de poriediameters en de kronkeligheid (m porie per m monster) van de doorgaande met luchtgevulde poriën te berekenen.

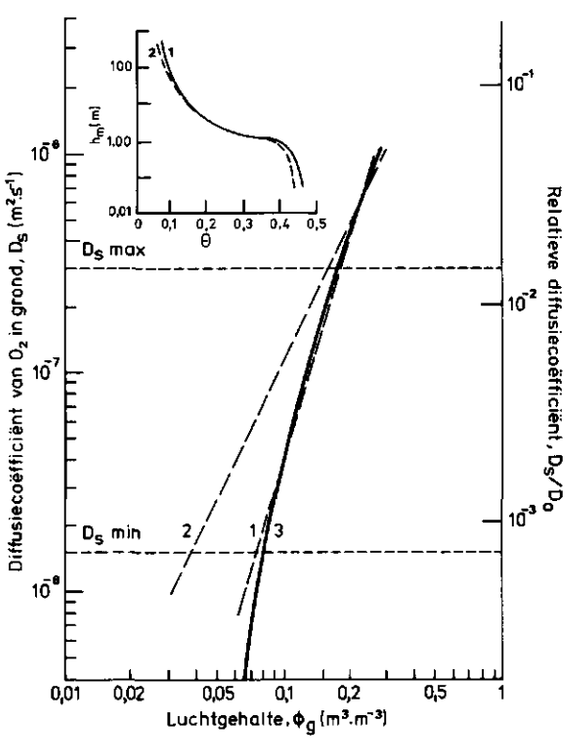

Fig. 8. $D_s(\phi_g)$-relatie (3) van een monster bestaand uit 1 cm verslempte grond en 4 cm niet-verslempte grond met respectievelijk ϕ = 0,47 en D_s/D_o = 5 $\phi_g^{3,4}$ (1) en ϕ = 0,51 en D_s/D_o = 0,8 $\phi_g^{2,1}$ (2). Inzet vochtkarakteristiek van 1 en 2.

2.6. Empirische relaties tussen D_s en ϕ_g

In de literatuur worden verschillende functies benut om de empirische relaties tussen de relatieve diffusiecoëfficiënt D_s/D_o en het luchtgehalte te beschrijven, te weten:

$$D_s/D_o = a\,\phi_g \qquad (30)$$

$$= a\,(\phi_g - b) \qquad (31)$$

$$= a\,\phi_g^{\,b} \qquad (32)$$

$$= \left(\frac{\phi_g - b}{1 - b}\right)^c \qquad (33)$$

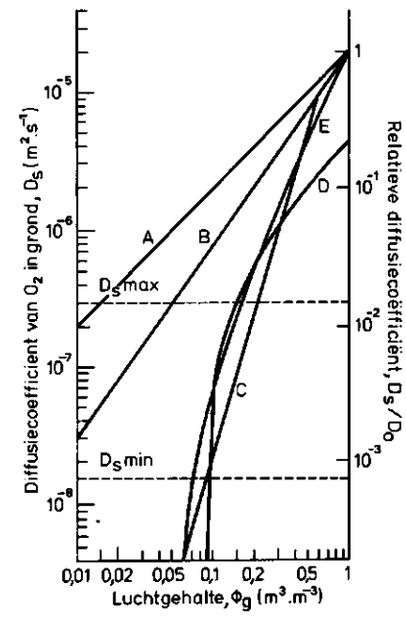

Fig. 9. Diverse functies waarmee relaties tussen D_s en ϕ_g worden beschreven; dubbel logaritmisch uitgezet.

A. $D_s/D_o = \phi_g$ (rechte capillairen)

B. $D_s/D_o = \phi_g^{1,4}$ (droge enkelkorrelstructuren)

<u>vochtige grond</u>

C. $D_s/D_o = a\phi_g^{\,b}$. Hier: 2,8 $\phi_g^{3,4}$

D. $D_s/D_o = a(\phi_g - b)$. Hier: 0,25 $(\phi_g - 0{,}09)$

E. $D_s/D_o = (\phi_g - b)^c/(1-b)^c$. Hier: $(\phi_g - 0{,}05)^2/(1-0{,}05)^2$.

In Figuur 9 zijn deze op dubbel logaritmische schaal gegeven. Voor een overzicht, zie BAKKER and HIDDING (1970) en TROEH et al. (1982).

Het luchtgehaltetraject waarvan D_s is gemeten, heeft invloed op de keuze van de functie waarmee men de relatie beschrijft. Over een korter traject bij hogere luchtgehalten zijn de resultaten wel met een lineaire functie te beschrijven. Dat na extrapolatie beneden een bepaald luchtgehalte de diffusie nul is, wordt gegeven door b in functie $Ds/D_o = a\ (\phi_g - b)$. In werkelijkheid wordt vaak bij een luchtgehalte lager dan b de diffusie nul.

Wordt over grotere luchtgehaltetrajecten gemeten of beschikt men over veel waarnemingen bij lage luchtgehalten, dan is de relatie duidelijk niet lineair maar heeft de vorm van een kromme (Figuur 10a). Deze is goed te beschrijven met functies van de vorm $D_s/D_o = a\ \phi_g{}^b$ waarin a zowel groter als kleiner dan 1 kan zijn. Tussen a en b kan een vaste relatie bestaan. STEPNIEWSKI (1983) vindt voor de diverse bodemlagen van akkerland op löss, de relatie $a = 0{,}22\ b^2$, waarbij b varieert tussen 1,0 en 3,5.

Bij lineair uitzetten van de gemeten waarden van D_s en ϕ_g zijn de voor aëratie zo belangrijk lagere D_s-waarden nauwelijks meer te onderscheiden van nul, en ook het voorkomen van totale blokkering van de met luchtgevulde poriën is niet te zien. Bij dubbel logaritmisch uitzetten, waaraan wij de voorkeur geven, heeft men deze problemen niet, bovendien wordt de functie $a\ \phi_g{}^b$ als rechte lijn weergegeven (Figuur 10b). Wel

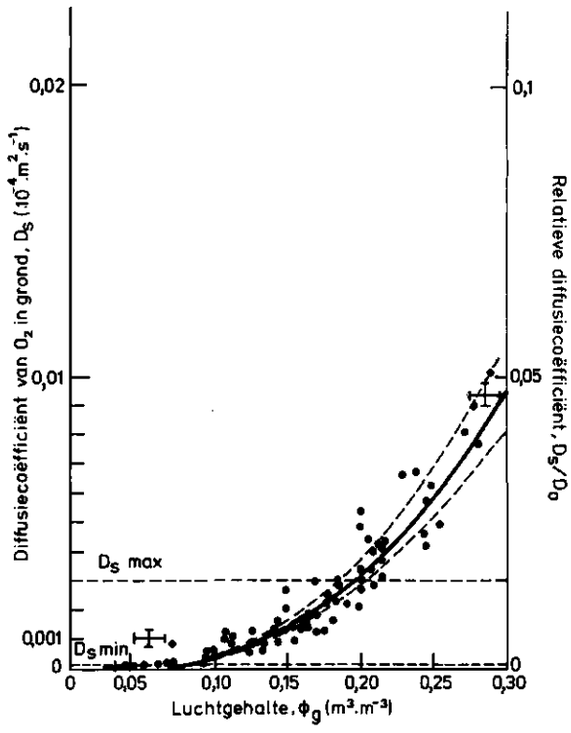

Fig. 10a. Gemeten waarden van D_s en ϕ_g in een zwak geaggregeerde zavel (5, Bijlage 2a) met de nauwkeurigheid van de ϕ_g en D_s-bepaling, en van de best passende lijn: $D_s = 0{,}25.10^{-4}\phi^{2,7}$ (R = 0,96). Aangegeven zijn de grenzen waarbinnen met 95% zekerheid deze lijn ligt.

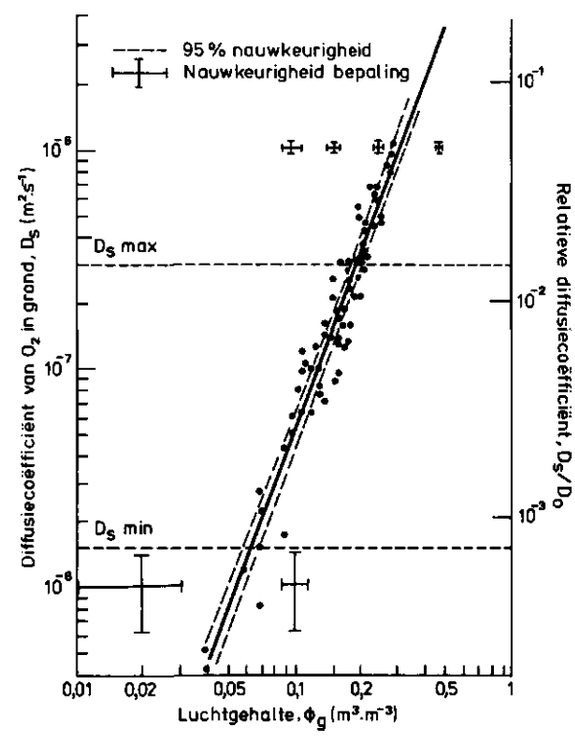

Fig. 10b. Is Figuur 10a op log log-schaal.

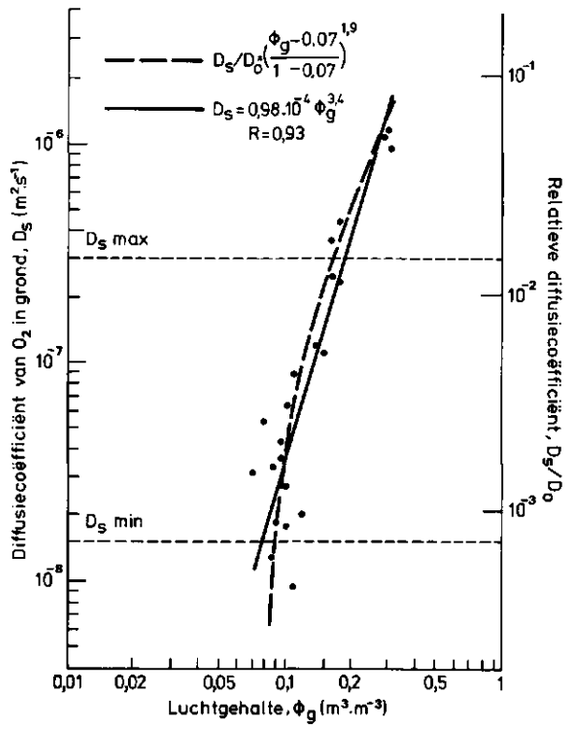

Fig. 11. In grond met hogere percentages geblokkeerde poriën kan de $D_s(\phi_g)$--relatie het best beschreven worden met een functie met de vorm:

$$D_s/D_o = \left(\frac{\phi_g - b}{1 - b}\right)^c$$

Ingetekend: gemeten waarden van een lichte zavel, vochtig gezeefd (3a, Bijlage 2a).

moet men er op bedacht zijn dat absoluut gezien kleine afwijkingen en meetfouten (zie 3.2.3.) in de zeer lage waarden van D_s, de ligging van de best passende rechte lijn a ϕ_g^b relatief sterk beïnvloeden.

Als de best passende functie bij de gemeten waarden van ϕ_g en D_s wordt genomen de functie waarvoor (log berekende $D_s)^2$ - (log gemeten $D_s)^2$ minimaal is. Het is ook mogelijk de best passende lijn te berekenen bij de waarden zelf van ϕ_g en D_s (CURRIE, 1984).

TROEH et al. (1982) stellen voor de functie

$$D_s/D_o = \left(\frac{\phi_g - b}{1 - b}\right)^c$$

te gebruiken:

Deze voldoet aan de realiteit in zover dat in zuivere lucht (ϕ_g = 1,0) $D_s = D_o$ en dat bij het luchtgehalte waarbij volledige blokkering optreedt (= b) D_s = 0. Minder reëel is dat uit de formule volgt dat het luchtvolume b ook bij het droger worden van de grond niet "meedoet" voor het diffusietransport. Als een volume-fractie van 0,05-0,10 geblokkeerd is, past deze functie in het vochtige traject evenwel goed bij de waarnemingen (Figuur 11). Deze lijn is, zoals door TROEH et al. (1982) wordt voorgesteld, op het oog gekozen uit een serie lijnen met verschillende waarden voor b en c.

Uit het voorgaande blijkt dat de relatie tussen ϕ_g en D_s voor verschillende pakkingen en van zeer natte grond tot droge grond met geen van de opgesomde functies volledig is te beschrijven. Er moet dus gebruik gemaakt worden van een reeks van functies, te weten:

- voor droge gronden: $D_s/D_o = \phi^b$
  (soms ook: $D_s/D_o = a\,\phi^b$)
- voor vochtige grond:
  a. niet en zwak geaggregeerde gronden (formule (31)):
  $$D_s/D_o = a\,\phi_g^b$$
  (met andere waarden voor a en b dan voor droge grond)
  b. sterk geaggregeerde gronden: met twee op elkaar aansluitende stukken van de vorm $D_s/D_o = a\,\phi_g^b$
  c. bij relatief hoog volume ingesloten lucht (formule (32)):
  $$D_s/D_o = \left(\frac{\phi_g - b}{1 - b}\right)^c$$
- d. na volledige blokkade van de luchtporiën (formule (24)):
  $D_s = \gamma D_w\, a\, \phi^b.\phi/\phi_w$

3. METHODEN

3.1. VOORKOMENDE BEPALINGSMETHODEN D_s

Aangezien de diffusiecoëfficiënt de evenredigheidsfactor is tussen massaflux en concentratiegradiënt moeten alle bepalingsmethoden berusten op bepaling van deze twee grootheden.

Bij stationaire meetmethoden wordt de concentratiegradiënt constant gehouden. Bijvoorbeeld door aan één kant van een bodemmonster een bakje te bevestigen met een vloeistof waarvan de damp via het monster naar de vrije lucht diffundeert. Door weging wordt de gediffundeerde hoeveelheid gas bepaald (PENMAN, 1940; met CS_2 als diffunderend gas).

Bij niet-stationaire methoden neemt de concentratiegradiënt in de tijd af. Bijvoorbeeld als een monster wordt geplaatst tussen twee kamers gevuld met gas van verschillende samenstelling: uit de verandering van de concentratie van één van de aanwezige gassen in die kamers met de tijd wordt de flux en de concentratie berekend. REIBLE and SHAIR (1982) gebruiken hierbij als meetgas SF_4, SALLAM et al. (1984) freon. Beide gassen worden gaschromatografisch bepaald. BALL et al. (1981) gebruiken krypton 85, dat wordt gemeten door bepaling van de radio-activiteit.

Ook kan het monster aan één zijde aan de vrije lucht worden geëxposeerd en aan de andere zijde aan een daarvan afwijkend gas in een kap. Dit wordt o.a. gedaan door CURRIE (1960) die als meetgas H_2 gebruikt, TAYLOR (1949) en BAKKER and HIDDING (1970), die de kap vullen met N_2 respectievelijk O_2 waarbij de O_2-concentratie in de kap wordt gevolgd en DE JONG et al. (1983) die als meetgas krypton 85 gebruiken.

Een andere methode is dat het monster aan een zijde wordt afgesloten en wordt gevuld met bijvoorbeeld N_2. De zuurstofdiffusie vanuit de vrije lucht in het monster wordt bepaald door O_2-meting in het monster (PAPPENDICK and RUNKLES, 1965). Wel is bij deze methode het luchtgehalte van het monster een noodzakelijk gegeven.

Wat betreft de keuze van het meetgas: elk gas dat niet sterk in water oplost en gemakkelijk is te meten, is te gebruiken. Aan het gebruik van zuurstof kleeft het bezwaar dat zuurstof in het monster kan worden geconsumeerd. De hierdoor veroorzaakte fout (D_s tot circa 4.10^{-10} $m^2.s^{-1}$; BAKKER and HIDDING, 1970) ligt normaliter beneden de overige onnauwkeurigheden van de meting.

Voor alle metingen aan grondmonsters geldt dat massastroming zorgvuldig moet worden vermeden, zelfs turbulentie van lucht aan een zijde van een monster met wat grotere scheuren kan grote fouten veroorzaken (DE JONG et al., 1983).

3.2. GEBRUIKTE BEPALINGSMETHODEN D_s

3.2.1. Meting

De auteurs gebruikten de door BAKKER and HIDDING (1970) beschreven methode waarbij als meetgas zuurstof fungeert. De diffusiecoëfficiënt van zuurstof in grond wordt bepaald aan monsters in ringen van 5 cm hoog en met een diameter van 5 cm (Boekel), 7,7 cm (Boone) of 7,7 en 14 cm (Bakker). De 14 cm monsterringen worden gebruikt voor heterogene gronden en voor makkelijk samendrukbare grond, bijvoorbeeld losse bouwvoor. Meestal is gebruik gemaakt van ongestoorde monsters die met behulp van deze ringen in het veld genomen zijn; bij

gestoorde monsters werd de grond in de ringen ingevuld en op een bepaalde dichtheid gebracht. Gewoonlijk werd de diffusiecoëfficiënt bepaald bij meer luchtgehalten, verkregen door de monsters na verzadiging op verschillende vochtspanningen te brengen of door uitdrogen c.q. bevochtigen van het veldvochtig monster. Op de gevulde monsterring wordt een kap bevestigd met een inhoud van ½ tot 2x de inhoud van het monster. De kap wordt met 80 à 100% zuurstof (Bakker en Boone) of met stikstof (Boekel) gevuld. Door diffusie van zuurstof naar de buitenlucht respectievelijk vanuit de buitenlucht daalt respectievelijk stijgt het zuurstofgehalte in de kap. Wanneer het zwaardere gas O_2 zich boven het lichtere gas N_2 bevindt, treedt in de kap vermenging op door de zwaartekracht. Is dit niet het geval dan zal bij een hoge D_s de diffusieweerstand in de kap merkbaar worden. Wanneer de hoogte van de kap gelijk is aan de hoogte van het monster zullen hierdoor bij D_s/D_o = 0,1 de waarden 5% en voor D_s/D_a = 0,01 0,5% te laag worden bepaald. De zuurstofconcentratie wordt door een in de kap aangebrachte polarografische zuurstofelectrode (Figuur 12a) één tot meer uren continue geregistreerd (bij Boekel tegelijkertijd 12 bij Bakker 5 electroden). Bij Boone worden nadat 10-20 kappen met zuurstof zijn gevuld, kleine compartimenten (3 per kap) op verschillende tijdstippen gesloten. De zuurstofconcentratie in de compartimenten wordt naderhand polarografisch bepaald, waarbij het gas uit het compartiment verkregen wordt door water in te brengen (Figuur 12b). De bepalingsduur (1 tot 24 uur) wordt aangepast aan de snelheid waarmee de concentratie verandert. Boone meet van elk monster eerst de luchtdoorlatendheid K_a en kiest op grond daarvan de meetduur (een lage K_a gaat vaak samen met een lage D_s). Na de diffusiemetingen worden van de monsters de volume-fracties aan poriën, water en lucht bepaald.

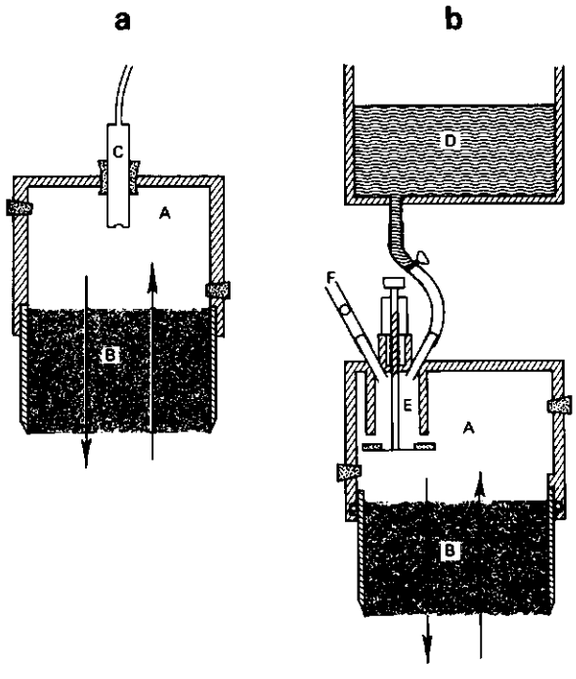

Fig. 12. Schema apparatuur voor D_s-meting gebruikt door Bakker en Boekel (a) en door Boone (b).
A = kap gevuld met O_2 of N_2, B = grondmonster in ring van 5 à 15 cm diameter, C = zuurstofmeetelectrode, D = container met water, E = afsluitbaar monsterkamertje, F = buisje voor gasmonstername.

3.2.2. Berekening

Wanneer de berging van zuurstof in het monster wordt verwaarloosd, dan is het zuurstoftransport door het monster te beschrijven met:

$$\frac{dM}{dt} = - D_s \frac{\Delta\chi}{h_s} A \qquad (34)$$

waarin:

$\Delta\chi$ = concentratieverschil tussen beide uiteinden van monster ($kg.m^{-3}$ bodemlucht)

h_s = hoogte van het monster (m)

M = massa gas (kg)

A = oppervlakte monsterdoorsnede (m^2), loodrecht op de transportrichting

De hoeveelheid gas die per tijdseenheid diffundeert is te berekenen uit de concentratie-verandering in de kap $d\chi_c$ en het volume van de kap $h_c.A$ volgens:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d\chi_c}{dt} h_c A \qquad (35)$$

Bij het combineren van de formules (34) en (35) krijgen we:

$$\frac{D\chi_c}{dt} h_c A = D_s \frac{\Delta\chi}{h_s} A \qquad (36)$$

Bij de oplossing van deze vergelijking voor de randvoorwaarden

$t = t_1$ $\qquad$ $t = t_2$

$\Delta\chi = \Delta\chi_{t_1}$ $\qquad$ $\Delta\chi = \Delta\chi_{t_2}$

krijgen we:

$$D_s = \frac{h_s h_c}{t_2 - t_1} \cdot 2{,}303 \log \frac{\Delta\chi_{t_1}}{\Delta\chi_{t_2}} \qquad (37)$$

Volgens formule (37) is er een lineaire samenhang tussen t en log $\Delta\chi_t$. D_s wordt berekend uit 2 of 3 tijdsintervallen. De bovenstaande semi-stationaire oplossing geeft iets lagere waarden voor D_s (bijvoorbeeld 6% bij ϕ_g = 0,30) dan de niet-stationaire oplossing, waarin ook de zuurstofberging in het monster wordt betrokken. Om dit te corrigeren moet de met de formule (37) berekende waarde van D_s worden vermenigvuldigd met de factor

$$1 + 0{,}342 \frac{\phi_g . h_s}{h_c} \qquad \text{(BAKKER and HIDDING, 1970)}$$

3.2.3. Nauwkeurigheid van de metingen en van de best passende berekende lijn

Wordt de meetduur aan D_s aangepast, dan is bij zorgvuldige meting de nauwkeurigheid bij $D_s = 10^{-8}\ m^2.s^{-1}$: $\pm 0{,}15.10^{-8}\ m^2.s^{-1}$ en bij $D_s = 10^{-6}\ m^2.s^{-1}$: $\pm\ 4{,}10^{-8}\ m^2.s^{-1}$ (BAKKER and HIDDING, 1970). Bij routinematige metingen kan de onnauwkeurigheid van de enkele meting oplopen, bij $D_s = 10^{-8}\ m^2.s^{-1}$ tot $\pm\ 0{,}4.10^{-8}\ m^2.s^{-1}$. De nauwkeurigheid van de bepaling van het luchtgehalte, ϕ_g, is circa 0,01. Deze waarden zijn in Figuren 10a en b aangegeven. Hierin zijn ook de grenzen aangegeven waarbinnen met 95% waarschijnlijkheid de bij de in deze figuur gegeven waarnemingen berekende lijn ligt, volgens de test van Student.

3.3. TESTMETINGEN

Om de vergelijkbaarheid van de door de drie auteurs gebruikte meetmethoden te testen is in 1981 gelijktijdig en op dezelfde plaats door ieder een serie monsters genomen waarvan D_s werd bepaald. De monsternameplek was een perceel mais op sterk verdicht lemig zeer fijnzandig zand waar de invloed van verdichting van de bouwvoor op de groei van mais werd bestudeerd (nr. 7a van Bijlage 2b). Binnen het betrouwbaarheidsinterval van 95% was geen verschil tussen de uitkomsten van de drie auteurs te onderscheiden.

4. MATERIAAL

Het grootste deel van de metingen is uitgevoerd in het kader van aëratieonderzoek als onderdeel van breder onderzoek.

Zoals het onderzoek van: De waterhuishouding en ontwatering van landbouwgronden, verslemping van de lichtere gronden, ploegzolen, verdichting van de bouwvoor door berijding, akkerbouw met minimale grondbewerking, het vereiste bodemmilieu voor straatbomen. Een overzicht van de objecten is in Bijlage 1 gegeven.

De diffusiecoëfficiënten en de luchtgehalten werden in een aantal gevallen bepaald bij een hele reeks vochtspanningen (= drukhoogte van het bodemwater) en van praktisch alle gronden bij veldvochtgehalte en bij een drukhoogte van -100 cm. Een bepaalde drukhoogte werd verkregen door de monsters te verzadigen, waartoe ze 1 à 2 dagen tot halverwege het monster in het water werden gezet, en daarna op de pF-bak met de gewenste drukhoogte te plaatsen tot evenwicht bereikt was (minstens 2 dagen). Bij enkele series zijn bepaalde luchtgehalten gecreeërd door toevoegen van water (hoe de luchtgehalten zijn verkregen, is in Bijlage 2 vermeld).

Verder zijn van de onderzochte gronden bekend (Bijlage 1 en 2): het organische stofgehalte, de textuur, de porositeit (ϕ), de drukhoogte (h_m) bij de meting, de vochtkarakteristiek, het gebruik en behandeling van de grond en een, meestal globale, structuurbeschrijving. Er ontbreken structuurkenmerken, zoals grootte, aantal en continuïteit van poriën, scheuren, wormgangen en dergelijke, die te gebruiken zouden zijn om $D_s(\phi_g)$-relaties te berekenen.

5. RESULTATEN

5.1 ALGEMEEN

Van de gemeten relaties tussen D_s voor O_2 en het luchtgehalte ϕ_g zijn er circa 100 nader geanalyseerd.

Het bleek dat op enkele uitzonderingen na, deze $D_s(\phi_g)$-relaties konden worden gegroepeerd tot 5 gemiddelde relaties, die representatief zijn voor de verschillende voorkomende structuren, of behandelingen. Daarom is gekozen voor rangschikking van het materiaal naar $D_s(\phi_g)$-relaties, waarbij wordt vermeld bij welke gronden en structuren de relatie is waargenomen.

Groepering naar textuur en organische stofgehalte, waarbij dan een bepaalde $D_s(\phi_g)$-relatie hoort, is niet mogelijk. Wel bepalen textuur en het gehalte en de soort organische stof, door hun invloed op o.a. structuurstabiliteit hoe de structuur, en ook ϕ_g, wordt beïnvloed door factoren, zoals berijden, bewerken, neerslag, uitdrogen en bevriezen. Om een schatting te kunnen maken van te verwachten D_s-waarden in een grond is, naast de $D_s(\phi_g)$-relatie kennis van de te verwachten ϕ_g nodig. Daarom is aandacht besteed aan hoe het waterhoudend vermogen, de drukhoogte van het bodemwater en de porositeit ϕ_g beïnvloeden.

Verder is het materiaal onderzocht op een eventuele invloed van de porositeit op de $D_s(\phi_g)$-relaties, zoals die volgens de theoretisch afgeleide relaties aanwezig zou moeten zijn.

5.2. INVLOED VAN POROSITEIT EN DRUKHOOGTE VAN HET BODEMWATER OP HET LUCHTGEHALTE VAN DE GROND

De volumefracties ingenomen door lucht (ϕ_g), door vaste delen (ϕ_s) en door water in en tussen die vaste delen (θ) nemen samen het gehele grondvolume in, dus:

$$\phi_g + \theta + \phi_s = 1 \qquad (38)$$

De verhouding van deze fracties, als functie van drukhoogte van het bodemwater en porositeit is te vinden in de vochtkarakteristieken (pF-curven). Voor Nederlandse gronden worden de vochtkarakteristieken gegeven door POELMAN en VAN EGMOND (1979), KRABBENBORG et al. (1983), BEUVING (1984) en VAN ZUILEN et al. (1985). Het luchtgehalte is af te lezen als verschil tussen de porositeit en de volumefractie water. De porositeit kan waarden hebben van 0,1 (bij mengsels waar de korrelgrootte- en mengverhoudingen zo gekozen zijn, dat de ruimten tussen de grote delen opgevuld worden door de kleinere delen en de ruimten daartussen door nog kleinere deeltjes, zoals bijvoorbeeld in beton en in asfaltwegdekken) tot 0,7 à 0,9 bij veen. In minerale gronden vinden we porositeiten van 0,3 in zeer compacte B-horizonten tot circa 0,6 in losse bouwvoren. De porositeit van minerale gronden is afhankelijk van sedimentatie en bodemvorming en in cultuurgronden ook van activiteiten als bewerken, berijden en betreden. Hoever een grond wordt verdicht door belasting is, behalve grootte en duur van de belasting, afhankelijk van de weerstand tegen vervorming en deze wordt weer bepaald door de reeds aanwezige dichtheid, de textuur, het organische-stofgehalte en de vochtspanning. Deze laatste twee factoren worden weer beïnvloed door het

verbouwen van gewassen en de ontwatering van het *profiel*.

Als de porositeit wordt verkleind door bijvoorbeeld samendrukken van de grond, dan is de afneming van het luchtgehalte van de grond in droge toestand uiteraard gelijk aan die van de porositeit. De luchtgehalten van grond in vochtige toestand dalen sterker dan de porositeit. De daling is sterker naarmate de vochtigheid van de grond groter is; dit geldt voor luchtgehalten hoger dan 2 à 3 volume % bij hogere drukhoogten van het bodemwater (nattere grond) en hoger dan 8 à 10 volume % bij lagere drukhoogten. Daling van de porositeit doet de luchtgehalten niet lager dan deze waarden dalen (Figuur 13). Verdere daling gaat dan ten koste van de poriën die bij de desbetreffende drukhoogten met water gevuld zijn.

Bij hogere luchtgehalten gaat de volumeafneming ten koste van de met luchtgevulde poriën en blijft de verhouding water/vaste delen constant, dus ook de vochtigheid w blijft constant.

In formule (38) geschreven voor θ:

$$w\,\frac{\phi_s \rho_s}{\rho_w} \quad \text{en} \quad \phi_s = 1 - \phi \quad \text{geeft}$$

$$\phi_g = \phi\left(1 + w\,\frac{\rho_s}{\rho_w}\right) - w\,\frac{\rho_s}{\rho_w} \qquad (39)$$

voor w is constant volgt uit 39:

$$d\phi_g / d\phi = \left(1 + w\,\frac{\rho_s}{f_w}\right) \qquad (40)$$

waarin:

ρ_w = volumieke massa water (= 1000 kg.m^{-3})

ρ_s = volumieke massa vaste delen (= 2600 à 2700 kg.m^{-3} voor minerale grond tot 1400 kg.m^{-3} voor veen).

Voor droge grond is $w\,\frac{\rho_s}{\rho_w}$ uiteraard nul. Bij veldcapaciteit (drukhoogte van het bodemwater = 0,1 m) zijn voorkomende waarden van $w\,\frac{\rho_s}{\rho_w}$: 0,25 van duinzand, 0,60 van lemig fijn zand, zavels en lichte klei, 1,0 van zware klei en 2-7 in venige gronden. Figuur 13 geeft waargenomen waarden van ϕ, ϕ_g en θ van twee gronden bij verschillende drukhoogten.

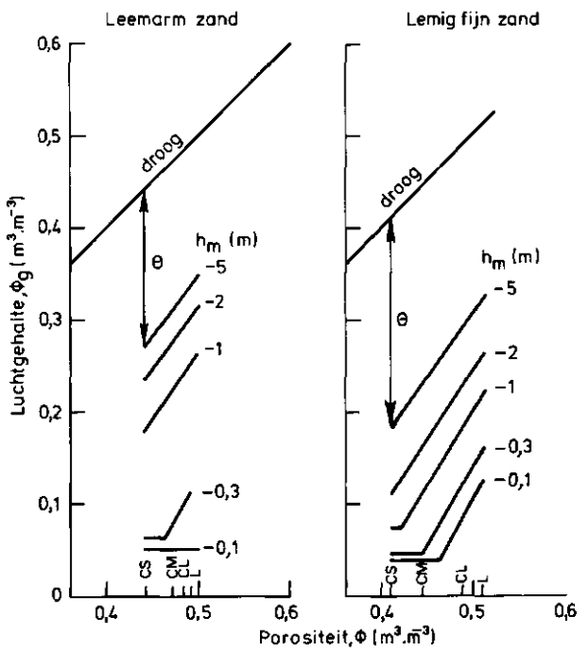

Fig. 13. Invloed van de porositeit (ϕ) op de volumefracties lucht (ϕ_g) en water (θ), bij drukhoogte (h_m) van -5 m tot -0,1 m van de bouwvoor van twee proefvelden.
L = niet bereden, tot CS = 3x zwaar bereden (naar BOONE et al., 1986).
Het leemarme zand is no. 8 van Bijlage 2b.

Het leemarme zand bevat niet zoveel water bij veldcapaciteit (h_m = -0,1m) dat het luchtgehalte door verdichting te laag wordt voor de normale gasuitwisseling in de grond. Het leemhoudende fijne zand met een hoger vochthoudend vermogen echter wel.

5.3. INVLOED VAN POROSITEIT EN VOCHTIGHEID VAN DE BODEM OP $D_s(\phi_g)$-RELATIES VAN DE ONDERZOCHTE GRONDEN

Als de theoretische $D_s(\phi_g)$-relatie gegeven in formule (26):
$D_s/D_0 = (\phi_g/\phi)^2\ \phi_g^{1,4} = \phi^{-2}\ \phi_g^{2,4}$ dubbellogarithmisch wordt uitgezet voor materiaal waarvan het luchtgehalte varieert door variatie in vochtigheid (gevolg van variatie van drukhoogte van het bodemwater) terwijl de porositeit constant blijft, dan zijn dit

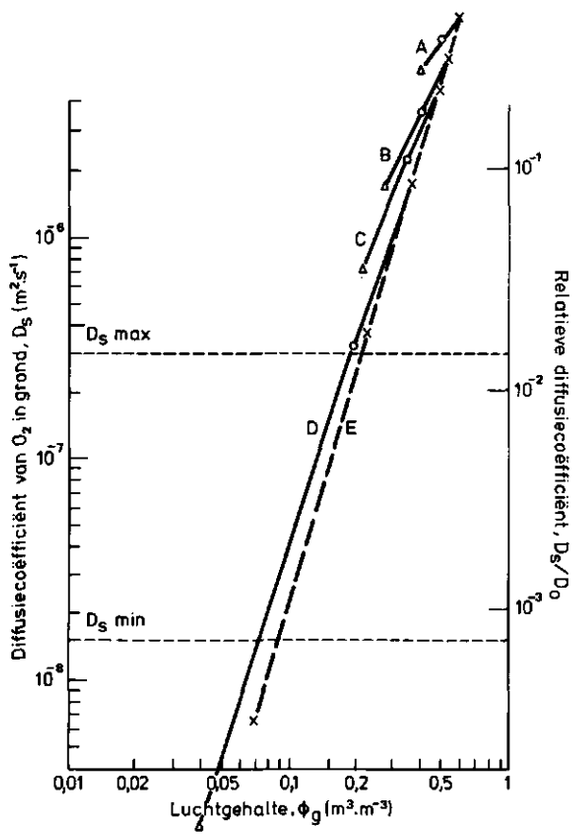

Fig. 14. $D_s(\phi_g)$-relaties volgens formule (26), als ϕ_g varieert door variatie in vochtigheid, w, en als ϕ_g varieert volgens formule (40) door variatie in porositeit.
(-----) = ϕ is constant 0,60, w varieert van 0,00 tot 0,50 g/g (E).
(———) = ϕ varieert tussen 0,40 (Δ), 0,50 (o) en 0,60 (x), w is constant: 0,0 (A), 0,075 (B), 0,11 (C) en 0,23 g/g (D).

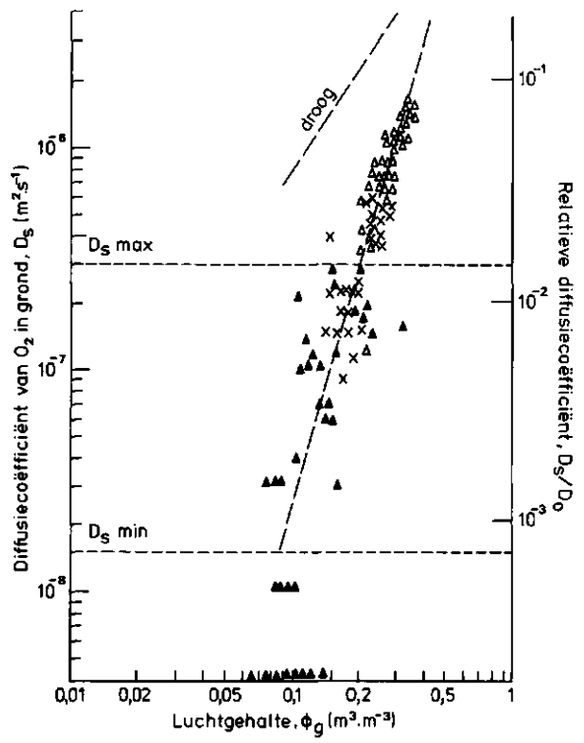

Fig. 15. Oorzaak van de ϕ_g-variatie is variatie van ϕ of variatie van vochtigheid. De invloed daarvan op de gemeten $D_s(\phi_g)$-relaties is nihil. Metingen aan een dalgrond (1b, Bijlage 2c). ϕ varieert tussen 0,45 en 0,56. De drukhoogtetrappen zijn h_m = -0,3 m (▲), -0,5 m (x) en -1,0 m (Δ).
(-----) = lijn volgens formule (26) voor ϕ = 0,56.

rechte lijnen met een richtingscoëfficiënt van 3,4. De lijnen voor materiaal waarvan het luchtgehalte verandert volgens formule (40) door variatie in porositeit, terwijl de vochtigheid constant blijft, zijn bij benadering rechten, waarvan de richtingscoëfficiënt lager is dan 3,4 naarmate de vochtigheid lager is; in droge grond is de richtingscoëfficiënt ten slotte 1,4 (Figuur 14).

In de door ons onderzochte vochtige minerale gronden met ϕ tussen 0,35 en 0,60 blijkt echter geen verschil te onderkennen tussen de $D_s(\phi_g)$-relaties van materiaal, waarbij ϕ_g varieert door variaties in voch-

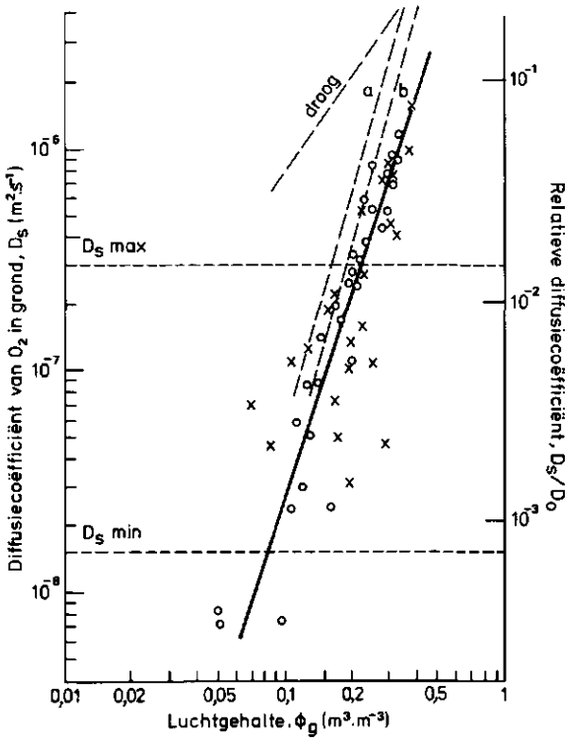

Fig. 16. Er is ook geen invloed van ϕ te vinden op het niveau van de $D_s(\phi_g)$-relaties. Metingen aan dichtgepakt duinzand ϕ = 0,38 (o) en losser duinzand ϕ = 0,47 (x) (1a + b, Bijlage 2a). De drukhoogte varieert in beide van -0,1 tot -2,0 m.
(———) = best passende lijn bij waarnemingen.
(-----) = met formule 26 berekende lijn voor ϕ = 0,38 (a) en voor ϕ = 0,47 (b).

tigheid en die waarbij ϕ_g varieert door variaties van ϕ. Figuren 15 en 16 geven daarvan illustraties.

Als grond weinig water bevat zou het relatief vlakke verloop van de relaties, als de vochtigheid ongeveer constant blijft (= de waarnemingen bij één vochtgehalte), vrij duidelijk moeten zijn ten opzichte van de lijn door de puntenzwermen samen, maar zelfs de tendens daartoe is meestal niet aanwezig (Figuur 15). Het aantonen van verschillen in richtingscoëfficiënt van de lijnen door de gemeten waarden is overigens moeilijk. In de drogere grond zijn de lijnen vrij kort omdat daar door variatie van ϕ de variatie van ϕ_g en D_s klein is. In nattere grond, waar die variatie wel groot is, is de afwijking van de richtingscoëfficiënt ten opzichte van de relatie voor constante ϕ niet groot meer (Figuur 14). Ook duidelijke verschillen in niveau van de lijn (factor a van $D_s = a\ \phi_g^b$) tussen de relaties van twee verschillende porositeiten van één grond werden niet gevonden (Figuur 16).

Hoewel in ons materiaal geen invloed van de porositeit te vinden was, moeten we erop bedacht zijn dat in materiaal met nog grotere variatie in ϕ deze invloed wel aanwezig kan zijn, zoals blijkt uit de gegevens van CURRIE (1984) (Figuur 5).

De empirisch bepaalde relaties voor structuurarme materialen vallen soms wel (Figuur 15) en soms niet (Figuur 16) samen met de theoretische lijnen. Opvallend is dat juist de empirische relaties van zeer uitgesproken enkelkorrelstructuren, zoals die van leemarme en humusarme zanden dat niet doen .

5.4. OVERZICHT $D_s(\phi_g)$-RELATIES IN GRONDEN MET VERSCHILLENDE STRUCTUREN

5.4.1. Representatieve relaties

Praktisch al het materiaal kon worden ingedeeld bij vijf groepen (Figuur 17) met een gemiddelde relatie van de vorm $D_s = a\ \phi_g^b$. Bij drie van de vijf groepen is ook de relatie van de vorm $D_s = D_o \left(\frac{\phi_g - b}{1 - b}\right)^c$ gegeven, om aan te duiden dat wanneer de ϕ_g-waarde tot b nadert veel D_s-waarden van praktisch nul worden gevonden.

De best passende relatie bij een reeks

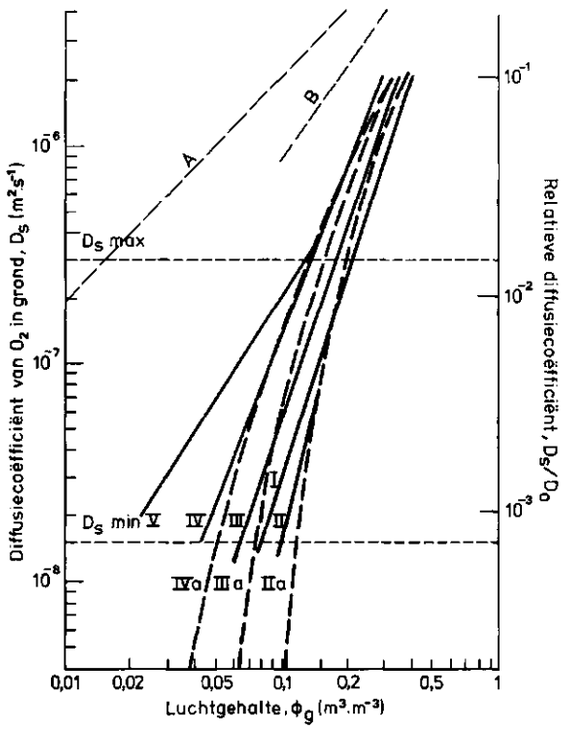

Fig. 17. Overzicht representatieve $D_s(\phi_g)$-relaties voor verschillende structuren, voor verklaring I t.m. V. Zie Figuur 18 t.m. 22.
----- Theoretische relaties
A. Recht doorlopende poriën
B. Droge enkelkorrelstructuren.

D_s-waarnemingen van een grond, verschilt meestal iets van de gemiddelde relatie voor de groep waarbij die grond is ingedeeld. De gemiddelde relatie ligt wel binnen de 95% nauwkeurigheidsgrenzen, waarmee de $D_s(\phi_g)$-relatie uit de enkele puntenzwerm kan worden bepaald (zie 3.2.3.). In Bijlage 2 is per groep waarnemingen zowel de best passende relatie als de representatieve gemiddelde relatie gegeven.

De representatieve relaties voor de vijf groepen zijn, als de diffusiecoëfficiënt van zuurstof in de gasfase alleen, D_o, $0,2.10^{-4}$ $m^2.s^{-1}$ bedraagt:

Lijn I (Figuur 18). Enkelkorrelstructuren met sterk uniforme korrelgrootte, zoals bij leem- en humusarme zanden:

$D_s = 0,3.10^{-4}\ \phi_g^{3,0}$.

Voorbeeld:

- schoon duinzand (1, Bijlage 2a).

Lijn II of IIa (Figuur 19). Enkelkorrelstructuren met grotere variatie in deeltjesgrootte, met meer blokkering van de luchtporiën in natte toestand dan bij groep I, waarschijnlijk door fijner materiaal wat tussen de grovere delen voorkomt:

$D_s = 1,5.10^{-4}\ \phi_g^{4,0}$ of

$$D_s = 0,2.10^{-4}\left(\frac{\phi_g - 0,1}{1 - 0,1}\right)^2$$

Voorbeelden:

- gemalen zavel (3b, Bijlage 2a)
- leemhoudend humeus grofzand heide ontgin-

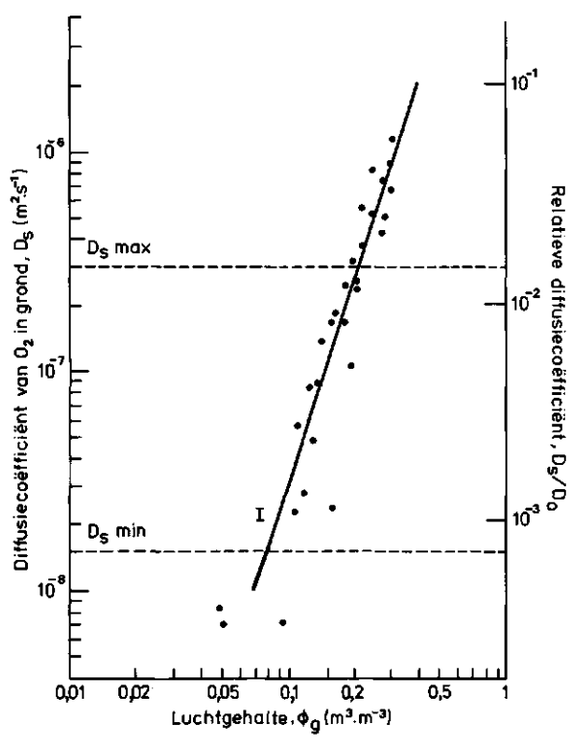

Fig. 18. Enkelkorrelstructuren met sterk uniforme korrelgrootte, zoals leem en humusarme zanden.
Lijn I: $D_s = 0,3.10^{-4}\ \phi_g^{3,0}$
- duinzand (1a, Bijlage 2a).

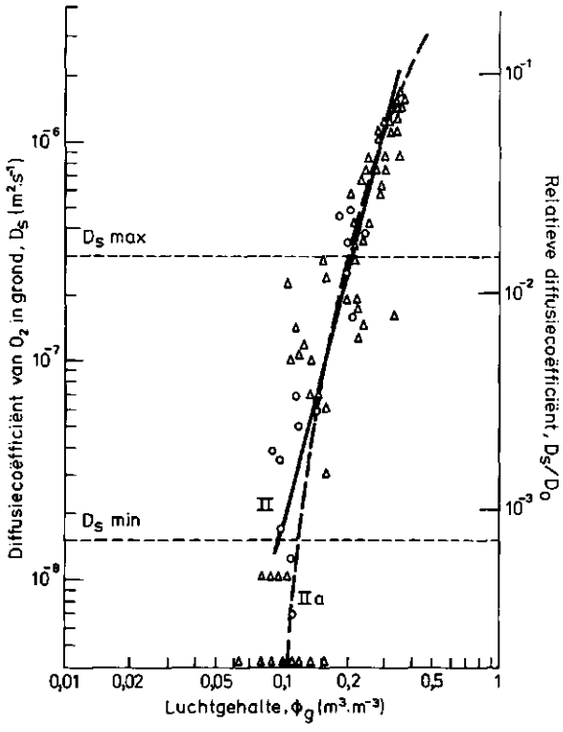

Fig. 19. Enkelkorrelstructuren met grovere en fijnere deeltjes.
Lijn II : $D_s = 1,5.10^{-4}\ \phi_g^{4,0}$
Lijn IIa:

$$D_s = 0,2.10^{-4}\left(\frac{\phi_g - 0,1}{1 - 0,1}\right)^2$$

o humeus lemig zand (2, Bijlage 2a)
Δ dalgrond (1b, Bijlage 2b).

ningsgrond Renkum (2, Bijlage 2a)

- zand en dalgronden in bakkenproeven (1a + 1b, Bijlage 2c).

Lijn III of IIIa (Figuur 20). Vrijwel alle structuurarme bouwvoren en ondergronden, bouwvoren van vele zandgronden, lichte zavels, verslempte of verdichte kleien en zavels en ploegzolen in zandgronden:

$D_s = 0,5.10^{-4}\ \phi_g^{3,0}$ of

$$D_s = 0,2.10^{-4}\left(\frac{\phi_g - 0,05}{1 - 0,05}\right)^2$$

Voorbeelden:

- kunstmatig ingevulde zavel (3a, Bijlage 2a).
- verslempte zavels en kleien (8b, Bijlage 2a).
- zware zavel na verdichting door berijding (5g en 5 h, Bijlage 2b).
- zandgronden Heino (8, Bijlage 2b).
- zandgronden, N-Limburg (9, Bijlage 2a).
- lichte en zware kleien kunstmatig verdicht (1d en 1e, Bijlage 2c).

Lijn IV of IVa (Figuur 21). Duidelijk geaggregeerde materialen en in grond met weinig gangen en scheurtjes:

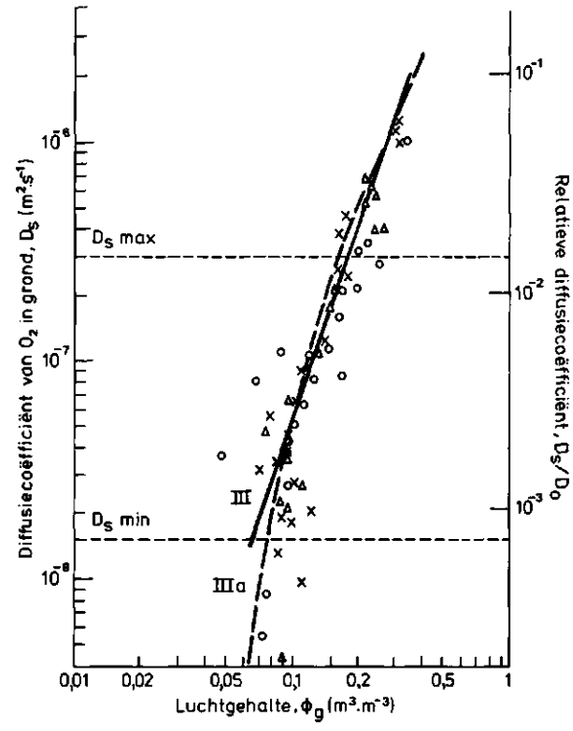

Fig. 20. Zwak en matig geaggregeerde bouwvoren en ondergronden.
Lijn III : $D_s = 0,5.10^{-4}\ \phi_g^{3,0}$
Lijn IIIa:

$$D_s = 0,2.10^{-4}\left(\frac{\phi_g - 0,05}{1 - 0,05}\right)^2$$

x gezeefde vochtige zavel (3a, Bijlage 2a)
o verslempte oppervlakte-laag van zavels en kleien (8b, Bijlage 2a)
Δ zandbouwland (8d, Bijlage 2b).

$D_s = 0,4.10^{-4}\ \phi_g^{2,5}$ of

$$D_s = 0,2.10^{-4}\left(\frac{\phi_g - 0,025}{1 - 0,025}\right)^2$$

Toename van gangen en scheuren bij hoge luchtgehalten doet D_s tot 50 à 100% boven deze lijn stijgen.

Voorbeelden:

- kasgrond, sterk humeus kleiig zand (4, Bijlage 2a)
- zavel na doorworteling (3c, Bijlage 2a)
- niet verslempte zavel en kleibouwvoren (7a, Bijlage 2a)
- geperste aggregaten zware klei (6a, Bijlage 2b)
- lichte klei, O-Flevoland 0-25 cm (7, Bijlage 2c)
- omgeploegde kunstweide op zand, Heino (9b, Bijlage 2b)
- lichte zavel ondergrond met sponsstructuur (1e en 2e, Bijlage 2b)
- mengsels van klei of slibbrokjes met schoon zand (10, Bijlage 2a)

Lijn V (Figuur 22). Verdichte zavels en kleien met gangen en scheuren:

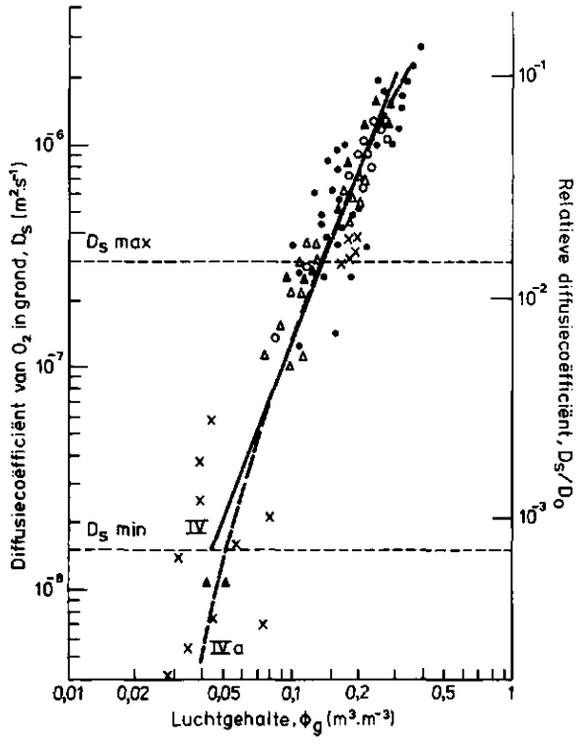

Fig. 21. Duidelijk geaggregeerde materialen
Lijn IV : $D_s = 0,4.10^{-4}\ \phi_g^{2,5}$
Lijn IVa:

$$D_s = 0,2.10^{-4}\left(\frac{\phi_g - 0,025}{1 - 0,025}\right)^2$$

x geploegde kunstweide op matig humeus zand (9, Bijlage 2b)
▲ zware klei, geperste aggregaten (6a, Bijlage 2b)
• bouwvoor lichte klei (5b, Bijlage 2c)
o bouwvoor niet-verslempte zavels en kleien (8a, Bijlage 2a).

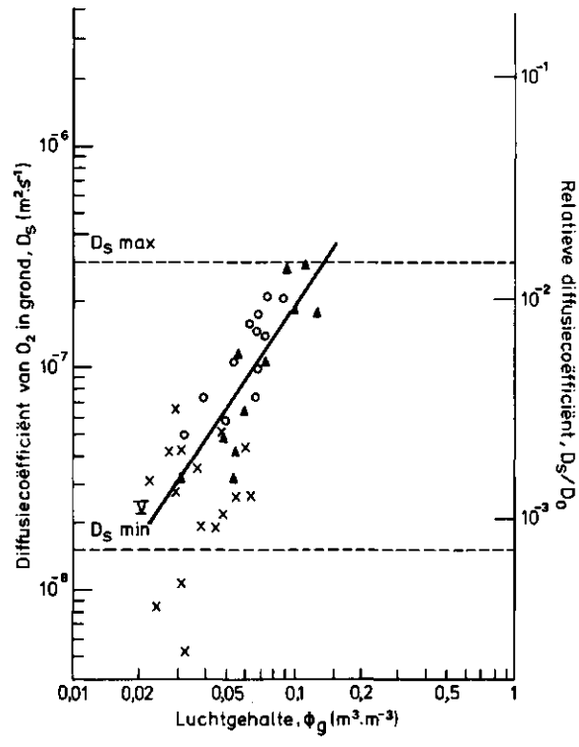

Fig. 22. Dichtere klei en zavelgronden met gangen en scheuren.
Lijn V: $D_s = 0,06.10^{-4}\ \phi_g^{1,5}$
▲ ploegzool in lichte zavel (4b, Bijlage 2b)
o bouwvoor langjarig niet-geploegd op zware zavel (2b, Bijlage 2b)
x bouwvoor langjarig niet-geploegd op zware klei (4b, Bijlage 2b).

$D_s = 0{,}06.10^{-4}\ \phi_g^{1,5}$.

Waarnemingen in het traject van ϕ_g 0,02 tot 0,15. Bij hogere ϕ_g geen waarnemingen (waarschijnlijk zal voor ϕ_g >0.15 relatie III-IV opgaan). De verschillen tussen monsters is in dit materiaal vaak groot.

Voorbeelden:

- oudere ploegzolen in zavels en kleien (1c, 2d en 4b, Bijlage 2b)
- de 'bouwvoor' bij 'no tillage' akkerbouw (2b en c, 6c en d, Bijlage 2b).

5.4.2. Verdere relaties

Van enkele gronden weken de $D_s(\phi_g)$-relaties duidelijk af van de vijf die in 5.4.1. zijn gegeven; dit was van:

- Sterk scheurende gronden. Deze hebben een zeer steile $D_s(\phi_g)$-relatie. Een toename van 1 à 2 volumeprocenten lucht in de vorm van scheuren doen D_s, voor diffusie in de richting van deze scheuren, zeer sterk toenemen. Een voorbeeld daarvan is de ondergrond van knipklei (7b, Bijlage 2a) en zware klei-ondergrond in Oostelijk Flevoland (2c, Bijlage 2c), waar D_s-waarden worden gemeten die hoger zijn dan voor droge enkelkorrelstructuren (Figuur 23).
- Grond met zeer veel gangen. Ook als D_s reeds hoog is, kunnen bijvoorbeeld wormgaten D_s nog sterk doen stijgen, zoals blijkt uit lichte klei onder grasland met al of geen wormen uit Oostelijk Flevoland (2a en b, Bijlage 2c) (Figuur 24). Deze twee meetseries zijn de enige die aan graslandgronden zijn uitgevoerd. Waarschijnlijk zal de bijdrage van bioporiën tot de gasdiffusiemogelijkheden in de ondiepere lagen van veel grasland en ook van bosgrond zeer belangrijk zijn. Het is

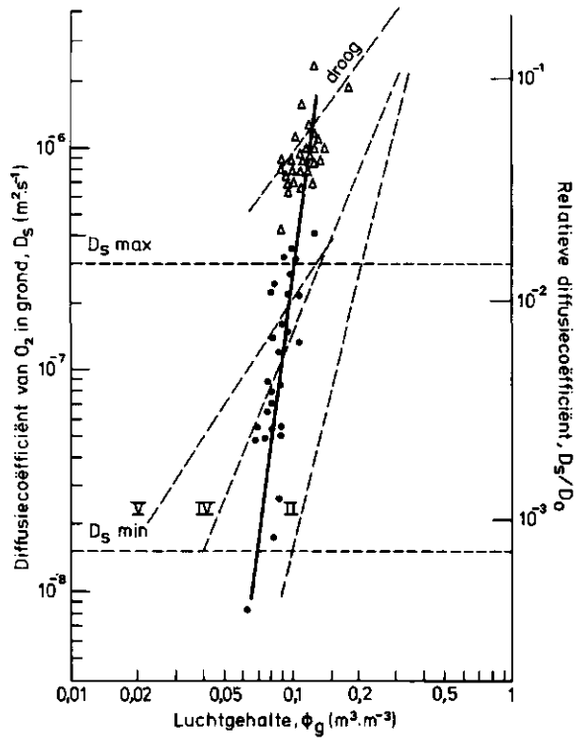

Fig. 23. Scheurende gronden, zeer hoge D_s-waarden en snelle D_s-toename, passen niet bij representatieve lijnen (I t.m. V).
- • pikklei scherp blokkig 40-60 cm - mv (7b, Bijlage 2a)
- Δ zware klei-ondergrond O-Flevoland (2c, Bijlage 2c)
- — best passende lijn $D_s = 460\ \phi_g^{5,5}$

De representatieve lijnen II, IV en V uit figuur 17 zijn gegeven ter oriëntatie.

nog niet onderzocht of de in dit rapport gegevens reeks relaties, no I t.m. V voor deze gronden bruikbaar zijn.

- Lössgrond. Deze is ingevuld in lysimeters, met een verdichte laag, aangebracht tussen 7 en 20 cm-m; het materiaal daarboven en daaronder is losser, circa een half jaar na deze 'bewerking' (6a en b, Bijlage 2a). De structuur van het losse materiaal is iets platig. De verdichte laag heeft weinig structuur met enkele gangen. In beide gevallen is D_s relatief laag boven ϕ_g = 0,25 (Figuur 25). De lössgrond op akkerbouwpercelen (3,

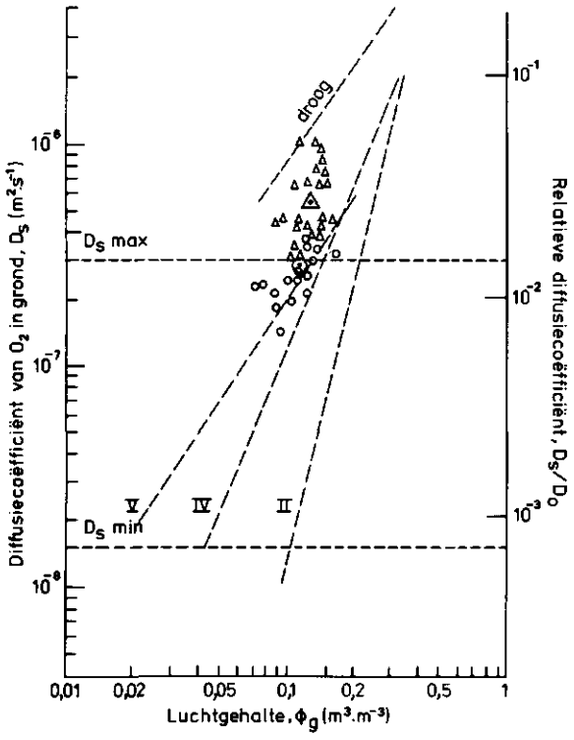

Fig. 24. Invloed wormen; lichte zavel onder gras 0-20 cm -mv. (2, Bijlage 2c)
o zonder wormen ⊙ = gemiddelde (ϕ_g = 0,11, D_s = 2,8.10^{-7} $m^2.s^{-1}$)
Δ met wormen ⊿ = gemiddelde (ϕ_g = 0,12, D_s = 5,9.10^{-7} $m^2.s^{-1}$).

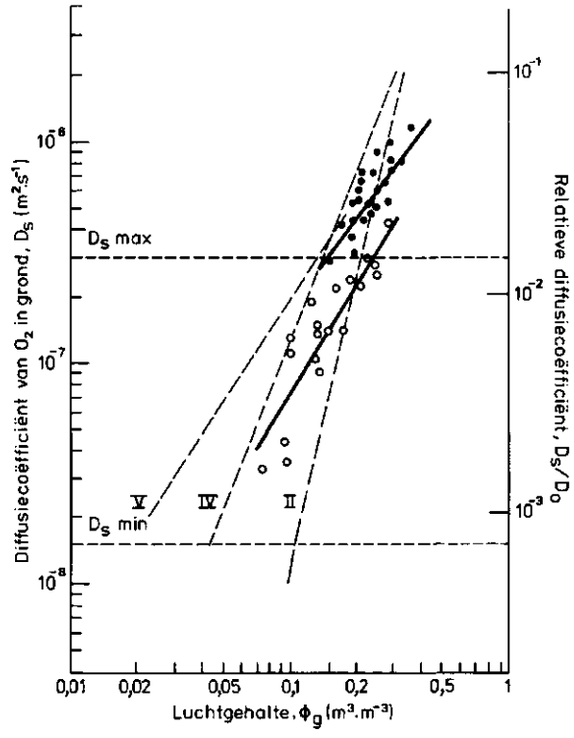

Fig. 25. Löss in lysimeterbakken met iets platige structuur, past niet bij representatieve lijnen (6a en 6b, Bijlage 2a).
• lossere bovenlaag en ondergrond 20-40 cm
o verdichte laag 7-20 cm -mv
— best passende lijnen.

Bijlage 2c) kunnen wel bij één van de groepen (no. IV) worden ingedeeld.

5.5. VERBAND TUSSEN TEXTUUR EN VOORKOMENDE STRUCTUREN

Dat er zeer verschillende luchtgehalten en $D_s(\phi_g)$-relaties kunnen voorkomen in gronden met dezelfde textuur en bij dezelfde drukhoogte van het bodemwater wordt geïllustreerd in Figuur 26a en b. Dit zijn bepalingen aan series veldmonsters en een serie kunstmatige monsters uit een proefveld op zware rivierklei met en zonder grondbewerking (6, Bijlage 2b). Het blijkt dat hier vier van de vijf representatieve gemiddelde $D_s(\phi_g)$-relaties in één en dezelfde grond voorkomen. De lijnen in Figuur 26a verbinden de gemiddelden per drukhoogte van steeds acht monsters per grondlaag, waarvan in Figuur 26b voor drie grondlagen de enkele waarnemingen worden gegeven. De lijnen door de gemiddelden bestrijken uiteraard kleinere $D_s(\phi_g)$-trajecten dan de groepen maar blijken wel representatief voor de groep.

De structuur in de bovenste 30 à 40 cm van akkerbouwgronden wordt sterk bepaald door bewerking en berijding van de grond en de vochtigheid waarbij dit gebeurd. Gegeven de behandeling zal de textuur en het organische-stofgehalte van belang zijn voor de structuur en daardoor ook voor de $D_s(\phi_g)$-

relaties die zijn te verwachten. Zo kan men in zanden en lichte zavels, wat gewoonlijk gronden zijn met geringe structuurstabiliteit de $D_s(\phi_g)$-relatie verwachten van structuurarm materiaal (Lijn no. III). Terwijl in gronden met een hoge structuurstabiliteit, zoals in de zwaardere gronden, er veel moet gebeuren, bijvoorbeeld zware beregening waardoor het oppervlak van de zware klei (6, Bijlage 2b) toch verslempte, voordat deze gronden dezelfde $D_s(\phi_g)$-relatie hebben als de meeste zandgronden. Maar ook zand kan wel de $D_s(\phi_g)$-relatie hebben van structuurrijke gronden (IV), bijvoorbeeld geploegde kunstweide op zand (9, Bijlage 2b).

Opvallend is ook de invloed van de textuur bij ploegzolen. Grond die geploegd, of gefreesd is en daarna wordt verdicht, heeft bij zavels en zanden de $D_s(\phi g)$-relatie III van structuurarme grond of zelfs, als de structuurstabiliteit klein is, de relatie II van enkelkorrelstructuren. In zavel en kleigronden ontstaan echter in de loop van de jaren veel barstjes en gangen in de verdichte laag onder de bewerkingsdiepte en, ondanks de lage luchtgehalten in

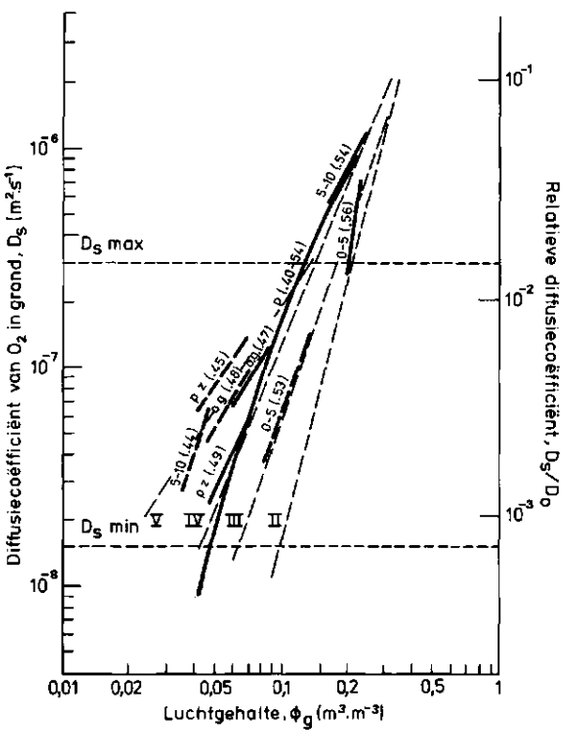

Fig. 26a. Verschillende $D_s(\phi_g)$relaties in één grond.
Grondbewerkingsproefveld op zware rivierklei (6, Bijlage 2b).
Monstername juli 1981.
—— = jaarlijks geploegd.
--- = ongeploegd sinds 1971.
Lijnstukken verbinden gemiddelden bij h_m = -1,0 m en -0,1 m van 8 monsters.
p = geperste aggregaten (6a, Bijlage 2b)
pz = bovenkant ploegzool midden in monster
og = laag onder ploegzool
0-5= diepte.(.53) = porositeit
II t.m. V zijn representatieve lijnen (Figuur 17).

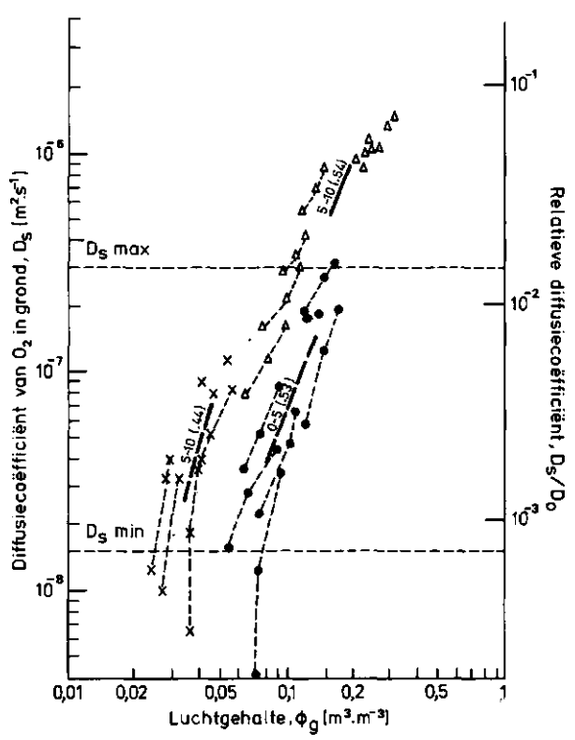

Fig. 26b. De enkele waarnemingen plus de gemiddelde relaties van drie series monsters van Fig. 26a. Metingen aan één monster bij h_m = -1,0, -0,5 en -0,1 m zijn met stippellijnen verbonden.

deze sterk verdichte ploegzolen, is diffusie hierdoor toch mogelijk wat resulteert in relatie V (voorbeeld: de lichte zavel, 4b, Bijlage 2b). In zanden blijft echter de $D_s(\phi_g)$-relatie in de ploegzolen die van structuurarm materiaal no. III of zelfs II (voorbeeld: de lichte humeuze zanden (7c, 8b en 10b, Bijlage 2b).

5.6. CONCLUSIES

- Akkerbouwgronden kunnen meestal met behulp van gegevens over structuur of van textuur in combinatie met behandeling ingedeeld worden bij een structuurgroep met een van andere structuren te onderscheiden $D_s(\phi_g)$-relatie. Is het luchtgehalte (ϕ_g) bekend, dan is een redelijke schatting van de gasdiffusiecoëfficiënt in die grond (D_s) mogelijk.
- De $D_s(\phi_g)$-relatie van diverse structuren verschillen, juist in dat luchtgehaltetraject, waarin problemen met de luchthuishouding mogelijk zijn (ϕ_g <0,20).
- De textuur en het gehalte aan organische stof zijn vooral via hun invloed op structuur en structuurstabiliteit van invloed op de $D_s(\phi_g)$-relatie.
- De porositeit van een grond (ϕ) is bij een gegeven vochtspanning van grote invloed op ϕ_g en zo op D_s; de invloed is groter naarmate de grond meer water bevat. In Nederlandse akkerbouwgronden is de invloed van ϕ op de $D_s(\phi_g)$-relatie te verwaarlozen.
- In de gemeten relaties worden de theoretisch af te leiden invloeden teruggevonden van structuureigenschappen die in verband te brengen zijn met continuïteit van de uit luchtgevulde poriën.

De gangbare structuurbeschrijvingen van geaggregeerde gronden en grond met gangen en scheuren zijn echter niet toereikend voor een echt kwantitatieve berekening van de $D_s(\phi_g)$-relaties.

LITERATUUR

BALL, B.C. 1981a. Modelling of soil pores as tubes using gaspermeabilities, gasdiffusitivities and water release. J. Soil Sci. 32: 465-481.

BALL, B.C. 1981b. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gasdiffusivities and permeabilities and airfilled porosities. J. Soil Sci. 32: 483-498.

BALL, B.C., W. HARRIS and J.R. BURFORD. 1981. A laboratory method to measure gasdiffusion and flow in soil and other porous materials. J. Soil Sci. 32: 323-334.

BAKKER, J.W. and A.P. HIDDING. 1970. The influence of soil structure and air content on gas diffusion in soils. Neth. J. Agric. Sci. 18: 37-48.

BAVEL, C.H.M. VAN. 1952. Gaseous diffusion and porosity of porous media. Soil Sci. 73: 91-104.

BEUVING, J. 1984. Vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, dichtheid en samenstelling van bodemprofielen in zand-, zavel-, klei-, en veengronden. Rapport 10, ICW, Wageningen. 26 pp.

BOONE, F.R., H.M.G. v.d. WERF, B. KROESBERGEN, B.A. TEN HAG and A. BOERS. 1986. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. I. Critical matric water potentials in relation to soil aeration and mechanical impedance. Neth. Journal 34: 136-156.

CHAPMAN, S. and T.G. COWLING. 1970. The mathematical theory of non-uniform gases. 3rd Ed. Cambr. University Press. 423 pp.

CURRIE, J.A. 1960. Gaseous diffusion in porous media. Brit. J. appl. Phys. 11: 314-324.

CURRIE, J.A. 1961. Gaseous diffusion in porous media. 3 - Wet granular material. Brit. J. appl. Phys. 12: 275-381.

CURRIE, J.A. 1984. Gasdiffusion through soil crumb: the effect of compaction and wetting. J. Soil Sci. 35: 1-10.

CURRIE, J.A. and D.A. ROSE. 1985. Gas diffusion in structured material: the effect of tri-model pore size distribution. J. Soil Sci. 36: 487-493.

GLINSKI, J. and W. STEPNIEWSKI. 1985. Soil aeration and its role for plants. CRC press inc. Boca Raton, Florida. 229 pp.

GRECHIN, I.P. and N. IGNATIEV. 1969. Adsorption of molecular oxygen and release of CO_2 by some soils. Pochvovedenie 6: 46.

GREENWOOD, D.J. 1970. Distribution of carbondioxide in the aqueous phase of aerobic soils. J. Soil Sci. 21: 314-329.

HILL, D. 1984. Diffusion coefficients of nitrate chloride, sulphate and water in cracked and uncracked chalk. J. Soil Sci. 35: 27-33.

HIRSCHFELDER, J.O., C.F. CURTISS and R.B. BIRD. 1964. Molecular theory of gases and liquids. John Wiley & Sons inc. New York. 1249 pp.

JAYNES, D.B. and A.S. ROGOWSKI. 1983. Applicability of FICK's law to gas diffusion. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 425-430.

JONG, E. DE, J.T. DOUGLAS and M.J. GOSS. 1983. Gaseous diffusion in shrinking soils. Soil Sci. 136: 10-17.

KRABBENBORG, A.J., J.N.B. POELMAN en E.J. VAN ZUILEN. 1983. Standaard-vochtkarakteristieken van zandgronden en veenkoloniale gronden. Rapport 1680. Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA), Wageningen. Deel I, 149 pp. Deel II, 200 pp.

KRISTENSEN, K.J. and E.R. LEMON. 1964. Soil aeration and plant-root relations. III. Physical aspects of oxygen diffusion. Agron. J. 56: 295-302.

LEFFELAAR, P.A. 1987. Dynamic simulation of multinary diffusion problems related to soil. Soil Sci. 143: 79-91.

LEMON, E.R. and H.E. ERICKSON. 1952. The measurement of oxygendiffusion with a platinum micro electrode. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 16: 160-163.

LEMON, E.R. and C.L. WIEGAND. 1962. Soil aeration en plant-root relations. II: Physical aspects of root respiration. Agron. J. 54: 171-174.

MARRERO, T.R. and E.A. MASON. 1972. Gaseous diffusion coefficients. Journal of Physical and Chemical Reference Data 1, 3-118.

MILLINGTON, R.J. 1959. Gasdiffusion in porous media. Science 130: 100-102.

MILLINGTON, R.J. and J.P. QUIRK. 1961. Permeability of porous solids. Transact of Farad. Soc. 57: 1-8.

MILLINGTON, R.J. and R.C. SHEARER. 1971. Diffusion in aggregated porous media. Soil Sci. 111: 372-378.

NAKAYAMA, F.S. and A.D. SCOTT. 1962. Gas sorption by soils and clay minerals. I. Solubility of oxygen in moist materials. Soil Sci. 94: 106-110.

NIELSON, K.K. and V.C. ROGERS. 1982. A mathematical model for radon diffusion in earthen materials. NUREG/CR 2765 U.S. Nuclear Regulatory commission Washington DC. 52 pp.

NIELSON, K.K., V.C. ROGERS and G.W. GEE. 1984. Diffusion of radon through soils: A pore distribution model. Soil Sci. Soc. of Am. Proc. 48: 482-487.

PAPENDICK, R.J. and J.R. RUNKLES. 1965. Transient state oxygen diffusion in soil. Soil Sci. 100: 251-261.

PENMAN, H.L. 1940. Gas and vapour movements in the soil (I and II). J. Agric. Sci. Camb. 30: 447-462; 570-581.

POELMAN, J.N.B. en T. VAN EGMOND. 1979. Uit eenvoudige grootheden af te leiden vochtkarakteristieken voor zee- en rivierkleigronden. Rapport 1492. STIBOKA, Wageningen. 65 pp.

PRINS, J.A. 1951. Grondbeginselen van de hedendaagse natuurkunde. J.B. Wolters, Groningen. pp. 320.

PRITCHARD, D.T. and J.A. CURRIE. 1982. Diffusion coefficients of carbondioxide, nitrons oxide, ethylene and ethane in air and their measurements. J. of Soil Sci. 33: 175-184.

REIBLE, D.D. and F.H. SHAIR. 1982. A technique for the measurement of gaseous diffusion in porous media. J. Soil Sci. 33: 165-174.

REID, R.C., J.M. PRAUSNITZ, and T.K. SHERWOOD. 1977. The properties of gases and liquids. 3rd ed. Mc Grawhill Book Comp. New York. 688 pp.

RUNKLES, J.R., A.D. SCOTT and F.S. NAKAYAMA. 1958. Oxygen sorption by moist soils and vermiculite. Soils Sci. Soc. Amer. 22: 15-18.

SALLAM, A., W.A. JURY and J. LETEY. 1984. Measurement of gasdiffusioncoefficient under relatively low air-filled porosity. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 3-6.

SIDES, G.R. and L. BARDEN. 1970. The times required for the attainment of air-water equilibrium in clay soils. J. Soil Sci. 21: 50-62.

SMITHONIAN PHYSICAL TABLES, 1969. 9th Ed. Smith. Inst. Washington. 2000 pp.

STEPNIEWSKI, W. 1983. Gas diffusion in a brown silty soil. Zesz. Probl. Postepow Nauk Roln., 220: 547-555.

TAYLOR, S.A. 1949. Oxygen diffusion as a measure of soil aeration. Proc. Soil Sci. Soc. Am. 14: 125-139.

TROEH, F.R., J.D. JABRO and D. KIRKHAM. 1982. Gaseous diffusion equations for porous materials. Geoderma 27: 239-253.

UMBREIT, W.W., R.H. BURRIS and J.F. STAUFFER. 1959. Manometrie Techniques. Burgers publ. co. Mineapolis. 338 pp.

WOOD, J.T., and D.J. GREENWOOD. 1971. Carbondioxide and oxygen distribution in soils. J. Soil Sci. 22: 281-288.

YOUNGQUIST, G.R. 1970. Diffusion and flow of gases in porous solids. 6th State of the art. symp. June 1969. Am. Chem. Society, Washington. p. 57-69.

ZUILEN, E.J. VAN, J.N.B. POELMAN en C. HOEKSTRA. 1985. Vochtkarakteristieken van kleilagen in het zeekleigebied, af te leiden uit enige eenvoudige eigenschappen van de grond. Rapport 1895. STIBOKA, Wageningen. 68 pp.

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN

A	oppervlak (m^2)
D_i	diffusiecoëfficiënt van stof i: $D_i = -f_i ds/dG_i$ ($m^2.s^{-1}$)
D_{ij}	D van stof i in stof of fase j ($m^2.s^{-1}$)
D_o	D van gas in gas met de samenstelling van de bodematmosfeer ($m^2.s^{-1}$)
D_k	Knudsen diffusiecoëfficiënt ($m^2.s^{-1}$) ($1/D_k$ = weerstand door wandinvloed)
D_{gc}	D van gas in zeer nauwe gasgevulde capillairen ($m^2.s^{-1}$)
D_{ijs}	D van stof i via fase j in grond: $D_{ijs} = -f_{ij}ds/d\chi_{ij}$ ($m^2.s^{-1}$)
D_{is}	D van stof i in grond: $D_{is} = -f_{is}ds/\chi_{ig}$ ($m^2.s^{-1}$)
D_s	idem, i onbenoemd ($m^2.s^{-1}$)
f_i	fluxdichtheid van stof i ($kg.m^{-2}.s^{-1}$)
f_{ij}	fluxdichtheid van stof i via fase j ($kg.m^{-2}.s^{-1}$)
G_i	massa van stof i per eenheid ruimte ($kg.m^{-3}$)
h_m	drukhoogte bodemwater; vochtspanning (m)
K	waterdoorlatendheid ($m^2.Pa.s^{-1}$)
K_i	intrinsieke doorlatendheid voor water (m^2)
K_a	luchtdoorlatendheid ($m^2.Pa.s^{-1}$)
K_{ia}	intrinsieke luchtdoorlatendheid (m^2)
p	absolute druk (Pa)
p_i	druk van component i (Pa)
r	straal (m)
R	gasconstante (8,314 J. $mol^{-1}.K^{-1}$)
s	ruimtecoördinaat in transportrichting (m)
T	temperatuur (K)
t	tijd (s)
v	snelheid ($m.s^{-1}$)
w	vochtigheid (kg water/kg vaste stof) ($kg.kg^{-1}$)
x,y	horizontale ruimtecoördinaten (m)
z	verticale ruimtecoördinaat (m)
α	produktie of consumptie van gas ($kg.m^{-3}.s^{-1}$)
	produktie of consumptie van water ($m^3.m^{-3}.s^{-1}$)
γ	oplosbaarheidsverhouding gas in water/gas in lucht
η_i	viscositeit (dynamisch) van stof i (Pa.s)
$\theta;\phi_w$	volume fractie water ($m^3.m^{-3}$)
ρ_α	volumieke massa van fase α (s = vaste stof, l = vloeistof, g = gas) ($kg.m^{-3}$)
b_ρ	massa/m^3 ruimte; volumegewicht ($kg.m^{-3}$)
b_{ρ_d}	droge massa/m^3; droog volumegewicht ($kg.m^{-3}$)
ϕ	volume-fractie poriën; porositeit ($m^3.m^{-3}$)
ϕ_α	volume-fractie van fase of component α ($m^3 \cdot m^{-3}$)
ϕ_g	volume-fractie gas; luchtgehalte ($m^3.m^{-3}$)
ϕ_{gb}	volume-fractie geblokkeerde gasgevulde poriën ($m^3.m^{-3}$)
ϕ_{vi}	volume-fractie poriën tussen aggregaten (m^3m^{-3})
ϕ_{va}	volume-fractie poriën in aggregaten ($m^3.m^{-3}$)
χ_{ij}	massa concentratie van stof i in fase j die deel van volume kan beslaan

BIJLAGEN

Bijlage 1

BESCHRIJVING ONDERZOCHTE GRONDEN

1a. Monsterserie BAKKER

1. Matig fijn zand (duinzand), 'bloembollengrond' Lisse. Het zand is in ringen ingevuld en verdicht tot twee dichtheden.
2. Humeus lemig matig grof zand, bouwvoor heide-ontginningsgrond (proeftuin Sinderhoeve te Renkum). De monsters zijn ingevuld.
3. Zeer fijnzandige zavel, bouwvoor grondwaterstanden-proefveld Geestmerambacht te Oud Karspel, opgeploegd uit diepte 1,20 tot 1,80 m -mv van onder pikklei.
   a) vochtige grond na passage 4 mm zeef ingevuld in ringen en aangedrukt
   b) stoof-droge grond gemalen en ingevuld in ringen
   c) monsters gestoken uit materiaal als 3a nadat er in potproeven stamslabonen op hadden gegroeid, grond sterk doorworteld
   d) gestoken monsters uit het veld, D_s bepaling bij veld-vochtgehalte en droger.
4. Mengsel van duinzand en zavel, dat door zware langdurige stalmestbemesting een hoog organische-stofgehalte heeft en een zeer fraaie en stabiele structuur: bouwvoor in kas te Wateringen.
5. Lichte zavel uit lysimeterbakken met een grondwaterstand van 0,6 en 1,2 m -mv, in het voorjaar de laag van 0,1 tot 0,2 m verdicht. De monsters zijn gestoken in augustus nadat er tuinbonen hadden gegroeid. D_s gemeten vanaf velddroog en na verder uitdrogen.

6a + b. Löss uit lysimeters als no. 5. De verdichte laag wijkt duidelijk af van de rest, heeft weinig structuur, lossere grond, iets platig.

7a + b. Zware klei, zogenaamde pikklei uit grondwaterstandenproefveld te Oud Karspel.

8a + b. Zavels en kleien, bovenste 5 cm van bezakte geploegde bouwvoor in het voorjaar van verslempte en niet-verslempte percelen (Zie BAKKER and HIDDING, 1970).

9. Zandgronden N-Limburg, monsters uit bouwvoor van percelen met bieten met al of geen slechte groei, waarschijnlijk als gevolg van verschillen in aeratie. Monstername in augustus. Bevochtiging monsters, niet door verzadiging maar door sproeien.
10. Doorwortelbare straatondergrond rond bomen. Uit proefobject Söderblomplaats te Rotterdam. Een rioolslib-zandmengsel met circa 30% organische stof, gemengd met schoon matig fijn zand, zodat het totale mengsel circa 5% organische stof bevat. Het rijke materiaal is nog als brokjes van ¼ tot 1 cm zichtbaar in het mengsel. D_s bepaling aan veldvochtige monsters met h_m = -0,5 tot -0,3 m en na 5 volumeprocenten uitdrogen van het monster.

1b. Monsterserie BOONE

1. Proefboerderij Westmaas, invloed bodemverdichtingen op aardappelen. Aanleg herfst 1972 (creëren/opheffen ploegzool) en voorjaar 1973 (bouwvoorverdichting). Kalkrijke poldervaaggrond van matig lichte zavel en een ondergrond van zeer

lichte zavel. Monsters onder 1a, 1d en 1e verzadigd, daarna op pF-bak op h_m = 0,5 en -1,0 m gebracht. Monsters onder 1b en 1c bij h_m = circa -30 m doorgemeten, daarna na enkele keren toevoeging van circa 4 volumeprocenten water.

2 + 3. Proefboerderij Westmaas, grondbewerkingssystemen proefveld (Ws 38). Aanleg in de herfst van 1971, bemonsterd in 1978 en 1979. Kalkrijke zware zavel die naar beneden vrij vlug overgaat in zeer lichte zavel. Systeem A: elk jaar 25 cm geploegd, systeem N: onderzochte lagen zijn sinds aanleg nooit meer bewerkt. Monsters verzadigd, daarna op pF-bak op h_m = -0,3 en h_m = -0,1 m gebracht.
B_1 = met hakvruchten, B_2 = zonder hakvruchten in het bouwplan.

4. Nieuwe Tonge, invloed bodemverdichtingen op aardappelen. Aanleg herfst 1973 (opheffen ploegzool) en voorjaar 1974 (bouwvoorverdichting). Kalkrijke matig lichte zavel die naar beneden vrij snel overgaat in lichte zavel.
   a = monsters genomen bij h_m = -1,5 m, en in drie stappen bevochtigd;
   b = monsters genomen bij h_m = -1,0 m en gemeten;
   c = aggregaten 4 mm, geperst en in vijf stappen bevochtigd.

5. Lelystad (Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de volle grond), invloed verdichtingen op aardappelen. Aanleg in de herfst van 1976 (aanbrengen ploegzool) en voorjaar 1977 (bouwvoorverdichting). Kalkrijke zware zavel (nesvaaggrond) met een ondergrond van lichte zavel. Monsters verzadigd en op pF-bak op h_m = -1,0, h_m = -2,0 en h_m = -5,0 m gebracht.

6. Proefboerderij 'De Bouwing' te Randwijk, grondbewerkingssytemen-proefveld met onder andere de vergelijking elk jaar ploegen met niet bewerken. Aangelegd in 1968. Zware rivierklei:onbewerkte grond, niet meer bewerkt sinds 1968.
   Monstername 1974:
   a = aggregaten 6 tot 8 mm, geperst en in twee stappen bevochtigd,
   b, c en d = monsters in drie stappen bevochtigd.
   Monstername 1981:
   e = monsters in bewerkte en onbewerkte grond vanaf de oppervlakte tot en met de nooit bewerkte ondergrond.

7. Heeten, verdichtingsproef op zandbouwland met het gewas mais (1981).
   Verdichten door berijden met trekker met enkele of dubbele luchtbanden.

8. Proefboerderij Heino, verdichtingsproef op zandbouwland met het gewas mais (1980). Verder als 7.

9. Proefboerderij Heino, perceel in herfst 1981 na 3 jaar kunstweide gescheurd in juli 1982 in gewas mais bemonsterd.
   Verder als 7.

10. Perceel in gemeente Wijhe, beekafzetting.
   Verder als 7.

1c. Monsterserie BOEKEL

1. a t/m e. Vakken-proef met vijf grondsoorten (esgrond, dalgrond, zavel, lichte klei en zware klei) met vijf structuurtrappen. Door losspitten tot zwaar aanstampen is de laag van 5 tot 20 cm -mv sterk tot niet verdicht. De laag 0 tot 5 cm is los. Jaarlijks wordt er een gewas verbouwd. Verdicht in 1973, 1974, 1978, 1979 en november 1980. Er zijn diffusiemetingen uitgevoerd in oktober 1976, 1977, 1979, 1980 en 1981 bij veldvochtgehalte, bij h_m = -1,0 m en in 1981 ook bij h_m = -0,3 en -0,5 m. In Bijlage 2 zijn alleen de resultaten van 1981 gegeven. Deze wijken bij overeenkomstige h_m

niet af van voorgaande metingen.

2. Lichte kalkrijke kleigrond in Oostelijk Flevoland, waar de invloed van wormenactiviteit wordt nagegaan.
3. Lössgronden Wijnandsrade, praktijkpercelen, verschillende lagen tot 40 cm diepte bepaald. Bedoeling om de aanwezigheid en het effect van een ploegzool te bekijken. $D_s(\phi_g)$-relaties van de laag 0 tot 20 en van de laag 25 tot 45 cm zijn gelijk.
4. Zand- en dalgronden in Drente en Overijssel, waar grondontsmetting heeft plaatsgevonden. Verschillende lagen bemonsterd. Bedoeling om de transportmogelijkheid van gas in dergelijke gronden te beoordelen.
5. Lichte klei uit Oostelijk Flevoland. Van proefveld PAGV met verschillende grondbewerkingssystemen (rijbanen, ploegen en cultivateren) en gewassen bieten en aardappelen. Monsters genomen van 0 tot 25 cm-mv. Er was geen invloed op $D_s(\phi_g)$-relatie van diepte, bewerking of gewas.

Bijlage 2

GEGEVENS GRONDEN MET HUN $D_s(\phi_g)$-RELATIES

Legenda

v/o = D_s-bepaling aan verstoord materiaal (v) of aan ongestoord materiaal (o)

ϕ = porositeit materiaal

Variatie ϕ_g door = oorzaak van de variatie in luchtgehalte is de variatie van porositeit (ϕ) of de variatie van de vochtspanning ($-h_m$)

$\phi_g.100$ = ϕ_g bij vochtspanning van -5, -10 en verder bij -x dm (voor de waarden -x zie volgende kolom) als D_s ook bij h_m = -x dm werd bepaald

* = D_s werd bij deze h_m niet bepaald

des/abs = vochtgehalten bij de meting is verkregen door vochtafgifte (des) of door vochtopname (abs)

$D_s=a\phi_g^b$ = berekende best passende relatie voor de desbetreffende reeks bepalingen van D_s (in $m^2.s^{-1}$) en ϕ_g

R = correlatie-coëfficiënt

$\phi_g.100.D_s.10^{-8}$ = de gemiddelde waarden van ϕ_g en D_s waar door te kleine variaties geen relatie is te onderscheiden

Aëratiegrens = ϕ_g waarbij normaliter altijd, dit is bij D_s min (= 1,5. 10^{-8} $m^2.s^{-1}$), of nooit, dit is bij D_s max (= 30.10^{-8} $m^2.s^{-1}$) aëratieproblemen zijn te verwachten

Past bij relatie no. = no. relatie waarbij de waarnemingen passen. Voor betekenis no. 1 t.m. 5 zie paragraaf 5.4.1

Afwijkingen wat betreft de richting zijn aangeduid met steil of vlak, wat betreft niveau met de afstand in % van de genoemde lijn

Metingen Bakker

No.	Grondsoort	Bemonstering diepte (cm)	Bemonstering datum	Samenstelling % <2 µm	<16	2-50	>50	org. stof	$CaCO_3$	Struktuur	v/o	ø.100	Variatie $ø_g$ door	$ø_g$. 100 bij h_m in dm -5	-10	-x	-x dm	des / abs	Aantal monsters	Aantal bepalingen	$D_s = a\ ø_g^b$ a 10^{-6}	b 10^{-2}	R 10^{-2}	Aeratiegrens $ø_g$.100 bij D_{smin}	D_{smax}	Past bij relatie no.:
1a	matig fijn	0-50	1970	2	-	3	95	0,2	2	één korrel	v	38	h_m	13	23	5-33	1-20	des	7	35	30	300	95	8	22	I
1b	zand									idem losser ingevuld	v	47	h_m	25	35	7-37	2-20	des	6	30	5	200	64	-	25	I
2	humeus lemig zand	0-20	1969	6	-	12	82	6,0	0	één korrel	v	48	h_m	12	18	9-24	1-50	des	27	27	200	390	95	9	19	II
3	zeer fijn zandige zavel																									
3a	veldvochtig door 4 mm zeef	0-25	1969	10	-	21	69	1,8	20	zwak geaggr. enkel korrel	v	50-52	h_m	9	11	7-36	1-50	des	27	27	98	340	93	7,5	18	III
3b	droog gemalen									droog gemalen	v	51-54	h_m	11	15	7-32	1-50	des	27	27	162	400	93	10	21	II
3c	=3a nagewas									=3a na dichte beworteling	o	48-52	h_m	5-9	7-12	4-31	1-50	des	10	40	14	210	79	-	16	IV
3d	veld	0-40	4-'68							zwak geaggr.	o	47-53	h_m	10	12	8-32	5-50	des	30	30	12	200	89	4	16	IV
4	zeer humeus kleiig zand	0-20	1969	9	-	18	73	6,4	-	matig geaggregeerd	o	49-52	h_m	10	15	3-27	3-50	des	8	32	4	135	66	-	16	IV
5	zandige zavel	0-40	8-'70	13	-	23	64	2,0	-	zwak geaggr.	o	40-47	h_m	5-8*	8-16	5-30	6-50	des	19	60	24	270	96	7	21	III
6a	löss	1-7 / 20-40	1970	10	-	73	17	3,0	0	licht platig	o	43-48	h_m	12*	15	16-36	6-100	des	8	32	4	135	86	-	15	vlak
6b		7-20								zwak struktuur enkele gangen	o	38-42	h_m	5*	7	8-28	6-100	des	7	28	3	160	88	-	24	vlak
7a	pikklei Oud Karspel	0-10	4-'68	46	-	47	7	3,7	0	zwak geaggr.	o	48-53	h_m	4*	5	6-20	10-100	des	9	35	16	234	82	5	18	III
7b		10-60						2,4		scherp, dicht, blokkig	o	46-49	h_m	3*	4	6-16	10-100	des	25	70	46000	550	51	8	10	steil
8a	klei en zavels	0-5	3-'67	7-17	-	7-17	-	2,0	-	niet verslempt	o	45-67	h_m	-	-	7-17	7-50	des	5	15	17	200	-	-	13	IV
8b		0-5								wel verslempt	o	40-52	h_m	-	-	5-21	7-50	des	10	30	40	300	-	7	20	III
9	zanden N-Limb.	0-20	8-'80	3-5	-	20-33		2,5	0	enkel korrel	o	36-51	ø	4-7*	8-24	8-33	8->10	des	24	98	20	250	88	-	18	III
10	zand-rioolslib mengsel	20-75	11-'81	4	-	6	90	5	3	klontjes in zand	o	42-54	ø+h_m	16-20	20-27*	6-23	3-5	-	17	22	110	330	95	-	17	IV

Metingen Boone

No.	Grondsoort	Bemonstering diepte (cm)	Bemonstering datum	Samenstelling % <2 µm	<16	2-50	>50	org. stof	$CaCO_3$	Struktuur	v/o	ø.100	Variatie $ø_g$ door	$ø_g$. 100 bij h_m in dm -5	-10	-x	-x dm	des / abs	Aantal monsters	Aantal bepalingen	$D_s = a ø_g^b$ a 10^{-6}	b 10^{-2}	R 10^{-2}	Aeratiegrens $ø_g$.100 bij D_{smin}	D_{smax}	Past bij relatie no.:
																					$ø_g$.100	D_s.10^{-8}				
Westmaas																										
1a	zware zavel	10-15	7-'73	20	26	44	36	2,8	7,4	onder trekker-spoor	o	42-46	ø		5-10			des	5	6	7	7,5		-	-	IV + 40%
1b	zware zavel	30-35	7-'73	22	28	45	33	2,7	7,3	ploegzool a-horizont	o	38-43	$ø+h_m$			3-24	<300	abs	5	15	10	190	99	-	15	IV
1c	zware zavel	30-35	7-'73	22	28	45	33	2,7	7,3	bereden in open voor, ploegzool A-horizont	o	37-39	$ø+h_m$			2-11	<300	abs	5	12	8	160	86	2,0	13	V
1d	lichte zavel	35-40	7-'73	14	18	38	48	1,0	11,8	ploegzool C-hor	o	41-44	$ø+h_m$	2-6	4-8			des	5	10	5	13		-	-	V + 50%
1e	lichte zavel	45-50	7-'73	14	18	38	48	1,0	11,8	poreuze spons-str. C-horizont	o	43-47	$ø+h_m$	5-9	7-10			des	5	10	24	200	82	-	11	V
Westmaas																										
2a	zware zavel	12-17	6-'78	24	33	49	27	2,3	8,3	losse gronds-teelt (A)	o	42-50	$ø+h_m$		8-21	6-17	3	des	8	16	58	250	95	-	12	IV + 40%
2b	zware zavel	12-17	6-'78	24	33	49	27	2,3	8,3	vaste gronds-teelt (B1)	o	39-41	$ø+h_m$		5-9	3-7	3	des	7	14	3	125	82	-	14	V
2c	zware zavel	12-17	6-'78	24	33	49	27	2,3	8,3	vaste gronds-teelt (B2)	o	38-41	$ø+h_m$		4-7	2-4	3	des	6	12	4	5,2		-	-	V
2d	zware zavel	32-37	6-'78	20		45	35	1,7	10,4	losse gronds-teelt (A) ploegzool grens A/C hor	o	37-41	$ø+h_m$		3-7	2-5	3	des	8	16	5	8,7		-	-	V + 50%
2e	lichte zavel	47-52	6-'78	15		43	42	1,0	12,5	poreuze spons-str. C-horizont	o	45-46	$ø+h_m$		10-11	6-8	3	des	8	16	12	12		-	-	IV
Westmaas																										
3			6-'79							= 6 -'78																
Nieuwe Tonge																										
4a	lichte zavel	10-15	1974	15	19	33	52	2,1	7,6	onder trekker-spoor	o	43-49	$ø+h_m$	6-9	10-12	7-20	<15	abs	8	32	56	304	86	7	18	III
4b	lichte zavel	25-30	1974	15	19	33	52	2,1	7,6	ploegzool A+C horizont	o	40-44	ø			8-12	10		12	12	12	178	86	2	15	V
		30-35	1974	17	21	35	48	1,0	7,0	"	o	36-40	ø			3-7	10									
4c	lichte zavel	10-15	1974	15	19	33	52	2,1	7,6	gepl.bouwvoor	v	44-57	$ø+h_m$			9-33		abs	10	43	166	369	95	8	18	III
Lelystad																										
5g	zware zavel	10-15	1977	20				2,3	8,1	" 1x bereden	o	43-47	$ø+h_m$			8-22	10 50	des	10	30	30	275	83	6	19	III
5h	zware zavel	10-15	1977	20				2,3	8,1	" 4x bereden	o	41-47	$ø+h_m$			5-20	10 50	des	10	29	10	220	68	5	20	III

Metingen Boone

No.	Grondsoort	Bemonstering diepte (cm)	Bemonstering datum	Samenstelling % <2 µm	<16	2-50	>50	org. stof	$CaCO_3$	Struktuur	v/o	ø.100	Variatie $ø_g$ door	$ø_g$. 100 bij h_m in dm -5	-10	-x	-x dm	des / abs	Aantal monsters	Aantal bepalingen	$D_s = a ø_g^b$ a 10^{-6}	b 10^{-2}	R 10^{-2}	Aeratiegrens $ø_g$.100 bij D_{smin}	D_{smax}	Past bij relatie no.:
																					$ø_g$.100	$D_s.10^{-8}$				
Randwijk																										
6a	zware klei	3-8	1974	36	61	56	8	2,1	0,1	gepl. bouwvoor	v	40-54	$ø+h_m$			4-25	100	abs	8	24	83	284	98	5	14	IV
6b	zware klei	3-8	1974	36	61	56	8	2,1	0,1	"	o	41-46	$ø+h_m$			1-10	?	abs	8	22	1	114	47	3	-	IV à V
6c	zware klei	3-8	1974	37	62	56	7	2,6	0,1	onbew. bouwv.	o	35-41	$ø+h_m$			2-9	?	abs	9	27	85	254	81	3	11	V
6d	zware klei	12-17	1974	37	62	56	7	1,5	0,1	"	o	38-40	$ø+h_m$			2-7	?	abs	9	27	4	154	58	3	-	V
6e	zware klei	0-47	7-'81	37	62	56	7	2	0,1	diversen	o	44-56	$ø+h_m$		6-12	2-32	1-1	des	64	192	zie fig.30+31			-	-	II - V
Heeten																										
7a	leemarm matig humeus zand	10-15	6-'81	3,3	7	29	68	4,5	0,1	3x verdicht enkel lucht	o	41-46	$ø+h_m$	5	5-12	12-20	25	des	10	30	181	341	86	6	15	III à IV
7b		10-15	9-'81	3,3	7	29	68	4,5	0,1	1x verdicht dubbel lucht	o	44-50	ø		14-23			des	10	10	15	209	954	-	23	III
7c		31-36	10-'81	3,3	7	29	68	2,7	0,1	ploegzool	o	41-47	ø		10-19			des	9	9	570	453	907	10	19	II
Heino																										
8a	leemarm matig humeus zand	12-17	5-'80	2,6	3,3	6	91	3,8	-	los	o	50-55	ø			15-21	3	des	6	6	17	30		-	-	II
8b		32-37	5-'80	2,6	3,3	6	91	2,1	-	ploegzool	o	42-41	$ø+h_m$		17-24	9-13	3	des	8	16	220	401	97	9	19	II
8c		12-17	5-'80	2,6	3,3	6	91	3,8	-	vorenpakker	o	45-55	$ø+h_m$		15-30	6-21	3	des	8	12	9	199	90	-	18	III-IV
8d		12-17	5-'80	2,6	3,3	6	91	3,8	-	1x verdicht dubbel lucht	o	45-52	$ø+h_m$		14-25	7-13	3	des	8	16	76	331	90	7	19	III
8e		12-17	5-'80	2,6	3,3	6	91	3,8	-	3x verdicht enkel lucht	o	42-49	$ø+h_m$		12-21	7-10	3	des	8	16	457	427	70	9	18	III
Heino																										
9	= 8	12-17	9-'82	3,0	-	6	91	4,7	-	gescheurde kunstweide 3x verdicht	o	47	h_m		17-20	3-8	1-3	des	5	15	80	199	90	5	18	IV
Wijhe																										
10a	zandige leem	12-17	9-'82	1,0		13,9	76	3,2	-	3x verdicht	o	44	h_m		12-15	4-5	1-3	des	5	15	150	205	92	4	14	IV
10b	zwak lemig zand	12-17	9-/82	6,5	-	-	-	1,3	-	ploegzool	o	39	h_m		11-16	6-10	1-3	des	5	15	590	426	90	8	18	III

BIJLAGE 2 (b) vervolg

Metingen Boekel

No.	Grondsoort	Bemonstering diepte (cm)	Bemonstering datum	Samenstelling % <2 µm	<16	2-50	>50	org. stof	$CaCO_3$	Struktuur	v/o	ø.100	Variatie $ø_g$ door	$ø_g$. 100 bij h_m in dm -5	-10	-x	-x dm	des / abs	Aantal monsters	Aantal bepalingen	$D_s = a ø_g^b$ a 10^{-6}	b 10^{-2}	R 10^{-2}	Aeratiegrens $ø_g$.100 bij D_{smin}	D_{smax}	Past bij relatie no.:
																					$ø_g$.100	$D_s.10^{-8}$				
1a	zand	5-10	10-'81					2,8		verschillende verdichting	o	43-54	$ø+h_m$	17-38	21-40	9-20 22-42	3 veld	des	40	160	110	402	87	11	22	II
1b	dalgrond	5-10	10-'81					4,6		verschillende verdichting	o	45-56	$ø+h_m$	14-31	21-36	6-22 22-39	3 veld	des	40	160	139	497	88	11	22	II
1c	zavel	5-10	10-'81	-	18	-	80	2,3	0,6	verschillende verdichting	o	42-50	$ø+h_m$	7-21	9-25	5-18 8-34	3 veld	des	40	160	327	393	75	8	17	steil
1d	lichte klei	5-10	10-'81	-	32	-	57	3,0	8,5	verschillende verdichting	o	45-58	$ø+h_m$	7-28	8-30	6-24 8-38	3 veld	des	40	160	196	393	79	9	19	III
1e	zware klei	5-10	10-'81	-	57	-	32	3,6	8,9	verschillende verdichting	o	52-63	$ø+h_m$	8-30	9-31	6-29 10-38	3 veld	des	40	160	40	291	88	7	19	III
O-Flevoland																										
2	lichte klei	0-20	11-'81	wisselend naar diepte						invloed wormen	o	47-53	ø		8-15	-	-	des	24	24	12	56		-	-	V + 100%
	onder gras	0-20								geen invl.wormen	o	46-55	ø		7-17	-	-	des	24	24	11	28		-	-	V = IV
		20-40								zware kleiondergrond	o		ø		7-17	-	-	des	36	36	11	80		-	-	V + 300%
		20-40								lichte zavel	o	48-53	ø		10-13	-	-	des	20	20	12	30		-	-	V = IV
Wijnandsrade																										
3	löss	0-45	?	12	27	-	-	1,9	0	praktijk perc.	o	42-55	$ø+h_m$	-	6-23	12-26	veld	-	62	124	50	270	?	-	-	IV + 60%
Overijssel																										
4	zand- en dalgronden	0-10	1974	uiteenlopend						pas ontsmette praktijkpercelen	o		ø		17-30			des	31	31	22	45		-	20	II à III
		20-25								idem	o		ø		13-25			des	31	31	20	35		-	18	II à III
		30-35								idem	o		ø		15-23			des	31	31	19	37		-	19	II à III
Lelystad																										
5a	lichte klei	0-25	6-'80	-	39	-	-	2,4	8,8	div. grondbewerkingen aardapp.	o	46-59	ø		10-36	-	-	des	81	81	15	188	83	-	12	IV
5b	lichte klei	0-25	6-'80	-	39	-	-	2,4	8,8	idem bieten	o	48-59	ø		9-29	-	-	des	81	81	21	209	85	-	13	IV

De RAPPORTEN zijn te bestellen door storting van het verschuldigde bedrag op giro 817672 t.n.v. ICW, Wageningen, onder vermelding van de gewenste publikatie en het aantal exemplaren. Toezending geschiedt na ontvangst van het bedrag.
Prijs Rapport 1 *f* 15; Rapport 2 *f* 10; Rapport 3 *f* 5; Rapport 5 *f* 5; Rapport 6 *f* 5; Rapport 7 *f* 7,50; Rapport 8 *f* 7,50; Rapport 9 *f* 5; Rapport 10 *f* 7,50; Rapport 11 *f* 7,50; Rapport 12 *f* 12,50; Rapport 13 *f* 10; Rapport 14 *f* 7,50; Rapport 15 *f* 15; Rapport 16 *f* 10; Rapport 17 *f* 12,50; Rapport 18 *f* 10; Rapport 19 *f* 20; Rapport 20 *f* 15

Te verkrijgen RAPPORTEN

1. Sprik, J.B. en G.H. Horst. 1982. Onderzoek naar capaciteitsnormen voor diepploegen, bulldozers en hydraulische graafmachines.
2. Nieuwenhuis, G.J.A. en C.L. Palland. 1982. Verdamping van een aardappelgewas en de meting daarvan via remote sensing.
3. Hoeks, J. en G.J. Agelink. 1982. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen.
5. Rijtema, P.E. et al. 1982. Bemesting, waterhuishouding, perceelscheidingen en landbouw. Commentaar op een RIN-rapport.
6. Harmsen, J. en H. van Drumpt. 1982. Conservering van watermonsters.
7. Ernst, L.F. 1983. Wegzijging en kwel; de grondwaterstroming van hogere naar lagere gebieden.
8. Steenvoorden, J.H.A.M. en M.J. de Heus. 1984. Fosfaatbalansstudies en de bijdrage van diffuse bronnen.
9. Wijk, A.L.M. van. 1984. Landbouwkundige aspecten van ontwatering in veenweidegebieden. Commentaar op een literatuuranalyse.
10. Beuving, J. 1984. Vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, dichtheid en samenstelling van bodemprofielen in zand-, zavel, klei- en veengronden.
11. Weerd, B. van der en L.F. Ernst. 1984. Een prognose van het effect van een peilverhoging in het Philippinekanaal (Zeeland) op de grondwaterstand in de aangrenzende polders.
12. Werkgroep nitraatuitspoeling in waterwingebieden. 1985. Nitraatproblematiek bij grondwaterwinning in Nederland. Onderzoek naar alternatieve maatregelen.
13. Wilde, J.G.S. de. 1984. Dammen van riet, heide of boomschors als perceelverbinding in veenweidegebieden.
14. Kemmers, R.H. en P.C. Jansen. 1985. Stikstofmineralisatie in onbemeste half-natuurlijke graslanden.
15. Bakel, P.J.T. van. 1985. Effecten van peilbeheer in het gebied 'De Monden' (Drenthe).
16. Wilde, J.G.S. de. 1985. Rekenmodel en produktienormen voor grondtransport met getrokken en zelfrijdende dumpers.
17. Projectteam Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. 1985. Onderzoek naar de mogelijkheden van operationele toepassing van remote sensing technieken in de landbouw en het natuurbeheer. Eindrapport.
18. Wösten, J.H.M., M.H. Bannink en J. Beuving. 1987. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks.
19. Rijtema, P.E., C.W.J. Roest en J. Pankow. 1986. Onderzoek naar de waterbalans van vuilstortplaatsen.
20. Bakker, J.W., F.R. Boone en P. Boekel. 1987. Diffusie van gassen in grond en zuurstofdiffusiecoëfficiënten in Nederlandse akkerbouwgronden.