

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding  
Wageningen

**ALTERRA**

Wageningen Universiteit & Research Center  
Omgevingswetenschappen  
Centrum Water & Klimaat  
*Team Integratie*

LUCHTHUISHOUDING VAN BODEM EN PLANT;  
OVERZICHT PROCESSEN EN KENMERKENDE GROOTHEDEN.

J.W. Bakker

---

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

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

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

---

## I N H O U D

	Blz.
INLEIDING	1
TRANSPORT VIA GASFASE	2
TRANSPORT VIA VLOEISTOFFASE	5
REAKTIE GEWAS	7
LITERATUURLIJST	9

## INLEIDING

Dat de luchthuishouding van de bodem een belangrijke produktie beïnvloedende factor is, behoeft voor Nederlandse omstandigheden niet discutabel gesteld te worden. Wat wel ter discussie staat, is: Hoe karakteriseert men een grond en ontwatering m.b.t. de luchthuishouding, of anders: welke grootheden kunnen dienen als bruikbare indicaties van de luchthuishouding.

Als indicaties zijn gebruikt: De gemiddelde grondwaterstand; voor meerdere grondsoorten zijn de z.g. opbrengst-ontwateringsdieptecurven bepaald uit meerjarig proefplekken onderzoek of uit gegevens van grondwaterstandsproefvelden (C.O.L.N. onderzoek proefvelden N.W. Beerta, Geestmerambacht, IJsselmeerpolders etc.).

De som van de dagelijkse overschrijdingen van de grondwaterstand boven een bepaalde diepte gedurende bepaalde perioden zoals door Sieben voor de IJsselmeerpolders is ontwikkeld.

Het structuurkenmerk luchtgehalte bij een vochtspanning van - 100 mb(pF<sub>2.0</sub>) of als de resultante van structuur en ontwatering het gemiddelde luchtgehalte tijdens de groeiperiode. De samenstelling van de bodematmosfeer en ten slotte de diffusiesnelheid van zuurstof in de grond naar een dunne platina electrode (O.D.R.).

Voorals als gevolg van verschillen in weersgesteldheid worden vrij sterke verschillen gevonden in de relaties tussen bovengenoemde grootheden en gewasopbrengsten van diverse jaren.

Het blijkt dat geen dezer grootheden als eenduidige maat is te gebruiken van de luchthuishouding met betrekking tot gewasgroei. Een duidelijk inzicht in deze materie is zeker gewenst om zinvolle interpretatie van deze metingen mogelijk te maken. Daarom is getracht een zo volledig mogelijk overzicht te geven van processen en relaties welke in verband met de luchthuishouding van invloed zijn op de uiteindelijke gewasproduktie.

De luchthuishouding van de grond zou kunnen worden gedefinieerd als een reeks transportprocessen van  $O_2$  en  $CO_2$  in verband met ademhaling van plantenwortels en micro-organismen in de grond.

Beginnend bij het luchtgehalte van de grond:  $\epsilon_g$  ( $cm^3$  lucht/ $cm^3$  bodem) is in fig. 1 een schema van de processen gegeven plus de factoren welke hierop van invloed zijn. In het nu volgende wordt dit schema nader besproken en voorzien van voorbeelden.

Het luchtgehalte is te bepalen als verschil tussen totaal poriënvolume:  $\epsilon_t$  en het vochtgehalte in vol%:  $\epsilon_w$ .

Van de grond is het luchtgehalte afhankelijk van de poriëngrootteverdeling, de grondwaterstand en het watertransport in de niet-verzadigde zône.

De poriëngrootteverdeling bepaalt het verband vochtspanning - luchtgehalte - vochtgehalte, zoals dat gewoonlijk wordt weergegeven in de z.g. pF curven.

De verschillen tussen de diverse gronden kunnen groot zijn: de luchtgehalten bij vochtspanning -100 mb bijvoorbeeld kunnen liggen tussen 5 en 35 vol%.

Wat betreft de vochtspanning: deze is in de situatie waarbij geen watertransport optreedt, gelijk aan -de hoogte boven de grondwaterspiegel ( $h_{grw}$ ).

Bij watertransport van de oppervlakte naar beneden, het geval bij neerslagoverschot, is de vochtspanning  $> -h_{grw}$ . Bij slecht doorlatende gronden komt het voor dat de doorlatendheid kleiner is dan de neerslag wat plasvorming en volledige verzadiging van het oppervlak tot gevolg heeft (vochtspanning  $\gg$  nul).

Bij transport van water vanuit het grondwater, het geval bij verdampingsoverschot, is de vochtspanning  $< -h_{grw}$  vooral in gronden met een laag capillair geleidingsvermogen (b.v. in zware klei) is de daling van de vochtspanning sterk.

Transport via gasfase.

Voor het gastransport in de grond over afstanden in de grootteorde van centimeters en meer is vooral het transport door gasdiffusie

via de gasfase van belang\*.

Voor het gastransport door diffusie via de gasfase zowel als via de waterfase geldt de vergelijking:

$$F = -D \frac{dc}{dx}$$

F = flux = massa welke per tijdseenheid door de eenheid van oppervlak passeert ( $g \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ ).

D = diffusiecoëfficiënt ( $\text{cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ ) met als index g en w voor diffusie door grond via gas resp. waterfase en met index og en ow voor diffusie via puur gas of water

c = concentratie (in gram per  $\text{cm}^3$  vloeistof of gas)

x = afstand (cm)

De  $O_2$  diffusiecoëfficiënt door de grond ( $D_g$ ) wordt bepaald door luchtgehalte en structuur.

Vooraf bij luchtgehalten beneden 0,20 is de structuur van groot belang (zie fig. 2).

Het verband tussen  $\xi_g$  en  $D_g$  kan goed beschreven worden met een formule van de vorm  $D_g = a \xi_g^b$ .

Een lineaire beschrijving is vooral in dit traject van  $\xi_g$  slecht bruikbaar (zie fig. 3).

In homogene niet-geaggregeerde gronden vinden we ongeveer gelijke formules.

homogeen zand	$D_g = 1,2 \xi_g^{3,4}$
gezeefde fijnzandige zavel	$D_g = 1,2 \xi_g^{3,5}$
duinzand	$D_g = 0,5 \xi_g^{3,0}$
opp. verslempde zavelgrond	$D_g = 0,4 \xi_g^{3,0}$

In gronden met uitgesproken structuur is de exponent b lager.

$D_g = 0,2 \xi_g^{2,0}$  (zie fig. 2 niet-verslempde gronden). Dit betekent bij  $\xi_g = 0,10$  een 4 x hogere  $D_g$  dan bij de verslempde zavelgrond. Een

\* b.v. Diffusiecoëf.  $O_2$  in lucht:  $D_{og} = 0,2 \text{ cm}^2/\text{sec}$  ( $T=20^\circ\text{C}$ ) en in water:  $D_{ow} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ . Bij partiële gasdruk van  $O_2 = 210 \text{ m.bar}$  bevat lucht  $280 \text{ mg } O_2/\text{liter}$  en  $H_2O$   $9 \text{ mg } O_2/\text{liter}$ . Bij een gelijke partiële drukgradiënt kan er door lucht  $\frac{0,2}{2,4 \cdot 10^{-5}} \times \frac{280}{9} \approx 3 \cdot 10^5$  meer  $O_2$  diffunderen dan door water.

verklaring hiervoor is waarschijnlijk het relatief grotere percentage doorgaande poriën (b.v. scheurtjes in gronden met 'blokkige structuur' of doorgaande gangen van bodemdieren).

De  $O_2$  en  $CO_2$  concentraties in de bodematmosfeer zijn de resultaten van gasdiffusie coëfficiënten en  $O_2$  consumptie en  $CO_2$  produktie + verdeling van deze met de diepte.

De  $O_2$  consumptie en  $CO_2$  produktie is afhankelijk van:

- a. Bewortelingsintensiteit en activiteit van de wortels.
- b. De temperatuur ( $Q_{10} \approx 2,2$  à  $2,7$ ), daar de wortelontwikkeling ook temp. afhankelijk is; zijn de verschillen tussen de seizoenen groter dan alleen de temperatuurverschillen zouden doen vermoeden.
- c. De microbiologische activiteit, zware organische bemesting doet b.v. de bodemademhaling meer dan verdubbelen.
- d. De  $O_2$  conc. van de bodematmosfeer en vochtgehalte (fig. 4).

De in land- en tuinbouw voorkomende  $O_2$  consumpties liggen tussen  $50-1500 \text{ mg } O_2 \text{ m}^{-2} \text{ uur}^{-1}$  ( $0,14 \cdot 10^{-5}$  à  $4,2 \cdot 10^{-5} \text{ mg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ ).

Voor het transport van deze hoeveelheden is bij een waarde voor  $D_g$  van  $10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$  (komt voor bij  $C_g=0,08$  à  $0,12$ , fig. 2) een concentratiegradiënt vereist van resp.  $0,11$  en  $3,16 \text{ vol\% } O_2$  per cm.

De  $O_2$  concentraties kunnen tot zeer lage waarden dalen (fig. 6)

ook op zeer geringe diepte van  $5$  à  $10$  cm wordt onder vochtige grasmat vaak zeer lage  $O_2$  conc. gemeten. De  $CO_2$  concentraties fluctueren aanzienlijk minder dan de  $O_2$  concentraties (fig. 5) waarschijnlijk doordat van  $CO_2$   $\pm 40$  x meer in  $H_2O$  oplost dan van  $O_2$  bij gelijke partiële spanning. Het water in de grond is een belangrijke buffer voor  $CO_2$ .

Alleen na langdurige stagnatie van het gastransport vinden we voor het gewas schadelijke  $CO_2$  concentraties. Het  $O_2$  gehalte is vaak na  $1$  à  $2$  dagen stagnatie van het gastransport tot voor het gewas schadelijk lage waarden gedaald. (Voorbeeld reactie gewas op  $O_2$  en  $CO_2$ , zie fig. 7 de verdamping is hier recht evenredig met het bladopp.).

Schade aan het gewas door slechte aeratie zal daarom in de eerste plaats veroorzaakt worden door te lage  $O_2$  concentraties.

In een natte periode is vaak de daling van  $O_2$  concentraties in ondiepere lagen het snelst, als gevolg van hogere ademhalingsactiviteit in de ondiepere lagen. Tijdelijk vindt men daarom op grotere diepte hogere  $O_2$  concentraties.

Transport via vloeistoffase.

De weerstand voor gastransport in de relatief dunne laag van water + bodemdeeltjes die het worteloppervlak van de gasfase scheidt en de weerstand in de wortel zelf kunnen zeer aanzienlijk zijn. Hetzelfde geldt voor het transport in verzadigde bodemaggregaten.

De formules voor de  $O_2$  concentratie afname rond en in de wortel zijn gegeven in fig. 8. De variatie van de genoemde grootheden is aanzienlijk. Het  $O_2$  verbruik per  $cm^3$  wortelweefsel ( $q$ ) is  $1 \text{ à } 3 \cdot 10^{-7} \text{ g/cm}^3 \text{ sec. } (\pm 22^\circ C)$ .

De diffusiecoëfficiënt van  $O_2$  in de wortel:  $D_i = 1,2 \text{ à } 7 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec.}$  Sommige planten reageren op onvoldoende aeratie door vorming van wortels met luchtgevulde ruimten. Hierin zal  $D_i$  hoog zijn,  $O_2$  aanvoer via de wortels zelf kan dan van belang worden.

De diffusiecoëfficiënt van  $O_2$  in water:  $D_{ow} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec.}$ , de aanwezigheid van vaste delen doet dit teruglopen tot in ieder geval  $a \times \xi_t \times D_{ow} = D_{ew}$  of ook wel  $D_{ew} = D_{ow} \xi_t^b$ .

Directe metingen van  $a$  zijn zeer schaars. Aangenomen wordt wel een 'tortuosity' factor  $a$  van  $\pm 0,60$  of, wat in het interessante traject van  $\xi_t$  ongeveer gelijke uitkomsten geeft:  $b = 3/2 \text{ à } 4/3$ .

Voor losse ongerichte pakking, zoals deze bij zanden voorkomen, lijken deze schattingen wel korrek. Voor meer gerichte pakkingen zoals deze bij kleien voorkomen kan  $a$  sterk dalen; metingen voor kleien (SIDES en BARDEN, 1970) geven de wel zeer lage waarden van  $a$  van  $0,14$  bij  $\xi_t = 0,55$  tot  $0,017$  bij  $\xi_t = 0,31$ . De grootte van  $D_w$  en ook de dikte van de verzadigde laag zijn dus nog vrij onzekere factoren in de berekeningen van transport door de grond.

De afhankelijkheid van zuurstofconsumptie van een wortelstelsel van de  $O_2$  concentratie beneden een bepaalde waarde kan verklaard worden uit het feit dat de  $O_2$  conc. afname in de waterfilm en wortel groter is dan deze  $O_2$  conc. waardoor in het centrum van de wortel de  $O_2$  conc. praktisch nul wordt. Verhoging van de ademhaling (door verhoging Temp.) of vergroting van de weerstand rond de wortel (vochtiger grond) doet waarde stijgen (fig. 4). Bij  $21^\circ C$  ligt deze in dit voorbeeld waarschijnlijk boven  $21 \text{ vol\% } O_2$ .

De beperking van de ademhaling in bodemaggregaten is op analoge wijze te verklaren.

Een meting welke een indruk geeft van de  $O_2$  diffusie in de waterfase is de meting van de z.g. oxygen diffusion rate (ODR). Gemeten wordt de hoeveelheid zuurstof die naar de oppervlakte van een in de grond gestoken platina electrode diffundeert, waar door elektrische  $O_2$  reductie een  $O_2$  concentratie = 0 wordt gehandhaafd. Deze  $O_2$  flux wordt bepaald door  $O_2$  conc. in de waterfase op het grensvlak van water en gasfase:  $C_p$ , waterfilmdikte en  $D_{ew}$ .

De formule voor het  $O_2$  concentratieverlies buiten de wortel (fig. 8) of electrode  $C_p - C_r = -\frac{qR^2}{2D_{ew}} \ln\left(\frac{R}{r_e}\right)$  omgewerkt voor deze flux geeft:

$$ODR = \frac{D_{ew} C_p}{R \ln\left(\frac{R}{r_e}\right)}$$

De dikte van de verzadigde laag  $r_e - R$  kan voor verschillende situaties met deze formule worden berekend. (Letey and Stolzy, 1967).

Bijvoorbeeld voor de waarde van de O.D.R. waarbij de wortelgroei van veel gewassen stopt:

$$\text{nml. } 0,20 \mu\text{g/cm}^2 \text{min.} \quad \left(0,2 \frac{10^{-6}}{60} \text{ g/cm}^2 \text{sec.}\right)$$

en voor de waarde waarboven de aeratie geen beperkende factor meer is nml.  $0,40 \mu\text{g/cm}^2 \text{min.}$

aangenomen:  $D_w = D_{ow} \xi_t^{3/2}$  en  $C_p$  is in evenwicht met 210 mb  $O_2$  druk

(21 vol%) geeft voor  $ODR = 0,2 \mu\text{g}$  een laagdikte van 0,08 en 0,35 mm voor een  $\xi_t$  van resp. 0,2 en 0,5

en voor  $ODR = 0,4 \mu\text{g}$ , 0,05 en 0,15 mm voor  $\xi_t$  van resp. 0,2 en 0,5.

Een film van alleen water rond een wortel zal alleen onder zeer natte omstandigheden weerstand van enige betekenis geven. De filmdikte wordt namelijk geschat op ongeveer 0,38 mm bij een vochtspanning van -1 mb en 0,0025 mm bij een vochtspanning van -18 mb.

Voor een lichte zavel is in figuur 9 de invloed van vochtgehalte en  $O_2$  concentratie op de ODR weergegeven.

Tot het niveau waar elektrische weerstanden een merkbare invloed krijgen, is de ODR rechtevenredig met de  $O_2$  conc. De invloed van het vochtgehalte ligt minder eenvoudig en is sterk afhankelijk van dichtheid en textuur. In niet-gehomogeniseerde geaggregeerde grond vertonen de ODR-waarden uiteraard zeer grote spreiding.



## Reaktie gewas.

De uiteindelijke mechanismen van de reacties van het wortelstelsel op onvoldoende aeratie schijnen zeer complex en afhankelijk van omstandigheden. Enkele voorkomende symptomen zijn: stoppen van wortelgroei; vorming dikke luchthoudende wortels; vertraging bovengrondse groei met geel worden van het blad. Op plotseling verslechterende aeratietoestand reageert het gewas vaak traag, de verdamping zowel als assimilatie vertonen meer verband met bladoppervlak dan met aeratietoestand.

Op volkomen afsluiten van gastoevoer (b.v. bij inundaties) reageert b.v. stamslaboon binnen 24 uur en sterft af. Andere gewassen b.v. sla reageert zeer traag en herstelt zich van 7 dagen inundatie. Afsterven vooral van jonge wortels komt veel voor. Bij inundatie daalt de zuurstofconcentratie in de grond meest binnen enkele uren tot 0%. Bij deze zeer lage zuurstofconcentraties worden door anaerobe bacteriën aan geoxydeerde stoffen zuurstof onttrokken, z.g. gereduceerd. Van de ontstane gereduceerde stoffen kunnen sommige reeds in lage concentraties giftig zijn. Bekend is vergiftiging door  $H_2S$  in natte sulfaathoudende gronden. Fig. 10 geeft een voorbeeld van de reductie onder graszode tijdens inundatie; de hier gemeten redoxpotentiaal is rechtverredig met log concentratie geoxydeerde stoffen - log gereduceerde stoffen en is dus een indicatie voor de mate van reductie in een grond. Duidelijk komt ook tot uiting hoe snel de reductie na inundatie optreedt. Dit is vooral het geval in gronden met grote biologische activiteit.

Er is veel onderzoek gepubliceerd over de reacties van gewassen op luchtgehalte,  $O_2$  en  $CO_2$  conc. in de bodematmosfeer en ODR-waarden. In proeven waar één van deze waarden de variabele is, worden goede correlaties gevonden. In de praktijk met sterk wisselende vochtgehalten, temperatuur en grondsoort blijkt geen dezer waarden een eenduidige maat voor de aeratietoestand van grond en gewas te zijn.

In proeven met één grondsoort, waar onder wisselend vochtgehalte als indicatie voor luchthuishouding  $\xi_g$ , ODR en  $[O_2]$  en  $[CO_2]$  worden gevolgd, wordt vaak de beste correlatie gevonden tussen

het luchtgehalte ( $\zeta_g$ ) en gewasgroei (Dasberg-Bakker, 1970).

Dit is waarschijnlijk te verklaren uit het feit dat een verandering van  $\zeta_g$  alle andere factoren in dezelfde zin doet veranderen.

Een daling van  $\zeta_g$  door verdichting of door verhoging van het vochtgehalte bijvoorbeeld gaat gepaard met zowel een daling van het macrotransport (daling  $D_g$  en  $[O_2]$ ) als met een daling van het microtransport in de verzadigde grond rond wortels en in bodemaggregaten als gevolg van resp. grotere dichtheid in verzadigde zone en grotere dikte ervan (te meten als daling ODR).

Herhaald zij dat voor verschillende gronden, structuren en gewassen het luchtgehalte waarbij de aeratie voldoende is, niet gelijk is.

Wanneer echter van een bepaalde grond voldoende bekend is over de in schema 1 gegeven relaties zal voor de praktijk het luchtgehalte waarschijnlijk een bruikbare maat zijn voor aeratie. Temeer daar de bepaling van het luchtgehalte relatief eenvoudig is.

## LITERATUUR

- BAKKER, J.W., 1965 - Luchthuishouding van bodem en plantenwortels; een literatuurstudie, Nota I.C.W. 302.
- BAKKER, J.W. and A.P. HIDDING, 1970 - The influence of soilstructure and aircontent on gasdiffusion in soils. Neth.J.agric. Sci.18; 37-48.
- DASBERRY, S. and J.W. BAKKER, 1970 - Characterising soil aeration under changing soil moisture conditions for bean growth. Agron.J.62: 689-693.
- LEMON, E.R., 1962 - Soil aeration and plantroot relations. Agron. J. 54: 167-170.
- LETEY, J. and L.H. STOLZY, 1967 - Limiting distances for oxygensupply. Soil Sci. 103: 404-409.

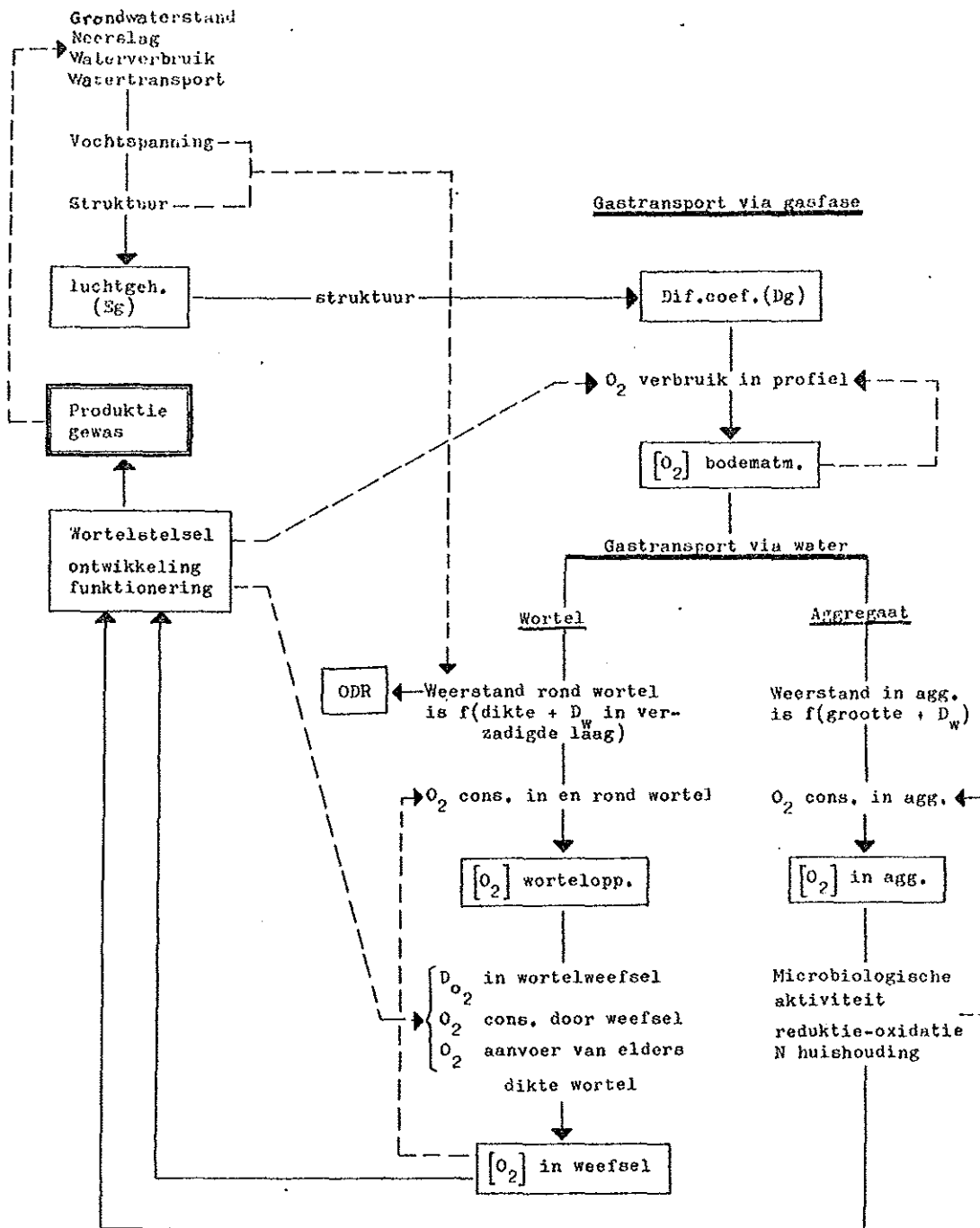


Fig. 1 Schema van bodemkundige en plantkundige grootheden welke een rol spelen bij de luchthuishouding van bodem en gewas.

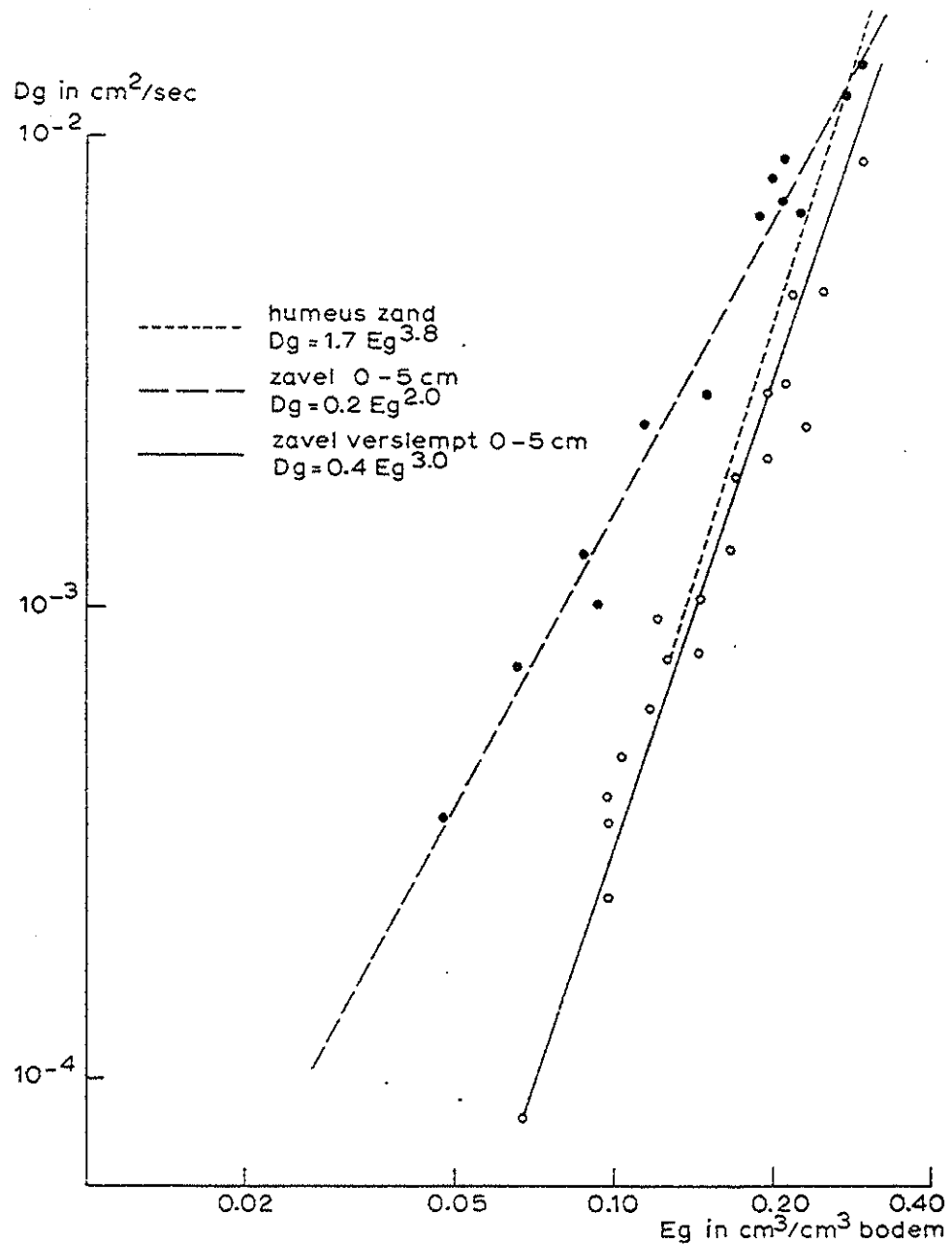


Fig. 2 Relaties tussen luchtgehalte ( $E_g$ ) en  $O_2$  diffusiecoëfficiënt ( $D_g$ ) voor verschillende gronden (log-log schaal)

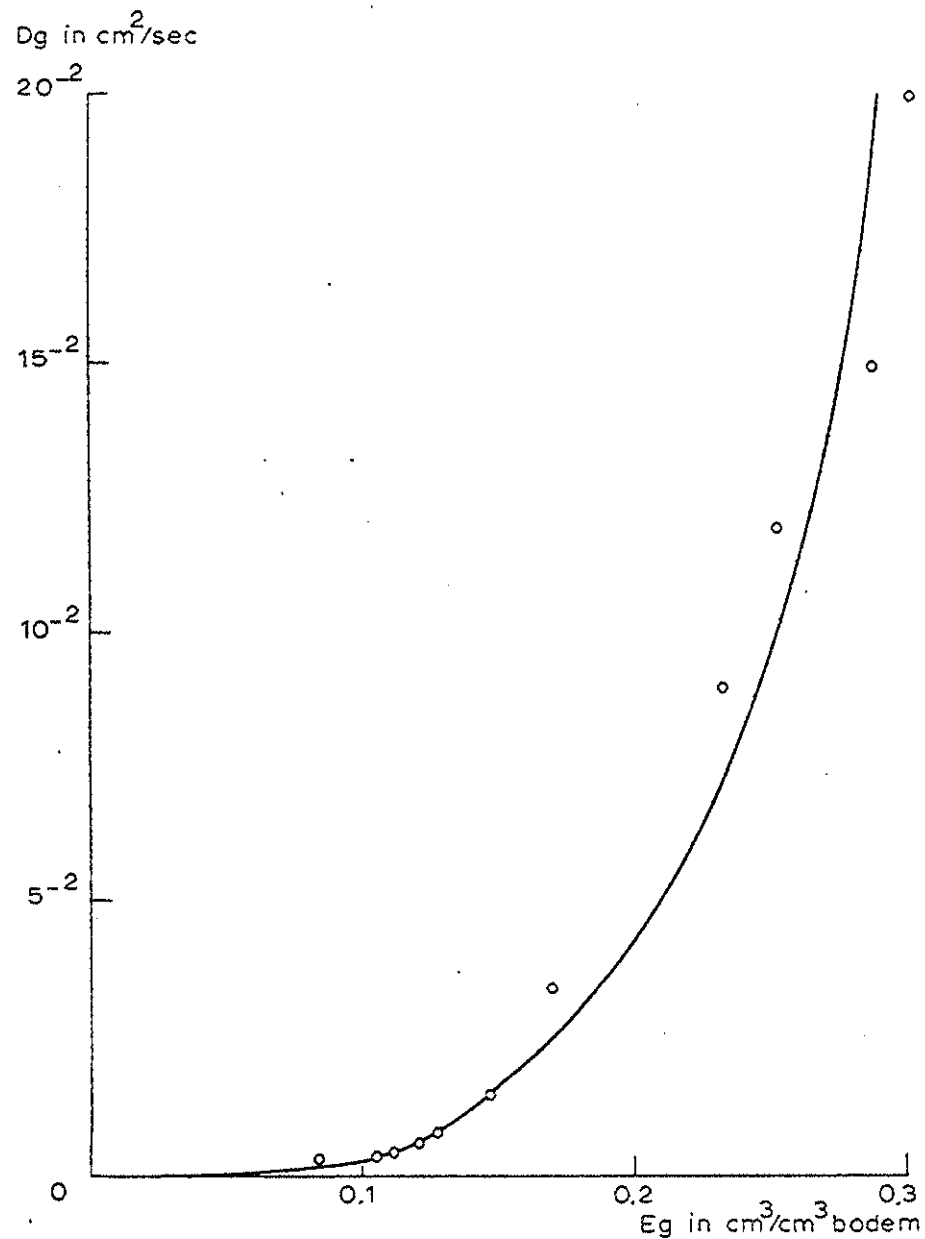


Fig. 3 Relatie tussen luchtgehalte en diffusiecoëfficiënt op lineaire schaal, fijnzandige zavel, functielijn:  $D_g = 1,2 E_g^3$

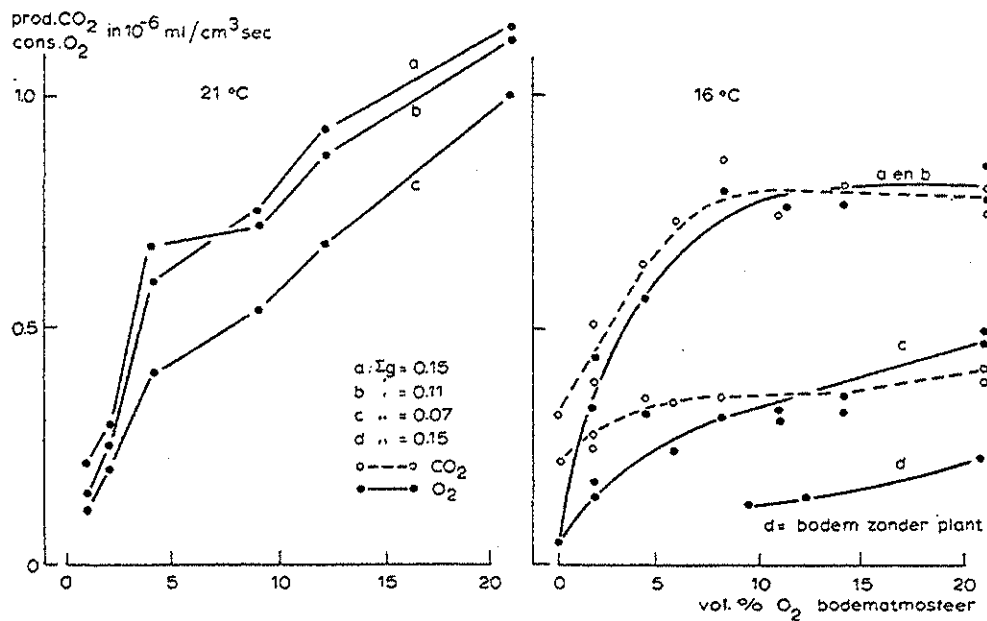


Fig. 4 Invloed O<sub>2</sub> gehalte van de bodematmoseer op ademhaling van grond en wortelstelsel (stamslaboon op fijnzandige zavel)

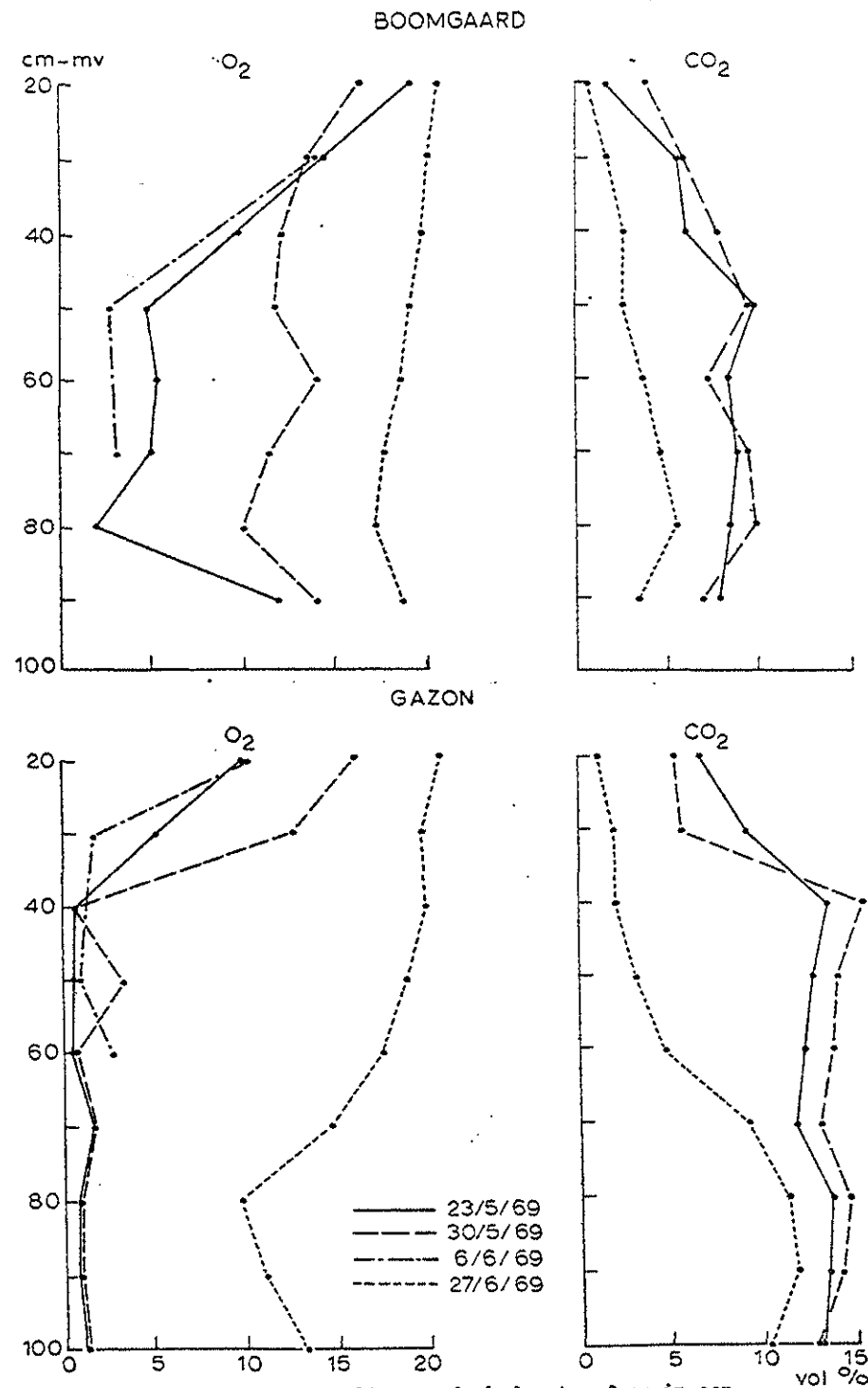
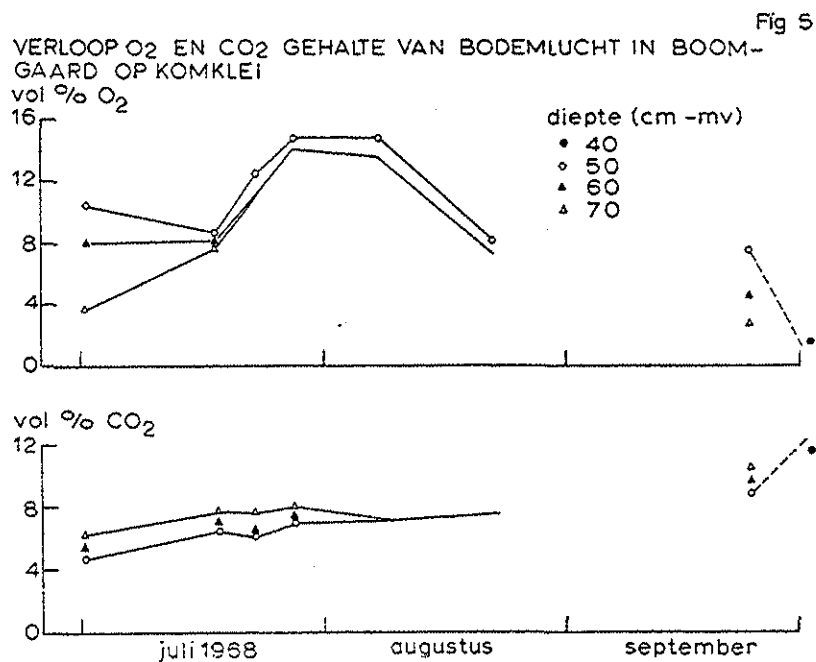


Fig. 6 Beloop O<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub> gehalte van de bodematmoseer in een boomgaard en een gazon op komklei, gedurende regenrijke zomer.

Fig7 INVLOED VAN O<sub>2</sub> EN CO<sub>2</sub> GEHALTE VAN DE BODEMLUCHT  
 OP KOMKOMMER, VERDAMPING NA 12 DAGEN  
 DOORLEIDEN VAN GASMENGSELS

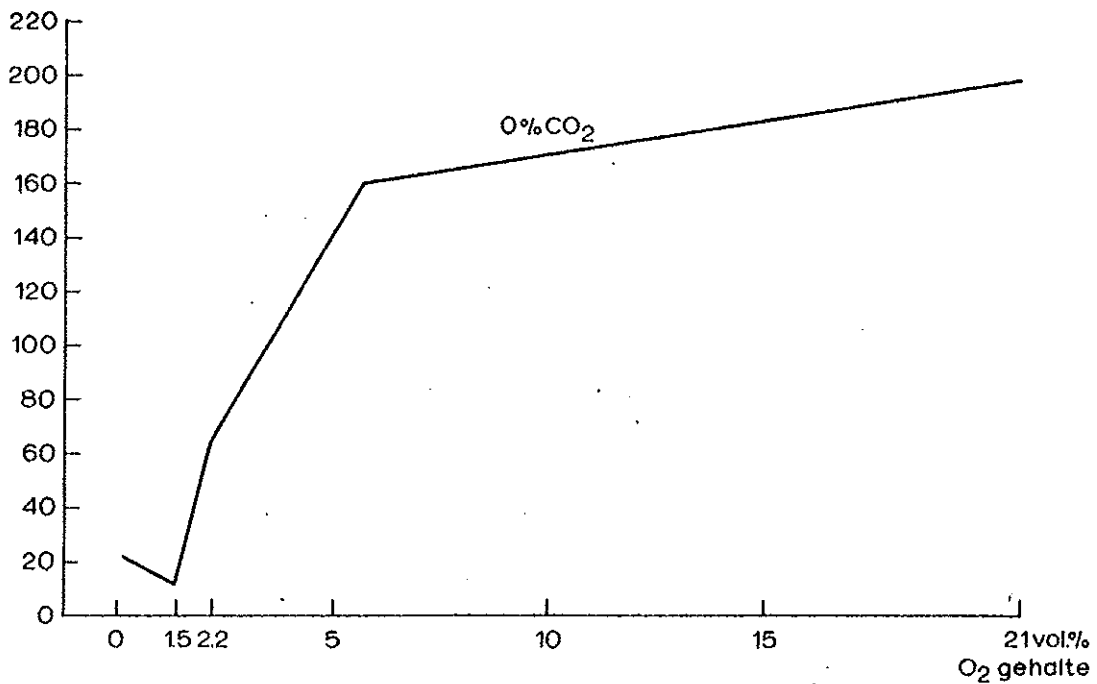
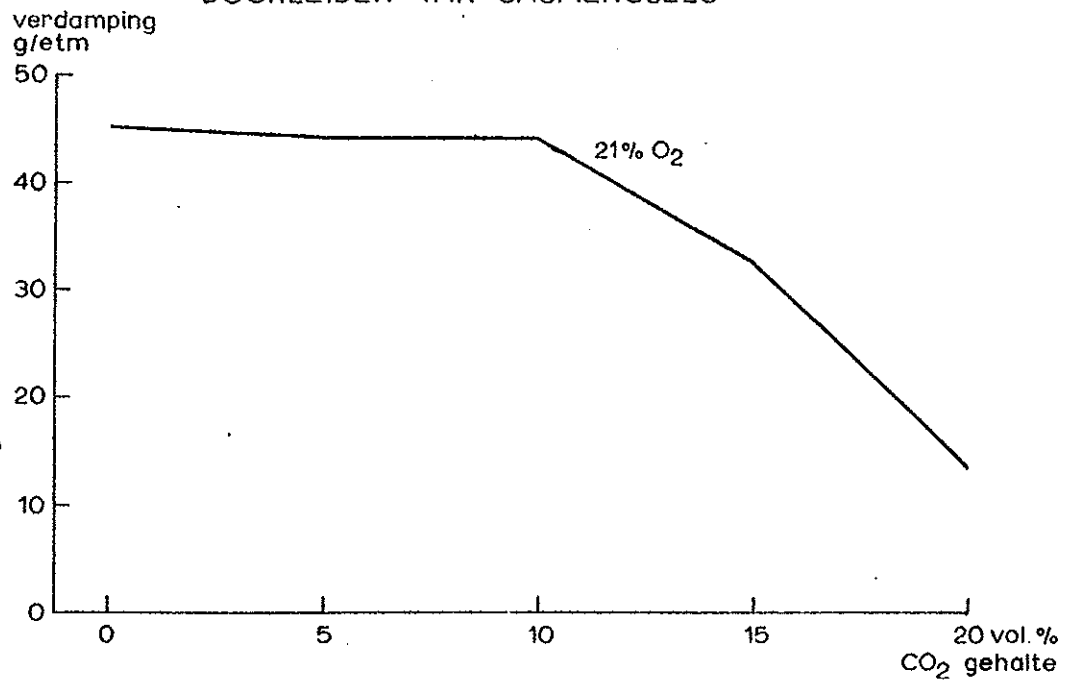
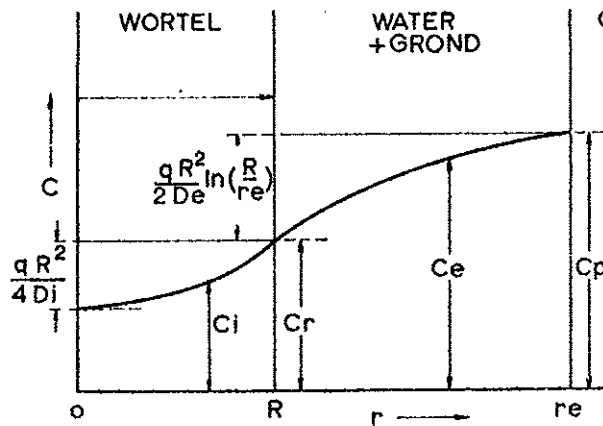


fig 8



O<sub>2</sub> concentratie als functie van de afstand  $r$  tot de wortelas (Lemon 1962)

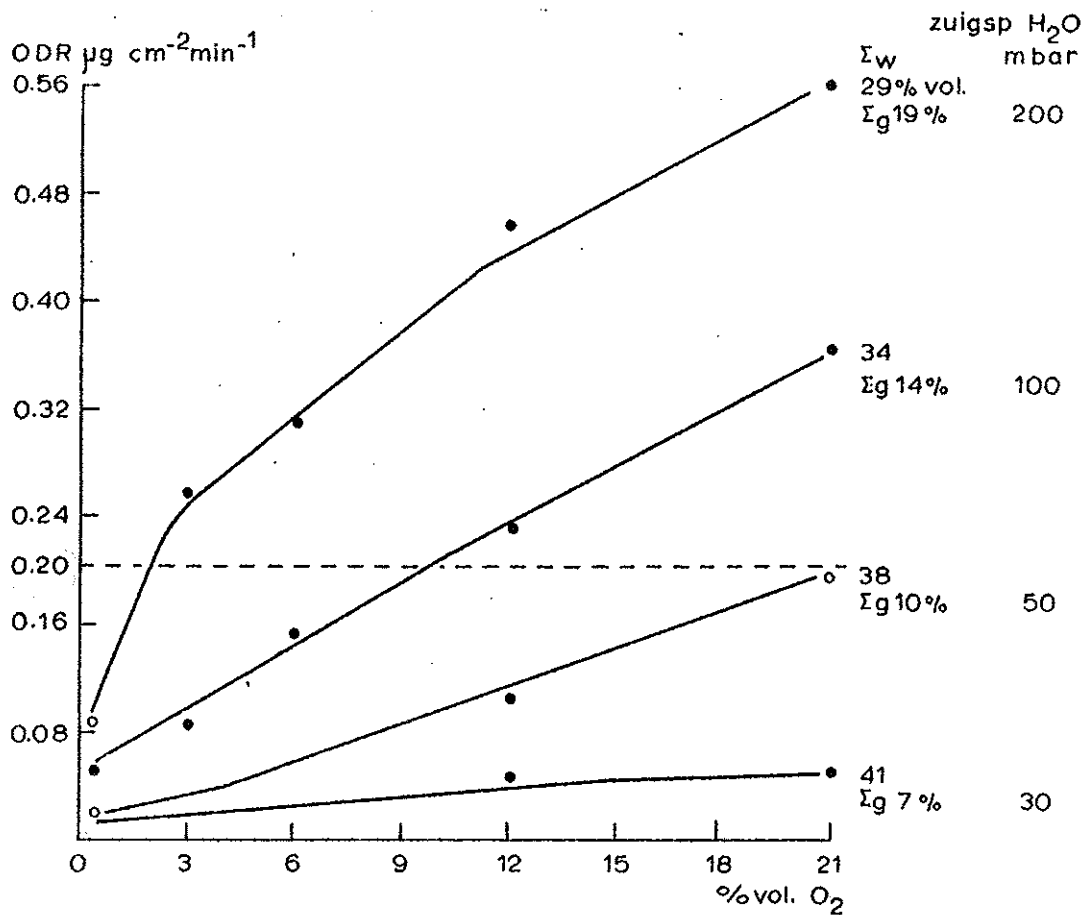


Fig. 9 O<sub>2</sub> diffusiesnelheid naar een platina electrode (o.D.R.) als functie van het O<sub>2</sub> gehalte van de bodematmosfeer en het vochtgehalte in een fijnzandige zavel



