INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING

NOTA 302, d. d. 20 mei 1965

Luchthuishouding van bodem en plantenwortels
een literatuurstudie

ir. 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.
Aan gebruikers buiten het Instituut wordt verzocht ze niet in publikaties te vermelden.
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking.

I N H O U D

			pag.
I		Inleiding	· 1
II		CO_2 produktie en O_2 verbruik van bodem en plantenwortels	· 3
	A	Inleiding	· 3
	B	Veldmetingen CO_2 produktie en O_2 verbruik	· 4
	B 1	enkele cijfers	· 4
	2	dagfluctuaties van CO_2 produktie in het veld, vooral als gevolg van vocht en temperatuurschommeling	· 6
	C	Enige factoren die de CO_2 produktie en het O_2 verbruik beïnvloeden	. 7
	C 1	van de bodem	. 7
	1a	Temperatuur	· 7
	b	Vochtgehalte	· 8
	c	reactie bodemademhaling op CO_2 en O_2 concentratie	· 10
	d	organische stof	. 11
	e	pH	· 12
	f	beschikbaarheid mineralen	· 12
	g	niet biologische oorzaken CO_2 afgifte of opname	· 12
	C 2	van de plantenwortel	· 14
	C 2a	enkele cijfers	· 14
	b	reactie worteladembaling op CO_2 en O_2 concentraties	· 15
	c	reactie op lage O_2 concentratie	. 16
	d	ademhalingsquotient	· 17
	D	Diffusiemogelijkheid als beperkende factor voor O_2 verbruik	· 17
	D 1	van wortels	· 17
	2	van bodemagregaten	· 21
III		CO_2 en O_2 concentraties in de bodemlucht	· 25
	A	Voorkomende concentraties	· 25
	B	Berekening van de CO_2 en O_2 concentraties op verschillende diepte	· 27
	B 1	De verdeling der CO_2 produktie en O_2 verbruik naar diepte	· 27
	2	Transportmogelijkheid van gassen	· 28

			pag.
IV		Reacties van de plant vooral op lage O_2 en hoge CO_2 concentraties	31
	A	Gevolgen slechte luchthuishouding	31
	A 1	physiologische reacties op O_2 en CO_2 concentraties	32
	2	vergiftige stoffen	33
	3	aanpassing van de plant aan slechte luchthuishouding	33
	B	Hoogte schadelijke O_2 en CO_2 concentraties	34
	B 1	het concentratieverval	34
	2	temperatuur	34
	3	limiterende O_2 concentratie	35
	4	reactie op zeer lage O_2 concentraties	35
	5	reactie op zeer hoge O_2 concentraties	37
	6	hoogte schadelijke CO_2 concentratie	37
V		Stikstofvoorziening en luchthuishouding	38
	A	Invloed luchthuishouding op de hoeveelheid minerale stikstof	38
	B	Invloed nitraat op plantengroei onder anaerobe omstandigheden	41
	C	Proefveldgegevens	41
VI		Apparaten gebruikt bij het aeratie-onderzoek	44
	A	O_2 diffusie snelheid in de grond naar een electrode, als maat voor de mogelijke zuurstoftoevoer naar plantenwortels	44
	B	Meting gasdiffusie coëfficient in de grond	49
	C	Bepaling luchtvolume van de grond	56
	D	Monstername gas uit de bodem	57
	E	Bepaling O_2 en CO_2 concentraties	59

Luchthuishouding van bodem en plantenwortels

I Inleiding

Onder de luchthuishouding van bodem en plantenwortels kan worden verstaan: Het complex van gastransport en produktie respectievelijk verbruik van CO_2 en O_2 door plantenwortels en micro-organismen en de daardoor beinvloedde CO_2en O_2 concentraties in de bodem.

Onder aeratie kunnen we verstaan de transportmogelijkheid van gassen in de bodem. Een onvoldoende aeratie betekent, dat de transportmogelijkheid in de bodem van gassen te klein is, zodat door de CO_2 produktie en het O_2 verbruik van plantenwortels en micro-organismen, de O_2 en CO_2 concentratie in de bodem te laag resp. te hoog wordt. Hierdoor worden de levensverrichtingen zowel van de plantenwortels als van de aerobe micro-organismen sterk geremd. Dit kan dan een opbrengstvermindering of zelfs het totaal afsterven van het gewas veroorzaken. Een onvoldoende aeratie komt vooral voor tijdens hoge grondwaterstanden en in verslempte of zeer dichte gronden.

In de loop der jaren zijn reeds talrijke overzichtsartikelen gepubliceerd van het verrichte onderzoek omtrent aeratie en de invloed daarvan op planten en micro-organismen (CLEMENTS, 1921; ROMELL, 1922; GIESEKE, 1930; en later PETERSON, 1950; RUSSEL, 1952 (zeer uitvoerig); KRAMER, 1949; ALBERDA, 1955; BLACK, 1957; VAN 't WOUD en HAGAN, 1960). Uitvoerige literatuuroverzichten geven ook H.F. BERGMAN, (1959) en VILAIN (1963).

Ten behoeve van het onderzoek omtrent de aeratie van de bodem en invloed daarvan op gewassen, waarmee op het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding een begin is gemaakt, is hier een overzicht samengesteld van de uit de literatuur bekende gegevens omtrent de luchthuishouding en de onderzoeksmethoden, welke hierbij te gebruiken zijn.

De luchthuishouding van bodem en plantenwortel kan beschreven worden als een transportsysteem. De O_2 die voor de ademhaling van plantenwortels en micro-organismen in de grond nodig is, moet uit de atmosfeer via de grond op de plaats komen waar het wordt verbruikt, en de daar gevormde CO_2 moet weer worden afgevoerd. Verreweg het belangrijkste mechanisme voor dit transport is gasdiffusie door de met lucht gevulde poriën in de grond. Alleen voor transport over afstanden van enkele millimeters in de direkte omgeving van de wortels, of in de met water gevulde poriën in bodemagregaten kan gasdiffusie door de waterfase van belang worden.

De hoeveelheid gas die door diffusie kan worden getransporteerd is afhankelijk van het verschil tussen de gasconcentratie in het wortelmilieu en in de atmosfeer, de afstand waarover het transport moet plaats hebben en de diffusie coëfficient voor gassen in de grond. Om dus een inzicht te verkrijgen van de luchthuishouding moet bekend zijn: De grootte van het O_2 verbruik en CO_2 produktie, het beloop daarvan met de diepte, de diffusie coëfficient van O_2 en CO_2 in de grond en de voor planten en micro-organismen nog toelaatbare O_2 en CO_2 concentraties;
Voor wat betreft het gastransport in de direkte omgeving van de wortel zijn gegevens nodig van het O_2 verbruik per worteldeel en de gastransportmogelijkheid via de waterfase over korte afstand.

In dit literatuuroverzicht is daarom vooral aandacht geschonken aan het verbruik en de produktie van O_2 resp. CO_2 van plantenwortels en micro-organismen en de factoren die daarop van invloed zijn (hoofdstuk II), de transportmogelijkheid van gassen in de grond door de met lucht gevulde poriën dit i.v.m. het gastransport tussen de atmosfeer en de wortelomgeving (hoofdstuk III, VI B en VI C), de transportmogelijkheid van gassen over kleinere afstanden via de waterfase en de reactie daarop van verschillende gewassen (hoofdstuk II D en VI A) en de invloed van lage O_2 en hoge CO_2 concentraties op de gewassen en micro-organismen (Hoofstuk IV en V).

II CO_2 PRODUKTIE EN O_2 VERBRUIK VAN BODEM EN PLANTENWORTELS

A. Inleiding

De grootte van de CO_2 produktie en het O_2 verbruik in de grond zijn samen met de tolerabele gehalten van CO_2 en O_2 voor bodem-organismen en plantenwortels, de factoren die de noodzakelijke transportcapaciteit voor CO_2 en O_2 bepalen.

De CO_2 produktie en het O_2 verbruik van bodem en plantenwortels als geheel genomen wordt in het algemeen de ademhaling van bodem en plantenwortels genoemd. Hoewel in sommige gevallen de CO_2 produktie niet gelijk is aan het O_2 verbruik wordt door veel onderzoekers alleen de CO_2 produktie of alleen het O_2 verbruik gemeten en als maat voor de ademhaling gebruikt. Iets wat onder normale aerobe omstandigheden, waar de CO_2 produktie gelijk is aan het O_2 verbruik, wel verantwoord is. Vandaar dat in het volgende hoofdstuk de begrippen O_2 verbruik en CO_2 produktie wel eens door elkaar gebruikt worden.

De factoren die de CO_2 produktie en het O_2 verbruik bepalen zijn:

Voor de grond

a) De aktiviteit, hoeveelheid en soort der micro-organismen in de grond, die weer beïnvloed worden door:
   Temperatuur, vochtgehalte, O_2 en CO_2 concentratie, de pH, aanwezigheid van mineralen en, zeer belangrijk, door de hoeveelheid en kwaliteit van de organische stof, wat sterk beïnvloed wordt door de begroeiing.
b) De niet biologische reacties in de grond, zoals zuiver chemische reacties waarbij vooral CO_2 vrijkomt of wordt gebonden en de physische verschijnselen zoals oplossen en adsorbtie van gassen.

Voor de plantenwortel

a) De aktiviteit, hoeveelheid en soort der plantenwortels. De aktiviteit is weer afhankelijk van temperatuur, vochtgehalte en de O_2 en CO_2 concentraties.
   Wanneer we de aktiviteit van een gedeelte van een wortel beschouwen is het ontwikkelingsstadium van het worteldeel van invloed. De hoeveelheid wortels is afhankelijk van de plantensoort, het ontwikkelingsstadium en het milieu waarin de plant is opgegroeid.

II B Veldmetingen CO_2 produktie en O_2 verbruik

B1 Sinds LUNDEGÅRDH (1927) omstreeks 1920 een methode ontwikkelde om de CO_2 produktie van de grond ter plaatse te bepalen, is met ongeveer dezelfde methodiek omtrent de totale CO_2 produktie van een bodemprofiel veel cijfermateriaal verzameld; o.a. door MAGERS (1929), WURMBACH (1934), FRERCKS en PUFFE (1959) voor landbouwgronden en grasland, door WALTER en HABER (1957) voor verschillende plantengezelschappen; met modernere CO_2 analyse apparatuur zijn metingen verricht door MEYER en SCHAFFER (1954), KOEPF (1954) en KRZYSCH (1962).

Het principe van deze CO_2 produktie meting is het plaatsen van een flinke klok op de grond met een oppervlakte van 750 cm^3 (bv LUNDEGÅRDH) à 2500 cm^3 (KRZYSCH) waarin de uit de bodem komende CO_2 wordt opgevangen. De hoeveelheid CO_2 wordt bepaald door: Het analyseren van luchtmonsters uit de klok (b.v. LUNDEGÅRDH), of het in de klok laten absorberen van de CO_2 door $Ba(OH)_2$ of KOH (FRERCKS en PUFFE) of door de klok te ventileren en van de uitgepompte lucht continue de CO_2 concentratie te registreren (metingen door b.v. KRZYSCH met een "Ultra-Rot Absorptions Schreiber" (U.R.A.S. apparaat).

Wel dient bij al deze bepalingsmethodieken ervoor gezorgd te worden dat de CO_2 concentratie en de totale druk binnenin de klok niet zo sterk van de normale omstandigheden gaan afwijken dat de diffusie van CO_2 uit de grond beïnvloed wordt.

In tabel 1 zijn ter illustratie enkele cijfers gegeven van gemiddelde CO_2 produktie of O_2 verbruik.

De sterke variatie is gezien de variaties in grondsoort, temperatuur, gewas en vochtigheid wel begrijpelijk. Hoge CO_2 produkties hebben vooral de gronden met een hoog gehalte aan organische stof en de gronden met een grote aanvoer van organisch stof (FRERCKS en PUFFE 1959, KRZYSCH 1962, WURMBACH 1934). * Grondbewerking kan eveneens de CO_2 produktie belangrijk doen toenemen (KRZYSCH, 1962; HAWKINS, 1963).

De invloed van het gewas op de totale ademhaling is duidelijk. Een grond met een gewas produceert 50 tot 150% meer CO_2 dan dezelfde grond zonder gewas. Ook tussen de gewassen zijn verschillen op te merken. WURMBACH (1934) geeft daarvan de rangorde. Weiland, leguminosen, granen, hakvruchten, waarbij weiland de hoogste CO_2 produktie heeft. Een deel der stijging van de CO_2 produktie wordt veroorzaakt door de ademhaling van de plantenwortels zelf, een ander deel door de micro-organismen die in de direkte omgeving van de wortels zeer aktief zijn als gevolg van de door de wortels uitgescheiden organische stoffen.

Tabel 1. CO_2 produktie of O_2 verbruik totale profiel

Omschrijving	CO_2 prod.mg/m^2.U	Periode	Bijzonderheden	Bron
Bouwland	125 à 410	Vegetatie periode		Lundegårdh (1927)
Weiland	330	"		
Haver	390	"		
Zelfde grond braak	270	"		
Elzenbos	1170 - 2340	"		
Maïs	500	Vegetatie periode	CO_2 produktie in	
W gerst	200	"	eenzelfde periode	Wurmbach v. (1934)
Suikerbiet	200	"	en op gelijke grond	
Lucerne	700	Vegetatie periode		
Z gerst	300 - 500	"	idem	
* Braak	250	"		
Weiland	500			
W gerst	300		idem	
Suikerbiet	100			
X Kasgrond braak	520 mg		hele profiel bij 20 à 25°C	Penningsfield (1952)
Bouwland + gewas	200	½ juni - ½ juli		Schaffer (1954)
Idem	50	+ ½ april		
Goed veraarde veengrond	250	gemiddelde 6 jaar	in lysimeters	Frercks en Puffe (1959)
Idem	110 - 150	"		
1 lemig zand braak	410	mei - oktober	jaarlijkse stalmestgift bewerking 25 cm diep	Krzysch (1962)
2 idem	279	"	id.bewerk.15 cm	
3 idem	270	"	bewerking 25 cm geen stalmest	
Tabak	140		pot proef met zuiver kwartszand	Harris en van Bavel (1957)
Zandige kleileem	O_2 verbruik			
Onbegroeid	139 mg/m^2.uur	Vegetatie periode	lysimeter grwst. 90 cm	Hawkins (1963)
Id.geroerd	268	"	idem	
Zandige bovengrond onbegroeid	580	"	idem	
Maximaal gemeten verschil tussen begroeide en onbegroeide gr.				
Kool	367	"	idem	
Tabak	250	"	idem	
Aardappelen	250	"	idem	

ROUATH,KATZNELSON en PAYNE (1960) vinden bij tarwe in de rhizosfeer ± 20 maal meer bacteriën dan in de rest van de bodem. WOLDENDORP (1963) bepaalt uit proeven met steriele en niet steriele waterculturen met erwt dat 1/3 van de totale CO_2 produktie van het wortelstelsel afkomstig is van de micro-organismen in de rhizosfeer.

De omvang van het wortelstelsel zal eveneens een rol spelen. Rangschikken wij de gewassen naar de hoeveelheid organische stof (voor het grootste deel wortelresten) die na de oogst in de grond achterblijft dan vinden wij dezelfde rangorde als die welke WURMBACH opgeeft voor CO_2 produktie.

Ook zonder eventuele aanvoer van organische stof of door worteladembaling kan de plant via de invloed welke hij heeft op de temperatuur en het vochtgehalte van de grond een belangrijke invloed hebben op de CO_2 produktie van een grond.

Ter illustratie daarvan grafiek nr. 1a (door MEYER en SCHAFFER, 1954). Door het inslaan van een cylinder tussen een bonengewas wordt de invloed van de wortels ter plaatse uitgeschakeld. Toch is de CO_2 produktie daar hoger dan van kaal land, wat in dit geval wordt toegeschreven aan minder felle uitdroging van het bodemoppervlak.

Omtrent de invloed van het ontwikkelingsstadium van een gewas op de totale CO_2 produktie in de bodem zijn weinig gegevens.
(WURMBACH, 1934 vindt wel bij lucerne, wanneer het na een snede weer gaat uitlopen, een stijging van de CO_2 produktie tot ver boven de waarde van het ongemaaide gewas)

De figuren 1a, 1b en 1c geven een indruk van de fluktuaties van de CO_2 produktie gedurende het groeiseizoen. Opvallend is ook weer de invloed van het gewas.

B2 Dagfluktuaties van de CO_2 produktie in het veld, vooral als gevolg van vocht en temperatuurschommeling

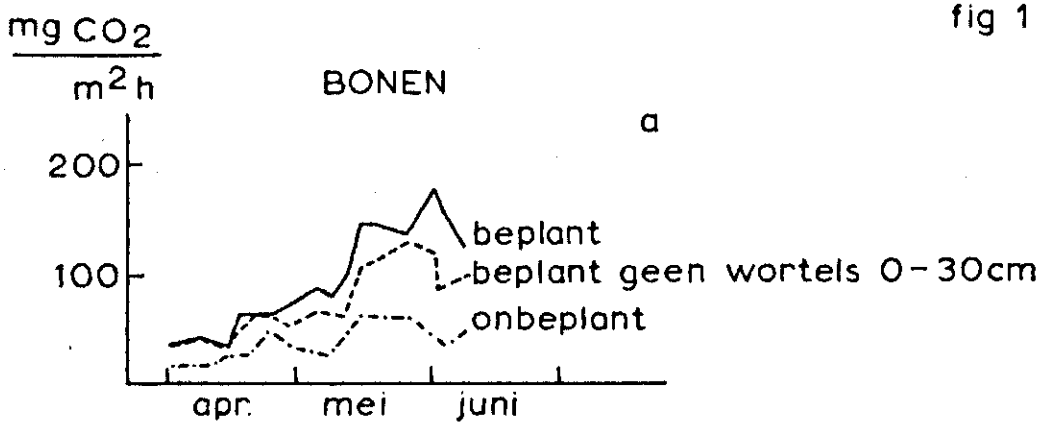
De continueregistratie der CO_2 produktie geeft een meer gedetailleerd beeld van de dagelijkse gang der CO_2 produktie. In figuur 2 is opvallend, dat het dagverloop van de temperatuur gelijk is aan dat van de CO_2 produktie. Begroeide grond geeft een dergelijk beeld te zien (KOEPF, 1954). KRZYSCH (1962) berekent van een onbegroeid bouwland uit continue registratie van de CO_2 produktie en de temperatuur, naast 10-daagse vochtbepalingen, de regressievergelijking:

$$Y = - 287,13 + 22,72\ X_1 + 117\ X_2 - X_2^{\ 2}.$$

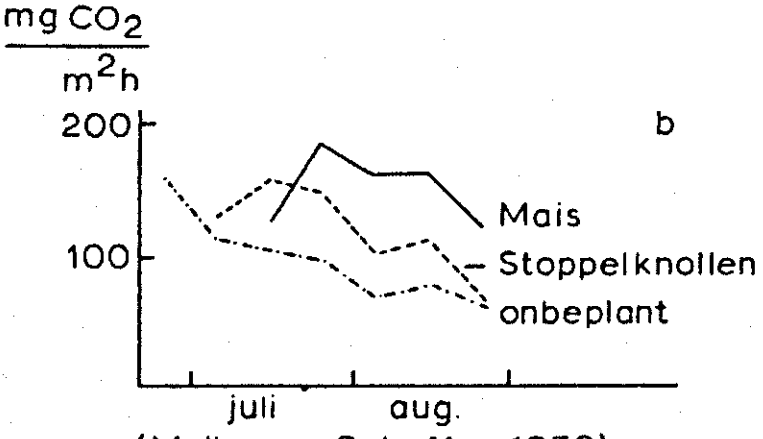
Y = CO_2 produktie mg CO_2/m^2 uur

X_1 = Temp. op 5 cm diepte in graden Celcius

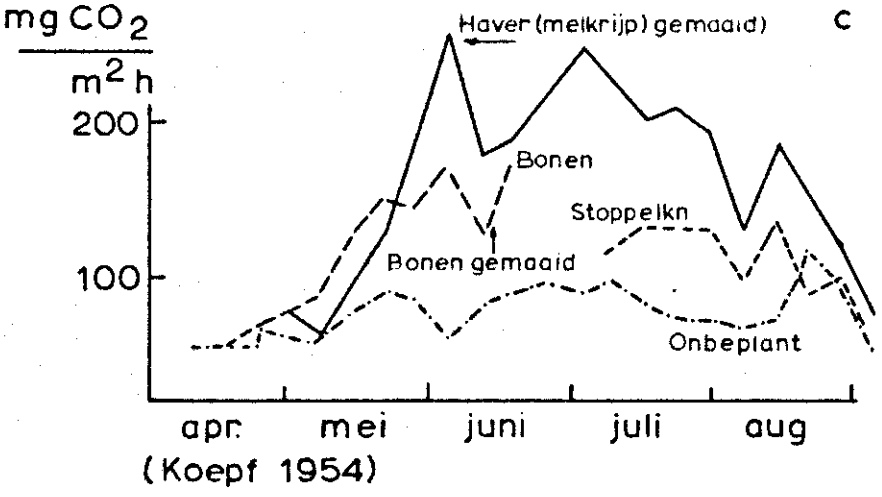
X_2 = beschikbaar vocht van 0-25 cm diepte
in 10 trappen 0-10% = 1 90-100% = 10



(Meijer en Schaffer 1954)



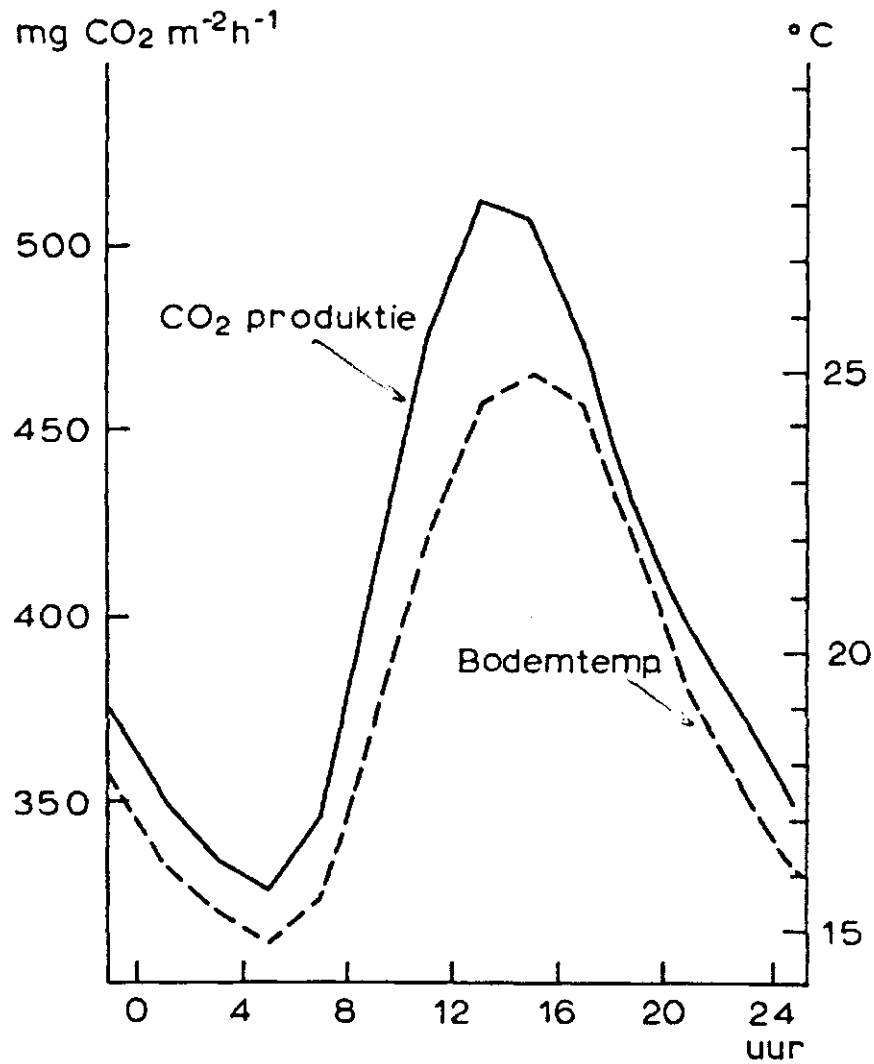
(Meijer en Schaffer 1959)



(Koepf 1954)

CO_2 produktie van bodem met en zonder gewas

fig 2



Gemiddeld dagverloop van de bodemtemp op 5cm diepte en van de CO_2 produktie van een onbegroeide grond. (Krzysch 1962)

Gegevens bodem: Lemig zand
0,94% humus pH 6,3
vochtgehalte bij veldcapaciteit 13,6 gew. %
vochtgehalte verwelkingspunt 1,5 gew. %
dichtheid niet bepaald.

De bodemtemperatuur varieert gedurende de meetperiode tussen 10° - 27° C, het vochtgehalte tussen 7 - 70 % beschikbaar vocht. Het is waarschijnlijk dat het luchtgehalte niet lager is geweest dan 20 vol % (zie ook fig. 4).

De regressievergelijking geeft een lineair verband aan tussen CO_2 produktie en temperatuur en een kwadratisch verband tussen CO_2 produktie en vochtgehalte;de maximale CO_2 produktie komt voor bij 45 à 55 % beschikbaar vocht.

De temperatuur heeft geen invloed op de vorm van de vochtgehalte CO_2 produktiecurve.

Opmerking:

Deze CO_2 metingen zijn verricht bij sterk varierende temperatuur (zie fig. 2); naast de reactie van de micro-organismen op temperatuur en vocht zal dus oplossen en weer vrijkomen van CO_2 mede de vorm van deze vergelijking hebben bepaald.

II C Enige factoren die de CO_2 produktie en het O_2 verbruik beïnvloeden

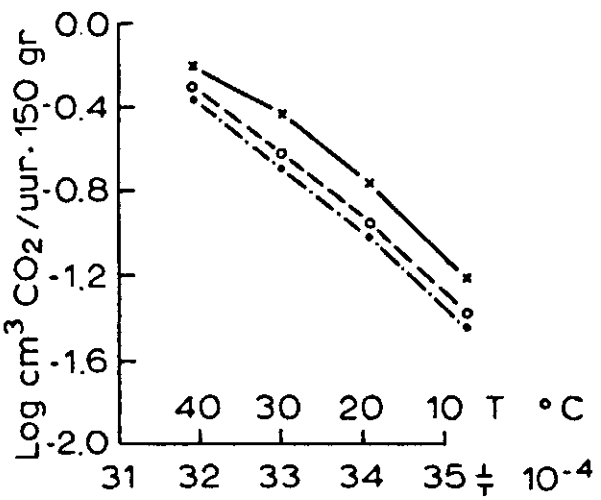
C1 Van de bodem

Temperatuur

Bij hoger wordende bodemtemperatuur stijgt de ademhalings-intensiteit van de micro-organismen in de bodem. Volgens ALEXANDER (1961) is, voor de meeste in de bodem voorkomende micro-organismen, de optimale temperatuur 25 à 35° C. Uit metingen o.a. van KOEPF (1953) blijkt dat de CO_2 produktie nog stijgt bij een temperatuurstijging van 35 tot 40° C.

KOEPF (1953) geeft de CO_2 produktie van grondmonsters bij optimale vocht en luchtvoorziening als functie van de temperatuur. Daar hier gewerkt is met platte monsters van 120 cm^3, bij een over langere tijd constante temperatuur, mogen wij wel aannemen dat hier een zuiver temperatuureffect wordt bepaald.

fig 3



voorgaande temparaturen

10 °
20 °
30 °

produktie CO_2 als functie temp
(Koepf 1953)

Over het onderzochte traject van 10-40° C blijkt de snelheid van de CO_2 produktie vrijwel overeen te komen met de algemene wet van Arrhenius die voor zuiver chemische reacties het verband beschrijft tussen reactie-snelheid en temperatuur.

$$\log K = \log C - \frac{\mu}{2\ 3\ RT.}$$

K = reactiesnelheid
C = constante
μ = activeringsenergie
R = gasconstante 1.99
T = absolute temperatuur

De log van de CO_2 produktie uitgezet tegen $\frac{1}{T}$ geeft rechte lijnen (zie fig. 3). μ = 15 000 cal/mol in het traject van 10-30° C; alleen bij de zeer hoge CO_2 produkties liggen de waarden voor CO_2 produktie onder de rechte. Het is niet onmogelijk dat bij de hoogste produktie het gastransport in het monster toch onvoldoende is geweest. Ook is bekend dat een biologisch proces door te hoge temperaturen wordt afgeremd. In figuur 3 is daarvan bij de lage CO_2 produktie nog geen aanwijzing te vinden.

Een andere methode om de stijging van de CO_2 produktie bij temperatuurstijging te omschrijven, is het gebruik van de Q_{10} factor. Q_{10} is de factor waarmee de CO_2 produktie wordt vermenigvuldigd bij een temperatuurstijging van 10° C. Voor dezelfde proef geeft KOEPF:

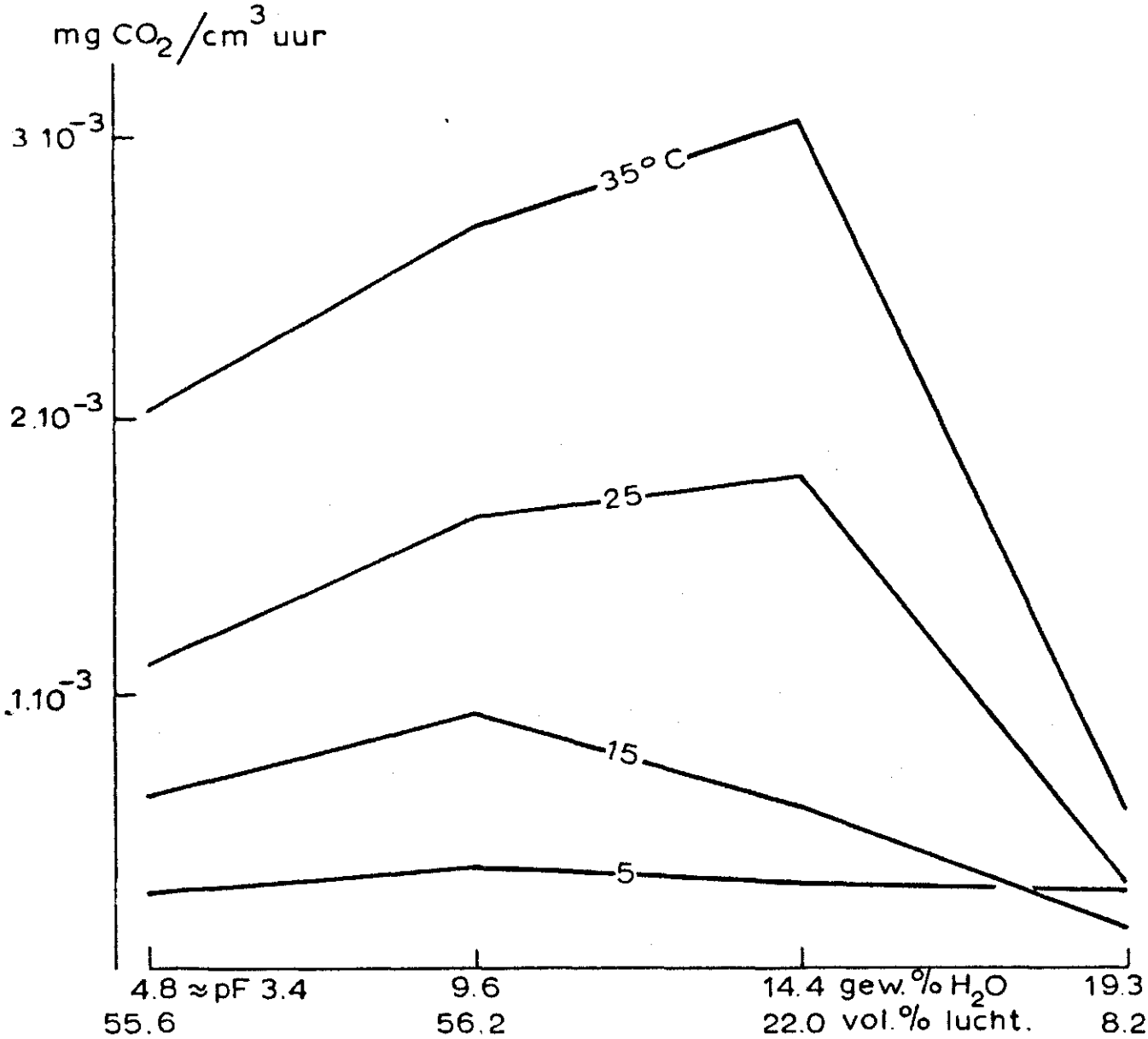
T °C	Q_{10}
10	2,5
20	2,7
30	2,3
40	2,1

Ook voor andere door KOEPF doorgemeten monsters geldt dat de CO_2 produktie bij 20° C het sterkst en bij 40° C het minst reageert op temperatuurvariaties.

C1b Vochtgehalte

Voor de ademhalingsactiviteit van de aerobe micro-organismen bestaat een optimaal vochtgehalte traject. Is het vochtgehalte laag, dan wordt de activiteit van de micro-organismen beperkt door het onvoldoende beschikbaar zijn van water.

fig. 4



Invloed temperatuur en vochtgehalte op de CO_2 produktie grond
(Tamm en Krzysch 1963)
grond : lemig zand 24.1 gew °/o H_2O = verzadigd

Is het vochtgehalte hoog dan zullen, door het blokkeren van het gastransport in de grond, de CO_2 en O_2 concentraties te hoog resp. te laag worden, waardoor ademhaling der micro-organismen wordt beperkt. Bij de bestaande opgaven b.v. ALEXANDER (1961) betreffende de invloed van vochtgehalte op de bodemademhaling ontbreken echter de gegevens omtrent vochtspanning en luchtporiën volume, zodat deze cijfers weinig algemeen bruikbaar zijn.

TAMM en KRZYSCH (1963) geven een seriewaarneming omtrent de invloed van temperatuur en vochtgehalte op de CO_2 produktie van een geroerd monster (zie fig. 4).

Het monster is uit de bouwvoor van hetzelfde perceel genomen, waarvan KRZYSCH (1962) de continue CO_2 produktie meting publiceert. Het monster is vooraf gedroogd en gezeefd door een 2 mm zeef.
Het monstervolume is $\pm$ 2 l, de hoogte $\pm$ 16 cm
Met meten is 48 uur na het bevochtigen der monsters begonnen.

Resultaten:

1. De CO_2 produktie van deze monsters wijkt weinig af van de CO_2 produktie onder natuurlijke omstandigheden. (maxima van 3,1 ; 1,8 en 0,9. 10^{-3} mg/cm^3 uur bij temperaturen van resp. 35,25 en 15° C. De gemiddelde zomerproduktie van dezelfde bouwvoor is 400 mg m^2/uur, dat is gerekend over een bouwvoor van 25 cm, 1,6 10^{-3} mg CO_2/cm^3 uur.)
   Het is daarom waarschijnlijk dat de CO_2 produktie van de bouwvoor op ongeveer gelijke wijze als de CO_2 produktie van de geroerde monsters door temperatuur en vochtgehalte zal worden beïnvloed.
2. Vooral de hogere CO_2 produkties blijken bij een laag vochtgehalte af te nemen. Het laagste vochtgehalte bedraagt 4,8 gew. °/o ; dit komt ruw geschat overeen met pF 3,4. (Bij deze schatting is aangenomen dat voor lemig zand de pF curve recht is tussen pF 4,2 en 2,0 en dat tussen pF 4,2 en 3,4 de pF curve van de ongeroerde grond, waarvan pF 4,2 en pF 2,2 bekend zijn, gelijk is aan die van het geroerde grondmonster). Verder blijkt dat bij een luchtgehalte van 8,2 vol % (vochtgehalte 19.2 gew. %) de CO_2 produktie zeer sterk is teruggelopen. Dit is toe te schrijven aan de onvoldoende transportcapaciteit voor gassen bij dit luchtgehalte. Voor de zeer lage ademhalingsintensiteit bij 5° C schijnt echter een luchtvolume van 8,2 vol % nauwelijks beperkend te zijn.

Bij dit soort proeven heeft de dikte van het grondmonster grote invloed op de CO_2 en O_2 concentraties door het monster. Bij een dun monster zullen deze minder sterk door het luchtporiënvolume beïnvloed worden dan in een dik monster, vandaar dat in proeven met kleine grondmonsters een kleinere daling der CO_2 produktie optreedt door hoge vochtgehalten.

De door KOEPF (1953) gemeten Q_{10} waarden (2,1 à 2,7) liggen gemiddeld iets hoger dan de waarden die KRZYSCH meet bij de optimale vochtgehalten van 9,6 en 14,4 gew. % en luchtgehalten van 56,2 resp. 22 vol %.

C 1c Reactie bodemademhaling op O_2 en CO_2 concentratie

Uitgezonderd onderzoek van GREENWOOD (1961) (zie bij hoofdstuk II D2) werden geen gegevens gevonden omtrent de CO_2 produktie en het O_2 verbruik als functies van CO_2 en O_2 concentraties in de grond.

Wel zijn er cijfers bekend over het verloop van de O_2 en CO_2 concentraties bij inundatie. Wordt b.v. luchtdroge grond onder water gezet dan loopt de O_2 concentratie binnen 8 uur terug tot nul (SCOTT en EVANS, 1955). Bij herhaalde verversing met O_2 rijk water is de aangevoerde O_2 binnen 4 à 5 uur verbruikt. Hieruit kunnen wij concluderen:

1. dat de micro-organismen in de grond O_2 opnemen ook bij zeer lage O_2 concentratie.
2. dat door de lage O_2 concentraties de micro-organismen als totaal gezien niet zo beschadigd worden dat de capaciteit tot O_2 opname afneemt.

De 1e conclusie is ook gerechtvaardigd door het onderzoek van LONGMUIR (1954). In bacteriecultures kan het verband tussen O_2 opname en O_2 concentratie beschreven worden door de vergelijking:

$$m = \frac{n\,c}{c + Km}$$

m = O_2 verbruik
c = O_2 concentratie
n = O_2 verbruik bij optimale O_2 concentratie
Km = factor

Voor Km wordt gevonden 1×10^{-6} à 1×10^{-8} molair O_2. Bij het ontbreken van O_2 of bij zeer lage O_2 concentraties komt CO_2 vrij door een anaerobe gedeeltelijke afbraak van organische stof, hierdoor zal het ademhalingsquotient(=CO_2 produktie / O_2 verbruik) groter worden dan 1. De samenstelling van micro-organismen verschuift bij lage O_2 concentratie naar de anaerobe soorten; een voorbeeld hiervan geeft tabel 2 (TAKAY e.a. 1956).

Worden anaerobe grondmonsters in een zuurstofrijk milieu geplaatst, dan ligt het ademhalingsquotient nog gedurende langere tijd boven 1. (PENNINGSFIELD, 1950).

Tabel 2

Verandering samenstelling micro-organismen en bodem atmosfeer onder anaerobe omstandigheden (TAKAY e.a. 1956)

dagen onder water	aantal bacterien 10^3/g grond		cm^3 gas/100 g grond			
	aeroob	anaeroob	O_2	CO_2	CH_4	H_2
0	34	22	3,2	83	0,0	0,0
1	220	-	0,3	10	0,0	0,0
2	110	23	0,0	172	0,0	0,2
4,5	55	50	0,0	-	0,3	0,0
6	-	-	0,0	280	2,2	3,6
8	53	170	0,0	-	14,7	2,1
10	-	-	0,0	226	21,4	0,0
13	62	130	0,0	-	-	-
23	-	-	0,0	-	60,3	13,2

C 1d Organische stof

De activiteit en hoeveelheid der micro-organismen in de bodem is vooral afhankelijk van de hoeveelheid makkelijk af te breken organisch materiaal. Toevoer van vers organisch materiaal, b.v. een groenbemester doet de bodemademhaling zeer sterk stijgen. Wanneer na 20 à 30 dagen de makkelijkst verteerbare produkten zijn omgezet daalt de bodemademhaling weer daar de resterende organische stoffen slechts langzaam of niet worden omgezet (EPSTEIN en KOEHNKE, 1957). Bij hoge temperatuur neemt de voorraad organisch materiaal sneller af; dit is ook de reden dat de CO_2 produktie lager is al naar gelang de temperatuur in de voorgaande periode hoger is geweest (KOEPF, 1953).

Een regelmatige organische stoftoevoer in de vorm van stalmest (KRZYSCH, 1962) of door een grote toevoer van plantenresten (MEIJER en SCHAFFER, 1954) doet de bodemademhaling van een grond voor een langere periode toenemen. Zie b.v. tabel 1, opgave KRZYSCH.

Een stalmest gift veroorzaakt ook wel eens een lagere CO_2 produktie tijdens het groeiseizoen (WEISZENBERG, 1954).

C 1e pH

In het algemeen hebben gronden met een hogere pH een grotere bacteriedichtheid en een snellere afbraak van organisch materiaal, dan gronden met een lage pH. Ook kunstmatige verhoging van de pH doet zowel het aantal bacterien als de CO_2 produktie in korte tijd sterk stijgen (KAPPEN e.a., 1949, WEISZENBERG, 1954).

Wordt de pH hoger gebracht dan $\pm$ 9,0 dan loopt de CO_2 produktie en het bacterie-aantal terug tot practisch nul (KAPPEN e.a., 1949).

Volgens ALEXANDER (1961) bedraagt de optimale pH voor bodembacterien 6 à 7. Uit gegevens van KAPPEN blijkt dat dit optimum hoger ligt. In vele gevallen zijn hoge CO_2 produkties gecorreleerd met grote bacterie-aantallen, maar eveneens komt het voor dat er geen correlatie tussen deze twee grootheden wordt gevonden (ALEXANDER, 1961).

C 1f Beschikbaarheid mineralen

Een minerale bemesting doet ook op onbegroeide grond de bodemademhaling stijgen. B.v. MEYER en SCHAFFER (1954) vinden door een kunstmestgift een stijging der CO_2 produktie van 53,7 mg/m^2 uur tot 67,3 mg/m^2 uur. In het algemeen kan gesteld worden dat de organische stof afbraak in de armere gronden langzamer verloopt dan in gronden die rijk zijn aan mineralen.

C 1g Niet biologische oorzaken CO_2 afgifte of opname

Oplossen CO_2 in water

Bij een CO_2 concentratie in de lucht van 1 vol % lost in zuiver H_2O op: Bij 10° C 23.2 mg CO_2 / l; bij 20° C 16.9 mg CO_2 / l en bij 30° C 12.6 mg CO_2 / l. (Aangenomen dat het opgelost gewicht CO_2 recht evenredig is met CO_2 spanning, zie ook W.J. MOORE, Phys. Chemistry 1962, pag. 126.)
De hoeveelheid CO_2, die in bodemlucht en bodemwater van 1 m^3 grond aanwezig is bij een CO_2 gehalte van de bodemlucht van 1 vol %, bedraagt bij 10° C 10.500 mg CO_2, bij 20° C 8 500 mg CO_2 en bij 30° C 7 600 mg CO_2. (Aangenomen is dat het luchtvolume = het watervolume in de grond = 25 vol %.)
We kunnen ruwweg zeggen dat water evenveel CO_2 bevat als de lucht waarmee het in evenwicht verkeert. De hoeveelheid O_2 die in water kan oplossen bedraagt slechts 1/30 van de hoeveelheid O_2 die in de lucht aanwezig is. Dit kan vooral onder vochtige omstandigheden de reden zijn dat de stijging van de CO_2 concentratie in de bodemlucht geringer is dan de daling van de O_2 concentratie.

adsorbtie CO_2 aan grond

Omtrent de adsorbtie van CO_2 en O_2 aan vochtige grond werden weinig gegevens gevonden.

KOEPF (1953) geeft voor een steriele zandige leem met 1,8% humus, welke bij 10° C in evenwicht is met 0,03 vol % CO_2, de volgende hoeveelheden CO_2 op, welke vrijkomen uit een monster van 150 g droge grond + 50 g H_2O: bij het verlagen van de CO_2 concentratie tot 0,00 vol % bij temperaturen van 10, 30 en 40° C.

tabel 3

Temp. °C	CO_2 prod./monster	CO_2 prod./liter bodemwater
10	0,9 ml	34 mg
30	1,9	67
40	2,96	102

± 8 uur na de verlaging van de CO_2 concentratie is alle CO_2 vrijgekomen. De hoeveelheid vrijgekomen CO_2 is vele malen hoger dan de in zuiver water opgeloste hoeveelheid CO_2.

Gegevens over de hoeveelheid CO_2 die aan de bodem gebonden wordt bij stijgende CO_2 concentratie werden niet gevonden.

CO_2 produktie of vastleggen door chemische reacties

Bij de verhoging van de pH treedt een verhoogde CO_2 produktie op. Dit is gedeeltelijk een zuiver chemische afbraak van organische stof waarbij CO_2 vrijkomt (decarboxylering). BECKMAN en SCHARPENSEEL (1964) vinden dit wanneer de pH hoger wordt dan 6.5. Een voorbeeld hiervan is de CO_2 produktie van een monster steriele "sauren Braunerde" waaraan één gram CaO per 100 gram droge grond wordt toegevoegd:
De CO_2 produktie steriele grond = 125 mg/100 g in 54 dagen
De CO_2 produktie niet steriele grond = 904 mg/100 g in 54 dagen
(Verdere gegevens: org. stof gehalte is 9,3%; pH (H_2O) voor de bekalking 3,3 en 56 dagen na de bekalking 5,9 in de steriele grond en 7,5 in de niet steriele grond, incubatie temperatuur is 20 à 25° C.)
Door de extra CO_2 produktie kan in sterk bekalkte grond het ademhalingsquotient groter zijn dan 1, iets wat ook LUNDEGÅRDH (1927) noemt.

In kalkhoudende of sterk bekalkte grond wordt een deel der ontwikkelde CO_2 vastgelegd.

SCHARPENSEEL en BECKMAN (1964) tonen door proeven met ^{14}C aan, dat 0,5 à 5 % van de CO_2 wordt vastgelegd aan de toegevoegde CaO. Terwijl KAPPEN e.a.,(1949)hiervoor zelfs 50% vinden.

Volgens W. BERGMAN (1954) wordt ook door $CaCO_3$ door de vorming van HCO_3^- ionen de CO_2 spanning aanzienlijk verlaagd waardoor het mogelijk zou zijn dat in kalkrijke grond zeer diepe beworteling kan voorkomen.

afvoer CO_2 door drainage water

Bij een neerslagoverschot zal ook een deel van de geproduceerde CO_2 door het drainage water worden afgevoerd. HOFMAN en HOFFMAN (1962) meten van onbegroeide landbouwgrond een CO_2 afvoer van 543-647 kg CO_2 / ha.jaar, dit bij een neerslagoverschot van 285 resp. 273 mm/jaar, waarvan 65 mm in de vegetatie periode. Bouwland produceert per jaar 10 000 à 20 000 kg CO_2 waarvan zeker ¾ gedurende de vegetatie periode. 600 kg CO_2 is dus 6 à 3 % der jaarproduktie. Tijdens de vegetatie periode zal de door drainage water afgevoerde hoeveelheid CO_2 meest kleiner zijn dan 1 %.

C 2 VAN DE PLANTENWORTEL

C 2a Van de CO_2 produktie en het O_2 verbruik van het wortelstelsel zijn drie soorten gegevens.

1. De stijging van de totale CO_2 produktie of het O_2 verbruik van een bodem door de aanwezigheid van een gewas. (zie tabel 1 veldmetingen)
2. De CO_2 produktie of het O_2 verbruik van kleine afgesneden worteldelen (zie tabel 5 diffusie).
3. CO_2 produktie van een heel wortelstelsel, terwijl de CO_2 produktie van de grond te verwaarlozen is.

Deze laatste gegevens zijn vrij schaars.

HARRIS en VAN BAVEL (1957) geven voor normale tabaksplanten in zuiver kwartszand (niet gesteriliseerd), gerekend over een bouwvoordikte van 30 cm, een produktie van 0,46 . 10^{-3} mg CO_2 / cm^3 uur of per m^2 omgerekend 140 mg CO_2 / uur. De fluktuatie der CO_2 produktie gedurende een etmaal vertoont hetzelfde beeld als dat van een al of niet begroeide grond. Deze fluktuatie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het dagelijkse temperatuurverloop (deze is echter hier niet geregistreerd).

De CO_2 produktie van het gehele wortelstelsel van tabak, mais en katoen verschillen sterk. Wordt de CO_2 produktie omgerekend in CO_2 produktie per g droge wortel, dan worden de verschillen kleiner. (HARRIS en VAN BAVEL, 1957)

Een representatieve waarneming der CO_2 produktie is voor mais 197 en voor tabak en katoen 214 resp. 488 mg CO_2 / dag g droge wortel.

Wat betreft de ademhalingsintensiteit van de verschillende delen van de wortel bestaan meer gegevens,zie tabel 5 en figuur 5 (MACHLIS, 1944, opgave van LEMON, 1962). De ademhalingsintensiteit is het grootst in de worteltop. Enkele centimeters uit de worteltop verwijderd is deze tot een deel hiervan teruggelopen.

C 2b Reactie wortel ademhaling op CO_2 en O_2 concentraties

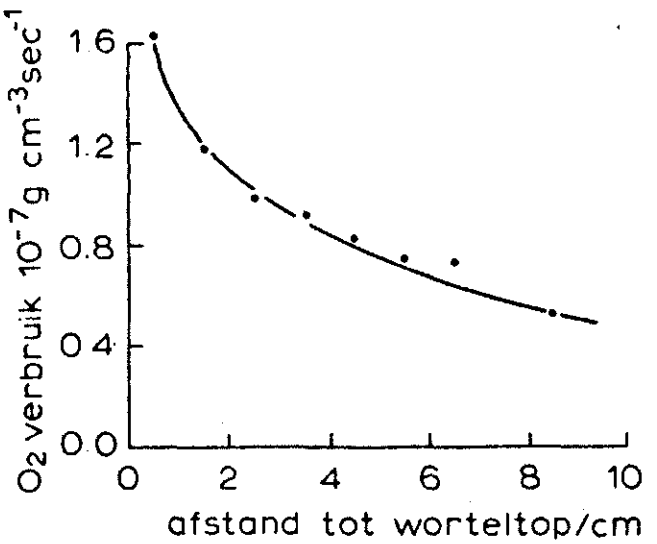
Van alle activiteiten van een plant zoals b.v. wateropname en zoutopname en groei reageert de ademhaling het sterkst op hoge CO_2 concentraties of lage O_2 concentraties. Voor een goed geventileerde tabakcultuur geven HARRIS en VAN BAVEL (1957).

tabel 4

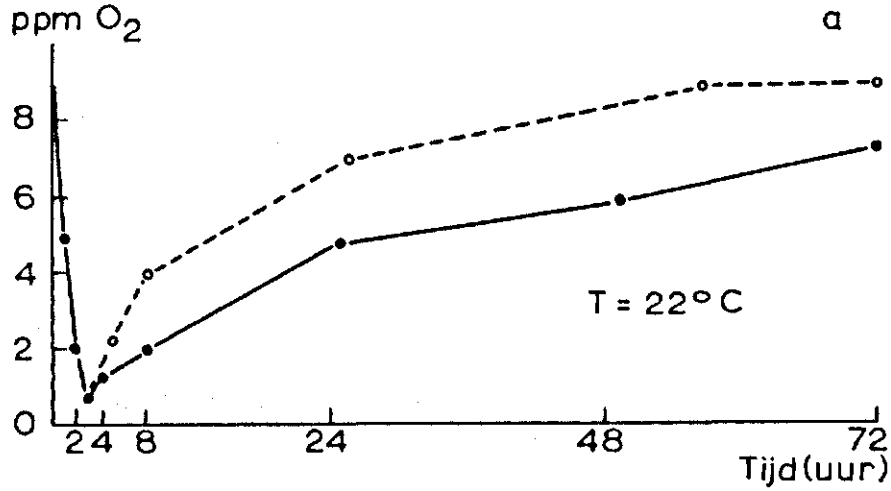
O_2 concentratie	CO_2 concentratie	CO_2 produktie wortels 1 plant
20 vol %	0 vol %	133 mg CO_2 / uur
15	0	134
10	0	112
15	5	90
10	10	75

Een gasmengsel bestaande uit 10 % O_2 en 0 % CO_2 en 90 % N_2 veroorzaakt een lichte daling der CO_2 produktie. Deze blijkt in andere proeven niet altijd significant te zijn. Bij een gasmengsel met 10 % O_2 - 10 % CO_2 en 15 % O_2 - 5 % CO_2 is de daling zeer duidelijk. We moeten dus wel aannemen dat 10 % tot 5 % CO_2 de ademhaling remt. Deze remming veroorzaakt echter nog geen duidelijke vertraging van groei, zoutopname of wateropname.
Ook NORRIS e.a. (1959) vinden bij afgesneden uienwortels een duidelijke remming der ademhaling door een CO_2 concentratie van 10 vol %. Zoals blijkt uit de volgende cijfers.

gassamenstelling vol %		CO_2 produktie mm^3 / 100 mg	O_2 verbruik wortel . uur
CO_2	O_2		
10	90	59	55
0	100	107	119



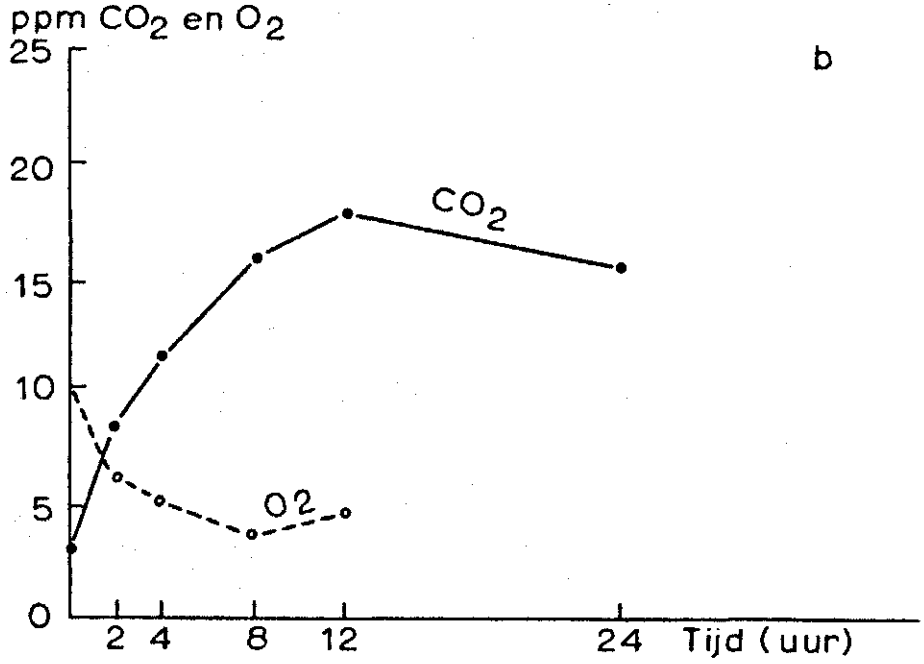
O_2 verbruik van gerstwortels als functie van de afstand tot de worteltop.
(Machlis 1944)



10 tarwe planten op 150 ml H_2O

——— planten in oplossing

----- oplossing zonder planten



40 planten in 500 ml H_2O

Verloop O_2 en CO_2 concentratie in een niet doorluchte voedingsoplossing met tarwe planten
(Wanner en Schmucki 1950)

Door een CO_2 concentratie van 10 vol % wordt het ademhalingsmechanisme beschadigd; worden na een verblijf van 40 minuten in een omgeving met 10 vol % CO_2 de wortels overgebracht in een atmosfeer met 100 vol % O_2, dan blijft de worteladembaling nog enkele uren lager dan normaal. Deze proeven zijn uitgevoerd in voedingsoplossingen, waarbij de gassamenstelling boven de vloeistof wordt gevarieerd.

Bij dit soort proeven in vloeistof zal door het concentratieverval, nodig voor het transport door de vloeistof, de concentraties rond de wortel afwijken van de concentraties boven de vloeistof, zodat wij de op deze wijze verkregen gegevens met reserve dienen te hanteren.

C 2c Reactie op lage O_2 concentratie

In water-cultures van jonge tarweplanten (WANNER en SCHMUCKI, 1950) daalt de O_2 concentratie na het stopzetten van de vloeistof-doorluchting tot 1 à 3 mg O_2 / liter (= 2 à 6 vol % O_2). De snelheid van daling is afhankelijk van de hoeveelheid wortels per volume eenheid water, zie figuur 6a en 6b. Door deze lage O_2 concentratie blijken de wortels zo beschadigd te zijn dat het O_2 transport door diffusie via het wateroppervlak het sterk gereduceerde O_2 verbruik overtreft, waardoor de O_2 concentratie weer stijgt tot 7 mg/liter. De CO_2 concentratie stijgt tot 17 à 40 mg/l (=1 à 2 vol % CO_2). Worden de planten daarna in doorluchte waterculturen geplaatst, dan komt de O_2 opname eerst langzaam weer op gang.

Onder de tijdelijke anaerobe omstandigheden worden mogelijk stoffen gevormd die de ademhaling remmen. Worden namelijk verse onbeschadigde planten in de gebruikte oplossing gebracht waarvan de O_2 concentratie inmiddels weer 7 à 8 mg/l bedraagt, dan blijkt het O_2 verbruik toch iets trager te zijn. Volgens WANNER en SCHMUCKI is dit niet te wijten aan de iets hogere CO_2 concentratie, maar aan andere schadelijke stoffen. GEISSLER (1964) vindt dat zich in niet-doorluchte waterculturen met erwtenplanten een evenwichtsconcentratie van 2 à 3 mg O_2 / l instelt.

Proeven met afgesneden wortels in een Wartburg apparaat tonen aan dat soms de ademhaling van wortels pas bij een O_2 concentratie van minder dan 1 mg O_2 / l begint af te nemen (WANNER, 1950). Bij hogere ademhalingsactiviteit ligt deze concentratie echter hoger. Wanneer geen O_2 wordt toegevoerd wordt alle O_2 tenslotte verbruikt, wat er op wijst dat een plantenwortel nog bij zeer lage O_2 concentraties O_2 kan opnemen.

C 2d Ademhalingsquotient

Daalt de O_2 concentratie, dan zullen in de plant de reacties, waarbij O_2 nodig is, ophouden en zullen de anaerobe reacties doorgaan. De voor de levensverrichtingen van een plant noodzakelijke energie kan dan worden geleverd door gedeeltelijke afbraak van koolhydraten waarbij CO_2 vrijkomt. Dit komt vooral voor bij gewassen die aan anaerobe omstandigheden zijn aangepast, b.v. rijst; bovendien zijn deze gewassen waarschijnlijk minder gevoelig voor de bij deze anaerobe processen ontstane giftige stoffen (ALBERDA, 1955).

VLAMIS en DAVIS (1943) doen proeven met kiemplanten van rijst en gerst, waarbij in het gehele milieu van de plant de O_2 concentratie wordt verlaagd. De groei van gerst daalt bij een O_2 gehalte van 9,5 vol % of lager, terwijl de groei van rijst door een O_2 gehalte van 1 vol % nog nauwelijks wordt beïnvloed. De opnamesnelheid van O_2 als functie van het O_2 gehalte is bij rijst gelijk aan die van gerst. Doch de CO_2 produktie van rijst blijft bij dalend O_2 gehalte gelijk, terwijl die van gerst bij een O_2 gehalte van 0 vol % tot 15 % der oorspronkelijke waarde is gedaald.

Terwijl bij een voldoende O_2 toevoer de verhouding CO_2 produktie / O_2 verbruik, of ademhalingsquotient, weinig van één afwijkt, wordt deze onder anaerobe omstandigheden groter dan één, doordat de CO_2 produktie minder snel afneemt dan het O_2 verbruik.

Het feit dat het ademhalingsquotient groter is dan één, wordt als aanwijzing beschouwd van anaerobe processen in de plant.

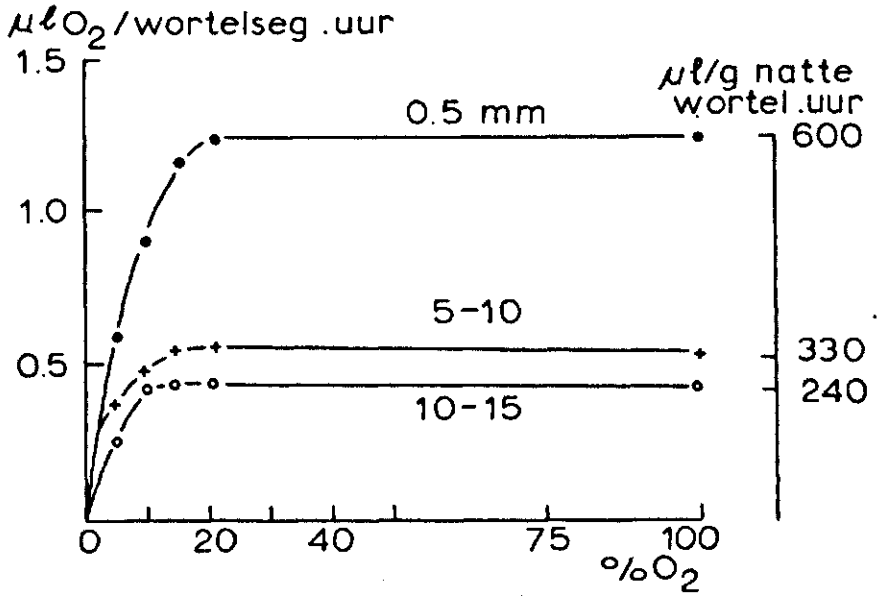
II D DIFFUSIE MOGELIJKHEID ALS BEPERKENDE FACTOR VOOR O_2 VERBRUIK

D 1 Van Wortels

Uit onderzoek van WANNER (1945) en BERRY en NORRIS (1949) blijkt dat het zuurstoftransport in en rondom de levende plantenwortel een factor is welke het O_2 verbruik sterk kan beïnvloeden.

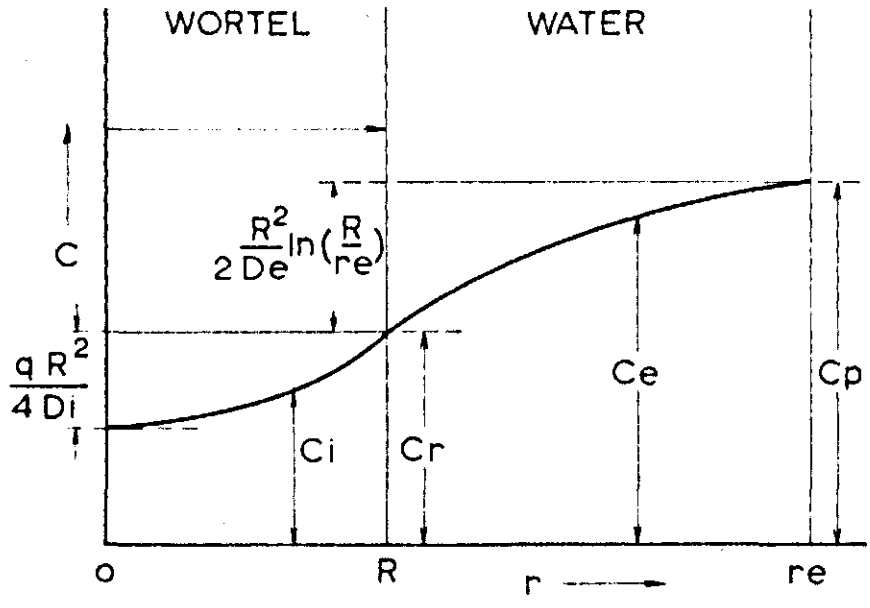
Bij een bepaalde O_2 concentratie wordt de O_2 concentratie bepalend voor het O_2 verbruik van de plantenwortel. Deze z.g. kritische O_2 concentratie is hoger naar mate het O_2 verbruik van de wortel hoger is, zie figuur 7 (BERRY en NORRIS, 1949).

Wordt van een plantenwortel bij constante O_2 concentratie de O_2 opname bepaald als functie van de temperatuur dan blijkt de O_2 opnamesnelheid ook aan de Arrhenius vergelijking te voldoen:



O_2 verbruik wortel segmenten ui als funktie O_2 concentratie (Berry en Norris 1949)

fig 8



O_2 concentratie als functie van de afstand r tot de wortels (Lemon 1962)

65C 18 4/12

$$\log K = \log C - \frac{\mu}{2.3\ RT}$$

μ = activiteitsenergie = 11 000 à 14 000 cal/mol (zie ook C 1a)

Bij hoog O_2 verbruik of lage O_2 concentraties vertoont de rechte log K tegen $\frac{1}{T}$ een knik en vinden wij een aanmerkelijk lagere μ (4 000 à 6 000 cal/mol). Dit zou betekenen dat μ afhankelijk zou zijn van de ademhalingsactiviteit of de O_2 concentratie. Dit is echter zeer onwaarschijnlijk; in het algemeen is de oxydatie-snelheid van enzymen door moleculair O_2 niet afhankelijk van de O_2 concentratie (BERRY en NORRIS, 1949). Het wordt dus waarschijnlijk dat de transportmogelijkheid van O_2 rond en in de wortel onvoldoende is voor het theoretisch mogelijke O_2 verbruik.

Een berekening van het concentratieverval rondom en in een plantenwortel geeft

In de notatie van LEMON (1962)

voor buiten de wortel:

form 1 $$C_R = C_p + \frac{q\ R^2}{2\ D_e}\ \ln(\frac{R}{re})$$

voor in de wortel:

form. 2 $$C_i = \frac{C_r - q(R^2 - r_i^2)}{4\ D_i}$$

zie voor de grafische afbeelding van het concentratiebeloop in en buiten de wortel figuur 8.

voor $C_i = 0$ en $r_i = 0$ wordt formule 2:

form. 3 $$C_R = \frac{q\ R^2}{4\ D_i}$$

Symbolen:

- q = O_2 verbruik (g/cm^3 sec)
- D_e = Diffusie coëfficient O_2 buiten de wortel (cm^2/sec.)
- D_i = Diffusie coëfficient O_2 in het wortelweefsel (cm^2/sec.)
- C = O_2 concentratie g/cm^3
- C_R = idem aan worteloppervlak
- C_p = idem buiten de wortel op het grensvlak bodemwater - lucht
- C_i = idem in de wortel op afstand r_i van de wortelas
- R = straal wortel (cm)
- r = afstand tot de wortelas (cm)
- r_e = afstand buitenkant watermantel tot de wortelas

Aannamen

1. Een cylindrische wortel waarlangs in de lengterichting geen belangrijk concentratie-verval plaats heeft.
2. Een stationaire O_2 toevoer dus $\frac{dc}{dt} = 0$
3. Buiten de plantenwortel wordt in het beschouwde traject geen O_2 verbruikt.
4. Het wortelweefsel is homogeen en het O_2 verbruik q is in de gehele wortel-doorsnede constant.
5. q = constant, zolang $C_i > 0$

Enkele van deze aannamen betekenen benaderingen van de werkelijkheid, maar blijken slechts kleine verschillen te veroorzaken tussen het theoretisch rekenmodel en de werkelijke verschijnselen. Alleen aanname 4 blijkt voor oudere worteldelen niet meer op te gaan, het schijnt dat daar de q in het centrum van de wortel lager is. Voor jonge worteldelen van 0-10 mm van de top blijkt de aanname wel te kloppen.

Het O_2 verbruik in de grond per cm^3 is minder dan 1 % van q (zie tabel 5).

Tabel 5. O_2 verbruik en straal afgesneden wortels

Soort + ouderdom	Afstand tot worteltop cm	Gem.straal cm	Temp.	O_2 verbruik 10^{-7} g_1 cm^3 sec	Critische O_2 conc. $Cr, 10^{-6}$ g cm^{-3} (gemeten)
Gerst ?	0 - 1.0	0,025	24° C	1,64	-
	2.0 - 3.0	"	"	1,06	-
	5.0 - 6.0	"	"	0,76	-
Tarwe ?	1.5 - 4.2	?	25° C	-	6.0
Mais 4 dagen	0 - 1.0	0,059	25° C	2,02	-
	1.0 - 2.0	0,058	"	1,27	-
	2.0 - 3.0	0,059	"	0,90	-
Lucerne 4 dagen	0 - 1.0	0,017	"	1,91	-
	0 - 1.0	0,018	"	1,70	-
Ui	0 - 0.5	0,036	15° C	1,53	7.2
	0.5 - 1.0	0,036	"	0,72	4.8
	1.0 - 1.5	0,036	"	0,59	4.8
	0 - 0.5	0,036	20° C	2,19	9.1
	0.5 - 1.0	0,036	"	0,99	6.5
	1.0 - 1.5	0,036	"	-	4.3
	0 - 0.50	0,036	30° C	4,75	16.1
Actieve grond prod.CO_2 $4x10^{-3}$ mg/ml uur			25° C	0,0081	-

LEMON and WIEGAND (1962)
ui BERRY and NORRIS (1949)

Bij formule 1. Het concentratie verval in water kan al zeer aanzienlijk zijn. Nemen wij een rekenvoorbeeld van WANNER (1945).

$C_R = 5\ 10^{-6}\ g/cm^3$

$C_p = 8\ 10^{-6}\ g/cm^3$

$R = 0{,}05$ cm, $D_e = 2 \times 10^{-5}\ cm^2/sec$, $q = 0{,}85\ 10^{-7}\ g/cm^3\ sec$

ingevuld in formule 1 geeft dit $r_e = 0{,}088$ cm.

Dus over een afstand van 0,038 cm is de O_2 concentratie al gedaald van de maximale waarde tot een waarde, die in verband met het O_2 transport in de wortel al beperkend kan zijn voor de worteladembaling.

Deze sterke daling van de O_2 concentratie in de directe omgeving van de wortel is ook de reden dat in een niet bewogen watercultuur de O_2 concentratie eerder bepalend wordt voor de groei dan in een in beweging zijnde watercultuur.

Variatie van D en q doen de waarde $r_e - R$ snel veranderen, zie onderstaande tabel, berekend met formule 1, aangenomen R = 0,05 cm

q (g/cm^3 sec)	D (cm^2/sec)	$r_e - R$ (cm)
$0{,}73\ 10^{-7}$	$2\ .\ 10^{-5}$	0,1
0,85 "	2 . "	0,038
0,85 "	1 . "	0,016
1,0 "	1 . "	0,0135

Formule 2 beschrijft het concentratie verval in de wortel als gevolg van O_2 verbruik en diffusie weerstand in het wortelweefsel.

Bij de kritische O_2 concentratie kan aangenomen worden dat de O_2 concentratie in het wortelcentrum precies nul is geworden. Gegeven de kritische C_R, q en R volgt uit formule 3, de O_2 diffusie coëfficient in het wortelweefsel (D_i) waarvan tabel 6 enige waarden geeft. Opvallend is dat door WANNER (1945) gevonden waarde voor D_i 4 x lager zijn dan de door BERRY en NORRIS gevonden waarden. Het is mogelijk dat dit komt omdat WANNER met iets oudere worteldelen heeft gewerkt.

De kritische O_2 concentratie, (zie ook tabel 5), is ongeveer te vergelijken met het door CANNON (1925) ingevoerde begrip "uppercritical concentration" = de concentratie waar de groei van de worteltop begint af te nemen bij nog verder dalende O_2 concentratie.

Tabel 6

Diffusie coëfficienten O_2

Segment	Temperatuur °C	D cm^2/sec	Bron
uienwortel 1,5-4,5 mm	15	$1{,}28\ 10^{-6}$	WANNER (1945)
"	20	1,38	
"	25	1,91	
uienwortel 0-0,5 mm	15	7,08	BERRY en
"	20	8,03	NORRIS (1949)
"	30	9,84	
dierlijk weefsel	?	$6{,}2$ à $7{,}5\ 10^{-6}$	idem
water	25	$\pm$ 30 à 35 10^{-6}	KRISTENSON en LEMON (1964)
verzadigde grond poriënvolume = p (cm^3/cm^3)	25	D_w (p - 0,1)	idem

D 2 Diffusie als beperkende factor voor O_2 verbruik van bodemagregaten

Evenals voor de ademhaling van plantenwortels kan de diffusie weerstand binnen in de bodemagregaten beperkend zijn voor het O_2 verbruik van grond. Terwijl de O_2 concentratie in de bodemporiën nog voldoende is voor de ademhaling der micro-organismen, kan de O_2 concentratie in het centrum der bodemagregaten al practisch nul zijn.

LONGMUIR (1955) geeft aan dat het O_2 verbruik constant is tot zeer lage O_2 concentraties.

GREENWOOD (1961) gebruikt dit gegeven voor de berekening van de O_2 diffusie in een met water verzadigd bolvormig bodemdeeltje. Hij gebruikt daarvoor de diffusie berekening die voor cellen is uitgevoerd door GERARD (1931) (oxygen diffusion into cells, Biol. Bull. 60: 245).

Wordt aangenomen dat het O_2 verbruik per cm^3 constant is en onafhankelijk van de O_2 concentratie zolang deze groter is dan nul, dan kan de algemene diffusievergelijking voor een bol worden geschreven in de vorm:

formule 1 $$\frac{dc}{dt} = \frac{D}{r}\frac{d^2 r_2 c}{d\,r} - M$$

c = O_2 concentratie (g/cm^3)
r = afstand tot de centrum bol (cm)
D = diffusie coëfficiënt voor O_2 in bodemagregaten (cm^2/sec)
t = tijd (sec)
M = O_2 verbruik (g/cm^3 sec)

Voor stationaire diffusie stroming in de bol geldt dan:

formule 2 $$C_1 - C_o = \frac{M(R^2 - R_o^2)}{6D}$$

C_1 = O_2 concentratie aan het boloppervlak
C_o = O_2 concentratie waarbij ademhaling onmogelijk wordt
R = straal van de bol
R_o = r waar $C = C_o$

Nemen wij aan dat $C_o = 0$, dan geldt:

formule 3 $$C_1 = \frac{MR^2}{6D}\left[1 - \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right)^{2/3}\right]$$

V_1 = volume bol waarin ademhaling plaats heeft (dus volume waar C groter is dan nul)
V_2 = totale volume bol

Wordt het O_2 verbruik per cm^3, gerekend over de totale bolinhoud K genoemd en het O_2 verbruik per cm^3 van alleen het ademhalend gedeelte dan geldt

formule 4 $$C_1 = \frac{MR^2}{6D}\left[1 - \left(1 - \frac{K}{M}\right)^{2/3}\right]$$

Wordt de factor M $\left|1 - (1 - K/M)^{2/3}\right|$ uitgezet tegen C_1 dan is dit een rechte lijn. Uitmetingen van het O_2 verbruik bij verschillende waarde voor C_i, M en R blijkt dit ook in werkelijkheid het geval.

Uitmetingen van M, R, K en C_1 berekent GREENWOOD de diffusie coëfficiënt voor O_2 in bodemagregaten, D.

GREENWOOD vindt voor agregaten van klei-grasland met $R^2 = 2{,}4 \times 10^{-2}$ cm^2, waarden voor D van 0,8 à 1,0 x 10^{-5} cm^2/sec. Deze waarden komen goed overeen met de door KRISTENSEN en LEMON, (1964) bepaalde diffusiecoëfficiënten.

KRISTENSEN en LEMON meten in volledig met water verzadigde gronden O_2 diffusiecoëfficiënten tussen 0,6 en 1,2 10^{-5} cm^2/sec. Zij vinden dat de O_2 diffusiecoëfficiënt afhankelijk is van het poriënvolume volgens de formule

$$\frac{D \text{ grond}}{D \text{ water}} = 1.\ p - 0{,}1$$

(p = poriënvolume = cm^3 H_2O/cm^3 grond)

De straal R van een met water verzadigde bodemagregaat waar de O_2 concentratie in het centrum door diffusieweerstand nul wordt, is met formule 3 te berekenen:

b.v. D = 1,0 x 10^{-5} cm^2/sec (25°C)

M = 4. 10^{-3} mg cm^3/uur = 1,1 x 10^{-6} mg O_2/cm^3 sec.

C_1 = 8. 10^{-3} mg O_2/cm^3 C_o = 0 K/M = 1

geeft R = 0,66 cm. Voor C_1 = 4. 10^{-3} mg O_2/cm^3 (= 10 vol % O_2) wordt R 0,46 cm.

Voor de meest voorkomende O_2 concentraties zal ook bij een hoog O_2 verbruik (vergelijk tabel 7) alleen bij de grote agregaten van ± 1 cm diameter de diffusie beperkend zijn voor het O_2 verbruik. CURRIE (1961) die een analoge afleiding van diffusie in een bolvormige bodem-agregaat geeft komt tot ongeveer gelijke waarden. Hij schat de diffusiecoëfficiënt 10 maal lager, maar neemt een veel kleiner O_2 verbruik aan.

In de bodem wordt in werkelijkheid meest geen bolvormige agregaten gevonden. CURRIE (1961) stelt voor daarom een relatieve straal der bodemagregaten in te voeren.

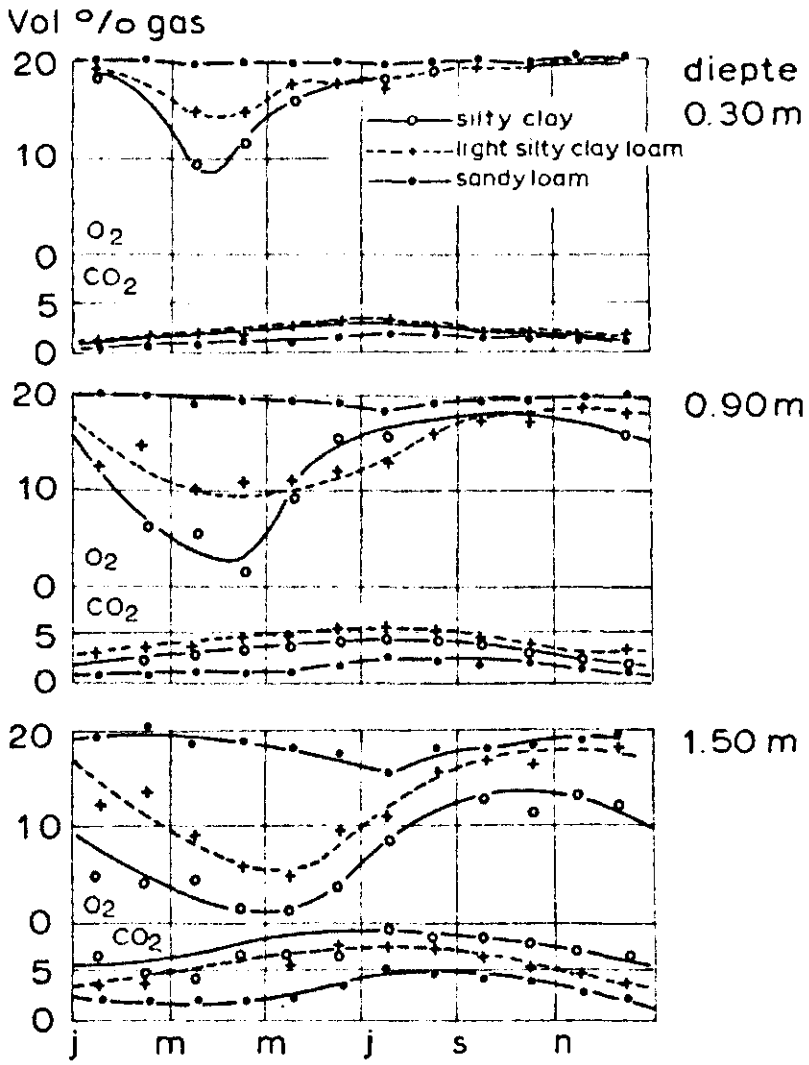
Tabel 7

CO_2 produktie cm^3 grond

Omschrijving	prod. CO_2 10^{-10} g/cm^3 sec	Opmerkingen
zandgrond 0-10 cm	7,5	berekend uit veldmetingen LUNDEGÅRDH (1927)
10-20 cm	2,5	totaal prod. = 370 mg CO_2/m^2 uur
20-30 cm	0,11	
löss humeuze kas-		meting monsters bij 20 à 25 °C
grond 0-40 cm	3,78	PENNINGSFIELD (1950)
zandige leem, bouw-		idem bij 20° C KOEPF (1953)
voor	5,0	
idem	1,4 à 27,2	idem var. van 10-40° C KOEPF (1953)
klei uit opp.		idem bij 25° C gedroogd en daarna bevochtigd
weiland	12,0	GREENWOOD (1961)
idem	10,8	meting monster bij 25° C
tabak in kwarts-		potproeven CO_2 prod. tabak verrekend over laag
zand	1,3	van 30 cm dik HARRIS en V. BAVEL (1957)
algemene waarde		benadering aan de hand van veldmetingen
bouwvoor	3,47	LUNDEGÅRDH (1927)

Opmerkingen

1) komt na een periode van lage temperatuur of van droogte waardoor de CO_2 productie laag is geweest, een grond op hogere temperatuur en betere vochtgehalte, dan is de CO_2 produktie aanzienlijk hoger, b.v. 2 maal (KOEPF,1953), dan wanneer de grond continu dit hogere vochtgehalte en hogere temperatuur zou hebben gehad.
2) bovenstaande cijfers zijn bepaald in een milieu waar de O_2 voorziening of CO_2 afvoer geen beperkende factoren waren voor de CO_2 produktie.
Wij kunnen daarom wel aannemen dat hier de CO_2 produktie in mol. gelijk is aan het O_2 verbruik in mol.
Dus: het O_2 verbruik in mg = 0,73 maal de CO_2 produktie in mg.



Jaarlijks verloop van O_2 en CO_2 concentraties in de bodemlucht van boomgaard op 3 verschillende grondsoorten, gemiddelde van 5 jaar (Boynton en Compton 1944)

III CO_2 EN O_2 CONCENTRATIES IN DE BODEMLUCHT

III A Voorkomende concentraties

In gronden met een goede luchthuishouding mogen de daarin voorkomende CO_2 en O_2 concentraties geen belemmering zijn voor de plantengroei. Als kriterium voor een goede luchthuishouding wordt wel aangenomen dat het CO_2 gehalte op 0.15 m diepte lager blijft dan 1 % (WESSELING, 1957). In goed doorluchte gronden komen in de gehele wortelzone van landbouwgewassen zelden CO_2 concentraties voor boven 2 % of O_2 concentraties beneden 15 % (PENNINGSFIELD, 1950; WURMBACH, 1934; LIPPS en FOX, 1964).

In natte en dichte landbouwgronden worden al in de bouwvoor aanzienlijk hogere CO_2 concentraties gemeten. In vochtige humeuze grond meet WURMBACH (1934) op 0,20 m diepte concentraties van 1 à 3 %. De op dit land verbouwde suikerbieten leden door deze concentraties geen schade. TAYLOR en ABRAHAMS (1953) meten in silty clay loam op 0,30 m diepten maximale CO_2 concentraties van 4 %; de som van CO_2 en O_2 concentraties varieerde van 6 tot 21 %.

In weiland komen onder de zode vaak hoge CO_2 concentraties voor, 10 % CO_2 is geen zeldzaamheid (WURMBACH, 1934).

Van boomgaard op matige tot goede schor- en plaatgronden geeft BUTIJN (1961) een reeks CO_2 bepalingen over een periode van 1 jaar (1953). In de periode augustus - oktober komt de hoogste CO_2 concentratie voor: 4 % op 0,50 m diepte. In april - mei is de CO_2 concentratie 0,2 à 1,0 %. Tijdens de waarnemingsperiode is de grondwaterspiegel 1,50 m - m.v. Het luchtvolume in de bovenste 0,60 m is in augustus - oktober $\pm$ 20 vol %, in de andere tijd is het luchtvolume groter.

Bij potproeven omtrent de reactie van appel (ras Jonathan) op hoge grondwaterstanden, worden in de natste objecten CO_2 concentraties gemeten van 0,5 à 1,2 %, dit bij een luchtvolume van 0 à 8,7 %. Ondanks deze lage CO_2 concentraties wordt het gewas zeer sterk door de hoge grondwaterstand beschadigd. BUTIJN schrijft dit toe aan vergiftiging door in anaeroob milieu gevormde stoffen en door O_2 tekort.

Bij volkomen gestagneerd gastransport b.v. onder de grondwaterspiegel of de zone daar vlak boven, kan de O_2 concentratie in de daar nog spaarzaam aanwezige lucht tot practisch nul dalen (BOYNTON en COMPTON, 1944).

BOYNTON en COMPTON (1944) geven over een periode van 5 jaar de CO_2 en O_2 concentraties in de grond van drie boomgaarden, zie figuur 9a en 9b.

Gegevens boomgaarden: Beplanting Appel (ras: Mc. Intosh)

silty loam	:	Het luchtvolume bij veldcapaciteit is 16 vol %, wortels tot 1,80 m diepte. Zeer goede boomgaard.
light silty clayloam	:	Het luchtvolume bij veldcapaciteit is 6 à 8 vol %, wortels tot 1,50 m diepte. Goede boomgaard.
silty clay soil	:	Luchtvolume bij veldcapaciteit van 0,0 - 0,9 m = 6 vol % 0,9 m en dieper= 1 vol % wortels tot 1,20 m. Matige boomgaard.

Omtrent de in het veld voorkomende luchtvolumen zijn geen metingen verricht.

In figuur 9b valt op:

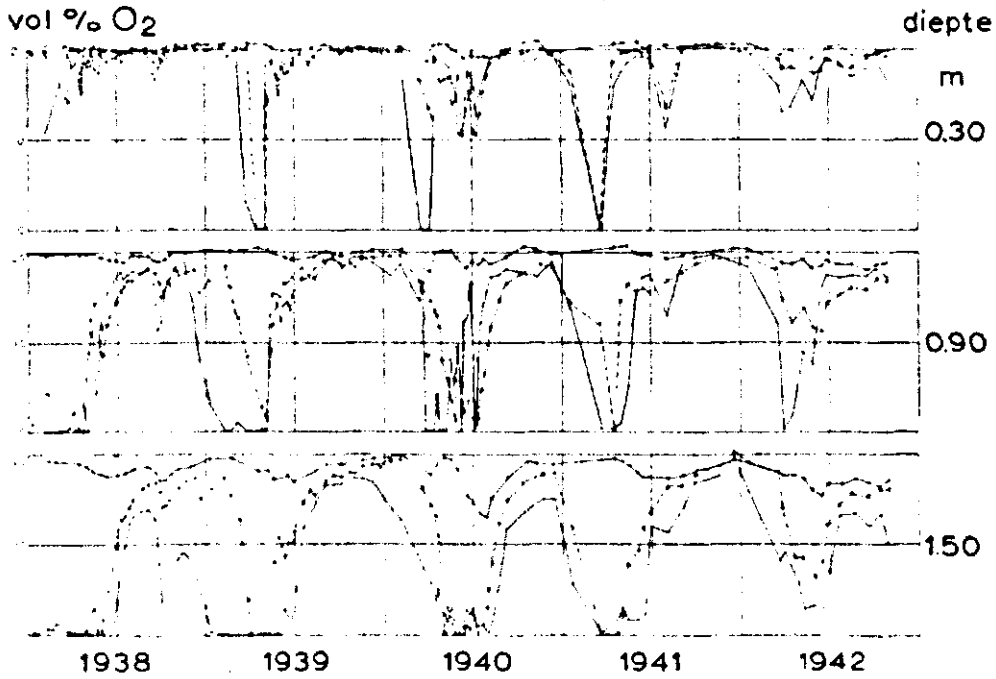
1. Dat ook in de als goed gekwalificeerde boomgaard (light silty clayloam) in het voorjaar nog zeer lage O_2 concentraties voorkomen; nul % O_2 komt voor: Op 0,90 m diepte 4 maal in de vijf jaar en op 0,30 m diepte 2 maal in de 5 jaar. De duur van deze lage O_2 concentraties is meest beperkt van enkele dagen tot één week. Daar ondanks de regelmatig voorkomende lage O_2 concentratie de boomgaard van goede kwaliteit is, moet wel worden aangenomen dat de schade veroorzaakt door de lage O_2 concentratie klein is. De matige stand van de boomgaard op silty clay soil is zeer waarschijnlijk wel veroorzaakt door de hier veel langer durende lage O_2 en hoge CO_2 concentraties.
2. De afname van de O_2 concentratie is groter dan de toename van de CO_2 concentratie. Terwijl in het voorjaar de O_2 concentratie daalt van 20 % tot 0 % stijgt de CO_2 concentratie tot $\pm$ 8 %.

Deze relatief grotere daling van de O_2 concentratie vinden wij ook terug in cijfers van TAYLOR en ABRAHAMS (1953), PENNINGSFIELD (1950), HACK (1956) en ROMELL (1922).

Het is onwaarschijnlijk dat het O_2 verbruik groter is dan de CO_2 produktie; onder de gedeeltelijk anaerobe omstandigheden waarbij deze metingen zijn verricht, is de CO_2 produktie meest groter dan het O_2 verbruik. Het is daarom aannemelijk dat het verschil vooral veroorzaakt wordt doordat meer CO_2 dan O_2 in het bodemwater oplost.

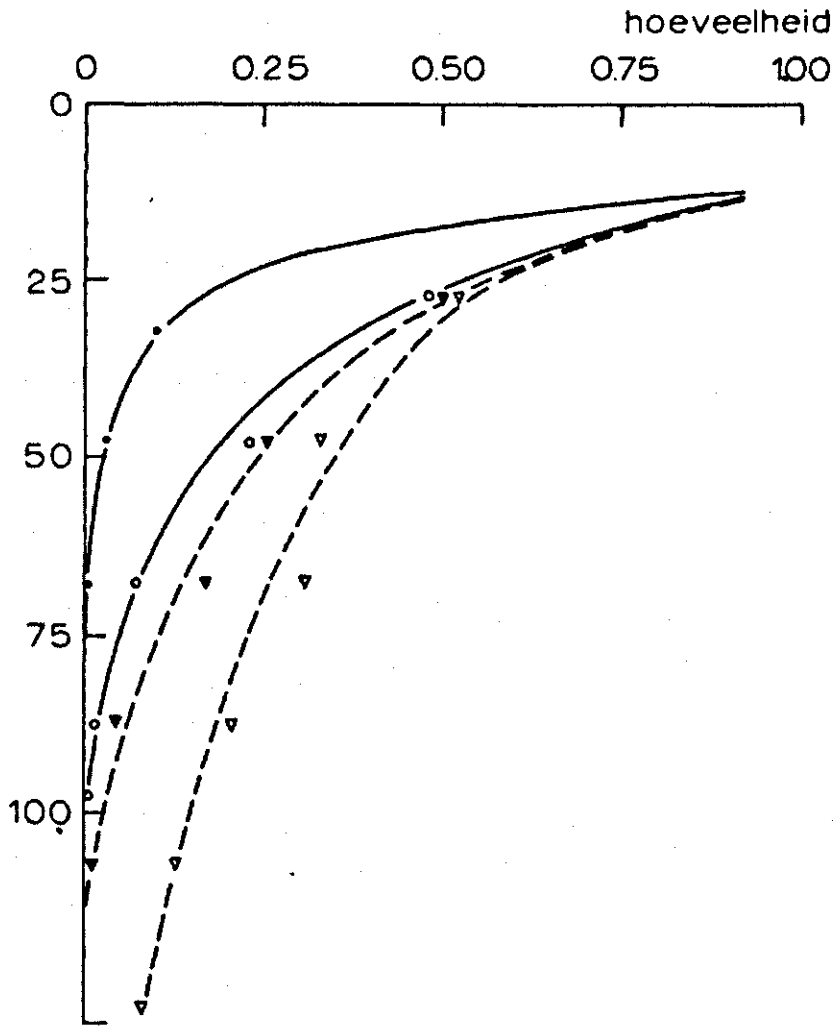
Voor een grond met 40 vol % water en 10 vol % lucht met een luchtsamenstelling 21 vol % O_2 en 0 vol % CO_2 bij een temperatuur van 20° C, aangenomen dat alle O_2 omgezet wordt in CO_2 dan zal, wanneer geen gastransport plaats vindt, van de gevormde 41 mg CO_2 / 1 grond, 32 mg CO_2 in het water oplossen en 8 mg in de bodemlucht terechtkomen; in de bodemlucht is de CO_2 concentratie dan 4,9 vol % en de O_2 concentratie 0 vol %.

fig 9 b



Verloop O_2 concentratie in de bodemlucht van boomgaard op 3 verschillende grondsoorten (Boynton en Compton 1944)

fig 10



wortelverdeling van gerst

3 juni
29 juli

bonen

3 juni
31 juli

naar Gleimeroth 1954

Het oplossen van CO_2 in het bodemwater zou in overeenstemming zijn met het feit dat de laagst voorkomende O_2 concentraties eerder in het jaar worden gemeten dan de hoogste CO_2 concentraties. De in het voorjaar geproduceerde CO_2 kan in het dan nog niet met CO_2 verzadigde bodemwater oplossen. Ook mogelijk is dat er CO_2 chemisch door kalk wordt vastgelegd in de vorm van $Ca(HCO_3)_2$ of dat het wordt geadsorbeerd aan humus of klei-mineralen (zie hoofdstuk II C 1g).

III B Berekening van de CO_2 en O_2 concentraties op verschillende diepte

Hiervoor is nodig te weten:

1. De grootte en verdeling naar de diepte in het profiel van de ademhalingsactiviteit (= CO_2 produktie en O_2 verbruik) van grond en plantenwortels.
2. De transportmogelijkheid voor gassen door de grond.

B 1 Omtrent de grootte van de CO_2 produktie of het O_2 verbruik van het totale profiel bestaan een aantal gegevens (zie hoofdstuk CO_2 produktie en O_2 verbruik). Over de verdeling naar diepte in het profiel bestaan minder metingen.

PENNINGSFIELD (1950) en MEIJER en SCHAFFER (1954) meten de ademhalingsactiviteit van grondmonsters uit verschillende diepte. Deze wordt gemeten bij hoge temperatuur en optimaal vochtgehalte van de monsters. In onderstaande tabel zijn enige uitkomsten gegeven van monsters uit verschillende diepte.

Tabel 8. Verdeling CO_2 prod. en O_2 verbruik. (PENNINGSFIELD, 1950)

diepte	beukebos op leem		humeuze löss (kasgrond)		humusarme löss (landbouw)	
cm	CO_2	O_2	CO_2	O_2	CO_2	O_2
0-20	18.3	19.7	14.6	32.5	11.3	15.0
20-40	9.9	11.9	18.6	23.2	1.3	2.5
40-60	3.8	3.6	6.6	7.3	1.6	2.1
60-80	2.3	2.4	5.9	6.2	1.8	2.7
80-100	1.3	1.8	7.8	7.7	1.5	1.7

De op deze manier gevonden cijfers zullen niet gelijk zijn aan de in werkelijkheid voorkomende waarden. In het veld zullen vooral in de diepere lagen van het profiel zelden zulke gunstige omstandigheden voor ademhaling aanwezig zijn.

Daarom zal in het veld op grotere diepte de ademhalingsactiviteit relatief lager zijn dan hier is bepaald.

Omtrent de verdeling der ademhalingsactiviteit naar diepte van plantenwortels bestaan waarschijnlijk geen metingen. Wel is aannemelijk dat de verdeling van de bewortelingsdichtheid naar diepte weinig zal afwijken van de verdeling der ademhalingsactiviteit gerekend per volume eenheid grond (WESSELING, 1957). Zie voor de verdeling der beworteling van enkele gewassen figuur 10. (GLIEMEROTH overgenomen van WESSELING, 1957). Een groot deel van het wortelstelsel blijkt zich in de laag van 0-0,25 m te bevinden. Bij fruitbomen kan een hiervan afwijkende verdeling voorkomen, b.v. een homogene beworteling tot $\pm$ 0,70 m (BUTIJN, 1961).

De verdeling van het aantal micro-organismen in de grond heeft een gelijk beloop als de potentiele ademhalingsactiviteit en de bewortelingsdichtheid. Hoewel het aantal micro-organismen of kiemen daarvan geen eenduidige maat is voor de totale activiteit der micro-organismen (ALEXANDER, 1961 en WESSELING, 1957), is in één profiel wel enig verband te verwachten tussen het aantal micro-organismen en de ademhalingsactiviteit.

Ter beschrijving van de ademhalingsactiviteit van grond en plantenwortels samen gebruiken VAN DUIN (1956) en WESSELING (1957) een formule welke de vorm heeft van de drie voornoemde verdelingen.

formule 1 $$\alpha_z = \alpha_0 \left\{1 - \left(\frac{z}{l}\right)^c\right\}$$

α_z = activiteit op diepte z
α_0 = activiteit op diepte 0
l = diepte waarop $\alpha_z = 0$
c = factor

Voor de activiteitsverdeling in goed ontwaterd bouwland past formule 1 wanneer aangenomen wordt c = $\frac{1}{4}$, l = 1,25 m voor graan, l = 0,90 à 1.00 m voor aardappels en voor grasland waarschijnlijk l = 0,20 à 0,40 (WESSELING, 1957).

B 2 Transportmogelijkheid van gassen

Het gastransport in de grond vindt voornamelijk plaats door gasdiffusie via de met lucht gevulde poriën (BUCKINGHAM, 1904; ROMELL, 1922). Aan de hand van cijfermateriaal uit de literatuur (zie ook hoofdstuk VI B) geeft VAN DUIN (1956) voor de diffusiecoëfficient van gassen als functie van het luchtvolume der grond:

formule 2 $$D_g / D_l = 0{,}9\ X_l - 0{,}1$$

D_g = diffusiecoëfficient in grond
D_l = diffusiecoëfficient in lucht
X_l = luchtporiën volume

Voor enkele gevallen is het concentratie beloop van CO_2 en O_2 in het profiel berekend (ROMELL, 1922; VAN BAVEL, 1951; VAN DUIN, 1956; WESSELING, 1957). Hierbij is aangenomen:

1. Een stationaire gasdiffusie
2. De ademhalingsactiviteit is onafhankelijk van de gassamenstelling van de grond.

Er is een oplossing gegeven van de diffusievergelijking voor:

a) Een homogene grond met tot op bepaalde diepte een constante activiteit, beneden die diepte is de activiteit nul (ROMELL, 1922; VAN BAVEL, 1951; VAN DUIN, 1956)

b) Voor gelaagde grond waarvan de lagen zelf homogeen zijn (ROMELL, VAN BAVEL en VAN DUIN)

c) Voor homogene en gelaagde grond waarvan de activiteit in de bovenlaag constant is en in de onderlaag lineair met de diepte afneemt (VAN DUIN)

d) Voor homogene grond waar de activiteit lineair met de diepte afneemt en voor homogene grond waar de activiteit niet lineair met de diepte afneemt (ROMELL, 1922)

e) Voor grond waar het luchtvolume en de activiteit niet lineair met de diepte afneemt (WESSELING, 1957)
Voor de afname van het luchtvolume met de diepte wordt gebruikt de formule :

formule 3 $$X_{Lz} = X_{Lo}\ (\ L - C_k z^k)$$

X_{Lz} = luchtvolume op diepte z
X_{Lo} = luchtvolume op diepte z = o
L = diepte waar $X_{Lz} = 0{,}13$
Z = diepte
C en k zijn constanten

Voor het verloop der activiteit met de diepte wordt formule 1 gebruikt, voor de invloed van X_L op de diffusiecoëfficient in de grond de formule 2. Aangenomen wordt dat wanneer $X_{Lz} = 0{,}13$ $\alpha_z = 0$
Het concentratiebeloop in de grond is voor CO_2 berekend en in grafiek weergegeven, voor de waarden C = $\frac{1}{4}$, k = 1 en 2 en voor verschillende waarden van C_k en X_{Lo}.

Om te kunnen toetsen of bovengenoemde modellen voldoende gelijken op de werkelijkheid ontbreken vooral gegevens omtrent het beloop der ademhalingsactiviteit van de grond- en plantenwortels.

Een open vraag is vooral voor hoever het gastransport in de grond als een stationaire gasdiffusie beschreven kan worden. De fluktuatie van de CO_2 produktie kan zeer sterk zijn; een stijging van 100 à 200 % binnen 4 à 5 uur kan voorkomen (KRZYSCH, 1962; KOEPF, 1954). Deze stijging wordt veroorzaakt door temperatuur variaties in de bovenste grondlagen en de sterke temperatuurgevoeligheid van de ademhalingsactiviteit. Wij kunnen dus verwachten dat vooral in de bovenste grondlagen de CO_2 en O_2 concentraties afwijken van de waarden, die uitgaande van een stationaire diffusie zijn berekend.

Met betrekking op de aanname dat de activiteit onafhankelijk is van de gassamenstelling, wijst CURRIE (1961) er op dat de O_2 concentratie in het centrum van bodem-agregaten tot nul kan dalen als gevolg van te grote met water verzadigde agregaten of door lage O_2 concentraties in de met lucht gevulde poriën. Zodra in het centrum der bodemagregaten de O_2 concentratie nul wordt zal de activiteit (waarvan CURRIE het O_2 verbruik als maat neemt) dalen bij verdere daling van de O_2 concentratie of door het stijgen van het vochtgehalte.
Deze daling zou in de bepaling van het activiteitsverloop in de grond kunnen worden betrokken (CURRIE, 1961).

IV REACTIES VAN DE PLANT VOORAL OP LAGE O_2 EN HOGE CO_2 CONCENTRATIES

Het is niet zonder meer te zeggen of de schade aan planten door een slechte luchthuishouding veroorzaakt wordt door de dan optredende lage O_2 concentratie, hoge CO_2 concentratie, of door giftige stoffen welke bij deze CO_2 en O_2 concentraties worden gevormd.

Er zijn onderzoekers die hun aandacht vooral op CO_2 hebben gericht (BERGMAN, BUTIJN, WURMBACH, WESSELING en VAN DUIN), andere vooral op de O_2 concentraties (BERRY en NORRIS, WANNER, CURRIE, CANNON en LEMON).

Onder natuurlijke omstandigheden zal een lage O_2 concentratie meest tegelijk voorkomen met hoge concentraties van CO_2 en giftige stoffen. Daar er echter geen vast verband bestaat tussen de O_2 en CO_2 concentraties in de grond, is het nodig ook geïnformeerd te zijn omtrent de invloed van iedere component afzonderlijk op de plant.

IV A Gevolgen slechte luchthuishouding

Bij ernstige wateroverlast is alle gastransport in de grond gestagneerd, als gevolg waarvan de O_2 en CO_2 concentraties schadelijke waarden kunnen bereiken.

Voor veel gewassen kan dit dodelijk zijn, vooral wanneer dit optreedt bij hogere temperatuur, terwijl de plant in volle groei is. Minder sterke wateroverlast vertraagt de groei, het blad wordt hierbij meest lichter van kleur (BUTIJN, 1961). Het ontbreken van gastransport bij lage temperatuur, terwijl de plant in een rusttoestand verkeert, veroorzaakt weinig of geen schade (zie voor fruit, HEINICKE, 1932). Zo vertoont de bewortelingsdiepte van fruitbomen geen correlatie met de hoogte der wintergrondwaterstanden, maar is wel gecorreleerd met de grondwaterstanden in mei (BUTIJN, 1961).

De gevoeligheid voor slechte luchthuishouding is voor de diverse gewassen verschillend; BUTIJN (1961) geeft voor fruit de rangorde van minder naar meer gevoelig: peer, pruim, appel, perzik, kers en voor klein fruit: aardbei, zwarte bes, braam, rode bes, framboos, kruisbes. Van de akkerbouwgewassen zijn granen wat minder gevoelig dan hakvruchten en mais. Uit proeven met verschillende CO_2 en O_2 concentraties blijkt, dat de groei van de wortels eerder reageert dan de groei van de bovengrondse delen.

A 1 Physiologische reacties op O_2 en CO_2 concentraties

Zoals te verwachten reageert de ademhaling van de wortels het snelst op lage O_2 of hoge CO_2 concentraties (HARRIS en VAN BAVEL, 1957). Volgens BERGMAN H.F. (1959) is de stagnatie van de ademhaling,welke hij vooral toeschrijft aan O_2 gebrek, de voornaamste oorzaak van de schade door anaerobe omstandigheden. De energie welke het levende protoplasma nodig heeft voor onder andere de zout-en wateropname, wordt bij de cultuurgewassen verkregen door verbranding van koolhydraten. Bij O_2 gebrek zal het levende protoplasma zijn functies niet meer kunnen vervullen. Ook het transport wat verder via het levende protoplasma plaats heeft, stagneert; dit toont CURTIS aan bij bladstelen waarvan een deel door zuiver N_2 wordt omgeven (genoemd door BERGMAN, 1959).

Het zoutgehalte in het blad blijkt bij lage O_2 concentraties in de wortelzone af te nemen in de volgorde K, N, P_2O_5, Ca en Mg, waarbij K het sterkst afneemt (HARRIS en VAN BAVEL, 1957, tabak; HOPKINS e.a., 1950, tomaat, tabak, soya; LETEY e.a., 1961, leeuwebek).
CHANG en LOOMIS (1945) vinden door CO_2 overmaat bij tarwe, mais en rijst zoutafname in dezelfde volgorde. Het Na gehalte blijkt bij O_2 gebrek te stijgen (SHAPIRO, 1958).

Het zoutgehalte in de wortels stijgt in verhouding tot het gehalte in de spruit (SHAPIRO, 1958; LETEY e.a., 1961), wat een aanwijzing zou kunnen zijn voor stagnerend transport van de wortel naar de bovengrondse delen. HOPKINS e.a. (1950) namen dit verschijnsel bij tomaat niet waar.

Het gehalte aan koolhydraten stijgt in de bovengrondse delen (HARRIS en VAN BAVEL, 1957; KRAMER, 1951). Volgens KRAMER is dit toe te schrijven aan transportstagnatie in de wortels. De koolhydraten en groeistoffen hopen zich op vlak boven de in anaeroob milieu verkerende wortels, op die plaats zouden daardoor nieuwe wortels uitlopen.

De wateropname daalt onmiddellijk bij lage O_2 of hoge CO_2 concentraties in de wortelzone (CHANG en LOOMIS, 1945; WHITNEY J.B., 1942, ref KRAMER, 1949). Bij minder extreme omstandigheden begint de verdamping eerst na enige dagen af te nemen (LETEY e.a., 1961). De afname is echter groter dan de afname van het verdampend oppervlak of de afname van de hoeveelheid wortels die water kunnen opnemen. BROUWER (1955) kon echter bij vicia faba in slecht geaereerde voedingsoplossingen geen verdampingsafname vinden. Dat stagnatie van de wateropname en de daarop volgende verdroging de belangrijkste oorzaak zou zijn van de dood van de planten, is te betwijfelen. Naast reacties die op watertekort duiden doen zich ook andere verschijnselen voor die meer op vergiftiging duiden (KRAMER, 1951).

A 2 vergiftige stoffen

Het is mogelijk dat de plant vergiftigd wordt door stoffen die bij lage O_2 concentratie ontstaan. BERGMAN H.F. (1959) noemt als mogelijke giftige stoffen Fe^{++}, S^{--}, NO_2^-, CH_4, organische zuren, alcoholen en aceet-aldehyden. Van de concentraties die onder anaerobe omstandigheden in de bodem voorkomen kon echter nog niet worden aangetoond dat deze giftig zijn voor de plant. (BERGMAN H.F., 1959). De algemene opvatting is echter wel dat onder anaerobe omstandigheden vergiftiging van de plant mede oorzaak is van de schade aan het gewas (KRAMER, 1951; BROUWER, 1955; BUTIJN, 1961; FULTON en ERICKSON, 1964).

VLAMIS en DAVIS (1944) vinden dat het doorleiden van CH_4 door de voedingsoplossing als gevolg heeft dat tomaat sterft, dat de groei van gerst tot 60 % daalt en de groei van rijst stijgt. Gegevens omtrent de O_2 concentratie ontbreken.

Bij japans onderzoek, YAMANE en SATO (1964), TAKAY, KOYOMA en KAMURA (1956) wordt bij inundatie onder hoge temperatuur gevonden dat na 8 tot 20 dagen grond een aanzienlijke hoeveelheid CH_4 produceert. Het is echter de vraag of een gewas onder dergelijke extreme omstandigheden al niet beschadigd is voordat er CH_4 tot ontwikkeling komt.

WANNER en SCHMUCKI (1950) tonen aan dat graanwortels in voedingsoplossing onder anaerobe omstandigheden stoffen uitscheiden die remmend werken op de worteladembaling.

A 3 aanpassing van de plant aan slechte luchthuishouding

Een wortelstelsel dat is gegroeid in een milieu met slechte luchthuishouding is beter bestand tegen anaerobe omstandigheden dan een wortelstelsel dat onder anaerobe omstandigheden is gegroeid.

KRAMER (1951) refereert onderzoek waaruit blijkt dat wortels die in een slecht geaereerd milieu zijn gegroeid tot lagere O_2 concentraties normaal zout opnemen dan in aeroob milieu gegroeide wortelstelsels.

De morfologische veranderingen van een wortelstelsel in slecht geaereerd milieu duiden op een aanpassing waardoor zowel de opnamemogelijkheid van O_2 uit de directe omgeving van de wortel wordt vergroot als de transportmogelijkheid van gassen in de wortels zelf.

BRYAN (1934) vindt bij gerst kortere en dikkere wortels met dunne celwanden en veel luchtruimten. GEISSLER (1964) bij erwt dikkere, kortere meer vertakte wortels. BERGMAN W. (1957) vindt bij rogge toename van de hoeveelheid wortelharen in niet doorluchte wortelculturen, terwijl bij goede doorluchting van de watercultuur of de toevoeging van adsorbtiekool totaal geen wortelharen meer ontstaan.

De mogelijkheid van gastransport via luchtholten in stengels en wortels was van rijst reeds langer bekend. Het blijkt uit recente proeven met zuurstof-isotoop ^{15}O bij boon en gerst en rijst, dat bij deze gewassen de O_2 in de wortel in diffusie-evenwicht verkeert met de O_2 aan het bladoppervlak; wat betekent dat er tussen blad en wortel praktisch doorlopende luchtkanalen aanwezig zijn (EVANS en EBERT, 1960 en BARBER, EBERT en EVANS, 1962; genoemd door JENSEN en KIRKHAM, 1963).

IV B HOOGTE SCHADELIJKE O_2 EN CO_2 CONCENTRATIES

Bij de bepaling van de O_2 of CO_2 concentratie welke schadelijk wordt voor de plant moeten wij rekening houden met:

1) Het mogelijke concentratieverschil tussen worteloppervlak en de plaats van gasmonstername
2) De temperatuur.

B 1 Het concentratie verval nodig voor het transport door diffusie van O_2 en CO_2 in water kan zeer aanzienlijk zijn. Zo kan het concentratieverval in de directe omgeving van een actieve wortel meer dan 4 ppm = 10 vol % O_2 bedragen (LEMON, 1962 zie ook berekening in Hoofdstuk II D 1). Daar de diffusie-coëfficient in lucht naar verhouding groot is zal in gronden met het hoge luchtvolume van 30 à 40 %, het transport maar zeer weinig concentratieverval vergen, bij gronden met een lager luchtvolume wordt het concentratieverschil wel merkbaar. BLACK (1957) noemt enkele onderzoekingen met rozen. In watercultuur blijkt dat 10 % O_2 de groei niet beperkt; op niet geventileerde grond met 18 vol % O_2 en 1,5 vol % CO_2 in de bodemlucht, blijkt echter de spruitgroei 50 % lager dan op geventileerde grond. CANNON (1925) geeft voor "Canadian field pea" dat in niet geventileerde grond de wortelgroei stopt bij 2 vol % O_2, in geventileerde bodemcultuur bij 0,5 à 1 vol % O_2.

Bij waterculturen zijn de verschillen tussen wel en niet bewogen water nog extremer; zelfs het O_2 transport van de oppervlakte naar de omgeving van de plantenwortels is reeds onvoldoende (WANNER en SCHMUCKI, 1950).

B 2 Temperatuur. De O_2 concentratie welke limiterend wordt voor de plantengroei is temperatuur afhankelijk (CANNON, 1925), evenals de voor de ademhaling limiterende O_2 concentratie dat is (zie hoofdstuk II D 1). BERRY en NORRIS (1949) vinden dat afhankelijk van het O_2 verbruik de limiterende O_2 concentratie voor ademhaling van wortelsegmenten van ui varieert van 10 tot 45 vol % O_2. De andere levensfuncties zoals groei, zout en wateropname zullen minder scherp als de ademhaling reageren, maar staan daarmede toch in nauw verband.

CANNON (1925) onderzoekt de wortelgroei van ± 30 soorten bij verschillende O_2 concentraties en temperaturen tussen 18 en 30° C.
De O_2 concentratie waarbij de wortelgroei stopt (lower critical concentration of l.c.c.) varieert van 0-3 vol % O_2. Bij 15° C is de l.c.c. 1 à 2° C lager dan bij 30°. De hoogte van de O_2 concentratie welke limiterend wordt voor de wortelgroei (upper critical concentration of u.c.c.) is zowel afhankelijk van soort als van temperatuur.
Zo is b.v. voor gerst bij 27° C 2 vol % O_2 limiterend voor wortelgroei, voor mais is dit bij 30° C 10 vol % O_2.
De temperatuurinvloed op de hoogte van de limiterende O_2 concentratie is groot. Voor mais is b.v. bij 30° C de limiterende O_2 concentratie 10 vol % en bij 18° C 4 vol % O_2.

Omtrent de temperatuurinvloed op de werking van CO_2 bestaan minder gegevens, uit enkele waarnemingen van CANNON blijkt, dat bij hogere temperatuur een lagere CO_2 concentratie reeds schadelijk wordt.

Wanneer er gegevens beschikbaar zijn over de diffusiecoëfficient van CO_2 in water en wortelweefsel zou een berekening van het concentratiebeloop van CO_2 in en buiten de wortel wel verhelderend werken.

B 3 limiterende O_2 concentratie

Tabel 9 geeft voor enkele gewassen de limiterende O_2 concentraties. Dit zijn uitkomsten van onderzoek waarbij we mogen aannemen dat de gemeten concentraties weinig afwijken van de concentraties aan het wortelоppervlak. Dit is het geval wanneer het luchtvolume van de grond groot genoeg is voor voldoende transport door diffusie (alleen proef SHAPIRO), of wanneer de culturen continue worden geventileerd met het gasmengsel dat geanalyseerd wordt.

Het ontbreken van gegevens omtrent de temperatuur tijdens de proeven komt de vergelijkbaarheid van de uitkomsten niet ten goede.

B 4 reactie op zeer lage O_2 concentraties

De reactie op O_2 concentraties van 0 tot ± 1 vol % is afhankelijk van soort en temperatuur. De resistentie soorten (b.v. citrus, soya, katoen en veel grassen) kunnen zich na een periode met lage O_2 concentraties weer herstellen en verder groeien. BOYNTON, VILLIERS en REUTER (1938) vinden dat appelwortels O_2 concentraties tot 0,1 vol % overleven. Daalt de concentratie beneden 1 vol % dan nemen de wortels af in gewicht. Meer gevoelige soorten (b.v. tomaat, tabak, advokaat) sterven af na een periode van 1 à 2 dagen met lage O_2 concentratie (CURTIS, 1949). Voor dit soort gewassen zijn tijdelijke anaerobe omstandigheden door b.v. hoge grondwaterstanden, vooral bij hogere temperatuur funest.

tabel 9

Limiterende O_2 concentraties

gewas	limiterende O_2 concentr. vol % v.lucht	temp. °C	kenmerkende reactie	groei-medium	resistentie tegen lage O_2 conc. vlgs auteur	Auteur
mais	10	30	wortelgroei	grond	gering	CANNON (1925)
mais	4	18	"	"	"	
erwt	10	27	"	"	"	
boon	10	27	"	"	"	
haver	-	-	"	"	matig	
gerst	2	27	"	"	"	
ui	3	27	"	"	"	
katoen	2	18	"	"	"	
rijst	-	-	"	"	groot	
wilg	-	-	"	"	"	
gerst	9,5	?	groei totaal	lucht	-	VLAMIS en DAVIS (1943)
mais	tussen 12 en 5	?	opname mineralen	grond	-	SHAPIRO (1958)
mais	10	?	worteldruk	lucht	-	GILL en MILLER (1956)
tabak	± 10	?	wortelademhaling	zand	-	HARRIS en VAN BAVEL (1957)
ui	15	15	ademhaling	water	-	BERRY en NORRIS (1949)
ui	45	30	worteltop	water	-	"
soya	15	12-28	groei	water	groot	SHIVE (1941)
haver	20	12-28	groei	doorluchting	-	"
tomaat	40	12-28	groei	voldoende?	-	"

B 5 zeer hoge O_2 concentraties

O_2 concentraties van 40 à 100 vol % blijken voor de plant nadelig te zijn. De wortels blijven kort en dik, terwijl ze sterk door micro-organismen worden aangetast (voor soya, citrus en advokaat, aangetoond door CURTIS, 1949; resp. SHIVE, 1941).

Onderzoekers welke met afgesneden wortels werkten rapporteren geen nadelige invloeden (WANNER, 1945; BERRY en NORRIS, 1949).

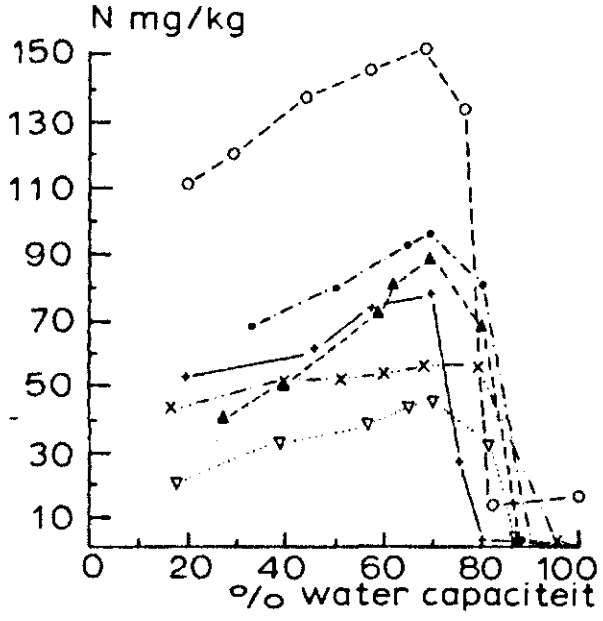
B 6 Hoogte schadelijke CO_2 concentratie

Zeer hoge CO_2 concentraties blijken voor de plant giftig te zijn (zie tabel 10). Van concentraties lager dan 10 vol % kan niet worden aangetoond, dat deze de plant ernstig beschadigen of remmen in groei, zoutopname of verdamping. De ademhaling gemeten als CO_2 produktie blijkt echter door CO_2 concentraties tussen 5 en 10 vol % af te nemen.

tabel 10

invloed CO_2 concentratie

gewas	CO_2 vol % v.	O_2 lucht	reactie gewas	groei-medium	auteur
citrus	75	20	wortelgroei zeer traag	grond	CANNON (1925)
tarwe	80 à 100	laag	daling, verdamping en zoutopname. Bij CO_2 doorleiden	water	CHANG en LOOMIS (1945)
mais	"	"	gedurende 10 min. per uur	"	
rijst	"	"		"	
tomaat	20	0	schade groter dan bij 100 % N_2	mist	BEHAN (1963)
appel	5	5-20	reactie op O_2 trappen gelijk bij 0 en 5% CO_2	grond (niet geventileerd)	BOYNTON en COMPTON (1943)
tomaat	20	20	lichte reductie transpiratie	zand	KRAMER (1949) refereert WHITNEY (1942)
zonnebloem	20	20			
erwt	± 12	20	geen invloed verdamping of zoutopname	water	GEISSLER (1964)
tabak	15	5	daling, ademhaling, groei en zoutopname	zand	HARRIS en VAN BAVEL (1957)
	10	10	alleen daling ademhaling	zand	
	5	15	lichte daling ademhaling	zand	



Invloed van het vochtgehalte op de hoeveelheid minerale N welke na 16 weken incubatie is gevormd (v. Schreven 1956)

V STIKSTOFVOORZIENING EN LUCHTHUISHOUDING

Wanneer men zich bezig houdt met het probleem van de luchthuishouding in de grond en de invloed daarvan op het gewas, kan de rol van de stikstof hierbij niet ongenoemd blijven.

In de eerste plaats wordt namelijk de hoeveelheid voor de plant opneembare stikstof beïnvloed door de luchthuishouding van de grond; in de tweede plaats zijn er aanwijzingen dat nitraten de schadelijke invloed van een te lage O_2 concentratie verkleinen.

V A invloed van de luchthuishouding op de hoeveelheid minerale stikstof

De stikstof kan in de vorm van: NO_3^- en NH_4^+, en in de vorm van enkele aminozuren door de plantenwortel worden opgenomen. De aminozuren komen in normale landbouwgronden weinig voor en spelen een ondergeschikte rol (VAN SCHREVEN, 1956).

Maakt men de balans op van de aan- en afvoermogelijkheden van minerale stikstof in de grond, dan blijkt dat de aanvoermogelijkheden kunnen zijn:

a) De stikstofbemesting

b) De afbraak van organisch materiaal (zie HARMSEN en VAN SCHREVEN, 1955)

Dit organisch materiaal kan bestaan uit:

1. Resten van hogere planten; hiervan moeten vooral de leguminozen worden genoemd.
2. Humus.
3. Microben, hiervan moeten de vrijlevende stikstof bindende microben worden genoemd; de hoeveelheid stikstof welke hierdoor uit de lucht wordt gebonden en later in de vorm van minerale stikstof weer vrij kan komen, bedraagt gewoonlijk niet meer dan 15 kg N/ha.j. Voor nederlandse omstandigheden is dit gemiddeld 5 à 10 kg N/ha.j. (VAN SCHREVEN). Andere auteurs geven voor landbouwgrond waarden op van gemiddeld 1,5 kg/ha (SCHEFFER, 1961).

c) Aanvoer door regenwater, dit bedraagt voor Nederland 5 à 6,5 kg N/ha.j. (VAN SCHREVEN, 1956).

Enkele afvoermogelijkheden van de minerale stikstof in de grond zijn:

a) Opname door het gewas, de in de oogst aanwezige stikstof wordt daarbij totaal afgevoerd.

b) Opname door microben; doordat dit zeer snel kan plaats hebben, evenals het weer vrijkomen bij afbraak der microben kan de hoeveelheid minerale stikstof in de grond sterk wisselen.

HEBERT (1960) meet in 24 uur veranderingen van ± 50 kg N/ha.

c) Adsorbtie van NH_4^+ aan klei-mineralen en humus.

d) Uitspoelen van vooral NO_3^- met het drainagewater.

e) Ontwijken in de vorm van NH_3; dit komt voor op in kalkhoudende gronden.

f) Ontwijken in de vorm van N_2O en N_2 na redactie van de nitraten door denitrificerende microben.

Een slechte luchthuishouding door bijvoorbeeld te hoge grondwaterstand of te dichte grond heeft op enkele belangrijke posten van deze balans invloed, te weten:

a) De stikstofbinding uit de lucht geschiedt door strikt aerobe microben, deze wordt door anaerobe omstandigheden belemmerd.

b) De afbraak van organisch materiaal wordt vertraagd en daarmede het vrijkomen van minerale stikstof. Een voorbeeld mede hiervan geeft VAN SCHREVEN wanneer hij de netto stikstof mineralisatie gaf van geincubeerde grond bij verschillend vochtgehalte, zie figuur 11.

Een watercapaciteit van meer dan 75 à 80 % (wat hier overeenkomt met een luchtvolume van ± 10 %) doet de hoeveelheid in 16 weken gemineraliseerde N dalen van 30 à 90 mg N/kg (= 90 à 270 kg N/ha) tot praktisch nul. Het is zeer wel mogelijk dat hierbij tevens denitrificatie van nitraat een rol heeft gespeeld.

Uit deze grafieken blijkt ook dat bij droge omstandigheden de mineralisatie van stikstof lager wordt.

c) Denitrificatie of de reductie van NO_3^- tot N_2O en N_2 heeft alleen plaats wanneer de O_2 toevoer nodig voor de microben onvoldoende is (BRENNER en SHAW, 1958). Onder anaerobe omstandigheden in de grond kan een aanzienlijke hoeveelheid stikstof hierdoor verloren gaan.

CADY en BARTHOLOMEW (1961) vinden uit proeven met stikstof isotoop ^{15}N de volgende waarden:

O_2 conc. vol %	N verlies mg N
1 - 1,6	52,1
4 - 5,7	10,6
7 - 8,5	1,9

(Duur incubatie 550 uur Temp. = 28° C toegevoegd 62 mg N als NO_3^-)

Alleen wanneer de O_2 concentratie tot praktisch nul nadert ontwijkt de stikstof als N_2 anders als N_2O.

Voor denitrificatie zijn naast NO_3 ook koolhydraten noodzakelijk als voedsel voor de microben. Verhoging van de hoeveelheid koolhydraten versnelt de denitrificatie.

ALLISON en CARTER en STERLING (1960) geven daarvoor de volgende getallen:

O_2 vol %	N verlies % toegevoegde NO_3
0,46	18,8
2,27	2,2
	+ 0,5 % glucose
0,46	98,8
2,27	25,2

(Incubatietijd 240 uur Temp. = 30° C toegevoegd 78 mg N als NO_3^-)

Bij 21 vol % O_2 bestaat de trend van toenemende NO_3 en totaal hoeveelheid N. Bij bekalkte grond daalt het totale hoeveelheid N waarschijnlijk door NH_3 verlies.

De snelheid van N verlies/per 100 g grond door denitrificatie blijft tot zeer lage NO_3 concentraties onafhankelijk van de NO_3 concentratie (zie ook PATRICK, 1960).

BRANDT, WALCOTT en ERICKSON (1964) geven het stikstofverlies als functie van de met platina electroden gemeten O_2 diffusie snelheid (voor meettechniek zie hoofdst. VI A). Wanneer de O_2 diffusie snelheid beneden de 20. 10^{-8} g O_2 cm^{-2} min^{-1} daalt, blijkt er stikstofverlies op te treden door denitrificatie van NO_3^-.

Ook onder niet extreem anaerobe omstandigheden gaat stikstof door denitrificatie verloren. Uit proeven met gemerkte stikstof, ^{15}N, vindt WOLDENDORP (1963) dat in levende graszoden $\pm$ 20 % van het toegediende nitraat door denitrificatie verloren kan gaan. Wordt de stikstofbemesting gegeven in de vorm van ammoniumzouten dan bedraagt het verlies 9 %.

WOLDENDORP schrijft dit toe aan het hoge O_2 verbruik van de levende wortels en de zeer actieve microben in de rhizosfeer, waardoor de O_2 concentratie in de rhizosfeer sterk kan dalen. Bovendien scheiden de wortels voldoende waterstofdonors uit, om aanzienlijke denitrificatie bij deze lagere O_2 concentratie mogelijk te maken. Bij deze proeven is de aeratie goed, het vochtgehalte van de graszoden wordt op 60 % van de watercapaciteit gehouden.

d) Het verlies van stikstof door uitspoeling komt in het nederlandse klimaat vooral voor tijdens de winter. Deze verliezen kunnen aanzienlijk zijn, VAN SCHREVEN(1965) berekent uit stikstofbepalingen van het uitgemalen water van Oostelijk Flevoland, dat hiermee 20 à 30 kg N/ha wordt afgevoerd.

VAN DER PAAUW (1959) vindt op veenkoloniale grond, dat na een droge winter 60 kg N/ha minder gegeven kan worden dan na een natte winter, dit verschil schrijft hij toe aan uitspoeling van het nitraat in de winter. Het nitraat wordt door het overtollige regenwater naar diepere lagen gespoeld waar het of zo diep kan komen dat het in de zomer niet meer voor de plant ter beschikking kan komen, of het komt in een anaeroob milieu waar het door denitrificatie verloren gaat (HARMSEN, 1962).

In gronden met een gering bergend vermogen en in zeer vochtige gronden zal de hoeveelheid door de grond percolerend water het grootst zijn en dienovereenkomstig ook het stikstofverlies door uitspoeling.

In gronden met een hoge grondwaterspiegel is de kans groot dat het uitgespoelde nitraat door denitrificatie verloren gaat.

V B Invloed nitraat op plantengroei onder anaerobe omstandigheden

Wanneer in waterculturen de stikstof aanwezig is in de vorm van nitraat blijkt dat planten lager O_2 concentraties beter verdragen dan wanneer dezelfde hoeveelheid N in de vorm van NH_4^- aanwezig is.
ARNON (1937) vindt dit bij gerst; GILBERT en SHIVE (1942) vinden dat bij NO_3-bemesting van tomaat, haver en soya de voor groei limiterende O_2 concentratie lager ligt dan bij NH_4 bemesting.

Bij nader onderzoek blijkt, dat de NO_3 wordt gebruikt als zuurstofleverancier voor de worteladembaling. Bij lage O_2 concentraties wordt de uit de vloeistof verdwenen NO_3 stikstof niet in de wortels teruggevonden (SHIVE, 1941). Bij verlaging van de O_2 concentratie daalt eerst de NO_3 opname uit de vloeistof evenals de opname der andere zouten, maar na verloop van tijd stijgt de NO_3 opname en daarmede parallel de CO_2 produktie van de wortel. De NO_3 opname bij lage O_2 concentratie is dan hoger dan bij normale O_2 concentratie (GILBERT en SHIVE, 1945).

Het is mogelijk dat vooral de in de rhizosfeer voorkomende micro-organismen de NO_3 hebben gedenitrificeerd (zie ook WOLDENDORP, 1963).

V C Proefveldgegevens

De bovengenoemde uit laboratoriumproeven verkregen gegevens verschaffen

wel een inzicht over de kwalitatieve samenhang der factoren maar zijn niet geschikt voor het vinden van kwantitatieve gegevens omtrent de stikstof en luchthuishouding in natuurlijke omstandigheden. Proefveldgegevens zijn daartoe wel geschikt.

VISSER (1964) en VAN HOORN (1958) geven uitkomsten van een grondwaterstandenproefveld met stikstoftrappen op zware klei (Nieuw Beerta).

Wordt de invloed van hoge grondwaterstanden in de zomer gesplitst in de directe invloed van de daarbij behorende aeratie op de gewasopbrengst en de indirecte invloed via de stikstofleverantie door de grond, dan blijkt dat de invloed van slechte aeratie via de stikstofleverantie van de grond groter is dan de directe invloed van de aeratie op de gewassen zelf (VISSER).

De opbrengstdaling als gevolg van een hogere zomergrondwaterstand dan 1,50 kan voor grondwaterstanden van 0,5 à 0,6 m en dieper, geheel worden opgeheven door een hogere stikstofgift en voor een zomergrondwaterstand van 0,4 m gedeeltelijk. Hieruit kan de conclusie worden getrokken dat de aeratie voor plantengroei reeds bij een grondwaterstand van 0,5 à 0,6 m voldoende was, terwijl de veel betere aeratie bij een grondwaterstand van 1,5 m voor de maximum stikstofleverantie nog beperkend is.

Door het inpassen van de opbrengstcijfers bij verschillende stikstofgiften en grondwaterstanden in de curven van opbrengst als functie van de totale hoeveelheid beschikbare stikstof berekent VAN HOORN voor graan, dat de grond per ha een hoeveelheid stikstof levert van:

150 kg bij een grondwaterstand van 1,5 m - mv
120 kg " " " " 0,9 "
55 kg " " " " 0,4 "

Een dergelijke berekening van de stikstofleverantie uit de opbrengsten van karwij, koolzaad, suikerbiet en aardappel geeft dezelfde resultaten als de berekening uitgevoerd voor graan.

Uit verwerking van latere gegevens vindt VISSER, dat bij een grondwaterstand van 0,60 m - mv, per jaar 30 kg N/ha minder stikstof door de grond wordt geleverd dan bij een grondwaterstand van 1,50 m - m.v.

De afname van de hoeveelheid beschikbare stikstof wordt verklaard door denitrificatie onder anaerobe omstandigheden, vertraagde stikstof mineralisatie en vertraagde stikstofbinding uit de lucht door microben.

Bij alle berekeningen is aangenomen, dat de stikstof alleen invloed heeft als stikstofvoeding van de plant, maar dat het de reactie van het gewas op slechte luchthuishouding niet beïnvloedt.

Uit veldproeven op een zware zavel in de Noordoostpolder vindt SIEBEN (1964 I en 1964 II) dat de hoeveelheid nitraat die in de laag van 0 - 60 cm wordt gevormd sterk is gecorreleerd met het luchtvolume van de grond; dit wordt op deze zware zavel weer sterk beïnvloed door de ontwateringstoestand in het winterhalfjaar.

In onbegroeide grond met in de laag van 0 - 16 cm 20 vol % lucht, is in de grondlaag van 0 - 60 cm van maart tot juni de hoeveelheid nitraat stikstof per ha 35 kg toegenomen (van ± 10 kg in maart tot 45 kg in juni);in grond met een luchtvolume van 7 vol % bedraagt deze toename 15 kg (van 5 kg in maart tot 20 kg in juni). SIEBEN schrijft dit verschil vooral toe aan de vertraagde stikstofmineralisatie door onvoldoende aeratie.

VI APPARATEN GEBRUIKT BIJ HET AERATIE ONDERZOEK

VI A De O_2 diffusiesnelheid in de grond naar een electrode, als maat voor de mogelijke zuurstoftoevoer naar plantenwortels

LEMON en ERICKSON (1952) gebruiken als eersten de diffusiesnelheid van O_2 naar een onder spanning staande electrode als karakterisering van de O_2 toevoermogelijkheid naar de wortel. Deze " O_2 diffusiesnelheid" (afgekort ODS) is nadien door meerdere onderzoekers gebruikt als maat voor de aeratietoestand van de bodem.

1. Principe

Op een in de grond gestoken electrode wordt een negatieve spanning gezet van ongeveer 0,8 volt, daardoor wordt alle O_2 aan het oppervlak der electrode gereduceerd. Daar bij gebruikte spanning alleen de O_2 wordt gereduceerd, is de stroomsterkte tussen grond en electrode een maat voor de toevoersnelheid van O_2 naar het electrode oppervlak. De stroomsterkte kan uitgedrukt worden in grammol. O_2 per tijdseenheid

volgens de formule:

$$fO_2 = \frac{I}{n\,FA}$$

fO_2 = grammol. O_2 gereduceerd per cm^2 per sec.
I = stroomsterkte, Ampère
A = opp. electrode, cm^2
F = Faraday = 96 500, conlombs
n = aantal electronen nodig voor reductie van een molecuul O_2 (=4).

De zuurstofdiffusiesnelheid uitgedrukt in $g.O_2/cm^2$ min (ODS) geeft:

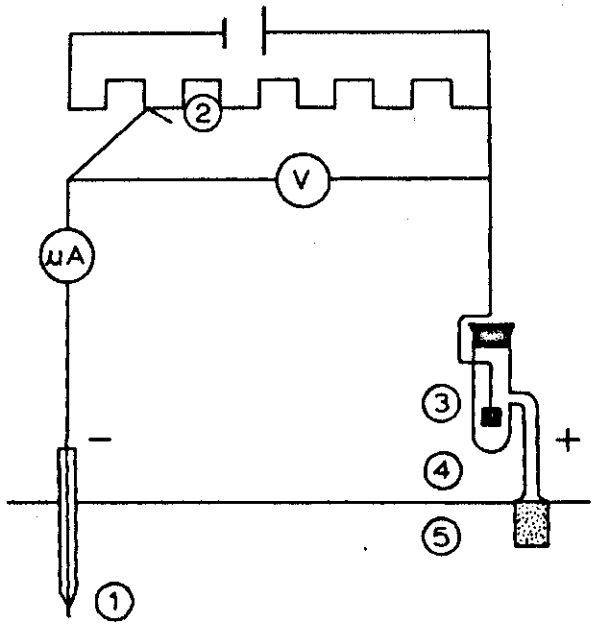
$$ODS = \frac{0{,}5\,i}{A}\ 10^{-8}\ g\ O_2\ /\ cm^2\ min.$$

i = stroomsterkte in µA.

chemische reactie: De zuurstof-reductie verloopt volgens:

$$O_2 + 2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2O_2 + 2OH^-$$
$$H_2O_2 + 2e^- \longrightarrow 2OH^-$$
$$+$$
$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

fig 12

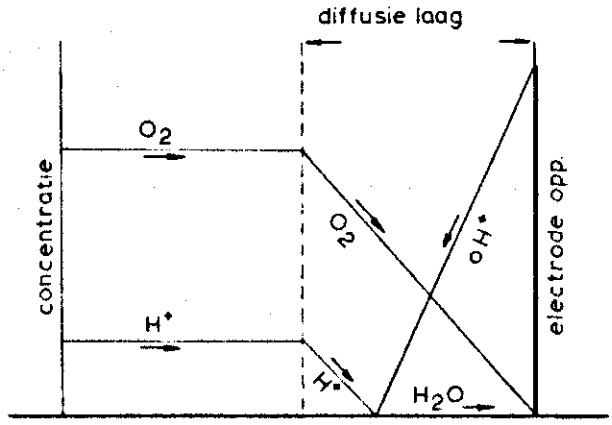


Schema zuurstofdiffusiemeting met electroden

① pt electroden ② potentiometer

③ anode ④ k cl brug ⑤ poreuze steen

fig 13



Schema diffusiestroming rond de kathode bij reduktie van O_2 (naar Odén 1962)

in extreem zuur milieu zou de reactie mogelijk zijn:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2\,H_2O$$

(KOLTHOFF en LINGANEN, 1946; LEMON en ERICKSON, 1955). Volgens ODEN (1962), komt de eerstgenoemde reactie voor tussen pH 4.0 en pH 10.75. Voor het transport van de verschillende bij deze reactie betrokken ionen en moleculen geeft hij een schema (zie fig. 13).

Bij meting in vloeistoffen blijkt de stroomsterkte tussen een spanning van 0,4 en 0,95 volt onafhankelijk van de spanning. Ook de pH van de oplossing tussen waarden van pH 3,55 en 11 heeft geen invloed op de stroomsterkte (ODEN, 1962).

Bij metingen in bodem en bodemsuspensies blijkt het spanningstraject waarin de stroomsterkte onafhankelijk is van het voltage minder sterk aanwezig (LEMON en ERICKSON, 1955; DONALDSON, 1958; verslag ir. practicum landbouwscheikunde A. BREEUWSMA, 1962).
Wordt de stroomsterkte gemeten bij een vaste spanning van 0,8 volt, dan blijkt er in bodemsuspensies wel een rechtlijnig verband te bestaan tussen stroomsterkte en O_2 concentratie. Bij 0 vol % O_2 blijft er een rest-stroom over van circa 0,5 µA, dit is een ODS van 4×10^{-8} g O_2 / cm^2 min.; dit is zo weinig dat aangenomen kan worden dat ook in bodemsuspensies alleen de O_2 toevoersnelheid bepalend is voor de stroomsterkte (LEMON en ERICKSON, 1955). Bij hogere spanningen dan circa 0,95 volt wordt de H^+ gereduceerd tot H_2, waardoor de stroomsterkte bij een spanning hoger dan 0,95 volt onafhankelijk wordt van de O_2 toevoersnelheid.

2. Instrument (zie figuur 12)

Tussen een kathode welke in de grond wordt gestoken en een anode welke via een KCl brug weer met de grond in contact staat, wordt de gewenste spanning aangebracht, met behulp van een regelbare weerstand en een spanningsbron. De stroomsterkte in de kring wordt gemeten met een micro ampère meter, de spanning met een voltmeter. Een dergelijke opstelling wordt ook gebruikt voor de meting van zuurstofconcentratie in vloeistoffen (ODEN, 1962), dierlijk weefsel (DONALDSON, 1958 pg 577) en in gassen (RENNERFELD, 1962).

Als kathode wordt door LEMON en ERICKSON en de meeste Amerikaanse onderzoekers een platina staafje gebruikt van 4 mm lang en 0,5 mm dik. Een nadeel van deze kathode is de geringe sterkte.WIERSUM (1960) gebruikt een om een punt van isolerend materiaal gebogen platina staafje, het oppervlak hiervan is echter moeilijk te bepalen en bovendien blijkt de werkzame oppervlakte in stuggere grond kleiner dan in vloeistof en plastische grond.

Een constructie welke dit nadeel niet heeft is een klein plaatje op een isolerende insteekpunt (mondelinge mededeling ir. A.R.P. JANSE). Waarschijnlijk zijn de gemeten waarden voor ODS bij de ronde en platte electroden niet gelijk, beide vormen zullen dus door meting moeten worden vergeleken. Voor de kathode kunnen ook andere edele metalen worden gebruikt, zoals goud en goudamalgaan (TÖDT, 1955) en kwik. Dit laatste wordt gebruikt voor O_2 meting in vloeistof waar een druppelende kwikelectrode als kathode dient (KOLTHOFF en LINGANEN, 1946; SCOTT en EVANS, 1955 - II).

Voor de anode gebruiken o.a. LEMON en ERICKSON (1952) en WIERSUM(1960), een calomel electrode. Er wordt echter ook veel een Ag-electrode in verzadigd KCl gebruikt (ODEN, 1962; RENNERFELD, 1962).

Als KCl brug wordt een met verzadigd KCl gevulde slang gebruikt, het contact met de grond wordt gemaakt via een poreuze steen aan het einde van de slang. Er dient wel voor gezorgd te worden dat de weerstand in de steen niet te hoog wordt, daar anders een te lage ODS wordt bepaald. Tevens moet gelet worden op goed contact tussen poreuze steen en bodem.

Bepaling van de O_2 concentratie zowel in gassen als in vloeistoffen is mogelijk met een opstelling waarbij kathode, KCl brug en anode in één zijn gebouwd en overtrokken met een voor O_2 doorlatend membraan (RENNERSFELD, 1962). Op dit principe berust ook de door BECKMAN in de handel gebrachteO_2 analysator.

3. Opmerkingen

a) De zuurstofdiffusie naar de kathode is een niet stationaire stroming, na 3 à 5 minuten vanaf het inschakelen van de spanning daalt de stroomsterkte echter weinig meer met de tijd. Gemiddeld is de stroomsterkte na 3 minuten circa 10% hoger dan de stroomsterkte na 5 minuten (WIERSUM, 1960).

b) Vochtgehalte grond: De zuurstofdiffusiemeting is alleen betrouwbaar in grond met een vochtgehalte van meer dan 30 vol % H_2O. In drogere grond loopt de gemeten stroomsterkte terug, waarschijnlijk door onvoldoende contact tussen electrode en grond, of doordat de gevormde OH^- niet snel genoeg kan worden afgevoerd (LEMON en KRISTENSEN, 1960; KRISTENSEN en LEMON, 1964).

c) Het werkzaam oppervlak der electroden moet bekend zijn. Onderlinge vergelijking van het oppervlak der electroden kan zeer goed geschieden door vergelijkende diffusie-meting in bewegend water.

d) Bij langdurig verblijf van de kathode in de grond loopt de gemeten ODS waarde zeer onregelmatig terug. Voor iedere meting moet de kathode opnieuw worden ingestoken.

e) Per graad Celsius temperatuurstijging stijgt de gemeten ODS waarde ongeveer 3 % (TÖDT, 1955).

f) Spreiding van de enkele meting: deze bedraagt in water enkele procenten. Bij meting in de grond wordt de spreiding vooral in de niet verzadigde grond groot (± 30 %). Het verdient aanbeveling de meting in de grond in 3-voud uit te voeren.

g) Doordat de gemeten ODS niet onafhankelijk is van de dikte en vorm der kathode, spanning en duur dat de kathode in de bodem onder spanning heeft gestaan (zie a), zijn . ODS waarden welke zijn bepaald met een iets afwijkende kathode of meetmethodiek niet zonder meer te vergelijken met de volgens de methode van LEMON en ERICKSON bepaalde ODS.
Is het nodig om andere electroden te gebruiken, dan zullen deze eerst geijkt moeten worden met ODS meting volgens de methode van LEMON en ERICKSON, om zodoende vergelijkbare ODS waarden te meten.

4. Betekenis gemeten zuurstofdiffusiesnelheid voor de plantengroei

a) empirisch

Vooral door amerikaanse onderzoekers is onderzoek verricht naar het verband tussen de groei van gewassen en de zuurstofdiffusiesnelheid naar de platina kathode volgens LEMON (ODS). Uit het meeste onderzoek komt dat bij een ODS van minder dan 20 10^{-8} g O_2 / cm^2 min de groei stopt; bij ODS tussen 20 en 40 à 100 10^{-8} g O_2 / cm^2 min is de zuurstoftoevoer nog bepalend voor de groei. ERICKSON en VAN DOREN (1960), vinden dat de groei van aardappels stopt wanneer de ODS lager wordt dan 24 10^{-8} (ODS steeds gegeven in g O_2 / cm^2 min); beperkend voor de groei is: voor aardappel ODS < 61 10^{-8}, voor kieming suikerbiet < 42 10^{-8} en voor groei tomaat < 44 10^{-8}.
LETEY e.a. (1962) vinden dat bij ODS < 20 10^{-8} bij 13° C zonnebloem sterft, een ODS < 40 10^{-8} zou limiterend zijn voor de groei. CLINE en ERICKSON (1959) vinden dat een ODS van 70 à 100 10^{-8} de groei van erwt nog beperkt, de produktie is 10% van het normaal bij ODS = 15 g 10^{-8}. Voor een maximale kieming van tarwe is een ODS nodig van 75 à 100 10^{-8} (HANKS en THORP, 1956).

Bij hogere temperatuur wordt een hogere ODS beperkend voor de groei. Zo is bijvoorbeeld zonnebloem bij 13° C een ODS < 25 10^{-8} beperkend voor de wortelgroei en bij 23° C een ODS van < 40 10^{-8}. De ODS waarbij de groei stopt wordt weinig door de temperatuur beïnvloed.

Opvallend is dat vooral de luchttemperatuur grote invloed heeft op de hoogte van de beperkende ODS voor wortelgroei: (LETEY, e.a. 1962).

Ook voor micro-biologische processen schijnt een ODS van 20 10^{-8} van belangrijke waarde. BRAND, WALCOTT en ERICKSON (1964), vinden dat vanaf een ODS van 20 10^{-8} en lager, denitrificatie plaats heeft.

Afwijkende gegevens: Enkele onderzoekers meten systematisch een lagere ODS. WILLIAMSON (1964) vindt maximale opbrengst bij een ODS van 15 10^{-8}. Zijn maximaal gemeten ODS bedraagt 35 10^{-8} voor zeer goed doorluchte grond. Deze lagere ODS waarden zijn waarschijnlijk te wijten aan het gebruik van dikkere electroden (1 mm) en een lagere spanning (0,7 volt).
BERTRAND en KOHNKE (1957) meten maximale waarden van 28 10^{-8}; hun lagere waarden zijn waarschijnlijk te wijten aan het feit dat de kathoden gedurende de hele proef in de grond bleven.

b) <u>theoretische interpretatie</u>

Beschouwt men zowel de wortel als de platina kathode als een cylinder waarheen stationair zuurstof diffundeert door de omgevende laag water of bodem, dan geldt voor de totale O_2 toevoersnelheid $F.O_2$

formule 1

$$F_{O_2} = 2 D_e \frac{L (C_r - C_p)}{\ln R/r_e} \quad g / sec.$$

(voor betekenis symbolen zie hoofdst. II D 1)

Omgerekend per cm^2 oppervlak van de electrode per minuut (dus ODS) waarbij wordt aangenomen dat de O_2 concentratie aan het electrode oppervlak, $C_r = 0$. wordt de formule

formule 2

$$ODS = \frac{D_e C_p}{60 R \ln \frac{r_e}{R}}$$

Nemen we een vaste waarde aan voor D_e en C_p dan kan de ODS worden geinterpreteerd als de dikte $(r_e - R)$ van de grond + waterfilm waardoor de O_2 diffusie plaats heeft.

Deze waarde wordt door KRISTENSEN en LEMON (1964) de "apparent liquid path way" genoemd.

Nemen we aan dat bij een bepaalde zuurstofverbruik (q) van een wortel de diffusieweerstand in en buiten de wortel zo groot is, dat in het wortelcentrum de O_2 concentratie 0 wordt, dan is het punt bereikt waar de zuurstoftoevoer bepalend gaat worden voor de levensverrichtingen van de plant.

Voegen we formule 1 en 3 (hoofdst. II D 1) samen, dan geldt:

formule 3

$$\ln R/r_e = D_e/2D_i - 2 D_e C_p/qR^2$$ (zie voor symbolen hoofdst. II D 1)

Bij gegeven D_i, D_e en q en R en C_p is uit formule 3 de waarde $(r_e - R)$ te berekenen welke voor de plant limiterend is, dit wordt de zogenaamde "critical diffusion path length" genoemd.

Vergelijking van de uit de ODS berekende waarde van$(r_e - R)$ en de uit bovenstaande formule berekende waarde opent de mogelijkheid van een interpretatie van de gemeten ODS.

KRISTENSEN en LEMON (1964) geven voor formule 2 en 3 enige grafieken. Om volgens bovenstaande methode te kunnen werken, zijn vooral gegevens nodig omtrent het zuurstofverbruik van de wortels (q) en de diffusiecoëfficiënt in de wortel D_i.
Afwijkingen in de schatting van D_e en C_p worden grotendeels gecompenseerd via de $(r_e - R)$ waarden die met formule 2 uit de ODS wordt berekend.

VI B

Meting gasdiffusie-coëfficient in grond

De diffusie-coëfficient van een bepaald gas in grond (Dg) wordt meestal uitgedrukt als deel van de diffusie-coëfficient in lucht (Dl) dus als: $Dg_{/Dl}$.

1) Meting diffusie-coëfficient aan grondmonsters

We kunnen de methoden scheiden in meting van stationaire en niet-stationaire diffusie stroming.

Stationaire diffusie

In een grondmonster wordt van een gas een constante concentratie gradient gehandhaafd. De diffusie-coëfficient kan worden berekend met de 1e wet van FICK.

Formule 1 $$dq_{/dt} = - A D \frac{dc}{dx}$$

q = hoeveelheid gas (mg)
t = tijd (sec)
A = diffusie-oppervlak (cm^2)
D = diffusiecoëfficient (cm^2 / sec)
c = concentratie mg/cm^3
x = diffusieweg (cm).

q wordt vaak bepaald in mg en c in de vorm van partiële gasdruk p, c omgerekend in p geeft $c = p/\beta \cdot \beta$ = omrekeningsfactor (mm Hg cm^3/mg^{-1}).
Formule 1 wordt dan:

formule 2 $$\frac{dq}{dt} = \frac{-A\,D\,dp}{\beta\,dx}$$

Bij de bepaling van de diffusie-coëfficient wordt gemeten:

1. De hoeveelheid gas, dq, die per tijdseenheid door het monster diffundeert.
2. De partiële gasdruk in twee punten ter weerszijde van het monster, het drukverschil tussen deze twee punten = Δp
3. De lengte Δx van de weg waarlangs het gastransport door diffusie plaats heeft, Δx is de som van de diffusie-weg in het monster, L_m, en de diffusieweg buiten het monster, L_1. L_m is nauwkeurig te meten, L_1 kan slechts bij benadering worden bepaald.

Formule 2 kan voor dit geval geschreven worden als

formule 2a $$dq/dt = \frac{A\,D\,\Delta\,p}{\beta \Delta x}$$

De totale diffusieweerstand = $\frac{\Delta x}{A\,D}$ deze is de som van de diffusieweerstand in het monster: $\frac{L_m}{A_m\,Dg}$
en de diffusieweerstand buiten het monster $\frac{L_1}{A_1\,D_1}$
(ondervoegsel m = in monsterring 1 = lucht g = grond)
Deze diffusieweerstanden ingevoerd in formule 2a geeft

formule 3 $$dq/dt = \frac{\Delta p}{\beta \left(\frac{L_1}{A_1\,D_1} + \frac{L_m}{A_m\,Dg}\right)}$$

PENMAN (1940), bepaalt de diffusie-coëfficient in droge materialen. Onder een ring (5,3 cm h = 2,64 cm) gevuld met het te onderzoeken materiaal wordt een bakje met een vluchtige vloeistof (zwavelkoolstof of aceton) geschroefd. Onder het monster heerst constant de dampspanning van de vloeistof, boven het monster is de partiële dampdruk constant nul. In iets andere opstelling wordt onder het monster een constante CO_2 druk gehandhaafd, dq wordt bepaald door weging of door bepaling van de door het monster gediffundeerde hoeveelheid CO_2. De stroming is stationair zodra dq/dt constant blijft.

PENMAN berekent dat hij door het verwaarlozen van de diffusieweerstand buiten het monster, het quotient: Dg/Dl minder dan 0,03 te laag berekent wanneer Dg/Dl kleiner is dan 0,3. Wordt Dl op deze manier bepaald dan zou de gemeten Dl echter 71 % zijn van de werkelijke Dl.

Uit zijn metingen vindt PENMAN voor droge grond een lineair verband tussen het luchtvolume, S en Dg/Dl: $Dg/Dl = 0,66\ S$.

Volgens dezelfde methode werken VAN BAVEL (1952) met ethyl alcohol; DOMBY, HELMUT en KOHNKE (1956) met ethyl alcohol en zwavelkoolstof. Allen vinden voor droge grond dezelfde verhouding tussen S en Dg/Dl als PENMAN.

Voor diffusiemeting in vochtige gronden is een stationaire methode o.a. door CALL (1957) gebruikt. Als diffusiegas gebruikt hij ethyleen-dibromide. In zeer zorgvuldig uitgevoerde diffusiemetingen bij een luchtgehalte S variërend van 0,14 tot 0,39 vindt hij voor het verband tussen luchtgehalte en gasdiffusie:

$$Dg_{/Dl} = 0,66\ (\ S - 0,1\ )$$

JENSEN en KIRKHAM (1963) gebruiken ^{18}O voor diffusiemeting in grote grondmonsters, waarin ook planten kunnen groeien; de bepalingen zijn uitgevoerd bij een luchtgehalte varierend van 0,065 tot 0,127.

Uit het feit dat bij luchtgehalten beneden 0,10 nog gasdiffusie door de grond wordt gemeten (zie ook CURRIE, 1961), moet worden geconcludeerd dat het empirisch bepaalde verband tussen Dg/Dl en S (VAN DUIN, 1956; CALL, 1957) alleen geldig is voor het traject waarin de diffusiemetingen zijn uitgevoerd.

Het gebruik van CO_2 als diffusiegas in vochtige grond heeft de moeilijkheid, dat de grond zelf ook CO_2 produceert (onderzoek SMITH en BROWN, genoemd door PENMAN, 1940).

niet_stationaire_diffusie

TAYLOR (1949) gebruikt een opstelling waar een monsterring met grond (maten 4,9 cm, h = 3,55 cm) geschoven wordt op een met N_2 gevulde cylinder. Uit de toename van de O_2 druk in de cylinder kan de diffusiecoëfficient voor O_2 in het monster worden berekend. Is het gasvolume in het grondmonster zo klein, dat de hoeveelheid gas in het grondmonster nodig voor een eventuele concentratieverandering in het monster te verwaarlozen is ten opzichte van de hoeveelheid door het monster gediffundeerd gas, (q), dan kan de diffusiestroming beschreven worden met de 1e wet van FICK (formule 1).

Verder geldt dat de gemiddelde partiële gasdruk van O_2 in de cylinder (p) een functie is van de hoeveelheid door het monster gediffundeerde O_2 (q) en het volume van de cylinder (V) volgens de formule:

$$dq/dt = \frac{dp\ V}{dt\ \beta}$$

Dit in formule 2a ingevuld en voor Δp geschreven:

$\Delta p = p_o - p$ (p_o = p.O_2 buiten de cylinder)

geeft:

formule 3a $$\frac{dp}{dt} = \frac{A\ D\ (p_o - p)}{V\ \Delta x}$$

Deze formule geïntergreerd voor de grensvoorwaarden

p_o = constant $\quad t = 0 \quad p = 0$

$\quad t = t \quad p = p_t$

geeft:

formule 4 $$\log \frac{p_o}{p_o - p_t} = \frac{0{,}4343\ A\ D.t}{V.\ \Delta x}$$

Uit formule 4 blijkt, dat $\log \frac{p_o}{p_o - p_t}$ ingezet tegen t een rechte is waarvan de helling recht evenredig is met D.

TAYLOR, verwaarloost de diffusieweerstand buiten het monster en neemt aan dat de gemeten D = Dg. Dg/Dl wordt berekend als de verhouding van de helling der rechte lijnen bij meting met grond en met lucht in de monsterring. Door verwaarlozing van de diffusieweerstand buiten het monster wordt Dg/Dl te hoog bepaald.

Uit formule 3 is af te leiden dat voor de gemeten Dg/Dl geldt:

formule 5 $$(Dg/Dl)\ \text{gemeten} = \frac{\frac{L_l}{A_l\ D_l} + \frac{L_m}{A_m\ D_l}}{\frac{L_l}{A_l\ D_l} + \frac{L_m}{A_m\ D_g}}.$$

De diffusieweerstand buiten de monsterring gebruikt door TAYLOR is slechts te schatten.

Nemen we aan dat $\frac{L_l}{A_l} = 0{,}05\ cm^{-1}$ (dezelfde waarde die Penman opgeeft), dan is de weerstand niet te hoog geschat.

$\frac{L_m}{A_m} = 0{,}190\ cm^{-1}$. Uitgerekend met formule 5 geeft, dat de gemeten Dg/Dl waarden 0,025, 0,04 en 0,06 te hoog zijn bij werkelijke Dg/Dl waarden van respectievelijk 0,1, 0,2 en 0,33.

CURRIE, 1960 geeft voor een overeenkomstige opstelling de exacte oplossing van de diffusie stroming volgens de 2e wet van FICK:

formule 6 $$\frac{dc}{dt} = \frac{d\ D\ dc}{S\ dx^2}$$

(S = luchtgehalte grondmonster)

Er wordt een kleine cylinder met H_2 boven het monster geschoven, de H_2 diffundeert in en door het monster. De waterstofconcentratie wordt gemeten met een in de H_2 cylinder gemonteerde katharometer (een elektrisch verwarmd draadje waarvan de weerstand wordt gemeten, de temperatuur van de draad wordt beïnvloed door het warmtegeleidingsvermogen van het omringende gas, welke sterk afhankelijk is van de gassamenstelling) (De weerstand is afhankelijk van de temperatuur).

Bij de berekening wordt aangenomen, dat de diffusieweerstand buiten het monster te verwaarlozen is. Uit testmetingen blijkt, dat deze aanname bij deze opstelling verantwoord is. $\frac{dc}{dt}$ van de H_2 is afhankelijk van de tijd, afmetingen van het apparaat, Dg en het luchtgehalte S. Na verloop van tijd wordt de lijn lC tegen t een rechte met de hellingstangens $-\frac{Dg\ \alpha^2}{S}$

α = een functie van S en de afmetingen van apparaat en monster. Metingen van al eerder bekende diffusiecoëfficiënten tonen aan, dat deze bepalingsmethodiek betrouwbaar is.

Van de gasdiffusie door droge materialen, wordt gevonden dat het verband tussen het luchtgehalte S en de gasdiffusie, beschreven kan worden met de formule

$$Dg/Dl = \gamma S\mu$$

γ = 0,8 à 1,0

μ = 1,35 voor zand en glasparels, 1,65 voor grond bestaande uit bodemagregaten
2,2 voor kaolien poeder.

Het laagste luchtgehalte waarbij de gasdiffusie is bepaald bedraagt 0,18 (in een mengsel van glasparels van verschillende grootte).

Het verband tussen luchtgehalte en gasdiffusie bij vochtige materialen is niet over het gehele traject met één formule te beschrijven (CURRIE, 1961). Bestaat het materiaal uit niet poreuze deeltjes (zand, gesinterd glas, glasparels en carborundum) dan geldt voor S groter dan 0,18

$$Dg/Dl = \eta S^{\sigma}$$

η is een functie van DT/Dl en S_T (D_T en S_T zijn diffusiecoëfficiënten respectievelijk luchtgehalte van het droge materiaal)

σ = 4 voor alle onderzochte materialen.

Voor zand en gesinterd glas is de gasdiffusie bepaald tot een luchtgehalte van 0,06 (ook bij deze lage luchtgehalten wordt nog enige gasdiffusie gemeten). De gasdiffusie bij luchtgehalten lager dan 0,18 is hoger dan de gasdiffusie welke uitgaande van de formule $Dg/Dl = \eta S^{\sigma}$ wordt berekend.

Voor gasdiffusie door materiaal bestaande uit poreuze deeltjes (puimsteenkorrels en bodemagregaten) geldt dezelfde formule als voor zand en dergelijke zolang alle poriën in de agregaten gevuld zijn met water. Een toename van het luchtvolume als gevolg van wateronttrekking aan de agregaten, doet de gasdiffusie minder stijgen dan eenzelfde luchtvolume toename door het onttrekken van water aan de poriën tussen de agregaten.

Opmerking: Het laagste luchtvolume van poreus materiaal waarbij nog diffusiemetingen zijn uitgevoerd bedraagt 0,18.

De pF curve van bij deze metingen gebruikte materialen zijn alle van het zogenaamde 'stoeltjes' model; wat erop wijst dat in de onderzochte materialen veel uniforme poriën aanwezig zijn.

2. Meting diffusiecoëfficiënt in het veld

Hiervoor bestaan verschillende methoden.

BLAKE en PAGE (1948), plaatsen in een boorgat van 30 cm diep een korfje met een poreus potje gevuld met zwavelkoolstof. Daarna wordt het boorgat gesloten. De verdampende CS_2 diffundeert in de grond. Het blijkt dat na enkele minuten de gewichtsafname per tijdseenheid (dq/dt) van het korfje met CS_2 constant wordt, zodat de diffusie van zwavelkoolstof rond het boorgat als een stationaire stroming kan worden beschouwd. dq/dt in de bodem wordt uitgedrukt als dq/dt in lucht bij gelijke temperatuur, deze verhouding is ongeveer gelijk aan

Dg/Dl. BLAKE en PAGE geven de verhouding Dg/Dl = 0,71 S voor een grond met sterk blokkige structuur en Dg/Dl = 1,35 S - 0,13 voor grond met sterk kruimelige structuur. De spreiding van de waarnemingen is aanzienlijk.

RANEY (1949 en 1950) ontwikkelt een methode waarbij een met N_2 gevulde sonde in de grond wordt gestoken en daarna geopend. Het volume van het systeem wat de grootste diffusieweerstand heeft (de ingangen aan de spits en de grond vlak daar omheen) is klein, zodat de diffusie met formule 4 beschreven kan worden.

Dg/Dl wordt evenals bij TAYLOR (1949) uitgedrukt als de verhouding der hellingstangens en van de lijn log $\frac{p_o}{p_o - p_t}$ tegen t bij meting in bodem en meting in lucht.

Bij meting in bodem gaan de rechten log $\frac{p}{p_o - p_t}$ tegen t praktisch door de oorsprong; de aannamen welke bij de afleiding van formule 4 zijn gedaan, zijn voor dit geval dus een aanvaardbare benadering van de werkelijkheid.

Bij Dg/Dl bepaling in zeer dichte grond wordt bij een luchtvolume van 2 à 5% Dg/Dl = 0,1 bepaald (LEMON, 1952).

Het blijkt dat de ruimte tussen sondenafsluiting en sondenspits nog een behoorlijk volume heeft. Ook bij volkomen dichte grond wordt dus nog O_2 in de sonde gemeten. De gepubliceerde waarnemingen zijn hierop kennelijk niet gecorrigeerd.

Ook bij de doorlatende gronden is Dg/Dl opvallend hoog. (Dg/Dl = 0,50 bij S = 0,3; LEMON, 1952).

Dit is te verklaren uit de diffusieweerstand in de sondespits zelf. Berekend voor een klein model sonde van RANEY, is de diffusieweg in de sonde $(\frac{le}{Al}) = 7,1\ cm^{-1}$; de diffusieweg buiten de sonde $(\frac{lm}{Am}) = 0,5\ cm^{-1}$.

Vullen we dit in formule 5 in voor Dg/Dl = 0,20, dan zou met de sonde van RANEY worden gemeten Dg/Dl = 0,79 (RANEY, 1950, meet deze waarde bij S = 0,33).

Door de invloed van de vorm van de sonde op de Dg/Dl meting zijn de door verschillende onderzoekers (LEMON, 1952; RICHARD, 1959) gepubliceerde Dg/Dl waarden volgens RANEY, niet te vergelijken, daar het niet zeker is dat er bij de metingen gelijke sonden zijn gebruikt.

De gemeten Dg/Dl waarden kunnen worden gecorrigeerd voor loze ruimte in de spits en diffusieweerstand in de sonde. Toch zal dit soort meting in het veld waarschijnlijk weinig betrouwbaar zijn, doordat tijdens het inbrengen van de sonde de grond bij het inbrengen van de sonde wordt samengedrukt.

VAN BAVEL (1954) geeft de berekening voor de diffusiebepaling met een van onder open buis, welke in een boorgat wordt geplaatst en daarna gespoeld met N_2. Voor de berekening van deze niet-stationaire diffusie worden de nodige grafieken gegeven.

Evenals bij RANEY wordt aangenomen dat de O_2 concentratie in de bodemlucht weinig afwijkt van die in de buitenlucht. Diffusiecoëfficiënten bepaald volgens deze techniek werden niet gevonden.

VI C

Bepaling luchtvolume van de grond

Het luchtvolume kan bepaald worden:

1e door directe meting met behulp van een porosimeter

2e als verschil van het totale bodemvolume en de som van het volume der vaste bodemdelen en het bodemwater. Het volume van water en vaste delen wordt meest gravimetrisch bepaald.

1e De luchtvolumebepaling met de porosimeter berust daarop dat voor een constante hoeveelheid gas bij constante temperatuur geldt: P.V. = constant. Van de porosimeter zijn vele uitvoeringen bekend (zie LOEBELL, 1955). Het principe van de porosimeter is dat een grondmonster in een gesloten ruimte wordt geplaatst, daarna wordt of de druk of het volume veranderd; de daarbij voorkomende volume- respectievelijk drukveranderingen, is afhankelijk van dit luchtvolume in het monster (VISSER, 1937; LOEBELL, 1955; RUSSELL, 1949). Een andere mogelijkheid is dat de ruimte met het grondmonster in verbinding wordt gesteld met een ruimte met bekend volume en druk. Het luchtvolume in het monster beïnvloedt de uiteindelijke druk in de twee verbonden vaten.

De drukveranderingen kunnen zowel positief (overdruk porosimeter) als negatief zijn (onderdruk porosimeter).

De bepaling met een porosimeter is zeer bruikbaar voor een snelle bepaling van het luchtvolume van vochtige monsters. De nauwkeurigheid is veelal ruimschoots voldoende $\pm$ 1 vol % lucht.

Volumebepaling in droge gronden is niet mogelijk door de gasadsorptie aan droge kleimineralen (SUNKEL, 1964; RUNKLES, SCOTT en NAKAYAMA, 1958).

Voor met water verzadigde grond met zeer weinig lucht vinden GUPTA en SWARTZENDRUBER (1964) dat het met een overdruk porosimeter bepaalde luchtvolume, kleiner is dan het gravimetrisch bepaalde luchtvolume.

De volumebepaling met de porosimeter kan gebruikt worden voor de soortelijkgewichtbepaling der vaste delen, wanneer het gewicht van water en vaste delen door weging wordt bepaald. Toch verdient het aanbeveling de bepalingsmethode met de porosimeter te ijken met een gravimetrische methode.

2e De betrouwbaarste en meest gebruikte methode is de gravimetrische methode. Deze bestaat uit weging van het vochtige en het bij 105° C gedroogde monster van bekend volume. Het volume der vaste delen wordt bepaald door soortelijkgewichtbepaling. De betrouwbaarste soortelijkgewichtbepaling is in dit geval die met de waterpycnometer (BOEKEL, 1961). Vooral de soortelijkgewichtbepaling is bewerkelijk, waardoor de gravimetrische methode meer tijd vraagt dan de bepaling met de porosimeter.

Soms kan echter een voldoende nauwkeurige schatting van het soortelijk gewicht worden gemaakt.

Opmerking

Voor de monstername van plastische grondmonsters zij nog opgemerkt, dat vooral door monstername met kleine monsterringen de grond wat samengedrukt kan worden (STAKMAN, 1964); hierdoor is het luchtvolume van het monster lager dan van de ongestoorde grond.

VI D Monstername gas uit de bodem

Om de bodemlucht te analyseren dienen gasmonsters uit de bodem te worden genomen. Hiervoor bestaan in principe twee methoden:

a) Het bodemgas wordt door middel van onderdruk opgezogen door een in de grond geplaatste sonde.
   Enige uitvoeringen hiervan zijn:
   1. Een vast in de grond geplaatst buisje met aan de onderzijde een verwijding (BOYNTON, 1938)
   2. Een sonde die voor iedere monstername opnieuw in de bodem wordt gestoken (PENNINGSFIELD, 1950; SCHUFFELEN, JANSE en WIERSEMA, 1954)
   3. Een kleine injectiespuit waarmee door een plastic wand van een monstername sleuf zeer kleine monsters worden genomen van ± 0,1 ml (HACK, 1956)

   Bij methoden 1 en 2 bedraagt de grootte van het monster ± 100 ml.

b) Door middel van diffusie wordt evenwicht bereikt tussen het gas in een monsterruimte en het gas in de bodem. Het gas uit de monsterruimte wordt daarna geanalyseerd.

Uitvoeringen hiervan zijn: Het apparaat volgens TAYLOR en ABRAHAMS (1953). Een monsternamebuisje (inhoud ± 15 ml) bovengronds staat door middel van een buis van 5 mm doorsnee in contact met de bodematmosfeer op de te bemonsteren diepte. ROBINSON (1957) werkt met een ingegraven monstername vat van ± 150 à 200 ml.

Een zeer elegante methode is die, welke gebruikt wordt door WILLEY en TANNER (1963), waarbij in de punt van een sonde in een kleine diffusieruimte tevens de O_2 analysator (een overdekte Pt electrode) is aangebracht.

In gronden met een hoog luchtgehalte kan, wanneer zorgvuldig wordt gewerkt, met alle genoemde methoden wel betrouwbare gasmonsters worden genomen. In gronden met een laag luchtgehalte, wordt de mogelijkheid dat het luchtmonster afwijkt van de lucht in de bodem groter. Bij het opzuigen van luchtmonsters stroomt vooral lucht uit de grotere luchtporiën toe; tevens bestaat de mogelijkheid dat door spleten of wormgangen lucht stroomt uit andere dan de bemonsterde lagen.

Bij een ingestoken sonde komt daar nog bij de mogelijkheid van luchtlekken door barstjes langs de sonde. Deze fouten resulteren meest in hogere O_2 en lagere CO_2 concentraties in het gasmonster dan in de bemonsterde laag.
Een vaste opstelling heeft het voordeel, dat betere voorzorgen genomen kunnen worden tegen lekken langs de sonde. De monstername van zeer kleine monsters lijkt zeer betrouwbaar, met deze methode wordt vooral in de dichtere gronden gemiddeld hogere CO_2 en lagere O_2 concentraties bepaald dan bij monstername van monsters van 50 à 100 cm^3. De strooiing van de enkele waarneming is bij de micromonstername groter dan bij de macromonstername.

Monstername door middel van diffusie geeft minder afwijkingen als gevolg van toestromende lucht door de grotere poriën. TAYLOR en ABRAHAMS meten in de door diffusie verkregen gasmonsters systematisch lagere O_2 concentraties dan in de opgezogen gasmonsters. De verschillen tussen de twee methoden zijn het grootst bij de lagere O_2 gehalten in de bodemlucht; is b.v. het O_2 gehalte in de door diffusie verkregen monsters 12 vol %, dan bevatten de opgezogen monsters 16 à 17 vol % O_2 (TAYLOR en ABRAHAMS). In metingen van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding werden geen verschillen gevonden.

De benodigde tijd voor het bereiken van het diffusie-evenwicht is afhankelijk van de afmetingen van het monsternameapparaat en de diffusiecoëfficient in de grond.
TAYLOR berekent dat bij een monsternamediepte van 30 cm bij $\frac{D\ grond}{D\ lucht} = 0{,}06$ en een O_2 gehalte in de bodemlucht van 10 vol %, in 12 uur voor 99,5 % evenwicht is bereikt.

In dichte gronden verdient het aanbeveling de monsternameruimte zo klein mogelijk te houden, zodat het diffusie-evenwicht snel wordt bereikt en de luchthuishouding van de grond weinig door de extra hoeveelheid lucht wordt beïnvloed. In dit opzicht is de monsternameruimte van 200 ml (ROBINSON) rijkelijk groot; de monsternameruimte van enkele cm^3 (WILLEY en TANNER) zeer gunstig.

Een bezwaar voor het gebruik van de diffusiemethode in gronden met een slechte aeratie is, dat de mogelijkheid bestaat, dat er geen diffusie-evenwicht wordt bereikt terwijl men bij de monstername daarvan niets merkt.

Worden monsters genomen volgens de methode van BOYNTON of PENNINGSFIELD, dan is het in de zeer dichte of met water verzadigde gronden niet mogelijk een luchtmonster te trekken. In met water verzadigde grond kan met opzuigen inplaats van een luchtmonster dan soms nog een watermonster worden genomen.

Voor eventueel transport van luchtmonsters kunnen zeer goed luchtdichte gecoate cellofaan zakjes voorzien van ventiel, worden gebruikt.

VI E

Bepaling O_2 en CO_2 concentraties

De bepalingsmethoden kan men scheiden in de chemische bepalingen van O_2 of CO_2 en de fysische bepalingen. Bij deze laatste methoden wordt een fysische grootheid, zoals bijvoorbeeld warmtegeleiding, optische dichtheid of paramagnetisme van het gasmengsel zo sterk door de concentratie van het te bepalen gas beïnvloed, dat deze grootheden als maat voor de gasconcentratie kunnen worden genomen. Genoemd zijn die methoden, welke waarschijnlijk bij het aeratie onderzoek te gebruiken zijn.

chemische bepalingen: Volumetische bepaling volgens ORSAT FISCHER:

Hierbij wordt de volume-afname gemeten wanneer de CO_2 wordt geabsorbeerd door KOH en de O_2 door pyrogallol. Van de in de handel zijnde apparaten is het meetbereik 0-21 vol % O_2 + CO_2, de nauwkeurigheid 0,2 vol %, monstergrootte 50 ml. Ook leverbaar is een apparaat met monstergrootte 10 ml en nauwkeurigheid 0,02 vol % (LLOYD gas-analyse-apparaat GALLENKAMP).

De analyse van een gasmonster duurt 6 à 7 minuten. Het voordeel van deze apparaten is dat zowel O_2 als CO_2 in één werkgang bepaald worden. Een volumetische bepalings-techniek voor micromonsters van 0,35 of 0,07 ml geven SCHOLANDER en EVANS (1947).

Colorimetrische bepaling: SCHUFFELEN, JANSE en WIERSEMA (1954) beschrijven de bepaling van het CO_2 gehalte door middel van het ontkleuren van phenolphtaleïne. Deze methode welke geschikt is voor bepaling in het veld heeft een nauwkeurigheid van 0,2 vol %, de vereiste gasmonstergrootte is 50 à 100 ml.

Titrimetrische bepaling: CO_2 zowel in vloeistof als in gas kan door titralie met KOH of $Ba(OH)_2$ worden bepaald. Vaak wordt de CO_2 in overmaat loog geabsorbeerd, daarna wordt het loog terug getitreerd. O_2 bepaling in vloeistof wordt vaak uitgevoerd door een jodometrische titratie volgens WINKLER. Deze vrij bewerkelijke titratie is bij afvalwater zuiveringsonderzoek een veel gebruikte bepaling. Deze methode kan als ijking worden gebruikt van fysische O_2 bepalingen.

Fysische bepalingen

CO_2 bepaling

Optische bepaling: CO_2 gas is optisch dichter dan N_2 en O_2. De optische dichtheid van N_2 en O_2 verschilt weinig. Hiervan wordt bij de "Riken gasanalysator" of interferometer gebruik gemaakt. De interferentie van een lichtbundel waarvan een deel een cuvet met het te bepalen gas is gepasseerd en het andere deel een cuvet met hetzelfde gas alleen zonder CO_2 is een maat voor de CO_2 concentratie.

Is het volume van O_2 + CO_2 kleiner dan 21 % dan wordt een iets te lage CO_2 concentratie bepaald; bij O_2 + CO_2 = 10 vol % bedraagt de fout 2,5 % van de totale CO_2 concentratie.

Er bestaat een type met een meetbereik van 0-10 vol % CO_2, nauwkeurigheid 0,05 vol % en één met een meetbereik van 0-3 vol % CO_2 nauwkeurigheid 0,02 vol % CO_2. Naar schatting is een gasmonster nodig van ± 50 ml.

Lichtabsorbtie:

CO_2 absorbeert een bepaalde golflengte infrarood licht. Hierop berust de CO_2 meting met de zogenaamde Ultra Rot Absorptions Schreiber (URAS).

Afhankelijk van de cuvetlengte waarin zich het monstergas bevindt, is het meetbereik 0-0,05 vol % CO_2 tot 0-100 vol % CO_2. Het is vooral geschikt voor doorstromende gasmonsters. Een voordeel van dit apparaat is de grote gevoeligheid en de mogelijkheid de waarneming te registreren. Het wordt vooral gebruikt voor meting van CO_2 produktie en assimilatie.

Warmtegeleiding:

De warmtegeleiding van CO_2 is lager dan van N_2 en O_2 welke in dit opzicht weinig verschillen. Hierop berust de zogenaamde katharometer. Deze bestaat uit een wheatstone-brug waarvan 2 en soms alle 4 weerstanden bestaan uit dunne platina draad. De platina draad wordt verwarmd door de electrische stroom. De afkoeling en daarmee de temperatuur van de draad wordt bepaald door de warmtegeleiding van het omringende gas. De weerstand van de draad is sterk temperatuurafhankelijk. Rond één of twee draden bevindt zich het monstergas, rond de anderen een referentiegas. De CO_2 concentratie ten opzichte van het referentiegas bepaalt de stroom in de brug. Uitvoeringen waarmee tot 0,01 vol % CO_2 nauwkeurig kan worden gemeten zijn mogelijk. Door de samenstelling van het referentiegas te wijzigen is het meettraject te kiezen, bijvoorbeeld van 10 - 13 vol % CO_2. De monstergrootte is ± 10 ml.
Apparatuur voor CO_2 bepaling bij fruitopslag wordt genoemd door VAN DER PLASSE en KARELSE, (964).

O_2 bepaling

O_2 is, in tegenstelling tot de meeste andere gassen, paramagnetisch. Het beïnvloedt daardoor sterk het magneetveld tussen twee magneetpolen. Daarop berust de o.a. door BECKMAN gefabriceerde O_2 meter. De torsie van een in een magneetveld gespannen kwartsdraad waarop een spiegeltje en een klein magneetje is gemonteerd, wordt bepaald door de O_2 concentratie.

Een eenvoudige draagbare uitvoering heeft een bereik van 0 - 25 vol % O_2 en een nauwkeurigheid van 0,5 vol %, de monstergrootte is ± 10 à 20 ml.

Laboratoriumuitvoeringen hebben een meetbereik van 0 - 100 % O_2 en een nauwkeurigheid van 0,02 vol %.

O_2 toevoer naar een electrode:

Voor meting van de O_2 druk zowel in vloeistof als in gas, levert o.a. BECKMAN een apparaat met een door een membraan overdekte electrode (zie hoofdst. VI A "beschrijving instrument"). Het meetbereik is 0 - 5, 0 - 25 en 0 - 100 vol % O_2, de nauwkeurigheid bedraagt ± 1 % van de schaal. De analyse vindt plaats aan de oppervlakte van een spits van ± ½ cm^2; een gasmonster van 1 ml is ruim voldoende; voor watermonsters is ± 10 ml nodig. Voor O_2 meting in vloeistof alleen zijn meerdere apparaten in de handel met een onbedekte electrode.

Voor de opgave van de nauwkeurigheid is meest de door de fabrikant genoemde waarde gebruikt, deze is waarschijnlijk alleen geldig onder gunstige omstandigheden.

Op het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding zijn voor gasanalyse de volgende apparaten:

1) Een ORSAT-Fischer apparaat; monstergrootte 50 ml; nauwkeurigheid 0,2 vol %.
2) Beckman O_2 analysator met overdekte electrode. Bruikbaar voor analyse van gasmonsters van ± 1 ml en van watermonsters van minstens 10 ml. Het apparaat is eventueel ook te gebruiken voor registratie O_2 concentratie direct in de grond, wanneer de sensor in een sonde wordt gemonteerd.
3) U.R.A.S.-apparaat meetbereik 0 - 0,2 vol % CO_2, zeer nauwkeurig, monstergrootte ?
4) Een katharometer. Waarschijnlijk gemaakt op natuurkunde; omtrent nauwkeurigheid ontbreken nog gegevens. Mogelijk 0,01 vol %, monstergrootte ca 10 ml.

Voor de bepaling van de O_2 en CO_2 concentraties in de bodemlucht lijkt een nauwkeurigheid van 0,2 vol % voldoende. Hiervoor is dus het Orsat-Fischer apparaat geschikt. Is het onmogelijk om 50 ml gasmonster te verkrijgen. dan kan de O_2 concentratie met de O_2 analysator worden bepaald; eventueel ook in watermonster. De CO_2 concentratie in kleinere luchtmonsters kan met de katharometer worden bepaald.

Voor de bepaling van de CO_2 produktie van gronden is de U.R.A.S. zeer geschikt. Voor de meting van de O_2 produktie staat niet zulke nauwkeurige apparatuur ter beschikking, voor wat onnauwkeuriger metingen is waarschijnlijk de O_2 analysator bruikbaar.

LITERATUURLIJST

ALBERDA, T., 1955 - De zuurstofvoorziening van plantenwortels
In : De plantenwortel in de landbouw
Uitg: Ned.Genootschap voor landbouwwetenschap: 98 - 106

ALEXANDER, M., 1961 - Introduction to soil microbiology
John Wiley New York

ALLISON, F.E., J.N. CARTER and L.D. STERLING, 1960 - The effect of partial pressure oxygen on denitrification in soil
Soil Sci.Soc. Amer.Proc. 24: 283 - 285

ARNON, D.J., 1937 - De Ammonium and nitrate nitrogen nutrition of barley at different seasons in relation to hydrogen-ion concentration, manganese, Copper and oxygen supply
Soil Sci. 44: 91 - 113

BAVEL, C.H.M. VAN, 1951 - A soil aeration theory based on diffusion.
Soil Sci. 72: 33 - 46

_____ 1952 - Gaseous diffusion and porosity of porous media
Soil Sci. 73: 91 - 104

_____ 1954 - Simple diffusion for measuring soil specific diffusion impedance and soil air composition
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 18: 229 - 239

BECK, T. und R. RÖSCHENTHALER, 1959 - Eine einfache Methode zur kolorimetrischen Bestimmung der Bodenatmung im Laboratoriumversuch
Z. Pflanz Ernähr Düng 87: 143 - 156

BECKMAN, H. und H.W. VON SCHARPENSEEL, 1964 - Kohlensaurentbindung in sterilisierte Böden
Z. Pflanz Ernähr 105: 102 - 112

BEHAN, M.J., 1963 - The effects of the composition of the root atmosphere upon water relationships of plants
Diss. Abstr. 24: 1355 - 1356

BERGMAN, W., 1954 - Wurzelwachstum und Ernteertrag
Z. Acker-U.PfBau 97: 337 - 368

_____ 1957 - Ueber die Beeinflussung der Wurzelbekaarung von Roggenkeimpflanzen durch verschiedene Aussenfaktoren
Z. Pflanz Ernähr 80: 218 - 224

BERGMAN, H.F., 1959 - Oxygen deficiency as a cause of disease in plants
Bot. Rev. 25: 418 - 485: 418 - 485

BERRY, L.J. and W.E. NORRIS, 1949 - Studies on onionrespiration
Biochim. Biophys. Acta 3: 593 - 614

BERTRAND, A.R. and H. KOHNKE, 1957 - Subsoil conditions and their effects on oxygen supply and growth of corn roots
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21: 135 - 141

BLACK, G.A., 1957 - Soil aeration
In: Soil-plant relationships
J Wiley & Co, London: 88 - 101

BLAKE, C.G. and J.B. PAGE, 1948 - Direct measurement of gaseous diffusion in soils
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 13: 37 - 42

BOEKEL, P., 1961 - De bepaling van het soortelijk gewicht van grond
Rapport IX (1961) Inst.voor Bodemvruchtbaarheid Groningen

BOYNTON, D. 1938 - A way sampling soil gases in dense subsoils and some of its advantages and limitations
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 3: 37 - 42

_____ 1940 - Soil atmosphere and the production of new rootlets by appletree root systems
Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 37: 19 - 26

_____ and O.C. COMPTON, 1943 - Effect of oxygen pressure in aerated nutrient solutions on production of new roots and on growth of roots and top of fruit trees
Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 42: 53 - 58

_____ 1944 - Normal changes in oxygen and carbondioxyde percentages in gas from the larger pores of three orchard subsoils
Soil Sci. 57: 107 - 117

_____ ; J. DE VILLIERS and W. REUTER, 1938 - Are there different critical oxygen concentrations for the different phases of root activity?
Science 88: 569 - 570

BRAND, G.H.; A.R. WALCOTT and A.E. ERICKSON, 1964 - Nitrogen transformations in soil as related to structure and oxygen diffusion rate
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28: 71 - 75

BREMNER, J.M. and K. SHAW, 1958 - Denitrification in soil
J. Agric. Sci. 51: 22 - 52

BROUWER, R., 1955 - De wateropname door de wortel
In: De plantenwortel in de landbouw. Uitg. Nederlands genootschap voor landbouwwetenschap: 79 - 89

BRYANT, A.E., 1934 - Comparison of anatomical and histological differences between roots of barley grown in aerated and non aerated culture solutions Plant Phys. 9: 389 - 391

BUCKINGHAM, E., 1904 - Contribution to our knowledge of the aeration of soils U.S. Dep. Agric. Bureau of Soils 25: 51pp

BUTIJN, J., 1961 - Bodembehandeling in de fruitteelt
Versl. Landb.Onderz. 66.7 3 dl.

CADY, F.B. and W.V. BARTHOLOMEW, 1961 - Influence of low PO_2 on denitrification processes and products
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25: 362 - 365

CALL, F., 1957 - Soil fumugation
V: Diffusion of ethylenebromide through soils
J. Sci. Food Agric. 8: 143 - 150

CANNON, W.A. 1925 - Physical features of roots, with especial reference to the relation of roots to aeration of the soil
Carnegie Inst. Washington 368: 168pp

CHANG, H.T. and W.E. LOOMIS, 1945 - Effect of carbondioxyde on the absorption of water and nutrients by plants
Plant Physiol. 20: 220 - 232

CLEMENTS, F.E., 1921 - Aeration and aircontent, the role of oxygen in root activity
Carnegie Inst. Washington 315

CLINE, R.A., and A.E. ERICKSON, 1959 - The effect of oxygen diffusion rate and applied fertilizer on the growth, yield and chemical composition of peas
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23: 333 - 335

COVEY, W. and E.R. LEMON, 1962 - Soil aeration and plant root relations
IV: Testing the cylindrical shell model in the transient case
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26: 526 - 530

CURRIE, J.A., 1960 - Gaseous diffusion in porous media
I A non steady state method
II Dry granular materials
Brit. J. Appl. Phys 11: 314 - 324

_____ 1961 - Gaseous diffusion in porous media
III Wet granular material
Brit. J. Appl. Phys. 12: 250 - 270

_____ 1961 - Gaseous diffusion in the aeration of agregated soils
Soil Sci. 92: 40 - 45

CURTIS, D.S., 1949 - Effect of oxygen supply in nutrient solution on avocado and citrus seedlings
Soil Sci. 67: 253 - 260

DOMBY, C.W. and H. KOHNKE, 1956 - The influence of soil crust on gaseous diffusion
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 20: 1 - 5

DONALDSON, P.E.K., 1958 - Electrodes for measuring oxygen tension
In: Electronic Apparatus for Biol Research. Butterworths, London: 577 - 578

DUIN, R.H.A. VAN, 1956 - Over de invloed van grondbewerking op het transport van warmte, lucht en water in de grond
Versl. Landb. Onderz. 's-Gravenhage 62.7

EPSTEIN, E. and H. KOHNKE, 1957 - Soil aeration as affected by organic matter
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21: 585 - 588

ERICKSON, A.E. and D.M. VAN DOREN, 1960 - The relation of plant growth and yield to soil oxygen availability
Trans. 7th Int. Congr.Soil Sci. 3: 428 - 432

EVANS, N.T.S. and M. EBERT, 1960 - Radio active oxygen in the study of gas transport down the roots of vicia faba
J. Exp. Bot. 11: 246 - 250

FRERCKS, W., und D. PUFFE, 1959 - Vergleichende Untersuchungen zwischen Bodenatmung und der CO_2 Produktion von Moorböden
Z. Pflanz Ernähr 87: 107 - 117

FULTON, J.M., A.E. ERICKSON and N.E. TOLBERT, 1964 - Distribution of ^{14}C among metabolites of flooded and aerobically grown tomato plants
Agron. J. 56: 527 - 529

_____ 1964 - Relation between soil aeration and ethylalcohol accumulation in xylem exudate of tomatoes
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28: 610 - 614

GEISLER, G., 1964 - Untersuchungen zum Einfluss der Bodenluft auf das Wurzel-Wachstum
Z. Acker - u. Pflbau 118: 399 - 410

GERARD, R.W., 1931 - Oxygen diffusion into cells
Biol.Bull. 60: 245 - 268

GIESEKE, F. 1930 - Das Verhalten des Bodens gegen Luft
Handbuch der Bodenlehre Bd VI Blanck, Berlin

GILBERT, S.G. and J.W. SHIVE, 1942 - The significance of oxygen in nutrient I: The oxygen requirement
Soil. Sci. 53: 141 - 152

GILBERT, S.G., and SHIVE, J.W., 1945 - Importance of oxygen in the nutrient substrate for plants, relation of the nitrate ion to respiration
Soil Sci. 59: 453 - 460

GILL, W.R. and R.D. MILLER, 1956 - A method for study of influence of mechanical impedance and aeration on the growth of seedling roots
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 20: 154 - 157

GREENWOOD, D.J., 1961 - The effect of oxygen concentration on the decomposition of organic materials in soil
Plant and Soil 14: 360 - 376

GUPTA, R.P. and D. SWARTZENDRUBER, 1964 - Air content and hydraulic conductivity during liquid flow
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28: 9 - 12

HACK, H.B.R., 1956 - An application of a method of gas micro analisis to study of soil air
Soil Sci. 82: 217 - 232

HANKS,R.J. and F.C. THORP, 1956 - Seedling emergence of wheat as related to soil moisture content, bulk density, oxygen diffusion rate and crust strength
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 20: 307 - 310

HARMSEN, G.W., 1962 - Landbouwkundige en bodemkundige problemen rondom de stikstof in de grond
Landbouwk.Tijdschr. 74: 505 - 519

_____ and D.A. VAN SCHREVEN, 1955 - Mineralisation of organic nitrogen in soil
Advanc. Agron. 7: 300 - 398

HARRIS, D.G. and C.H.M. VAN BAVEL, 1957 - Growth yield and water absorption of tobaccoplants as affected by the composition of the root atmosphere
Agron.J. 49: 11-14 en 176 - 184

HAWKINS, J.C., 1963 - The oxygen requirements of soil and plantroot systems
Symp. Brit. Weed Control Council.2: 40 - 43

HEBERT, J. 1960 - Evolution hebdomadaire de l'azote mineral en sol nu et sons culture pendant deux annees, dans le nord de la France
Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci. 2: 82 - 90

HEINICKE, A.J., 1932 - The effect of submerging the roots of apple trees
Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 29: 205 - 207

HOFMANN,E. und G. HOFFMANN- Ueber Herkunft und Weg des Kohlendioxydes im Boden
Z. Pfl Ernähr Düng. 97 - 100

HOORN, J.W. VAN, 1958 - Results of a groundwater level experimental field with arable crops on clay soil
Techn. Bull. I.C.W. 1: 10pp

HOPKINS, H.T.; A.W. SPECHT and S.B. HENDRICKS, 1950 - Growth and nutrient accumulation as controlled by oxygen supply to plant roots
Plant Physiol. 25: 193 - 209

JENSEN, C.R., and D. KIRKHAM, 1963 - Oxygen 18 as a tracer of soil-aeration studies
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27: 499 - 501

_____ 1963 - Labeled oxygen. Increased diffusion rate through soil containing growing corn roots
Science 141: 735 - 736

KOEPF, H., 1953 - Die Temperatur/Zeit - Abhangigkeit der Boden
Z. Acker u. Pfl.Bau 61: 29 - 48

_____ 1954 - Untersuchungen über die biologische Aktivität des Bodens
Z. Acker u. Pfl. Bau 98: 289 - 312

KOLTHOFF I.M. and J.J. LINGANE, 1946 - In: Polarography: 429 - 437

KRAMER, P.J. 1949 - Plant and soil water relationships
Mc. Graw Hill Book Co., New York

_____ 1951 - Causes of injury to plants resulting from flooding of the soil
Plant Physiol. 26: 722 - 736

KRISTENSEN, K.J. and E.R. LEMON, 1964 - Soil aeration and plant root relations III: Physical aspects of oxygen diffusion in the liquid phase of the soil
Agron. J. 56: 295 - 301

KRZIJSCH, G., 1962 - Der Verlauf der Boden atmung während der Vegetations-zeit und ihre Veranderung durch langjährige Düngungs - und Bodenbearbeitungs massnahmen
Proefschr. Fak. für Landbau und Techn. Univ.Berlin: 116pp

LEMON, E.R., 1962 - Soil aeration and plant-root relations
I. Theory,Agron. J. 54: 167 - 170

_____ and A.E. ERICKSON, 1952 - The measurement of oxygen diffusion in the soil with a platinum electrode
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 16: 160 - 163

LEMON, E.R. and A.E. ERICKSON, 1955 - Principe of the platinum micro electrode as a method of characterising soil aeration
Soil Sci. 79: 383 - 392

_____ and K.J. KRISTENSEN, 1960 - An edaphic expression of soil structure
Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci. 1: 232 - 241

_____ and C.L. WIEGAND, 1962 - Soil aeration and plant - root relations
II: Physical aspects of root respiration
Agron. J. 54: 171 - 175

LEONARD, O.A., and J.A. PINCKARD, 1946 - Effect of various oxygen and carbon-dioxyde concentrations on cotton root development
Plant Physiol. 21: 18 - 36

LETEY, J. e.a., 1961 - Plant growth, water use, and nutritional response to rhizosphere differentials of oxygen concentration
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25: 183 - 186

_____ 1962 - Influence of oxygen diffusion rate on sunflower growth at various soil and air temp.
Agron. J. 54: 316 - 319

_____, L.H. STOLZY and G.B. BLANK, 1961 - Effect of temperature on oxygen diffusion rates and subsequent shoot growth and mineral content of two plant species
Soil Sci. 92: 314 - 321

LIPPS, R.C., and R.L. FOX, 1964 - Root activity of Alfalfa
Soil Sci. 97: 5 - 16

LOEBELL, R., 1955 - Luft pyknometer
Schriftenreihe des Kuratoriums für Kulturbauwesen Hamburg
4: 59pp

LONGMUIR, I.S., 1954 - Respiration rate of bacteria as a function of oxygen concentration
Biochem. J. 57: 81 - 87

LUNDEGÅRDH, H., 1927 - Carbondioxyde evolution of soil and crop growth
Soil Sci. 23: 417 - 453

MEYER, L., und G. SCHAFFER, 1954 - Atmungskurven des Bodens unter dem Einflusz von Düngung und Bewachsung
Landw. Forsch. 6: 81 - 95

MOORE, W.J., 1962 - Physical chemistry 3th ed.
Prentice Hall. inc. U.S.A.

NORRIS, W.E., J.D. WIEGAND and L. JOHANSON, 1959 - Effect of CO_2 on root respiration Soil Sci. 88: 144 - 149

ODEN, S., 1962 - Electrometriska metoder för syrestudier i vatten och jord
Grundförbattring 15: 117 - 210

PAAUW, F. VAN DER, 1959 - Stikstofbehoefte in afhankelijkheid van het weer in de voorafgaande winter
Landbouwk. Tijdschr. 71: 679 - 689

PATRICK, W.H., 1960 - Nitrate reduction rates in a submerged soil as affected by redox potential
Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci. 2: 494 - 499

PENMAN, H.L., 1940 - Gas and vapour movements in the soil
I and II
J. Agric. Sci. 30: 437 - 462 and 570 - 581

PENNINGSFIELD, F., 1950 - Ueber Atmungsuntersuchungen an einige Bodenprofilen
Z. Pfl. Ernähr. Dung: 50: 135 - 164

PETERSON, J.B., 1950 - Relations of soil air to roots as a factor in plant growth
Soil Sci. 70: 175 - 185

PLASSE, J.B. en M.P.KARELSE,1964 - Ervaringen opgedaan bij het I.B.V.T. met de Orsat Codimeter, Beken CO_2 meter en de Tyrite CO_2 en O_2 meter
De Fruitteelt 54: 33: 1034 - 1035

RANEY, W.A., 1949 - Field measurement of oxygen diffusion through soil
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 14: 61 - 65

_____, 1950 - Oxygen diffusion as a method of characterising soil aeration
Thesis Cornell Univ. 65pp

RENNERFELT, J., 1962 - Electrometriska metoder för syrestudier i vatten och jord
Grundförbattring 15: 117 - 210

RICHARD, F. 1959 - Ueber den Einflusz des Wasser und Luftgehaltes im Boden auf das Wachstum von Fichtenkeimlingen
Mitt.Schweiz.Anst.Forstl. Vers W. 35: 243 - 263

ROBINSON, F.E., 1957 - A diffusion chamber for studying soil atmosphere
Soil Sci. 83: 465 - 469

ROMELL, L.G. 1922 - De Bodenventilation als ökologischer Faktor
Medd. Skogsforsk Inst. Stockh. 19: 125 - 359

ROUATH, J.W., H. KATZNELSON and F.M.B. PAYNE, 1960 - Statistical evaluation of the rhizosphere effect
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24: 271 - 273

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

RUSSEL, M.B., 1949 - A simplified air picnometer for field use
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 14: 73 - 76

_____, 1952 - Soil aeration and plant growth
In: Soil phys. cond. and plant growth ed. Shaw. Ac.Press. New-York: 253 - 301

SCHAFFER, G., 1954 - Atmungskurven des Bodens unter dem Einflusz langjähriger verschiedener Düngung.
Z. Pfl. Ernähr Düng 67: 219 - 230

SCHARPENSEEL, H.W. VON und H. BECKMAN, 1964 - Untersuchungen zur Kohlendioxyd entbindung des Bodens
Z. Pfl. Ernähr Düng. 104: 110 - 117

SCHEFFER, F., 1961 - Stickstoff und Boden
In: Der Stickstoff uitg:Stickstoffind. Düsseldorf: 67 - 120

SCHOLANDER, P.F. and H.J. EVANS, 1947 - Micro analysis of fractions of a cubic millimeter of gas
J. Biol. Chem. 169: 551 - 560

SCHREVEN, D.A. VAN, 1965 - Stikstofomzettingen in jonge IJsselmeer poldergronden
Van Zee tot Land 41: 74pp

_____, 1956 - Stikstofomloop en stikstof analyse voor het schatten van stikstof-behoefte
Med. Dir. Tuinbouw. 19: 641 - 653

SCHUFFELEN, A.C., A.R.P. JANSE en G.P. WIERSEMA, 1954 - Een eenvoudige methode om het koolzuurgehalte van bodemlucht te bepalen
Landbouwk. Tijdschr. 66: 36 - 39

SCOTT, A.D. and D.D. EVANS, 1955 - Dissolved oxygen in satured soil
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 19: 7 - 12

_____ , 1955 - A polarographic method of measuring dissolved oxygen in satured soil
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 19: 12 - 16

SHAPIRO, R.E., 1958 - The relationship of varying soil oxygen contents to salt optake by corn
Diss. Abstr. 18: 1183 - 1184

SHIVE, J.W., 1941 - The balance of ions and oxygen tension in nutrient sub-strates for plants
Soil Sci. 51: 445 - 457

SIEBEN, W.H.,1964 I- Het verband tussen ontwatering en opbrengst bij de jonge zavelgronden in de N.O. polder
Van Zee tot Land 40: 117pp

_____,1964 II-Invloed van de ontwateringstoestand op de stikstofhuishouding en opbrengst
Landbouwk. Tijdschr. 76: 784 - 802

STAKMAN, W.P., 1964 - De invloed van diameter en hoogte van bemonsteringscylinders op de relatie tussen vochtspanning en vochtgehalte van ongestoorde grondmonsters
Interne nota I.C.W. no. 268

STOLZY, L.H. and J. LETEY, 1961 - Root growth and diffusion rates as functions of oxygen concentration
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25: 463 - 467

SUNKEL, R., 1964 - Zur Dichtebestimmung des Bodens
Z. Pfl. Ernähr Düng 106: 228 -238

TAKAY, Y, T. KOYAMA and T. KAMURA, 1956 - The effect of waterlogging on various processes in soil
Soil and Plantfood 2: 63 - 66

TAMM, E., und G. KRZYSCH, 1963 - Der Einflusz der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte auf die CO_2 produktion eines lehmigen Sandbodens
Z. Acker - u. Pfl. Bau 117: 359 - 378

TAYLOR, G.S. and J.H. ABRAHAMS, 1953 - A diffusion - equilibrium method
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 17: 203 - 206

TAYLOR, S.A., 1949 - Oxygen diffusion as a measure of soil aeration
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 14: 55 - 60

TÖDT, F., 1955 - Anwendung der elektrochemischen Sauerstoffmessung
Angewandte Chemie 67: 266 - 270

VILAIN, M., 1963 - L. Aeration du sol
Ann. Agron. Paris. 14: 967 - 998

VLAMIS, J. and A.R. DAVIS, 1943 - Germination growth and respiration of rice and barley seedlings at low oxygen pressure
Plant physiol 18: 685 - 698

_____ and A.R. DAVIS, 1944 - Effects of oxygen tension on certain physiological respcuses of rice barley and tomato
Plant physiol. 19: 33 - 51

VISSER, W.C.,1964 - De stikstofvorming in de grond en de ontwatering
Stikstof 43: 231 - 236

VISSER, W.C., 1937 - Porespace determination as a field method
Soil Sci. 44: 467 - 476

WALTER, H. und W. HABER, 1957 - Ueber die Intensität der Bodenatmung mit Bemerkungen zu den lundegårdhschen Werten
Ber. Dtsch. Bot. Ges. 70: 275 - 282

WANNER, H., 1945 Sauerstoff diffusion als begrenzerder Faktor der Atmung von Pflanzenwurzeln
Vierteljahresschr. Naturfors. Ges. Zürich 90: 98 - 119

_____, und SCHMUCKI, 1950 - Hemmung der Wurzelatmung durch Ausscheidungen des Wurzelsystems
Ber. Schweiz. Bot. Ges. 60: 413 - 425

WEISSENBERG, H, 1954 - Die Mikro organismen tätigkeit auf rohhumuskaltigem Heidesand gemessen an der CO_2 produktion
Z. Pfl. ErnährDüng. 66: 227 - 239

WESSELING, J., 1957 - Enige aspecten van de waterbeheersing in landbouwgronden
Versl. Landbouwk. Onderz. 63.5 90pp

_____, 1962 - Some solutions of the steady- state diffusion of carbondioxyde through soils
Netherlands J. Agric. Sci. 10: 109 - 117

WHITNEY, J.B., 1942 - Effects of the composition of the soil atmosphere on the absorbtion of water by plants
Abstr. Doct. Diss. Ohio. State Univ. 38: 97 - 103

WIERSUM, L.K., 1960 - Some experiences in soil aeration measurements and relationship to depth of rooting
Netherlands. J. Agric. Sci. 8: 245 - 252

WILLEY, C.R. and TANNER, C.B., 1963 - Membrane covered electrode for measurement of oxygen concentration in soil
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27: 511 - 515

WILLIAMSON, R.E., 1964 - Aeration and plant growth
Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 28: 86 - 90

WOLDENDORP, J.W., 1963 - The influence of living plants on denitrification
Med.Landb.Hogesch. Wageningen 63: 100pp

WOUD, B.D. VAN 'T and R.M. HAGAN, 1960 - Landdrainage in relation to soils and crops
In: Drainage of Agric. Lands- ed Luthin Amer.Soc.Agron Madison
523 - 538

WURMBACH, H., 1934 - Beiträge zur Kenntnis der Bodenatmung und der Kohlensäurekonzentration der Bodenluft in Landwirtschaftlich genutzten Flächen
Wiss. Archiv.Landw. Pfl.Anbau 10: 484 - 532

YAMANE, I and K. SATO, 1964 - Decomposition of glucose and gasformation in flooded soil
Soil Sci. and Plant Nutr. 10: 127 - 133.