

Vandretention, vandbevægelse og ilt diffusion i inaktive rodmedier

*Water-Retention, Water Movement, and Oxygen
Diffusion in Inert Root Media*

Jens Willumsen

Hydroteknisk Laboratorium, Den kgl. Veterinær- og Landbohøjskole

Sammen drag

3 typer af inaktive rodmedier blev undersøgt:

Baystrat formeringsklodser (et plastmateriale i skumform), Grodan formeringsklodser (stenuld) og Grodan planteuld (stenuld).

Der er foretaget følgende bestemmelser:

1. Retentionskurver, der viser sammenhæng mellem matricpotential og rodmediernes vandindhold ved ligevægt, efter medierne har afgivet eller optaget vand.
2. Kurver, der viser de inaktive rodmediers hydrauliske ledningsevne som funktion af vandindhold.
3. Kurver og ligninger, der udtrykker iltens diffusionskoefficient i de nævnte rodmedier som funktion af relativt luftvolumen.

De fremkomne resultater viser væsentlige forskelle mellem de tre rodmedier og mellem retentionskurverne i forbindelse med henholdsvis vandafgivelse og vandoptagelse.

I. Indledning

I de senere år er man i gartnerier og planteskoler i stigende grad begyndt at bruge forskellige former for kunstige rodmedier, som gennemgående er kemisk inaktive under normale betingelser for plantedyrkning, og som i mange tilfælde i fysisk henseende afviger

betydeligt fra velkendte rodmedier som jord og tørv.

En del dyrkningsforsøg har været udført med de inaktive rodmedier. Undersøgelser af deres fysiske egenskaber har derimod kun været foretaget i ringe grad. Derfor har det været anset for nødvendigt at begynde sådanne undersøgelser, og i denne artikel redegøres for resultaterne af fysiske målinger, som er udført på materialerne stenuld og Baystrat, der begge forhandles her i landet.

I artiklens engelske titel er benyttet ordet »inert«, der med betydningen »kemisk inaktiv« karakteriserer de undersøgte rodmedier på rette måde. Et tilsvarende ord findes ikke på dansk. Da ordet »inaktiv« her i landet ofte har været brugt i forbindelse med disse rodmedier, bibeholdes det i denne artikel, men med betydningen »kemisk inaktiv« underforstået.

II. De undersøgte rodmedier

Tre typer af sterile, inaktive rodmedier i ubrugt tilstand blev undersøgt:

1. Grodan planteuld (stenuld)

Dette rodmedium består af stenfibre med diameter på ca. 5 μ m. Fibrene fremstilles af smeltede stenmasser. I planteulden er stenfibrene samlet i granulater, og bindemidlet fenolharpiks er ikke tilsat under fremstillingsprocessen. Planteuldens reelle massefylde, d.v.s. fibrenes

massefylde er bestemt til 2.86 g cm^{-3} ; pyknometermetoden blev benyttet hertil. I praksis bruges planteulden i blandinger med jord, ler eller tørv eller alene.

2. Grodan formeringsklodser (stenuld)

Også denne type består af stenfibre med diameter på ca. $5 \mu\text{m}$. Under fabrikationen er tilsat bindemidlet fenolharpiks.

Fibrene er ikke samlet i granlater, men er mere jævnt fordelt, og hovedparten af dem er orienteret i horisontale retninger. Formeringsklodserne bruges til både frø- og stiklingeformering. Af praktiske hensyn er klodserne ved køb samlet i større enheder ved at være limet på tynde væv af glasuld eller papir. Samtlige de foretagne målinger er for formeringsklodser uden et sådant væv. Den reelle massefylde er bestemt til 2.81 g cm^{-3} .

Foruden formeringsklodser fremstiller Grodan større dyrkningsblokke og plader, der er fremstillet efter samme princip som formeringsklodserne. Denne afhandlings resultater for klodserne er også gyldige for disse produkter, men hvad angår hydraulisk ledningsevne og ilt diffusion er resultaterne kun gyldige i retningen vinkelret på de lag, som hovedparten af fibrene er med til at danne.

3. Baystrat formeringsklodser

Baystrat er et skumstof af polyurethangruppen og fremstilles til stiklingeformering. Under fremstillingen indtræffer i plastmaterialet en kemisk reaktion, og i tilknytning hertil udvikles luftblærer, som danner mediets poresystem. Derfor er der mulighed for både lukkede og åbne porer. Oplysninger om Baystrats reelle massefylde har ikke været tilgængelige, og bestemmelse af den reelle massefylde med pyknometermetoden har ikke været mulig. Baystrat formeringsklodser forhandles sammenhængende i plader.

III. Vandretention

1. Teori

Et rodmediums vandretention findes ofte illustreret af retentionskurver, der viser sammen-

hængen imellem rodmediets vandindhold og matricpotential. Matricpotential angiver summen af kapillar- og adsorptionskræfter og er negativt i et umættet medium.

2. Målemetode

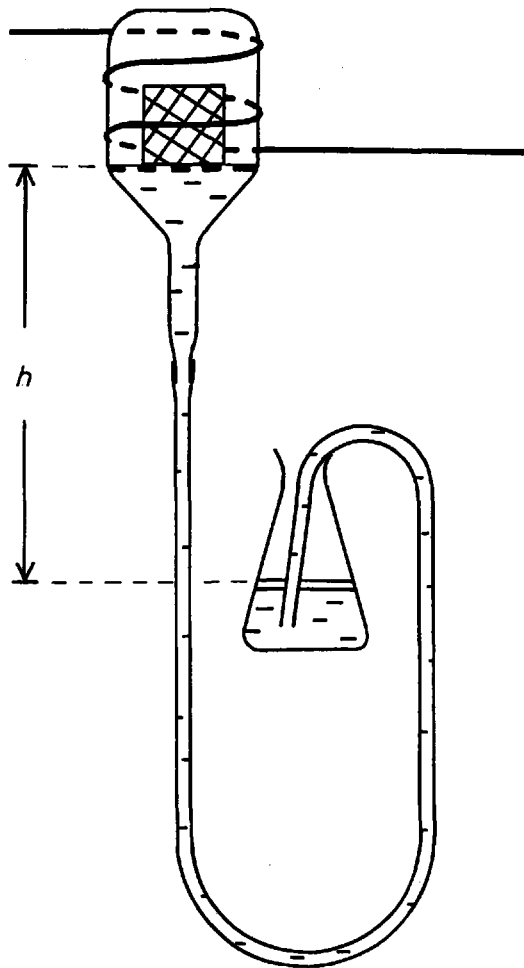


Fig. 1. Opstilling til måling af vandretention; -h: matricpotential.

(Equipment for measurements of water-retention).

Vandfyldte filtertrugte, forbundet til hver sit vandreservoir med en plastslange (figur 1), blev benyttet til bestemmelse af retentionskurvernes forløb. Indtil en vis størrelse af matricpotential har de porøse plader, som består af sintrede glaskugler, den egenskab, at vand men

ikke luft kan passere igennem dem, når de først er blevet gennemvædet.

Når et fugtigt rodmedium bliver anbragt på en af de porøse plader, kan vandet i rodmediet udsættes for skiftende matricpotential ved at ændre højdeforskellen mellem den porøse plade og vandreservoirets vandoverflade. De tilsvarende ændringer i rodmediets vandindhold måles som ændringen i vandreservoirets vandmængde. Efter hver ændring af matricpotential er det nødvendigt, at ligevægt indstiller sig i systemet, inden ændringen i vandreservoirets vandindhold måles ved vejning.

Den lodrette afstand, med negativt fortegn, mellem vandreservoirets vandoverflade og den porøse plades overflade blev målt som matricpotential. Efter at det ønskede antal målinger var fuldført for hver enkelt prøve, blev denne tørret i tørreskab ved 105°C natten over. Det derved fremkomne vandtab sammenholdt med den trinvis ændring af vandindholdet i vandreservoiret igennem forsøgsperioden udgjorde grundlaget for en beregning af prøvens volumetriske vandindhold ved hvert enkelt målt matricpotential.

Fordampning fra prøverne blev nedsat til et minimum ved at anbringe et omvendt bægerglas over filtertragten. Påsæt tape eliminerede utætheder imellem bægerglasset og den porøse plade, men en lille åbning ud til omgivelserne sørgede for, at lufttrykket under bægerglasset forblev det samme som udenfor. Kondensering af vanddamp på bægerglassets inderside blev forhindret ved at vikle en konstantan varmetråd omkring glasset. Desuden blev fordampning fra vandreservoiret forhindret ved at dække vandoverfladen med et ca. 5 mm tykt lag paraffinolie; målinger viste, at man med et sådant lag totalt undgår fordampning fra overfladen. Det samlede systems således stærkt reducerede fordampning blev kontrolleret med en opstilling uden nogen prøve på den porøse plade.

Under afdræning og ved vandindhold på mindre end 20 vol. % svigtede kontakten mellem den porøse plade og Baystrat klodserne som følge af de sidstnævntes ringe vægt. Dette

problem blev elimineret ved at placere 200 g lodder oven på klodserne, uden at klodserne blev deformet.

3. Resultater

Matricpotential,
cm vandsøjle

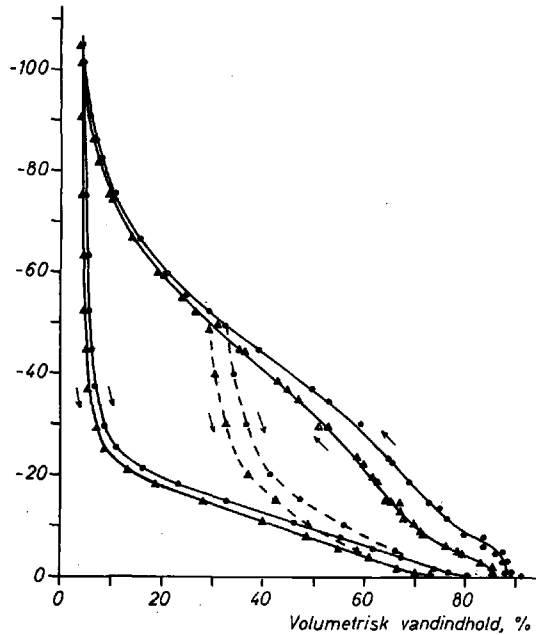


Fig. 2. Retentionskurver for »Grodan planteuld«. (\blacktriangle) vol. vægt 0.175 g cm^{-3} (6.1 vol. % faste bestanddele). (\bullet) vol. vægt 0.200 g cm^{-3} (7.0 vol. % faste bestanddele). Prøvehøjde 5.0 cm. (For rockwool in crumbs: The volumetric water content in equilibrium with the matricpotential after water outflow or water uptake).

Retentionskurver for Grodan planteuld ses på figur 2. For hver af de to pakninger, svarende til volumenvægtene 0.175 og 0.200 g cm^{-3} i lufttør tilstand, findes en kurve for afdræning efter vandmætning og to kurver for vandoptagelse. Kurverne for afdræning er fremkommet som gennemsnit af 2 eller 3 enkeltkurver for et tilsvarende antal prøver. De øvrige kurver er enkeltkurver. Samtlige måleresultater er vist på figuren.

Under afdræningerne skrumpede prøverne med volumenvægten 0.175 g cm^{-3} noget ind,

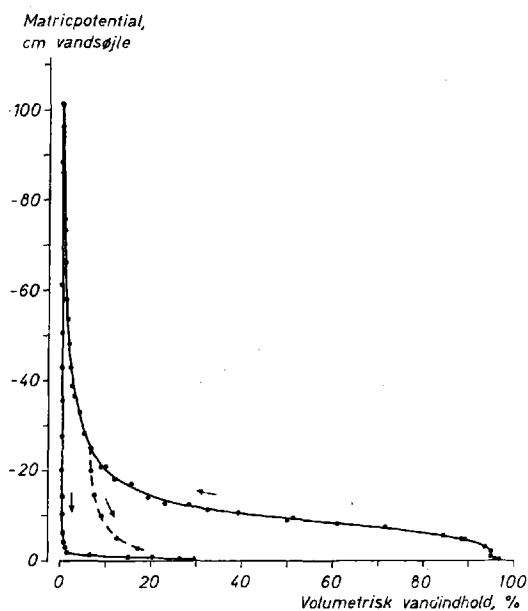


Fig. 3. Retentionskurver for »Grodan formeringsklodser 5 × 5 × 5 cm«. 2.3-2.6 vol. % faste bestanddele. Prøvehøjde ca. 5.0 cm.

(For cubes of rockwool: The volumetric water content in equilibrium with the matric potential after water outflow or water uptake).

således at volumenvægten øgedes til ca. 0.185 g cm⁻³ ved de laveste vandindhold. Under de efterfølgende vandoptagelser svulmede prøverne op til deres oprindelige volumen. Prøverne med volumenvægten 0.200 g cm⁻³ ændrede ikke volumen. Kurvernes volumetriske vandindhold er beregnet i relation til prøvernes aktuelle volumen.

På figur 3 findes et tilsvarende sæt retentionskurver for Grodan formeringsklodser med volumenvægt imellem 0.065 og 0.073 g cm⁻³. Kurven for afdræning efter vandmætning er gns. af 2 enkeltkurver, medens kurverne for vandoptagelse er enkeltkurver. Det bør bemærkes, at manglende kontakt mellem den porøse plade og formeringsklodsen ikke var skyld i det lodrette forløb af kurven nærmest ordinaten. Klodsernes højde mindskedes fra 5.0 cm til ca. 4.7 cm under afdræningerne for derefter at øges til den oprindelige højde under

vandoptagelse. Klodsernes bredde ændredes ikke under målingerne.

For Baystrat klodser er kurven for afdræning efter vandmætning (figur 4) gns. af 3 enkeltkurver. Klodsernes volumen ændredes ikke under afdræningerne. Da Baystrat indeholder en del næsten lukkede porer, hvortil vand- og lufttransporten foregår yderst langsomt, var det ikke muligt at nå til ligevægt i klodserne inden for et rimeligt tidsrum under både afdræning og vandoptagelse. Derfor må afdræningskurverne på figuren sættes i relation til den samlede afdræningstid, der udgjorde 8-9 døgn. Ved reduktion af afdræningstiden til det halve viste det sig, at kurven ville være blevet rykket til højre på figuren i størrelsesordenen 1-2 vol. %. Målinger efter vandoptagelse blev

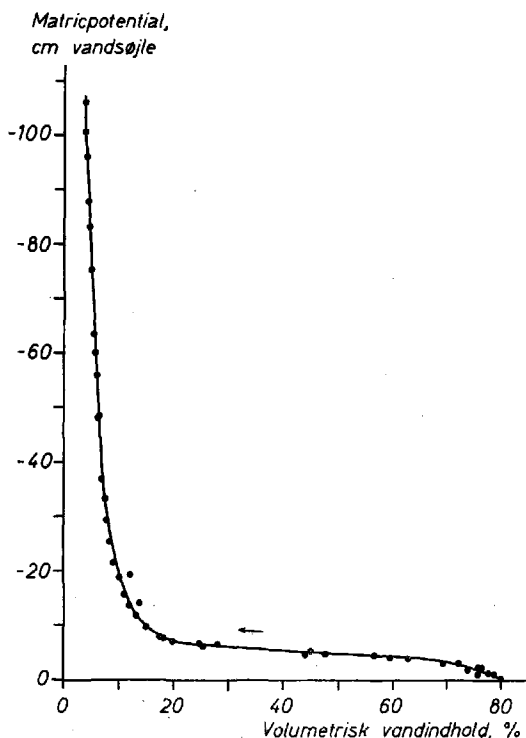


Fig. 4. Retentionskurve for »Baystrat formeringsklodser 4 × 4 × 4 cm«. Ca. 1.5 vol. % faste bestanddele. Prøvehøjde 3.8 cm.

(For cubes of Baystrat: The volumetric water content in equilibrium with the matric potential after water outflow).

udført, men på grund af problemerne med de næsten lukkede porer er resultaterne herfra ikke tilstrækkelig entydige, hvorfor de er udeladt.

4. Diskussion

Retentionskurverne viser, at der er en betydelig forskel mellem de undersøgte rodmediers vandholdende evne.

Ved at betragte placeringen af stenuldens afdræningskurver i forhold til de tilsvarende kurver for vandoptagelse (fig. 2 og 3) ses, at der i dette rodmedium findes en betydelig hysteresevirkning. Alle målinger er foretaget imellem matricpotentialerne 0 og -100 cm vand-søjle, da plantedyrkning i stenuld uden for dette potentialområde er uden praktisk betydning. I det nævnte område kan de fuldt optrukne kurver på de to figurer betragtes som retentionskurvernes ydergrænser. Imellem disse vil der findes et uendeligt antal retentionskurver, hvis placering afhænger af vandoptagelsens eller afdræningens udgangspunkt med hensyn til matricpotential og volumetrisk vandindhold. Den stiplede kurve for hvert medium er et eksempel på en af de mange muligheder imellem de to ydergrænser.

I 992. meddelelse fra Statens Forsøgsvirksomhed i Plantekultur (1971) opgives volumenvægten af Grodan planteuld til 0.18 g cm⁻³ under plantedyrkning, medens firmaet a-s Grodan selv anslår volumenvægten til 0.20 g cm⁻³. Da planteulden i de foreliggende undersøgelser blev pakket til volumenvægtene 0.175 og 0.200 g cm⁻³, må begge pakningers kurver på figur 2 anses for at være realistiske.

Afdræningskurverne på figur 2 for den granulerede planteuld er dobbelt s-formede i modsætning til de enkelt s-formede afdræningskurver på figurerne 3 og 4; dette er i overensstemmelse med andre undersøgelser (Currie, 1961), som viser, at retentionskurver for granulerede materialer bliver dobbelt s-formede. Det sted på kurven, hvor den ene s-formede del glider over i den anden, ved 60-70 vol. % vand, angiver den tilstand, hvor porerne imellem granulerne er blevet næsten tømt for vand, me-

dens tømningen af porerne i granulerne først er ved at begynde.

Ordinatværdierne på figurerne 2, 3 og 4 angiver matricpotential for rodmediernes underside. Absciseværdierne angiver gennemsnit af vandindholdet i rodmediernes totale højde. Derfor er de tegnede retentionskurver kun gyldige for de prøvehøjder, som findes opgivet under figurerne. Imidlertid kan kurverne med en vis tilnærmelse bruges på følgende måde for andre højder af rodmedierne:

Ved et givet vandindhold er matricpotential ved mediets underside lig med den tilsvarende værdi på ordinataksen + ½ (rodmediets højde - den prøvehøjde, som er nævnt under figur 2, 3 eller 4).

Vol. % luft i rodmedierne kan ved et givet matricpotential beregnes som 100 % minus summen af vol. % vand og vol. % fast materiale. Sidstnævnte størrelse findes opgivet under hver figur.

IV. Hydraulisk ledningsevne

1. Teori

For en laminar, stationær vandstrømning igennem et rodmedium, der ikke er vandmættet, gælder Darcy's lov:

$$v = -K(\delta\varphi/\delta L),$$

v: den »tilsyneladende« strømningshastighed igennem mediet, cm sek⁻¹,

$\delta\varphi/\delta L$: potentialgradienten, cm cm⁻¹,

φ : summen af matric-, gravitations- og osmotisk potential, cm v.s.,

L: længden af mediet i strømningsretningen, cm,

K: den hydrauliske ledningsevne, cm sek⁻¹.

Produktet af v og rodmediets tværsnitsareal vinkelret på strømningsretningen, i cm², giver den gennemstrømmende vandmængde i cm³ sek⁻¹.

K er en funktion af rodmediets poregeometri, vandindhold og temperatur. Ændres de nævnte faktorer ikke, udgør K en konstant, som er karakteristisk for det pågældende rodmedium, og som ved brug af Darcy's lov kan

benyttes til beregning af vandgennemstrømningen i rodmediet.

2. Målemetode

For at kunne finde K's afhængighed af rodmediernes volumetriske vandindhold er der udviklet en metode, som benævnes »the outflow method«. Denne afdræningsmetode bygger på en ikke stationær, endimensional strømning igennem et rodmedium som følge af en ændring i matricpotentialet.

Butijn & Wesseling (1959) har beskrevet den praktiske udførelse af »the outflow method«. De benyttede en opstilling med porøse plader, som også er benyttet i de foreliggende undersøgelser til bestemmelse af hydraulisk ledningsevne, og som i princippet ikke adskiller sig fra opstillingen på figur 1. For at kunne bestemme K for stenuld og Baystrat tilstrækkelig nøjagtigt var vandreservoiret under afdræningen placeret på en vægt, således at udstrømningsmængden i forhold til tiden til stadighed kunne kontrolleres.

Ved at måle afstrømningen i tilknytning til tiden, er det muligt at beregne K med »t^{1/2}-metoden«. Denne er baseret på ligningen:

$$\frac{Q_t}{Q_\infty} = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{K V \Delta \Psi}{\pi Q_\infty}} \sqrt{t}$$

Q_t : mængde afdrænet vand i tiden t sek, cm³,

Q_∞ : total mængde afdrænet vand i tiden indtil ligevægt, cm³,

L : prøvens højde, cm,

V : prøvens volumen, cm³,

$\Delta \Psi$: ændring af matricpotentialet, cm v.s.

Ligningen er gyldig i begyndelsen af afstrømningsperioden, hvor prøven på den porøse plade endnu opfører sig, som var den uendelig høj, således at forstå at ændringen af matricpotentialet endnu ikke har nået at forplante sig op til den øverste ende af prøven. *Jackson et al.* (1963) fandt, at 3 forudsætninger var nødvendige for at kunne anvende »t^{1/2}-metoden« til beregning af K:

1. at den porøse plades modstand imod afstrømningen kan anses for at være ubetydelig,

2. at der ikke findes kontaktvanskeligheder imellem prøven og den porøse plade,
3. at det volumetriske vandindhold er en lineær funktion af matricpotentialet inden for den ændring af potentialet, som forårsager udstrømningen.

Afsættes Q_t/Q_∞ i et koordinatsystem som en funktion af $t^{1/2}$, og er de nævnte forudsætninger opfyldt, bør den fremkomne kurve være retliniet ved de laveste værdier af t. Hældningen α for den retliniede del af kurven kan findes og indsættes i ovenstående ligning, som kan omformes til:

$$K = \frac{\pi L^2 \alpha^2 Q_\infty}{4 V \Delta \Psi}$$

For hver afdræning må den beregnede værdi af K siges at svare til et gennemsnit af matricpotentialets eller vandindholdets værdier ved henholdsvis $t = 0$ og $t = \infty$ (*Klute*, 1965).

Som nævnt er hver afdræning forårsaget af en ændring af matricpotentialet. *Klute* (1965) anbefalede, at størrelsen af denne ændring højst var 10 % af matricpotentialet inden afstrømningen. Dette blev fulgt i målingerne på stenuld og Baystrat.

Det må bemærkes, at de omtalte metoder er udviklet til bestemmelse af K i forbindelse med vandafgivelse. Metoderne skulle også kunne benyttes ved vandoptagelse, men de fremkomne værdier af K vil på grund af hystereseseffekt blive forskellige fra K ved vandafgivelse (*Klute*, 1965).

3. Resultater

På figurerne 5 og 6 ses, hvordan den hydrauliske ledningsevne i vertikal retning (vinkelret på fiberretningen) afhænger af rodmediernes volumetriske vandindhold. 3 eller 4 prøver ligger til grund for hvert af de tre mediers resultater. Punkterne for de højeste vandindhold er de mest usikre, da de repræsenterer en ændring af matricpotentialet på kun ca. 0.5 cm, hvilket er vanskeligt at måle tilstrækkelig nøjagtigt.

For Baystrat på figur 6 kan der ikke konstateres nogen sikker forskel mellem den hy-

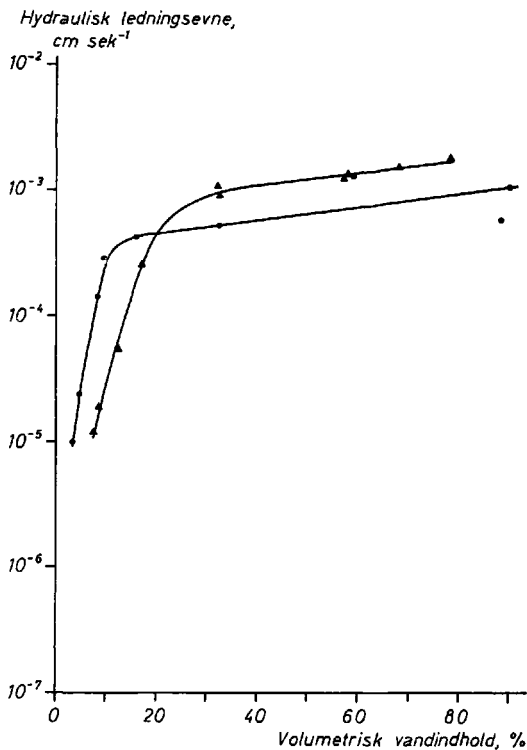


Fig. 5. Hydraulisk ledningsevne ved ca. 25° C i »Grodan formeringsklodser 5 × 5 × 5 cm« i vertikal retning (●) og i »Grodan planteuld« med vol. vægt 0.200 g cm⁻³ (▲).
(Relationship between hydraulic conductivity and volumetric water content for rockwool in cubes (●) and crumbs (▲).

drauliske ledningsevne i vertikal og i horisontal retning. Derfor kan en enkelt kurve repræsentere begge sæt resultater. 200 g lodder blev lagt på Baystrat klodserne for at forøge kontakten mellem prøven og den porøse plade ved lavt vandindhold.

4. Diskussion

De fundne kurver for den hydrauliske ledningsevnes afhængighed af vandindholdet er gyldige for situationer, hvor vandindholdet i rodmedierne formindskes, d.v.s. under afdræning eller under røddernes vandoptagelse. $t^{1/2}$ -metoden viste sig ikke anvendelig til bestemmelse af K under mediernes vandoptagelse.

Den hydrauliske ledningsevne K i de undersøgte inaktive rodmedier er større, end hvad der er normalt i jord. For både Baystrat og stenuld er det karakteristisk, at K under et volumetrisk vandindhold på 10-20 % aftager stærkt med faldende vandindhold. De tre kurvers temmelig skarpe knæk indtræffer ved de vandindhold, hvor de tilsvarende retentionskurver (under afdræning efter vandmætning) begynder at stige kraftigt; dette forhold, som er en udbredt iagttagelse for bl.a. jord, sandsynliggør forløbet af kurverne.

Kurvernes ringe hældning ved vandindhold større end 20 vol. % er overraskende. Beregninger viser, at de ringe hældninger indebærer, at den reelle vandhastighed i porerne øges med faldende vandindhold. På fig. 5 krydser de to

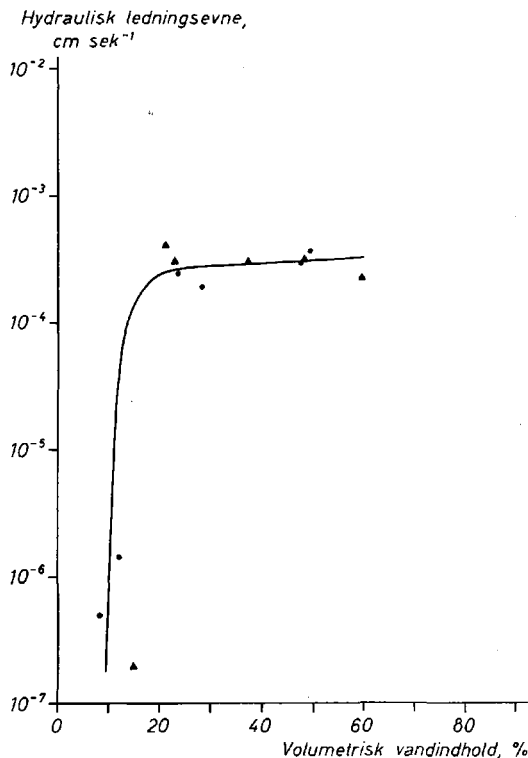


Fig. 6. Hydraulisk ledningsevne ved 25° C i »Baystrat formeringsklodser 4 × 4 × 4 cm« i vertikal (●) og i horisontal (▲) retning.
(Relationship between hydraulic conductivity and volumetric water content for Baystrat cubes).

kurver hinanden, hvilket må skyldes, at planteulden med sin granulerede form besidder en anden porefordeling og poresammenhæng end formeringsklodserne.

Det opgives af Agro-Kemi A/S, som forhandler Baystrat, at et af dette rodmediums fordele er, at vandtransporten forløber lettere i vertikal end i horisontal retning, hvilket har betydning, hvor undervanding praktiseres. De foreliggende undersøgelser (fig. 6) viser imidlertid, at der ingen sikker forskel er mellem de to retninger.

Punkterne på figurene 5 og 6 fremviser en ret stor spredning, hvilket også andre har fundet i deres resultater for hydraulisk ledningsevne. I den forbindelse konkluderer *Njøs* (1962), at ikke stationær strømning byder på vanskelige måletekniske problemer, særlig ved højt vandindhold, hvor en blokering af de store porer giver en effekt, som kan variere en del fra måling til måling.

V. Ilt diffusion

1. Teori

Undersøgelser har vist, at en for ringe tilførsel af ilt til rødderne kan nedsætte vækst og næringsstofoptagelse (*Lemon & Wiegand*, 1962); ophobning af kuldioxid og andre af cellernes affaldsprodukter og deres borttransport spiller en sekundær og mindre rolle, som dog ikke er uden betydning.

Ilttransporten igennem rodvævet og igennem det medium, hvori rødderne vokser, sker efter adskillige forfatters mening hovedsagelig ved diffusion (*Bakker & Hidding*, 1970, *Lemon & Wiegand*, 1962, *Taylor*, 1949). Derfor har det betydning at kende diffusionsmulighederne igennem både rodvæv og rodmedium. Diffusionsmulighederne kan udtrykkes med diffusionskoefficienter, hvis betydning fremgår af følgende ligning for stationær, endimensional diffusion:

$$F = -D \left(\delta \chi / \delta L \right)$$

F: mængden af diffunderet ilt, g cm⁻² sek⁻¹,

D: iltens diffusionskoefficient i det pågældende medium, cm² sek⁻¹

$\delta \chi / \delta L$: koncentrationsgradienten, g cm⁻³ cm⁻¹.

D afhænger af temperaturen (*Currie*, 1960a) og øges ved stigende temperatur med 0.6 % pr. ° C i området 0-40° C.

Da D i luft er omkring 10⁴ gange så stor som i vand, må værdien af D i rodmedier afhænge stærkt af det volumetriske luftindhold og af luftporernes fordeling i mediet. *Currie* (1960 b) udviklede for tørre porøse materialer en ligning, som angiver, hvorledes D for en luftart afhænger af luftindholdet i materialet:

$$D/D_0 = \gamma \varepsilon^\mu$$

D: luftartens diffusionskoefficient i materialet,

D₀: luftartens diffusionskoefficient i den omgivende luft,

ε : materialets relative luftvolumen (ε varierer mellem 0 og 1),

γ og μ : konstanter, som er karakteristiske for materialet.

Senere undersøgelser (*Currie*, 1961) godtgjorde, at ligningen også er gyldig for vandholdige porøse medier, når disse ikke er helt eller næsten vandmættede. Er medierne granulerede, eller besidder de en tydelig krummestruktur, er ligningen kun gyldig for de områder af ε , hvor de små porer i granulerne eller i krummerne endnu er vandfyldte og således ikke medvirker i diffusionsprocessen. Kendes D₀, kan konstanterne γ og μ findes ved i et koordinatsystem at afsætte log D som en funktion af log ε ; μ er den fremkomne rette linies hældningskoefficient, og log (D₀ γ) er liniens afskæring på koordinataksen.

2. Målemetode

Til beregning af D ved forskellige vandindhold blev benyttet en metode, som er beskrevet af *Bakker & Hidding* (1970). Metoden bygger på en ikke stationær diffusion af en luftart igennem en delvis indelukket prøve af det medium, for hvilket D ønskes bestemt.

Hver prøve af stenuld og Baystrat blev anbragt i en tætsluttende cylinderring eller anden tætsluttende holder, som i den ene ende var i kontakt med atmosfæren, og som i den anden

ende var tilsluttet et lukket luftrum. Iltens partialtryk i luftrummet blev mindsket i forhold til dens partialtryk i atmosfæren, hvilket startede en ilt diffusion igennem prøven. Ved at måle ændringen af iltens partialtryk i det lukkede rum i forhold til tiden kunne D med de nødvendige korrektioner taget i betragtning beregnes af de ligninger, som Bakker & Hidding (1970) har opstillet. Iltens partialtryk blev målt med en »Beckmann Fieldlab™ Oxygen Analyser, model 100800«.

3. Resultater

Diffusionskoefficient,
 $10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ sek}^{-1}$

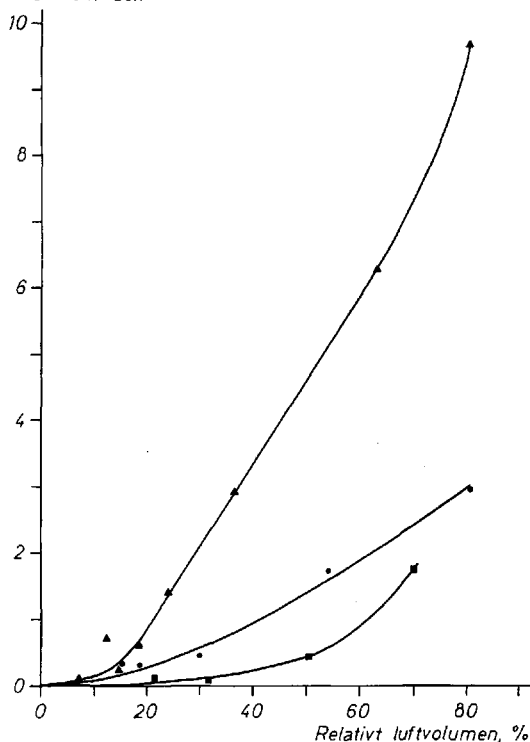


Fig. 7. Ilt diffusion ved 25° C i »Grodan planteuld« (vol. vægt: 0.200 g cm^{-3} , (▲), i »Grodan formeringsklodser $3.75 \times 3.75 \times 3.75 \text{ cm}$ « (●) og i Baystrat formeringsklodser $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}$ « (■). (Relationship between oxygen diffusion coefficient and air porosity for rockwool in crumbs (▲) and cubes (●) and for Baystrat cubes (■).

For vertikal ilt diffusion igennem de inaktive rodmedier ses på figur 7 iltens diffusionskoefficient D som funktion af relativt luftvolumen i %. Hvert af de indtegnede punkter repræsenterer et gennemsnit af resultaterne fra 3-5 målinger under et enkelt diffusionsforløb igennem den pågældende prøve. Efter hvert diffusionsforløb blev prøven tørret ved 105° C for at finde dens volumetriske vandindhold, og med kendskab til volumenprocent fast materiale i prøven blev det relative luftvolumen beregnet.

Rette linier kunne med en tilstrækkelig sandsynlighed trækkes igennem måleresultaternes punkter, når disse var afsat i et koordinatsystem med akserne $\log \epsilon$ og $\log D$. ϵ er det relative luftvolumen med værdier imellem 0 og 1. De rette liniers hældninger og afskæringer på koordinataksen blev benyttet til beregning af følgende ligninger:

$$\text{Grodan planteuld: } D = 0.138 \epsilon^{1.6}$$

$$\text{Grodan formeringsklodser: } D = 0.044 \epsilon^{1.6}$$

$$\text{Baystrat formeringsklodser: } D = 0.070 \epsilon^{4.0}$$

hvor D har enheden $\text{cm}^2 \text{ sek}^{-1}$. I konstanterne foran ϵ indgår D_0 , som ved 25° C og 1010 mb angives at være af størrelsesordenen $0.20\text{-}0.22 \text{ cm}^2 \text{ sek}^{-1}$ (Bakker & Hidding, 1970).

4. Diskussion

Kurverne i figur 7 viser, at modstanden mod ilt diffusion er tydelig forskellig i de tre rodmedier. Ved luftindhold under ca. 20 % er måleresultaterne usikre som følge af vanskeligheder med at indeslutte prøverne tilstrækkelig lufttæt i måleapparatet og som følge af blokering af de store porer nederst i prøverne. De beregnede ligninger, som udgør et alternativ til kurverne på figur 7, kan ikke anses for at være bedre i dette område.

Under det teoretiske afsnit blev det omtalt, at disse ligninger kun var gyldige for medier med krummestruktur, når porerne inden i krummerne var vandfyldte. Grodan planteuld har en sådan struktur. Den beregnede ligning for planteulden synes imidlertid at være gyldig

for luftindhold op til mindst 80 vol. %, da måleresultaterne op til dette luftindhold følger en ret linie i det koordinatsystem, hvor $\log D$ er afsat som en funktion af $\log \varepsilon$.

Det ville være nyttigt at kunne beregne, hvor store værdier af D man må tilstræbe at have i rodmedierne under normal plantedyrkning. I den forbindelse kan det nævnes, at størrelsesordenen af D i rødder, vand og atmosfærisk luft er henholdsvis 10^{-6} , 3×10^{-5} og $0.2 \text{ cm}^2 \text{ sek}^{-1}$. Sammenlignes disse tal med værdierne for D på figur 7, er det forståeligt, at rodvævet og vandhinderne omkring rødderne på trods af den ringe tykkelse kan øve en lige så stor modstand mod ilt diffusionen fra atmosfæren til rodcellerne som det totale rodmedium.

Ved hjælp af teoretisk udledte ligninger har forfatteren og andre forsøgt at beregne den nødvendige ilttransport igennem rødder, vandhinder og rodmedier samt de respektive diffusionskoefficienter. Resultaterne herfra viser, at der er sandsynlighed for, at ilt diffusionen igennem stenuld og Baystrat under visse betingelser kan blive en begrænsende faktor for plante produktionen. For at beregningerne kan gennemføres, er det imidlertid nødvendigt at basere dem på så mange antagelser og tilnærmelser, at det er for tvivlsomt, om de har nogen praktisk betydning. Derfor må det konkluderes, at kurverne på figur 7 og de beregnede alternative ligninger i praksis mest har betydning som relative størrelser, hvormed forskellige rodmedier kan sammenlignes. Skøn over de nødvendige betingelser for ilt diffusion i medierne må bestemmes ud fra dyrkningsforsøg.

VI. Konklusion

De undersøgte typer af stenuld og Baystrat repræsenterer rodmedier, som i fysisk henseende adskiller sig væsentligt fra hinanden. Når medierne benyttes i praksis, er det derfor nødvendigt at tage hensyn hertil ved at tilpasse en del af de øvrige dyrkningsfaktorer, således at en tilfredsstillende rodaktivitet opnås.

Ved dyrkning på væksthuseborde kan det således være nødvendigt at anbringe rodmediet

på et porøst underlag, i hvilket grundvandspejlet må have en sådan afstand fra rodmediet, at dette afdrænes så tilpas, at ilt diffusionen til rødderne bliver tilstrækkelig, samtidig med at den nødvendige vandreserve forbliver i rodmediet. I den forbindelse må det bemærkes, at Baystrat med sin relativt lave diffusionskoefficient for ilt sammenholdt med dens forholdsvis pludselige afgivelse af vand ved et matricpotential på ca. -5 cm er den af de undersøgte rodmedier, som kræver den største påpasselighed med hensyn til at holde vand/luft forholdet på det rette niveau.

De beregnede kurver for hydraulisk ledningsevne viser, at stenuld og Baystrat i klodser og i potter ikke byder på problemer for vandtransporten, når vandindholdet er større end 10-20 vol. %. I måtter af stenuld foregår transporten af vand over større afstande. Dette giver mulighed for, at vandtransporten der kan blive en begrænsende dyrkningsfaktor.

Efterskrift

Der bringes hermed en tak til prof., dr. H. C. Aslyng og øvrige personale på Hydroteknisk Laboratorium, K.V.L., for velvillig hjælp og vejledning i forbindelse med de foretagne undersøgelser.

Summary

Some physical properties of inert root media, used for horticultural purposes, were measured in laboratory.

Three types of inert root media were investigated:

1. Rockwool in crumbs, manufactured by Grodan.
2. Cubes of rockwool, manufactured by Grodan.
3. Cubes of Baystrat, which is a foam material of polyurethane.

Water-retention of the root media was measured by the porous plate method. The results, given in figure 2, 3 and 4, show the great difference between desorption and sorption curves, each of which depends on the initial values of the matric potential and the volumetric water content in the medium.

Hydraulic or capillary conductivity for unsaturated flow in root media was measured by means of a pressure-plate outflow method called »the square root of time method« (Butijn and Wesseling, 1959. Jackson *et al.*, 1963). The results in figure 5 and 6 show that the hydraulic conductivity is high in the 3 types of inert root media in relation to soil.

The oxygen diffusion from the atmosphere to the root cells depends on many factors such as the rate of oxygen consumption, the root radius, the distance between root and atmosphere, and the diffusion coefficients interior and exterior to the root surface. One of the factors, the diffusion coefficient in the root media, D , was measured by means of a non-steady state method evolved by Bakker and Hidding (1970). Relationship between D and air porosity is given in figure 7 and, in addition, as a set of analogous equations. The total factors involved in the diffusion of oxygen from the atmosphere to the root cells are difficult to estimate, which restricts a calculation of minimum D -values.

Litteratur

- Bakker, J. W. and A. P. Hidding (1970): The influence of soil structure and air content on gas diffusion in soils. *Neth. J. agric. Sci.* 18: 37-48.
- Butijn, J. and J. Wesseling (1959): Determination of the capillary conductivity of soils at low moisture tensions. *Neth. J. agric. Sci.* 7: 155-163.

- Currie, J. A. (1960a): Gaseous diffusion in porous media. Part 1. A non-steady state method. *Br. J. appl. Phys.* 11: 314-317.
- Currie, J. A. (1960b): Gaseous diffusion in porous media. Part 2. Dry granular materials. *Br. J. appl. Phys.* 11: 318-324.
- Currie, J. A. (1961): Gaseous diffusion in porous media. Part 3. Wet granular materials. *Br. J. appl. Phys.* 12: 275-281.
- Jackson, R. D., C. H. M. van Bavel and R. J. Reginato (1963): Examination of the pressure-plate outflow method for measuring capillary conductivity. *Soil Sci.* 96: 249-256.
- Klute, A. (1965): Water diffusivity. - C. A. Black: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling.* Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin: 262-272.
- Lemon, E. R. and C. L. Wiegand (1962): Soil aeration and plant root relations. 2. Root respiration. *Agron. J.* 54: 171-175.
- Njøs, Arnor (1962): Vannstrømning i umettet jord. *Grundförbättring* 15: 220-228.
- Taylor, S. A. (1949): Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 14: 55-61.
- Anon. 1971: Granuleret stenuld som dyrknings-substrat. 992. meddelelse fra Statens Forsøgs-virksomhed i Plantekultur.

Manuskript modtaget den 27. oktober 1971.