



Statens
Planteavlsforsøg

Planteværnscentret
Administrationn
Lottenborgvej 2 - DK-2800 Lyngby

Beretning nr. S 1762

Udstyr til afdræning af jordprøver for jordfysiske analyser

Equipment for drainage of soil samples

Per Schjønning
Statens Forsøgsstation
Højer

Tidsskrift for Planteavls Specialserie

København 1985



Statens
Planteavlsforsøg

Beretning nr. S 1762

Udstyr til afdræning af jordprøver for jordfysiske analyser

Equipment for drainage of soil samples

Per Schjøning
Statens Forsøgsstation
Højer

Tidsskrift for Planteavl Specialserie

København 1985



<u>Indholdsfortegnelse</u>	<u>side</u>
Resumé	4
Summary	4
1. Indledning	5
2. Analyseprincip	6
2.1. Afdræning	6
2.2. Porestørrelse i relation til potentiale	7
3. Konstruktion og opbygning af udstyr	10
3.1. Sandbokse	10
3.1.1. Opbygning af boksen	10
3.1.2. Vandreguleringssystem	11
3.1.3. Sortering af sand	12
3.1.4. Nedlægning af sand i boksen	13
3.2. Vakuumsystem	13
3.3. Overtryksystem	15
4. Brug af udstyret	15
4.1. Jordprøverne	15
4.2. Opfugtning	16
4.3. Afdræning i sandboks	16
4.4. Afdræning i trykssystemerne	17
5. Afprøvning af udstyr	17
5.1. Kontrol af afdræningspotentiale	17
5.2. Ligevægtsindstilling ved lave potentialer	18
5.2.1. Eksperiment	18
5.2.2. Resultater	19
5.2.3. Beregnet afdræningsmængde	21
5.3. Jordprøvernes stabilitet	21
6. Sammenfattende vurdering	22
7. Erkendtlighed	24
8. Litteratur	25

Resumé

I flere sammenhænge er det ønskeligt at kende porestørrelsesfordelingen i jord. Fordelingen er bl.a. bestemmende for jordens vandholdende evne. Porekarakteristikken kan opnås ved måling af jordens vandretention ved flere afdræningspotentialer på jordprøver i laboratoriet.

I beretningen redegøres for princippet, der ligger til grund for afdræningsmetoden. Der gives en sammenhæng mellem porestørrelse i jorden og afdræningspotentialer. Potentialebegrebet diskuteres, og ækvivalente udtryk med forskellige enheder sættes i relation.

Afdræning af jordprøver kan ske efter princippet med hængende vandsøjle eller med en pneumatisk trykforskel. Styring og måling af potentialet sker direkte med den hængende vandsøjle eller med pneumatiske trykregulatorer og -målere.

I beretningen beskrives konstruktion af sandbokse samt opbygning af vakuum- og tryksystemer, som de anvendes ved Institut for jordbearbejdning og jordfysik ved Statens Planteavlsforsøg.

Der gives en kort beskrivelse af proceduren ved opfugtning af jordprøver samt afdræning i de forskellige målesystemer.

Et eksperiment med nøjagtig måling af akkumuleret udstrømning fra jordprøver ved et lavt potentiale viste, at afdræning til total ligevægt er meget tidskrævende især for lerjordsprøver.

På grundlag af dette eksperiment og vurdering af en metode til beregning af totaludstrømning fra den første tids afdræningsmængde konkluderes, at der vil blive begået væsentlige fejl ved afbrydning af afdræning før ligevægt, samt at beregning af slutvandmængden er usikker.

Endelig gives i beretningen en vurdering af mulig indvirkning på jordstrukturen af gentagne målinger med afdræningsmetoden.

Nøgleord: Vandpotentiale, porestørrelsesfordeling, retentionskurve, vandindhold i jord, afdræningsudstyr.

Summary

Pore size distribution in soil determines several physical characteristics of the soil, e.g. the water holding capacity. This property can be determined in soil samples in the laboratory by measurement of the water retention at several potentials.

In the paper the principle in water release measurements on tension tables and ceramic plates is discussed. Pore size in soil is related to potential. The meaning of potential is discussed and equivalent expressions with different dimensions are related.

The construction of a sandbox-system is described. The measuring procedure with this system as well as with vacuum and pressure plate systems is described as it is carried out at the Institute of Soil Tillage and Soil Physics, Højer.

An experiment was carried out by which accumulated outflow from soil samples on pressure plate was followed in time. It appeared that the drainage process was very time consuming, especially for clay soils. A method for calculating the final accumulated outflow from the initial water release is evaluated using data from the experiment. It is concluded that accurate determination of volumetric water content can only be done by awaiting total outflow.

Finally the influence of the water release measurements upon the soil structure is considered.

Key words: Water potential, pF-curve, pore size distribution, water content in soil, drainage equipment.

1. Indledning

Jordens porerumfang udgør i danske jorde oftest 40-50 % af jordens totale fylde. Tekstur og struktur betinger fordelingen af dette rumfang på forskellige størrelsesklasser af porer. Denne størrelsesfordeling har stor betydning for jordens evne til at levere planterne vand i vækstsæsonen. Porerumfang med indhold af plantetilgængeligt vand varierer for pløjelaget i danske jorde mellem 10 og 26 % (4). Denne spredning øges endog for dybere liggende jordlag uden indhold af organisk stof. Kendskab til porestørrelsesfordelingen har derfor stor betydning ved vurdering af vandingsbehov.

Rumfang af vand- og luftfyldte porer har afgørende betydning for en lang række fysiske egenskaber ved og processer i jorden.

Størrelsen af porer med betydning for de nævnte problemstillinger spænder fra regnormegange på flere millimeter til mikroskopiske porer på få titusindele millimeter. En direkte måling af porestørrelsesfordelingen vil derfor være yderst problematisk - selv med hjælp af moderne billedanalyseteknik.

Da den flydende komponent i jordens trefasede system imidlertid udgøres af vand, er det naturligt at anvende en indirekte metode, som baseres på vands fysiske egenskaber. En sådan er udviklet for år tilbage og anvendes flere steder både her i landet samt i udlandet. Metoden består i gravimetrisk bestemmelse af vandindhold i jordprøver, som afdrænes ved kendt, kontrolleret potentiale. Ud fra vejningerne fås vandindholdet direkte, hvorefter porestørrelser kan beregnes. Princippet i metoden er på dansk beskrevet af Hansen (3), Aslyng (1) og Rasmussen (5).

På det jordfysiske laboratorium ved Højer forsøgsstation har metoden været anvendt siden 1968. I perioden 1980-83 er der sket en betragtelig udvidelse af målekapaciteten. Da der jævnlig vises interesse for metoden, beskrives konstruktion af udstyr samt måleteknik m.v. i denne beretning.

Læsere, som udelukkende er interesseret i udstyrets konkrete opbygning og praktiske funktion, kan overspringe afsnittene 2: Analyseprincip samt 5: Afprøvning af udstyr.

2. Analyseprincip

2.1. Afdræning

I beskrivelsen af vands fysiske forhold i et system anvendes vandpotentiallet, som er et mål for vandets binding i forhold til rent, frit vand. Flere fysiske faktorer bidrager til potentialets størrelse. For vand i jord kan man i denne forbindelse oftest se bort fra osmotiske kræfter, hvorfor der tilnærmeth gælder

$$\psi_w = \psi_m + \psi_p + \psi_g, \quad (1)$$

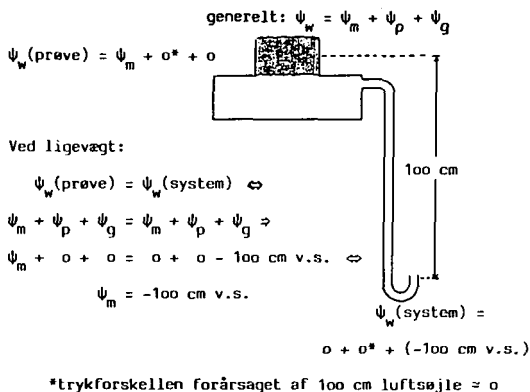
hvor ψ_w = vandpotentiallet, ψ_m = matrisk delpotentiale (kapillære kræfter), ψ_p = trykpotentiale (pålagt tryk) og ψ_g = gravitationspotentiale (tyngdens indvirkning).

Vandpotentiallet i jord-plante systemet er normalt negativt.

Vand vil strømme fra punkter med højt til punkter med lavere potentiale. I et system uden potentialgradienter vil transport ikke forekomme.

Bringes vandet i en jordprøve i kontakt med et vandfyldt målesystem, kan man ved at regulere ψ_p , trykket på vandet, og/eller ψ_g , højdeforskellen mellem prøve og målested i systemet, forårsage en afdræning til et ønsket matrisk depotentiale i jorden, hvilket modsvares af de kapillære porer. Dette er princippet i selve afdræningsproceduren. I figur 1 er potentialbegreberne hæftet på et eksempel med hængende vandsøjle som reguleringsmekanisme.

Der kan være grund til at klargøre, at betegnelsen "tension", som ofte anvendes om vandets binding i jorden, er den numeriske værdi af vandpotential.



Figur 1: Eksempel på anvendelse af potentialer til forklaring af forholdene ved afdræning af prøver i sandboks

2.2. Porestørrelse i relation til potentiale

Ønskes jordens vandindhold sat i relation til porestørrelse, skal afdræningspotentiallet omregnes til ækvivalent porediameter. Ved denne størrelse forstås diameter af en cirkulær pore med samme kapillære stighøjde som den undersøgte pore i jorden.

Tænkes et kapillarrør med radius r anbragt i rent vand, vil vandet stige, indtil kraften forårsaget af overfladespændingen og adhæsionen til kapillarrørets vægge er i ligevægt med tyngdekraften virkende på vandsøjlen. Denne ligevægt kan udtrykkes

$$\text{kraft} = \text{kraft}$$

$$\text{kontaktlængde} \times \text{overfl.spænding} = \text{vandmasse} \times \text{tyngdeacceleration}$$

$$\text{omkreds} \times \text{overfl.spænding} = \text{areal} \times \text{højde} \times \text{massefylde} \times \text{tyngdeacc.}$$

$$2\pi r\sigma = \pi r^2 \rho g, \quad (2)$$

hvor r = kapillarrørets radius [L]

σ = overfladespænding [$M \cdot T^{-2}$]

ρ = vandets massefylde [$M \cdot L^{-3}$]

g = tyngdeaccelerationen [$L \cdot T^{-2}$]

z = vandsøjleens højde [L]

Kontaktvinklen mellem vand og kapillarrørets vægge er antaget at være nul.

Ligning (2) kan omskrives til

$$z = \frac{2\sigma}{r\rho g} \quad (3)$$

Indsættes i (3) $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$ (20°C), $\sigma = 0,07275 \text{ N/m}$ (20°C) og $g = 9,816 \text{ m/s}^2$, fås følgende sammenhæng mellem z og r (z i cm, r i μm):

$$z = 1485/r \quad (4)$$

eller tilnærmet, med diameter i stedet for radius:

$$z = 3000/d \quad (5)$$

Ligning (5) udtrykker en ofte anvendt sammenhæng mellem afdræningspotentialt og største vandfyldte pore i en jord.

Vandpotentialt kan udtrykkes ved en række synonyme enheder. Enheden "længde af vandsøjle" anvendes ofte p.g.a. den direkte relation til de kapillære kræfter i jorden. Schofield (7) har foreslået betegnelsen p_f som logaritmen til det negative vandpotentialt udtrykt i cm vandsøjle.

I SI-systemet* er den korrekte enhed for vandpotentialt Joule/m^3 , som er ækvivalent med trykenheden Pa (N/m^2). Sidstnævnte betegnelse er ikke helt i overensstemmelse med definitionen af et potentialt (energitalstand), men er den af de mulige SI-afledede enheder, som oftest anvendes i international litteratur.

*Système International d'Unités. System af enheder baseret på de 7 grundlæggende enheder meter, kilogram, sekund, Ampere, Kelvin, candela, mol. Anbefalet af Conférence Générale des Poids et Mesures, 1960.

Enheden "længde af vandsøjle" er reelt et volumen pr. fladeenhed (jvf. ligning (2)). Omregning fra vandsøjle til SI-enheden foretages derfor med formlen

$$\psi_m (\text{hPa}) = 0,980 \cdot \psi_m (\text{cm v.s.}) \quad (6)$$

hvor omregningsfaktoren repræsenterer konvertering fra "volumen pr. areal" over "masse pr. areal" til "kraft pr. areal".

Anvendelsen af hPa (hekto Pascal) frem for Pa letter sammenligningen til tidligere anvendte potentialenheder, idet potentialets talværdi derved omtrent svarer til cm v.s.

De i praksis anvendte potentialmålere er trykmålere med enheder som f.eks. kp/cm^2 , bar, psi eller cmHg.

I tabel 1 er for en række ofte anvendte afdræningsniveauer vist sammenhørende værdier af ækvivalent porediameter og potentiale udtrykt ved forskellige enheder.

I de følgende afsnit er fortrinsvis anvendt potentialenheden hPa.

Tabel 1: Sammenhørende værdier af ækvivalent porestørrelse og afdræningspotentiale
=====

Porediameter	Afdræningspotentiale, numerisk værdi						
	cm v.s.	pF	hPa	bar	kp/cm ²	psi*	cm Hg
1200	2,5	0,40	2,5	0,003	0,003	0,036	0,18
300	10	1,00	9,8	0,010	0,010	0,142	0,74
188	16	1,20	15,7	0,016	0,016	0,228	1,18
60	50	1,70	49,0	0,049	0,050	0,711	3,68
40	75	1,88	73,5	0,074	0,075	1,066	5,52
30	100	2,00	98,0	0,098	0,100	1,421	7,36
18,8	160	2,20	157	0,157	0,160	2,28	11,77
15	200	2,30	196	0,196	0,200	2,84	14,71
6	500	2,70	490	0,490	0,499	7,11	36,71
1,9	1600	3,20	1568	1,568	1,597	22,74	117,5
0,20	15306	4,18	15000	15,00	15,28	217,6	1124
0,19	15849	4,20	15530	15,53	15,82	225,2	1164

*psi = pound-force pr. square inch

Anvendte konstanter:

Lyngdeaccelerationen = $9,816 \text{ m/s}^2$

Vands massefylde (20°C) = $998,2 \text{ kg/m}^3$

Kviksølvs massefylde = $13593,9 \text{ kg/m}^3$

1 bar = $14,504 \text{ psi}$

3. Konstruktion og opbygning af udstyr

Som tidligere nævnt kan afdræningspotentialiet etableres ved hængende vandsøjle, hvor der er direkte forbindelse mellem jordvand og vandet i drænsystemet helt frem til målepunktet, eller ved brug af en pneumatisk trykforskel (vakuum eller overtryk).

Systemet med hængende vandsøjle samt vakuum kan anvendes for potentialer mellem 0 og ca. -700 hPa. Hængende vandsøjle bruges af praktiske grunde dog sjældent ud over -100 hPa.

Overtryk kan anvendes i hele potentialintervallet fra 0 til -15000 hPa. Ved lave tryk kræves dog præcisionsudstyr til trykregulering.

Valg af afdræningsmetodik afhænger af kapacitetskrav, krav til målenøjagtighed og mulighed for at lave egne konstruktioner.

I det følgende beskrives udstyret, som er opbygget, og som det anvendes ved Institut for jordbearbejdning og jordfysik (IJF).

3.1. Sandbokse

Til brug i potentialområdet 0 til -100 hPa kan med fordel anvendes sandbokse med hængende vandsøjle. Med dette udstyr opnås en stor kapacitet, idet sandboksene kan rumme et betragteligt antal prøver pr. afdræning. Endvidere undgås indirekte måling af potentialet.

I princippet består en sandboks af en beholder med et dræn nedlagt i fint sand. Drænet udmunder i en niveauflaske, hvis afstand under sandoverfladen kan reguleres.

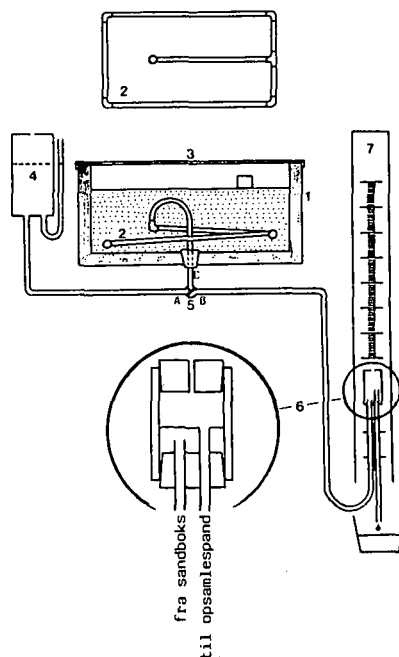
3.1.1. Opbygning af boksen

I figur 2 er skematisk vist, hvorledes et sandbokssystem er opbygget. Selve beholderen, figurens nr. 1, er en porcelænslaboratorievask med længde x bredde x højde = 610 x 450 x 250 (udvendige mål, mm). Drænet (2) er opbygget af 12 mm Ø PVC-rør. Samlinger er limet med 2-komponent Araldit. På undersiden af rørene er med ca. 10 mm afstand boret 1 mm huller. Før nedlægning i boksen er rørsystemet endvidere omvundet med et finmasket syntetisk klæde (som filtermateriale mod

sandindtrængen). Bemærk, at drænsystemet er konstrueret og nedlagt således, at eventuel luft vil blive "fanget" i den smalle udløbsslange, hvorfra den nemt kan fjernes ved vandgennemstrømning.

Som værn mod fordampning fra prøver og sandoverflade under afdræning er konstrueret et låg (3) til boksen. Materialet er en PVC-plade, 5 mm. På undersiden er klæbet et lag 10 mm skumgummi, som - svagt opfugtet - næsten fuldstændig hindrer fordampning fra systemet.

Figur 2: Sandboksudstyrets opbygning.
 ===== Skematisk. Se tekst for forklaring af detaljer.



3.1.2. Vandreguleringssystem

Af figur 2 fremgår, hvorledes drænsystemet i sandboksen med en tregangshane (5) er forbundet med dels en beholder med vand (4), dels en regulerbar niveauflaske (6). Beholderen (4) er konstrueret af et rektangulært PVC-rør med dimensionerne 200 x 100 mm, udskåret i længden 460 mm. Beholderens tværsnitsareal (vandoverflade) skal udgøre ca. 25 % af sandoverfladen i boksen for at kunne levere en tilstrækkelig vandmængde under opfugtning. Tregangshanen er af glas med boring 2,5 mm og konisk, massiv haneprop. Denne skal være omhyggeligt indsmurt i hanefedt.

Niveaubeholderen (6) er placeret på et rektangulært aluminiumrør (7), 50 x 30 mm, gods 2,5 mm, med indfræsning, som gør det anvendeligt som glide-skinne ved den variable placering af slangeudløbet. Selve niveaubeholderen er fremstillet af et rør af klar PVC, 30 mm diameter, og med til- og fraløb i form af små stålrør, se figurens fremhævede detailbillede.

3.1.3. Sortering af sand

Porerne mellem sandkornene i boksen skal være så små, at de kan tilbageholde vand ved det laveste potentiale, der ønskes anvendt med boksen. Med 100 cm som største afdræningshøjde kræves derfor porediameter under 30 μm (tabel 1).

Dette vil kunne opnås med et meget finkornet materiale. Samtidig kræves en god hydraulisk ledningsevne i sandmassen.

Stakman et al. (8) anvendte sand med 77 % partikler mellem 35-50 μm og mindre end 1 % større end 75 μm . Hall et al. (2) anfører, at en samling af sandpartikler i størrelsen 60-100 μm kan tilbageholde vand til potentialer under -100 hPa.

For at frembringe et produkt med de ønskede egenskaber gennemførtes ved IJF følgende sorteringsprocedure.

Som udgangsmateriale anvendtes undergrundssand, 60-90 cm dybde, fra et areal ved Højer forsøgsstation. Hansen (4) fandt, at 89,2 % af dette materiale udgøres af sand mellem 20-200 μm .

Jorden blev dispergeret i 2-3 minutter i en tynd opløsning af natriumpyrofosfat (ca. 0,004 M $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$). Da en meget stor sandmængde skulle behandles på denne måde (ca. 200 kg færdigt sand blev behandlet), blev der fremstillet en stor "dispergeringsmølle" til montering på boremaskine. Behandlingen foretoges i en 20 liter spand med ca. 1 kg jord i arbejde pr. dispergering.

For at befri materialet for partikler større end 100 μm anvendtes sedimentation med fjernelse af den øverste del af opslemningen (den brugbare del) med hævert (i princippet som Andreasens pipette-apparat). Sedimentationstid blev beregnet fra Stokes lov. En vakuumpumpe med et ca. 100 liter kammer som mellemled sikrede en hurtig overførsel af materialet.

Fjernelse af ler- og siltpartikler skete ved gentagen opslemning, sedimentation og anvendelse af hævert i selve opsamlingskarret (200 liter olietønde).

Med den her beskrevne procedure opnåedes et materiale med partikelstørrelsesfordelingen vist i tabel 2. I tæt lejring er dette sand i stand til at tilbageholde vand ved potentialer lidt under -100 hPa.

Tabel 2: Partikelstørrelsesfordeling for sand anvendt i sandbokse
=====

	Partikelstørrelse, μm					
	< 2	2-20	20-63	63-125	125-200	> 200
% i fraktionen	1,5	0,5	16,6	79,8	0,9	0,7

3.1.4. Nedlægning af sand i boksen

Den frasorterede, lidt grovere sandfraktion er nedlagt i bunden af boksen omkring drænene for at optimere den hydrauliske ledningsevne. Dette materiale er i det aktuelle tilfælde også relativt finkornet (kun 0,9 % partikler større end 200 μm).

Ved nedlægning af sand - især den øverste finsandede fraktion - er det meget vigtigt at sikre en tæt, fast lejring. Dette opnås ved at foretage ilægningen lagvis og endvidere slemme sandet op i vand, som - efter fordeling af sandet over fladen - suges delvis ud med en vakuumpumpe gennem boksens drænsystem.

Der fyldes sand i boksen op til ca. 5-6 cm fra kanten (afhængig af størrelse af prøveringe, der ønskes anvendt i boksene). Afslutningsvis nivelleres overfladen, og luft, der måtte være indespærret i "lommer" i sandmassen, drives ud ved gentagne opmætninger (tregangshane i figur 2 i position A-C) og afdræninger (hane i position C-B). Under disse afdræninger tilsluttes udløbet en vakuumpumpe (NB: dette må kun ske med en fri vandoverflade over sandet i boksen).

For at hindre forstyrrelse af lejringen i sandet samt forurening med jord fra prøverne anbringes et finmasket syntetisk klæde på sandoverfladen.

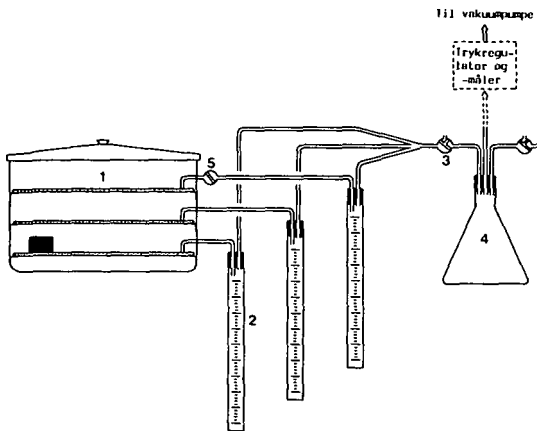
3.2. Vakuumsystem

Flere af komponenterne, som indgår i dette system, er kommercielt tilgængelige. Detaljer vedrørende udstyret kan fås ved henvendelse til IJF.

I potentialintervallet -100 til -700 hPa er anvendelse af hængende vandsøjle upraktisk. Endvidere kræves som afdræningsmedium et mere finporet materiale, end det er muligt at opnå med egne konstruktioner.

Ved IJF anvendes et system af gryder med keramiske plader tilsluttet en vakuumpumpe via et trykregulerings- og målesystem. I figur 3 er skematisk vist den anvendte opstilling.

I stedet for sand som understøttelsesflade og medium for borttransport af vand anvendes ved vakuumsystemet keramiske plader med en porekarakteristik, som tillader anvendelse i hele vakuumområdet. Pladerne er på undersiden beklædt med en gummikappe, hvilket muliggør etablering af trykgradienten på tværs af pladen. På figur 3 er vist, hvorledes 3 plader er anbragt over hinanden i en gryde



Figur 3: Vakuumsystemets opbygning. Skematisk.
 ===== Se tekst for forklaring af detaljer.

(nr. 1 på figuren). Denne er en almindelig trykkogegyde af aluminium, dog naturligvis forsynet med nødvendige udboringer og påmonteringer samt med lågets underside beklædt med et porøst syntetisk materiale, som i fugtig tilstand hindrer fordampning fra prøver og plader. Hver enkelt plade har forbindelse til vakuumsystemet. Afdræningsvandet ledes til opsamlings-/måleglas (2), hvor det registreres, når afdræning er ophørt (ligevægt i systemet).

Vakuum til et sæt af plader i en gryde etableres gennem en tregangshane (3), som samtidig muliggør afkobling af en gryde uden forstyrrelse af mulige andre i funktion. Udover funktion som forgreningspunkt tjener kammeret (4) som en sikkerhedsopsamling for afdræningsvand (ved uforudset fyldning af måleglassene). Hanen (5) muliggør afmontering af den øverste plade i gryden uden tab af vakuum på de to nederste, hvilket har betydning ved tidskrævende målinger på prøverne (ved afkobling af vakuum før prøverne fjernes fra pladerne, kan der strømme vand tilbage fra pladen til prøverne).

Regulering og måling af vakuum kan i dag foretages med membranventiler henholdsvis membrantrykålere. Ved IJF haves eet sådant system samt to systemer med anvendelse af en kviksølv søjle i forbindelse med en porøs keramisk kop som ventil. Systemerne vil ikke blive nærmere beskrevet her.

3.3. Overtrykssystem

De fleste komponenter, som omtales i dette afsnit, er kommercielt tilgængelige. Detaljer vedrørende udstyret kan fås ved henvendelse til IJF.

En sammenhængende vandsøjle kan maksimalt hænge ca. 8-9 meter, før den brydes (kogning). Derfor må der anvendes overtryk ved afdræning til potentialer under ca. -900 hPa. Ved IJF anvendes udstyr, som kun er ganske svagt modificeret i forhold til fabrikantens rekommandationer.

Til levering af overtryk bruges en kompressor, idet et system med trykflaske meget hurtigt taber trykket (trykregulatorer lækker til stadighed luft under funktion).

Systemet kan i øvrigt sammenlignes med vakuumsystemet, idet der også her er tale om "gryder" med plads til 3 (evt. 4) plader. Gryderne er imidlertid i kraftig udførelse, og låget boltes fast. Der fås keramiske plader med forskellig porekarakteristik. En 1-bar plade (fabrikantens specifikationer) er i praksis i stand til at tilbageholde vand op til 1,6 bar overtryk. Dette har betydning ved valg af plade, idet 1-bar pladen har en større hydraulisk ledningsevne end tættere plader.

Ved overtrykssystemet følges afdræningsforløbet ved simpel iagttagelse af udstrømning fra pladen.

4. Brug af udstyret

4.1. Jordprøverne

Jordens struktur (lejring) har i sagens natur stor betydning for porestørrelsesfordelingen. Især de store porer påvirkes af strukturen. Forholdet har altså størst betydning ved høje afdræningspotentialer. Derfor bør der så vidt muligt anvendes jordprøver udtaget i naturlig lejring.

Afstrømningstiden fra en jordprøve stiger med kvadratet på prøvehøjden. Ved lave afdræningspotentialer kan tidsforløbet for opnåelse af ligevægt være betragteligt (se afsnit 5: Afprøvning af udstyr). Derfor kan det være nødvendigt at anvende små (lave) prøver ved disse afdræninger. Jordprøver med forholdet højde/diameter mindre end 1/3 er imidlertid i praksis problematiske at udtage, hvorfor der oftest anvendes løs jord ved lave afdræningspotentialer.

Udover ovennævnte problematik afhænger valg af dimensioner for prøveringe af en række forhold, som ikke skal omtales nærmere her. Ved IJF anvendes messingringe med indre diameter 61,0 mm, højde 34,22 mm og godstykkelse 1,25 mm. Dette giver et prøvevolumen på 100,0 cm³. Prøverne udtages i felten ved nedhamring med specialkonstrueret flange. Under transport og opbevaring beskyttes mod udtørring og mekanisk forstyrrelse ved hjælp af plastlåg. I tidsrummet mellem udtagning og analyse sker opbevaring ved ca. 5° C i køleskab.

4.2. Opfugtning

Uanset, ved hvilket afdræningsniveau en prøve ønskes analyseret, kræves, at der først sker en total vandmætning. Dette skyldes hysteresefænomener, som alternativt ville kunne give fejlagtige resultater afhængig af prøvens forhistorie i felten.

Ved IJF opfugtes prøverne med almindeligt grundvand fra boring. Vandmætningen foretages ideelt i sandboks, som giver gode muligheder for langsom opfugtning med indlejring af vand alene fra bunden af prøven. Endvidere er prøverne straks klar til afdræning ved det potentiale i sandboksens område, der måtte ønskes. Ved IJF forløber opfugtningsproceduren i 2-10 dage afhængig af prøvernes vandindhold ved udtagning samt afhængig af jordtype. Ved afbrydning af opfugtningen er vandniveauet 5 mm under prøvens overkant.

En sammenlignende undersøgelse mellem flere laboratorier af analyseproceduren ved afdræning af jordprøver har vist, at en mindre vandstand under opfugtning kan give betragtelige fejl ved bestemmelse af vandindhold ved de højeste potentialer (B. Hansen, pers. medd.).

Den her beskrevne procedure giver en god vandfyldning af porerne i jorden og giver ikke problemer med kvældning for normale danske mineraljorde, hvilket kan være et problem ved opfugtning under vakuum.

4.3. Afdræning i sandboks

Til understøttelse af jorden under transport mellem afdræningsudstyr og vægt/jordfysisk måleudstyr anvendes ved IJF et finmasket syntetisk klæde.

Med de tidligere beskrevne dimensioner for bokse og prøveringe kan der placeres i alt 36 prøver pr. boks. Såfremt prøverne har været igennem initialopfugtningen, som beskrevet tidligere, og der blot skal etableres kapillær kontakt

mellem afdræningssystem og prøve, reduceres vandtilledningen til få millimeters vandstand.

Dernæst kan afdræningen begynde. Efter indstilling af niveauflaske ved ønsket potentiale drejes tregangshænen i figur 2 i position C-B. Tidsforløb til ligevægt er 1-3 døgn afhængig af potentiale og jordtype.

Ved IJF har vi valgt at definere nulpunkt for afdræning ved et niveau midt for prøven i boksen. Med de anvendte ringe svarer dette til 17 mm over sand-overfladen.

4.4. Afdræning i trykssystemerne

De keramiske plader i såvel vakuum- som overtrykssystemer har en dimension, som tillader placering af i alt 12 stk. af de aktuelle prøver pr. plade. Det betyder, at der pr. gryde kan arbejdes med 36 prøver svarende til sandboksens kapacitet.

På de keramiske plader sikres kapillær kontakt mellem plade og prøve ved brug af kvartsmel - et finkornet, ensartet materiale, som forhandles kommercielt. Før start af afdræning tilledes vand til pladen med sprøjteflaske.

Afdræningstid for opnåelse af ligevægt er eksempelvis 1-3 uger ved afdræningspotentialerne -160 og -500 hPa med vakuumsystemet og 3-8 uger ved potentialer -500 og -1600 hPa med overtrykssystemet. Se nærmere omtale af afdræningstider i næste afsnit.

Ved potentialet -15000 hPa anvendes ved IJF løs jord i små PVC-ringe, højde 15 mm. Ved dette system anvendes ikke kvartsmel, og jorden fyldes direkte i prøveringene på pladerne, ligesom total vandmætning sker her. Derudover er proceduren som tidligere beskrevet.

5. Afprøvning af udstyr

5.1. Kontrol af afdræningspotentialer

Sandbokse kan kontrolleres for korrekt afdræningspotentialer ved at anbringe minitensiometre i jordprøver, som er placeret til afdræning i boksene.

Undersøgelser ved IJF har vist, at det matriske potentialer bestemt med tensiometre i prøverne ved en tilsigtet afdræning på -100 hPa afviger mindre end

1,5 % fra det ønskede potentiale. I betragtning af usikkerhed i forbindelse med placering af tensiometerkop samt aflæsningsusikkerhed (kviksølv søjle) betragtes dette som en rimelig nøjagtighed.

Udover denne prøve kan afdræningsudstyret kontrolleres ved krydstest, dvs. afdræning af samme prøve i flere bokse eller trykssystemer ved samme potentiale. En tredje kontrolforanstaltning, som af og til anføres som en mulighed, er brug af en porøs sandsten eller lignende med en uforanderlig porestørrelsesfordeling. Ved IJF er vi meget tilbage fra denne mulighed p.g.a. frygt for, at kalkaflejringer eller andet i prøveklodsens vil ændre det "uforanderlige".

5.2. Ligeveghtsindstilling ved lave potentialer

Som tidligere nævnt er afstrømning til ligevegt tidskrævende for afdræningspotentialer mindre end ca. -500 hPa. Kapacitetshensyn kan begrunde afbrydelse af afdræning, før total ligevegt er opnået.

For at undersøge, hvor stor en fejl der vil blive begået med denne fremgangsmåde, er der udført eksperimenter, hvor afdræningen registreredes kvantitativt som funktion af tiden. Undersøgelserne giver endvidere basis for at vurdere muligheden for beregning af den sandsynlige totaludstrømning ud fra registrering af startafdræningen.

5.2.1. Eksperiment

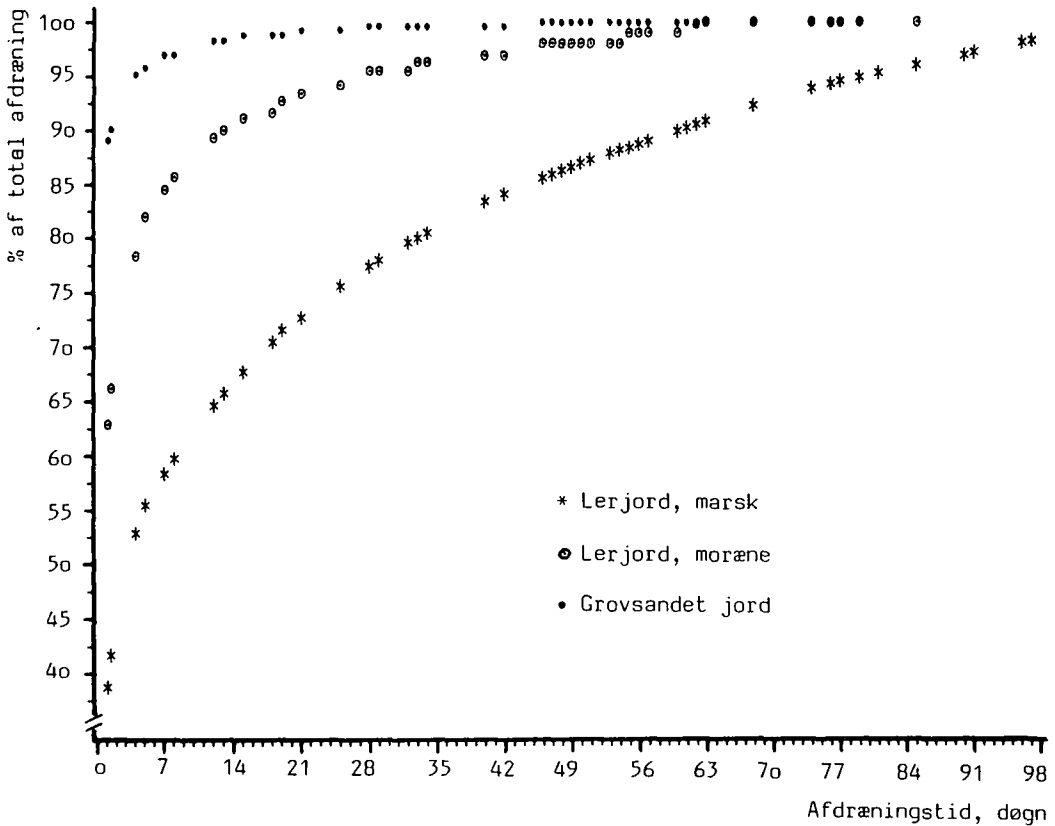
Målingerne blev foretaget for tre jordtyper: en grovsandet jord, en morænelerjord samt en lerjord fra marsken. De undersøgte afdræningspotentialer er -500 hPa og -1600 hPa. Alle eksperimenter blev foretaget med overtrykssystemet.

Fra hver afdræningsplade (med 12 stk. 100 cm³ prøver fra hver jordtype) opfangedes afdræningsvandet i en Erlenmeyerkolbe.

Ved hjælp af tørret CaCl₂ (uden hydratvand) placeret i afgangshanen fra kolben blev forhindret enhver form for tab af vand fra systemet. Vægtforøgelsen i en blindkolbe med CaCl₂ muliggjorde korrektion for optagelse af luftens vanddampe i det tørrede CaCl₂. Kolberne vejedes med jævne mellemrum. I det første døgn efter pålægning af tryk blev vejet $\frac{1}{2}$, 2, 8 og 24 timer efter start. Dernæst hver eller hveranden dag, indtil ligevegt var opnået.

5.2.2. Resultater

I figur 4 er afdræningen fra prøverne ved -1600 hPa afbildet som funktion af tiden. Bemærk de store forskelle mellem jordtyper. For den grovsandede jord afdrænes 97 % af vandindholdet mellem vandmætning og -1600 hPa-potentialet i løbet af den første uge. På dette tidspunkt har jordene med større lerindhold kun afgivet 58 henholdsvis 85 % af vandet.

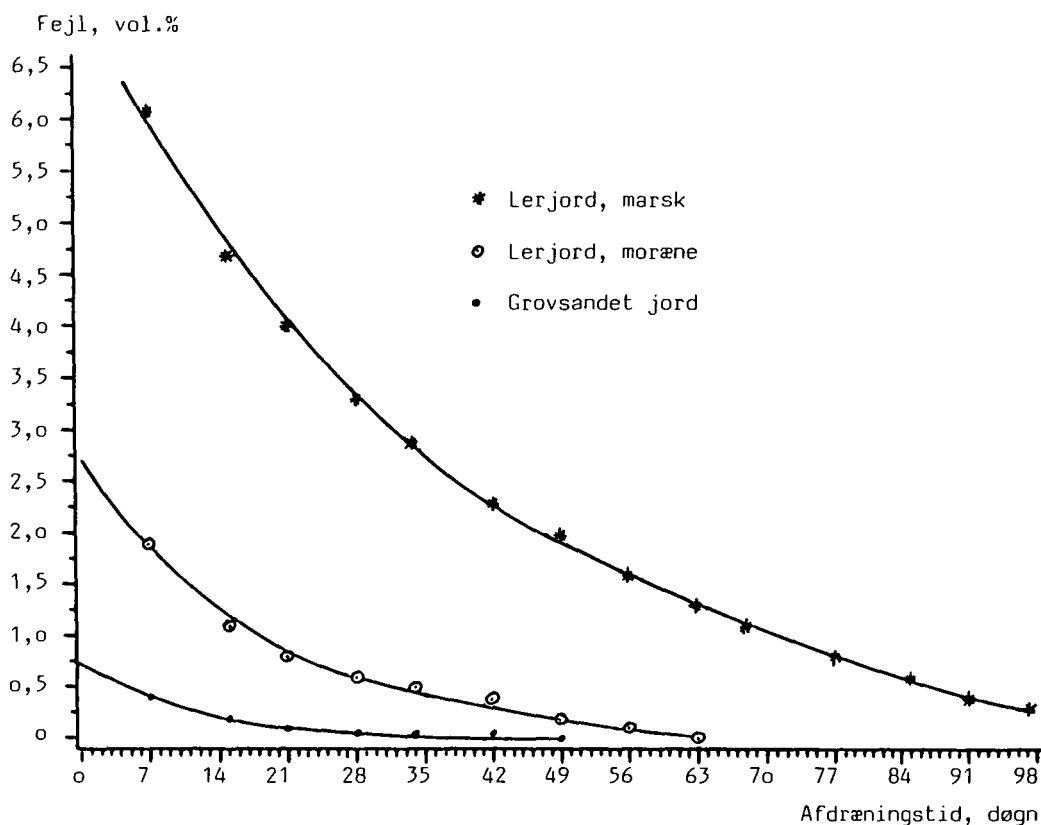


Figur 4: Afdræning ved -1600 hPa for 3 jordtyper

=====

I figur 5 er vist den absolutte fejl i volumenprocent vand, der begås ved afbrydning af afdræning på forskellige tidspunkter, før ligevægt er opnået. De sande værdier for de tre jordes vandindhold ved det aktuelle potentiale er 30,0 %, 25,3 % samt 7,8 % for henholdsvis marsklerjorden, morænelerjorden og den grovsandede jord.

Figur 5 viser, at der for de svære jorde vil blive begået en ikke uvæsentlig fejl ved afbrydning af afdræning efter f.eks. 2-3 uger. Det bør dog bemærkes, at den ekstremt lange afdræningstid for marskjorden er noget længere end normalt for jordtypen.



Figur 5: Fejl i estimat for volumenprocent vand ved afbrydning af afdræning før
===== ligevægt ved -1600 hPa

5.2.3. Beregnet afdræningsmængde

Enhver vurdering af nøjagtighed i en måling må naturligvis baseres på afvejn timer af ønskelig præcision mod kapacitetshensyn. Såfremt et stort antal prøver skal analyseres med måleproceduren ved de lave potentialer, eller man ønsker at reducere tidsforbruget til bestemmelserne, kan der foretages beregninger over forventet total-udstrømning på grundlag af den første tids udstrømning. Dette forudsætter således måling af udstrømmet vandmængde. Beregningerne baserer sig på ligninger til beskrivelse af afdræningsforløbet fra jordprøver efter etablering af et konstant afdræningspotential. Sådanne relationer er opstillet af bl.a. *Rijtema* (6).

Afprøvning af en beregningsmetode på datamaterialet fra den aktuelle undersøgelse viste dårlig korrelation til de eksperimentelt bestemte værdier for totaludstrømning. Såfremt en beregning baseredes på de første 20 dages afdræning ved -1600 hPa, fandtes estimerede værdier for ligevægtsvandmængden på 84, 95 og 98 % af målte værdier for henholdsvis marsklerjorden, morænelerjorden og den grovsandede jord. Da det netop er for lerjordene, det ville være mest relevant at bruge en beregningsmetode, må det konkluderes, at fremgangsmåden ikke synes pålidelig. Da metoden i øvrigt er mere arbejdskrævende (bestemmelse af udstrømmet vandmængde samt beregningsarbejde) end afventen af ligevægt, kan kun et meget stort kapacitetsbehov motivere en procedure af denne art.

5.3. Jordprøvernes stabilitet

Bestemmelse af en række punkter på retentionskurven indebærer gentagne opfugtninger af prøverne. Hertil kommer transport til og fra vægt og eventuelt et måleinstrument (f.eks. bestemmelse af luftskifteforhold ved forskellige vandindhold). Denne proces kunne tænkes gradvis at ødelægge jordstrukturen med en ændret porestørrelsesfordeling til følge.

Tabel 3 viser resultatet af et forsøg med 6 gentagne opmætninger og afdræninger af jordprøver. De ikke viste afdræninger skete til -100 hPa. Resultaterne viser, at lerjordene har modstået behandlingen praktisk taget uden ændring

af de store porer i jorden. For sandjordens vedkommende synes der at være et henfald af nogle af de store porer med et mindre vandindhold ved -10 hPa til følge. Dette resultat er dog sandsynligvis påvirket af, at transport mellem afdræningsudstyr og vægt i dette tilfælde ved alle 6 afdræninger er sket med jordprøver med et ret højt vandindhold, i hvilken tilstand jordens struktur er svag. Generelt må resultaterne i tabel 3 betyde, at jordprøver udtaget i naturlig lejring kan køres gennem en række afdræninger uden væsentlig påvirkning af porositetsforholdene.

Tabel 3: Stabilitet af prøver ved gentagne opmætninger og afdræninger.
 ===== Vandindhold ved -10 hPa. Gennemsnit af 12 prøver pr. jordtype

Afdræning nr.:	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>6</u>
Lerjord, marsk	33,43	33,45	33,31
Lerjord, moræne	40,94	41,03	40,69
Grovsandet jord	37,26	37,21	33,67

6. Sammenfattende vurdering

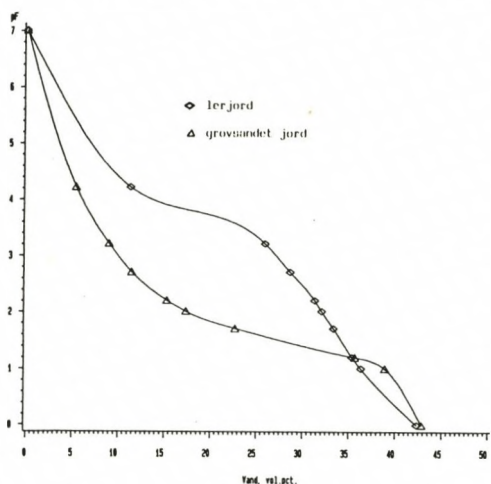
Bestemmelse af volumetrisk vandindhold i jordprøver ved et givet vandpotentialle kræver anvendelse af specialudstyr. For potentialintervallet -100 til -15000 hPa findes kommercielt tilgængeligt udstyr. Nøjagtige målinger i potentialområdet 0 til -100 hPa kan bedst udføres med et målesystem med hængende vandsøjle. Sandbokse betjener sig af dette princip og giver samtidig en stor målekapacitet.

Der kan ikke siges noget generelt om nødvendigt antal fællesprøver ved bestemmelse af volumetrisk vandindhold i jord. Metodeusikkerheden er væsentligt mindre end variationen mellem jordprøver i naturlig lejring. Antallet af fællesprøver kan derfor bestemmes ved vurdering af tilladelig variation på det estimerede gennemsnit alene ud fra jordvariationen.

Der må tilrådes afventen af ligevægt i afdræningssystemet, idet afbrydelse af afdræning, før alt vand er afgivet, kan give væsentlige fejl i beregnede værdier for volumetrisk vandindhold ved et givet potentiale.

Nødvendig afdræningstid afhænger af målesystem, prøvehøjde, jordtype og potentiale. Nedenstående vejledende værdier angiver omtrentlig tidsforbrug ved afdræning ved forskellige potentialer med jordprøvehøjden 34,2 mm. Forskellen i værdien for afdræningstid ved -500 hPa i de 2 afdræningssystemer kan henføres til forskelle i de anvendte keramiske plader.

Potentiale		Afdrænings- system	Typisk afdræningstid, døgn	
hPa	pF		moræneler jord	sandjord
- 10	1,0	sandboks	1	1
- 50	1,7	-	2	1
- 100	2,0	-	3	2
- 160	2,2	vakuum	14	7
- 500	2,7	-	18	14
- 500	2,7	overtryk	20	18
-1600	3,2	-	60	30



Figur 6: Eksempel på retentionskurver
=====

Resultaterne fra afdræninger ved flere potentialer kan fremstilles direkte i form af retentionskurven, som afbilder potentialer i jordvandet som funktion af volumetrisk indhold i jorden, figur 6. Ved denne fremstillingsmåde anvendes her i landet ofte den logaritmiske potentialenhed pF , hvilket muliggør overblik over et stort potentialområde i een figur.

Er jordens totale porerumfang beregnet ud fra tør volumenvægt og reel massefylde for jorden, kan denne værdi eventuelt afsættes ved pF 0 eller -1, som reelt svarer til afdræninger på 1 henholdsvis 0,1 cm v.s.

Ønskes retentionskurven ekstrapoleret til ekstremt lave potentialer, indtegnes konventionelt punktet (potential, vandindhold) = (pF 7, 0). Potentialet pF 7 svarer til et relativt damptryk over jorden meget nær nul. Dette vil aldrig forekomme under naturlige forhold, idet planternes visnegrænse svarer til potentialet ca. -15000 hPa $\approx pF$ 4,2.

Der findes andre og mere nuancerede måder at fremstille resultaterne på. Ved IJF anvendes den fundne porestørrelsesfordeling således ofte i tilknytning til andre jordfysiske målinger.

7. Erkendtlighed

Landbrugstekniker *Bernd Carstensen* har bidraget væsentligt ved opbygning og indkøring af afdræningssystemerne og forestår endvidere tilsyn og analysearbejde med apparaturet.

8. Litteratur

1. Aslyng, H. C. 1976. Klima, jord og planter. DSR forlag. KVL. 368 pp.
2. Hall, D. G. M., Reeve, M. J., Thomasson, A. J. & Wrigth, V. F. 1977. Water retention, porosity and density of field soils. Soil Survey Technical Monograph No. 9. Harpenden. 75 pp.
3. Hansen, L. 1962. Retentionskurver og porestørrelsesfordeling i nogle danske jorder. Licentiatafhandling, Hydroteknisk Laboratorium, KVL. 72 pp.
4. Hansen, L. 1976. Jordtyper ved statens forsøgsstationer. Tidsskr. Planteavl 80, 742-758.
5. Rasmussen, K. J. 1976. Jordpakning ved færdsel om foråret. II. Jordfysiske målinger. Tidsskr. Planteavl 80, 835-856.
6. Rijtema, P. E. 1959. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data with non-negligible membrane impedance. Neth. J. Agric. Sci. 7, 209-215.
7. Schofield, R. K. 1935. The pF of the water in soil. Trans. 3rd. Intern. Congr. Soil Sci. 2, 37-48.
8. Stakman, W. P., Valk, G. A. & van der Harst, G. G. 1969. Determination of soil moisture retention curves. I. sand-box apparatus, range pF 0 to 2.7. Inst. f. Land and Water Management Research.
9. Weast, R. C. (ed.) 1976. Handbook of chemistry and physics. 57th edition.

Institutter m.v. under Statens Planteavlfsforsøg

Sekretariatet

Statens Planteavlfskontor, Kongevejen 83, 2800 Lyngby	(02) 85 50 57
Informationstjenesten, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby	(02) 87 53 27
Dataanalytisk Laboratorium, Lottenborgvej 24, 2800 Lyngby	(02) 87 06 31
Sekretariatet for Sortsafprøvning, Tystofte, 4230 Skælskør	(03) 59 61 41
Statens Bisygdomsnævn, Kongevejen 83, 2800 Lyngby	(02) 85 62 00
Jordbrugsmeteorologisk Tjeneste, Forsøgsanlæg Foulum, 8833 Ørum Sønderlyng	(06) 65 25 00

Landbrugscentret

Statens Forsøgsstation, Ledreborg Allé 100, 4000 Roskilde	(02) 36 18 11
Statens Forsøgsareal, Bornholm, Rønnevej 1, 3720 Åkirkeby	(03) 97 53 10
Statens Biavlfsforsøg, Ledreborg Allé 100, 4000 Roskilde	(02) 36 18 11
Statens Forsøgsstation, Rønhave, 6400 Sønderborg	(04) 42 38 97
Statens Forsøgsstation, Tylstrup, 9380 Vestbjerg	(08) 26 13 99
Statens Forsøgsstation, Tystofte, 4230 Skælskør	(03) 59 61 41
Institut for Grovfoder, Forsøgsanlæg Foulum, 8833 Ørum Sønderlyng . .	(06) 65 25 00
Statens Forsøgsstation, Borris, 6900 Skjern	(07) 36 62 33
Statens Forsøgsstation, Silstrup, 7700 Thisted	(07) 92 15 88

Statens Forsøgsstation, Askov, 6600 Vejen	(05) 36 02 77
Statens Forsøgsstation, Lundgård, 6600 Vejen	(05) 36 01 33
Statens Forsøgsstation, 6280 Højer	(04) 74 21 04
Statens Forsøgsstation, St. Jyndeved, 6360 Tinglev	(04) 64 83 16
Statens Planteavlfs-Laboratorium, Lottenborgvej 24, 2800 Lyngby	(02) 87 06 31
Centrallaboratoriet, Forsøgsanlæg Foulum, 8833 Ørum Sønderlyng	(06) 65 25 00

Havebrugscentret

Institut for Grønsager, Kirstinebjergvej 6, 5792 Årsløv	(09) 99 17 66
Institut for Væksthuskulturer, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årsløv	(09) 99 17 66
Institut for Frugt og Bær, Kirstinebjergvej 12, 5792 Årsløv	(09) 99 17 66
Institut for Landskabsplanter, Hornum, 9600 Års	(08) 66 13 33

Planteværnscentret

Institut for Pesticider, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby	(02) 87 25 10
Institut for Plantepatologi, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby	(02) 87 25 10
Planteværnsafdelingen på »Godthåb«, Låsbyvej 18, 8660 Skanderborg . .	(06) 52 08 77
Institut for Ukrudtsbekæmpelse, Flakkebjerg, 4200 Slagelse	(03) 58 63 00
Analyselaboratoriet for Pesticider, Flakkebjerg, 4200 Slagelse	(03) 58 63 00