

Jordpakning ved færdsel om foråret*Soil Compaction by Traffic in Spring*

II. JORDFYSISKE MÅLINGER

*Soil Physical Measurements***Karl J. Rasmussen**

INDHOLDSFORTEGNELSE

	side
Resumé	836
Summary	836
1. Indledning	837
2. Forsøgsplan og jordtyper	837
3. Jordfysiske målinger	838
3.1. Porøsitetmåling	838
3.2. Retentionskurver	838
3.3. Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord	838
3.4. Skæremodstand	839
4. Resultater	839
4.1. Porøsitetmålinger	839
4.1.1. Forskelligt antal pakninger – markforsøg	840
4.1.2. Forskellige tryk på jordoverfladen – lysimeterforsøg	841
4.2. Retentionskurver og porestørrelsesfordeling	843
4.2.1. Forskelligt antal overkørsler – markforsøg	844
4.2.2. Forskelligt tryk på jordoverfladen – lysimeterforsøg	845
4.3. Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord	847
4.4. Skæremodstand	849
4.5. Aggregatstørrelsesfordeling	849
5. Diskussion	850
5.1. Jordfysiske målinger samt jordfugtighedens og klimaets indflydelse	850
5.2. Relationer mellem porøsitet, luftindhold og udbytte	853
5.3. Relationer mellem kvælstof, porøsitet, luftindhold og udbytte	854
6. Konklusion	854
7. Litteraturliste	856

Resumé

Forsøg med forskelligt antal pakninger med traktor under forskellige fugtighedsforhold er gennemført i markforsøg om foråret på vinterpløjet jord (se 1317. beretning). I lysimeteranlæg er der på de samme jordtyper anvendt forskelligt specifikt tryk på jordoverfladen under forskellige fugtighedsforhold.

Stigende antal pakninger med traktorhjul samt stigende specifikt tryk på overfladen reducerede pløjelagets porerumfang og luftindhold. Ændringerne var størst ved pakning under »våde« forhold, og virkningen af pakningen kunne måles igen efter høst i hele pløjelagets dybde.

Et specifikt tryk på 0,7 kg/cm² har sjældent reduceret jordens luftindhold til mindre end 11 vol.pct. på lerjordene. Et specifikt tryk på 1,0 kg/cm² har i mange tilfælde reduceret luftindholdet til mindre end 11 vol.pct. ved pakning under »våde« og »ideelle« forhold men i intet tilfælde under »tørre« forhold.

Det optimale porerumfang var på lerjorden ved Rønhave 41-44 vol.pct. og på lerjorden ved Højer 50-54 vol.pct., mens det optimale luftindhold begge steder var 11-15 vol.pct.

Det optimale pore- og luftindhold blev lavere desto større N-mængder, der blev givet.

Ændringer i jordens totale porerumfang betød, at porestørrelsesfordelingen ændredes, således at der med stigende pakningsgrad blev færre store drænbare porer og dermed ringere mulighed for et passende luftskifte og afdræning af overskudsvand.

Mindre ændringer i andelen af store porer betød store ændringer i jordens hydrauliske ledningsevne.

Skæremodstanden gav et udmærket relativt udtryk for jordens tæthed. Der var statistisk sikker sammenhæng mellem skæremodstand og porerumfang.

Nøgleord: Jordpakning, porøsitet, retentionskurver, hydraulisk ledningsevne, skæremodstand.

Summary

Experiments with different number of compactions by tractor wheels under different conditions of wetness in spring were carried out in the field on winterploughed soil (see 1317. report). On the same soil types as in the fields, lysimeter experiments were carried out with different specific pressure on the soil surface under different conditions of wetness.

Increased number of compactions by tractor wheels and increased specific pressure on the soil surface have reduced the pore- and air volume of the topsoil. The reductions were greatest after compaction under »wet« conditions, and the effect could be measured again after harvest in a depth of 14-18 cm.

A specific pressure of 0,7 kg/cm² has seldom reduced the air volume to less than 11 volume per cent in sandy loam soil and silty loam marsh soil. A specific pressure of 1,0 kg/cm² has in many cases reduced the air volume to less than 11 per cent after compaction under »wet« and »ideal« conditions, but in no cases after compaction under »dry« conditions.

The optimum pore volume in the sandy loam soil was 41-44 per cent and in the silty loam marsh soil 50-54 per cent, while the optimum air volume in both of the soils was 11-15 per cent.

The optimum pore- and air volume were lower the more nitrogen given.

Changes in the total pore volume has caused changes in the pore size distribution. Increased degree of compaction has caused a reduction in the part of large drainable pores and a rather small increase in the part of medium waterholding pores.

Small changes in the number of pores $> 30 \mu\text{m}$ has caused great changes in the hydraulic conductivity of saturated soil.

There was significant correlation between shear strength of the soils and the pore volume. Therefore shear strength is an excellent relative expression for the density of the soil.

Key words: Soil compaction, porosity, retention curves, hydraulic conductivity, shear strength.

1. Indledning

Færdsel på jorden med traktorer og tunge redskaber forårsager, at jordens porerumfang og luftindhold reduceres (Rasmussen 1973). Denne reduktion betyder, at andelen af store drænbare porer formindskes og andelen af mellemstore og fine, langsomt drænbare porer forøges, med deraf følgende lavere luftindhold og højere vandindhold (Eriksson et al. 1974, Krüger 1969).

Når andelen af drænbare porer reduceres, betyder det, at permeabiliteten for vand og luft formindskes (Kuntze 1965, Neuhaus 1963, Krüger 1969, Eriksson et al. 1974).

Ændringer i porestørrelsesfordelingen som følge af pakning bevirker, at andelen af porer, som er mindre end røddernes diameter, forøges, hvorved rodvæksten hæmmes (Eriksson et al. 1974).

Pakningsgraden afhænger af fugtigheden under færdsele. Den optimale pakningsgrad varierer med vejrforholdene. I tørre år er en temmelig hårdt pakket jord bedst, og i våde år er en løs jord bedst for plantevæksten (Eriksson et al. 1974).

Marken modstår normalt et tryk på 0,5-0,6 kg/cm² om foråret under såbedstilberedningen, inden der sker nogen nævneværdig pakning af jorden. Et traktorhjul med et lufttryk på 1,0 kg/cm² giver et tryk på ca. 1,2 kg/cm² (Håkansson 1967). Mange store gødningsspredere og transportvogne trykker ofte betydeligt mere. I Tyskland har Söhne (1953) fundet, at trykket går dybere i en våd end i en tør jord, og at et stort hjul med samme specifikke marktryk som et lille hjul vil pakke jorden dybere.

Jordpakning under pløjedybden kan ikke ophæves af vinterens frost. Ved pløjning sker der en løsnings og en forøgelse af de store

porer i pløjelaget. Pakningen kan forringe afdræningsforholdene, således at faren for overfladevand, slemning og skorpedannelse bliver større. Derved vanskeliggøres såbedstilberedningen, og såbedet bliver dårligere.

I nærværende beretning beskrives en række målinger af jordfysisk art, som er foretaget dels i markforsøg med jordpakning (1317. beretning) og dels i forsøg med jordpakning i lysimeteranlæg.

2. Forsøgsplan og jordtyper

Undersøgelserne er gennemført dels i de i 1317. beretning omtalte forsøg og dels i et lysimeteranlæg ved Højer med de samme jordtyper som i nævnte forsøg.

Muldlaget i lysimeteranlægget er 20 cm, og undergrunden er 80 cm.

Undergrundsgrunden er en blanding af underjord fra tilsvarende dybder i marken.

Vedrørende forsøgsplanen for markforsøget henvises til 1317. beretning. I lysimeteranlægget er undersøgelserne gennemført efter følgende plan:

- A. Pakning under »våde« forhold
- B. Pakning under »ideelle« forhold
- C. Pakning under »tørre« forhold

- 1. Ingen pakning
- 2. Pakning med 0,4 kg/cm²
- 3. Pakning med 0,7 kg/cm²
- 4. Pakning med 1,0 kg/cm²

Jorden i lysimeteranlægget blev efterårsgravet med spade til ca. 20 cm dybde, og forsøgsbehandlingerne gennemførtes om foråret.

Ved forsøgets anlæg blev 4 cm muldjord fjernet, inden pakningen gennemførtes med de foreskrevne tryk. Efter pakningen blev sånin-

Tabel 1. Teksturanalyse fra lysimeteranlægget
Analysis of texture in the lysimeter

			Humus	Ler	Silt	Fin sand	Grov sand
					0,02–	0,2–	2,0–
				<0,002	0,002	0,02	0,2
				mm	mm	mm	mm
Iynde vad	muldrag	<i>topsoil</i>	1,8	3	2	18	75
	undergrund	<i>subsoil</i>	1,1	3	1	19	76
Rønhave	muldrag	<i>topsoil</i>	2,1	13	17	49	19
	undergrund	<i>subsoil</i>	0,8	17	16	48	18
Højer	muldrag	<i>topsoil</i>	2,2	15	13	70	0
	undergrund	<i>subsoil</i>	1,1	17	11	71	0

gen gennemført, hvorefter de 4 cm jord igen blev lagt på.

Teksturanalyser af de tre jordtyper i lysimeteranlægget er vist i tabel 1.

3. Jordfysiske målinger

3.1. Porøsitetsmåling

Umiddelbart efter pakningens gennemførelse, i vækstperioden og efter høst blev der i både markforsøg og lysimeteranlæg udtaget jordprøver til porøsitetsmåling. Udtagningsdybden var 6–10 cm i marken og 4–8 cm og 14–18 cm i lysimeteranlægget. Enkelte år blev der udtaget prøver efter høst til bestemmelse af retentionskurver og måling af hydraulisk ledningsevne på vandfyldt jord.

3.2. Retentionskurver

Jordens totale vandindhold giver ingen oplysninger om jordvandets tilgængelighed og den for planterne tilgængelige vandmængde. Kurver, der viser sammenhæng mellem jordens vandindhold og vandets tilgængelighed, betegnes retentionskurver.

Retentionskurver er tillige summationskurver for vandmængde og porerørrelse, og poreradius kan beregnes.

$$pF = \log h = \log \frac{2c}{rgG},$$

hvor h = afsugningshøjden i cm vandsøjle

r = poreradius i cm

g = væskens massefylde i g/cm³

c = væskens overfladespænding i dyn/cm

G = tyngdeaccelerationen, cm/sec².

Indsættes værdierne ved 20° C og angives r i μm fås

$$pF = 3,2 \div \log r$$

hvoraf r kan beregnes (Aslyng 1968).

Jordprøver til bestemmelse af retentionskurver blev udtaget i naturlig lejring i 100 cm³-ringe, og i laboratoriet blev afsugning indtil pF 2,0 (÷ 100 cm vandsøjle) foretaget i sandbox efter princippet med hængende vandsøjle som beskrevet af *van der Harst* og *Stakman* (1965). Fra pF 2,2 til 4,2 anvendtes trykmembranapparat som beskrevet af Aslyng (1968). Ved pF 4,2 anvendtes løs jord. Alle målingerne gennemførtes med 9 fællesprøver.

3.3. Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord

Jordens evne til bortledning af vand afhænger af tekstur, struktur samt af poresystemets kontinuitet.

Den hydrauliske ledningsevne kan måles på flere måder (*Aslyng* 1968). I nærværende undersøgelse blev der målt hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord med konstant hydraulisk gradient. Udstyret, der blev anvendt, var i princippet som beskrevet af *Andersson* (1955). Målingerne er baseret på Darcys lov (*Darcy* 1856).

$$kf = \frac{Q}{F} \frac{1}{h} \frac{1}{t}, \text{ cm/sec.}$$

hvor Q = den gennemstrømmende vandmængde i cm³

F = jordprøvernes (cylinderens) tværsnit i cm²

l = jordprøvernes højde i cm

h = trykhøjde i cm

t = tiden i sec.

kf = hydraulisk ledningsevne i cm/sec., som kan omregnes til andre enheder, f.eks. mm/time, som det er gjort i denne beretning.

da $\frac{1}{F \cdot h} = i$ er konstant, kan formelen omskrives til

$kf = i \cdot \frac{Q}{t}$, hvor kun Q og t er variable.

Hastigheden, hvormed vandet ledes gennem jorden afhænger dels af strukturen og dels af den hydrauliske gradient $\frac{h}{l}$. Darcys lov er gældende for laminar strømning, som opnås når $\frac{h}{l} \leq 1$. I det anvendte udstyr er $\frac{h}{l} = \frac{3,9}{3,4} = 1,15$. Måling af hydraulisk ledningsevne

(kf) er forbundet med stor usikkerhed, selv ved analyse af et meget stort antal fællesprøver (Kuntze 1965, Neuhaus 1963).

Målingens værdi som mål for strukturen ligger i, at den er meget følsom over for strukturforandringer.

I nærværende undersøgelse anvendtes der 9 fællesprøver pr. forsøgsled pr. år. Prøverne blev udtaget efter høst.

3.4. Skæremodstand

Jordens tekstur og struktur er afgørende for dens sammenhængskræfter eller konsistens. Virkningen af sammenhængskræfterne i jorden afhænger stærkt af dens vandindhold.

Jordens konsistens er blandt andet af betydning for trækraftforbrug ved jordbehandling samt for rodvæksten.

Et udtryk for jordens sammenhængskræfter kan fås ved anvendelse af et vingebor, som består af en metalstang, i hvis nederste ende der er påsvejset 4 radialt anordnede 10 cm høje plader, hver med en bredde (radius på 2,5 cm).

Dette vingebor slås i jorden med en hammer, og den kraft, der skal til for at dreje den derved fremkomne cylindriske jordprøve fri, aflæses på en drejemomentnøgle.

Det maximale drejemoment (M max) er udtryk for de kræfter, der skal til for at løsne jordsøjlen, og det aflæses på momentnøglen. Den omtrent konstante værdi (Mmin) efter friskæringen er udtryk for vingernes friktion imod jorden (Schaffer 1960).

Skæremodstanden (forskydningsmodstanden) pr. fladeenhed beregnes med hjælp af følgende ligning:

$$M_{\max} = S \left(2 \pi h R^2 + \frac{2}{3} R^3 \right) = S a$$

$$S = \frac{M_{\max}}{a}$$

hvor Mmax = det maximale moment i cmkg

h = vingebores højde i cm

R = vingebores radius i cm

S = skæremodstand pr. fladeenhed i kg/cm²

For R = 2,5 og h = 10 cm fås a = 425,4 cm³ Er det maximale moment eksempelvis 600 cm kg, som aflæses på momentnøglen, fås:

$$S = \frac{M_{\max}}{a} = \frac{600 \text{ cm kg}}{425,4 \text{ cm}^3} = 1,410 \text{ kg/cm}^2$$

Måling af skæremodstanden blev lejlighedsvis gennemført på alle tre jorde samtidig med udtagning af prøver til vandbestemmelse. Der blev foretaget 3 målinger pr. parcel, hvilket gav 9 fællesmålinger.

4. Resultater

4.1. Porøsitetmålinger

Resultaterne af porøsitetmålingerne i lysimeteranlægget og markforsøget er samlet i tabeller, der er arkiveret ved Højer forsøgsstation, hvorfra de kan rekvireres. I det følgende omtales kun gennemsnitsresultaterne.

4.1.1. Forskelligt antal pakninger – markforsøg

Jordens pore-, vand- og luftindhold ved anlæg er vist i figur 1. Det ses, at jordens vandindhold ved Jynde vad var højere ved pakning under »våde« end under »ideelle« og »tørre« forhold. Ved Rønhave og Højer var forskellene ret små. Ved Jynde vad trykkes jorden mere sammen ved pakning under »våde« forhold end ved pakning under »ideelle« og »tørre« forhold. Ved Rønhave og Højer var der meget lille forskel på sammentrykningen efter de forskellige tidspunkter for pakning. Den største sammentrykning skete efter 1 pakning. 2 og 4 pakninger bidrog kun i ringe grad til yderligere sammentrykning. En øget sammentrykning bevirker, at det volumetriske vandindhold stiger, da jordens vandindhold ved sammentrykningen skal fordeles i et mindre rumfang. Dette betyder så, at luftindholdet bliver mindre. Ved Jynde vad reduceredes luftindholdet fra 34-38 vol.pct. i de upakkede forsøgsled til 19-28 vol. pct. i de hårdest pakkede forsøgsled, ved Rønhave fra 16-22 vol. pct. til 8-11 vol.pct. og ved Højer fra 16-19 vol.pct. til 7-9 vol.pct. Sammenhængen mellem luftindhold og udbytte vises senere.

Jordprøver udtaget efter fremspiring og efter høst viste, at de forskelle, der målt ved anlæg, holdt sig vækstsæsonen igennem som vist i figur 2, hvor det kun er porerumfanget, der er angivet, idet både vand- og luftindhold varierer med fordampning, nedbør og planternes udvikling.

På Jynde vadjorden ser det ud til, at pore-rumfanget er øget lidt i løbet af vækstsæsonen. På Rønhavejorden skete der ingen ændring, mens der på Højerjorden skete en mindre forøgelse af jordens porerumfang i det upakkede

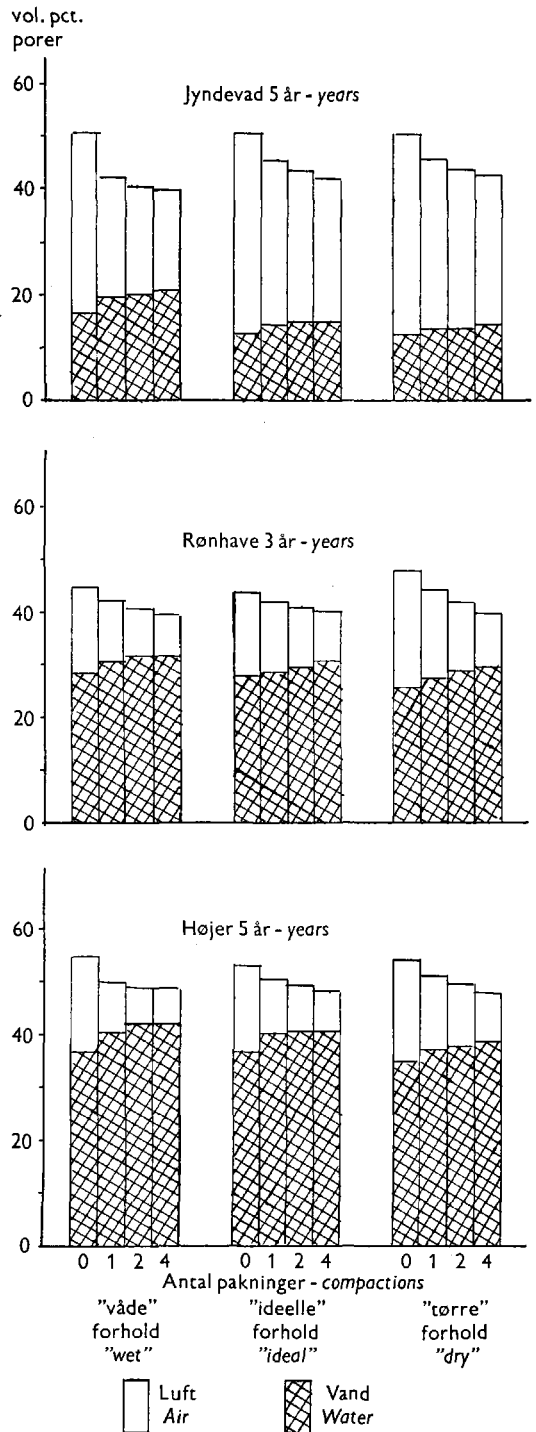
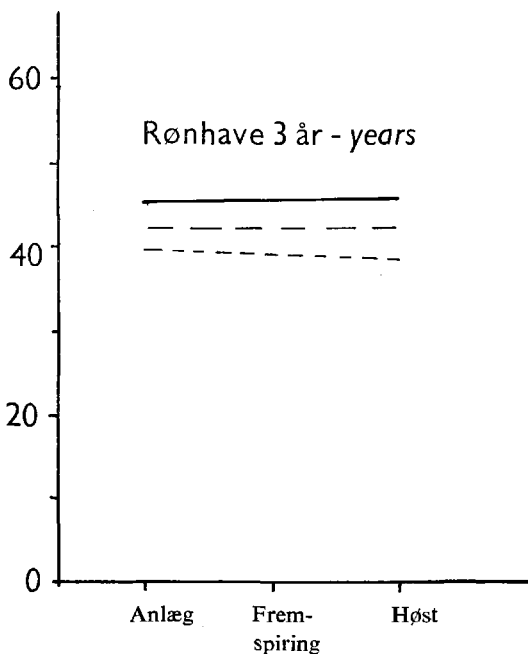
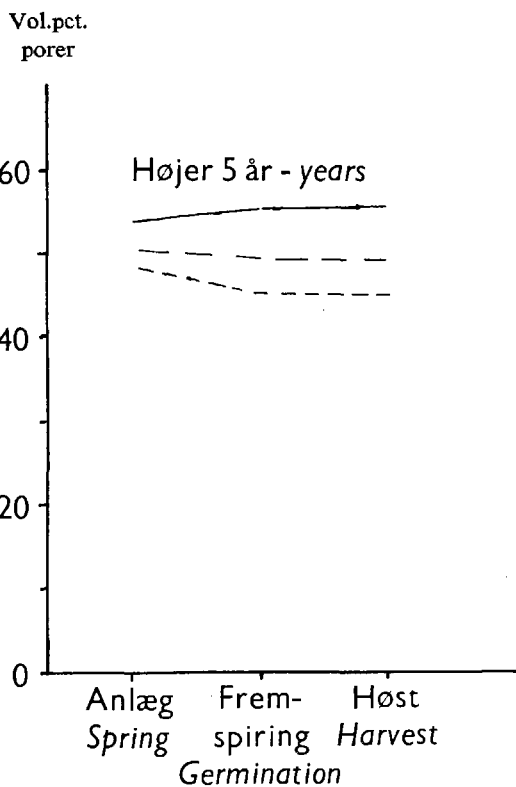
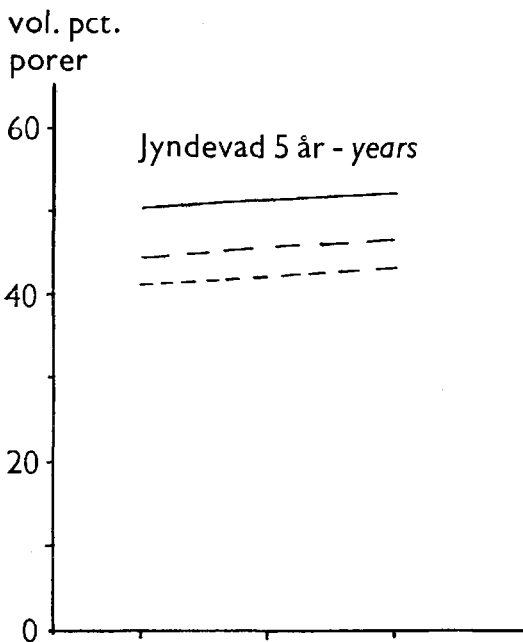


Fig. 1. Pore-, vand- og luftindhold i 6-10 cm dybde efter forsøgets anlæg om foråret. (Markforsøg).

Pore-, water- and air volume in 6-10 cm depth after establishment of the experiment in spring. (Field experiment).



- upakket - no compaction
- - 1 pakning - compaction
- - - 4 pakninger - compactions

Fig. 2. Pløjelagets porerumfang i 6-10 cm dybde gennem vækstsæsonen. (Markforsøg). Pore volume in 6-10 cm depth during the growing season. (Field experiment).

forsøgsled og en mindre reduktion, hvor der var pakket. Disse forskelle er dog små og usikre.

4.1.2. Forskelligt tryk på jordoverfladen - lysimeterforsøg

I figur 3 er jordens pore-, vand- og luftindhold vist for »våde« og »tørre« forhold. »Ideelle« forhold er ikke medtaget, da resultaterne derfra ligger omtrent mellem »våde« og »tørre« forhold.

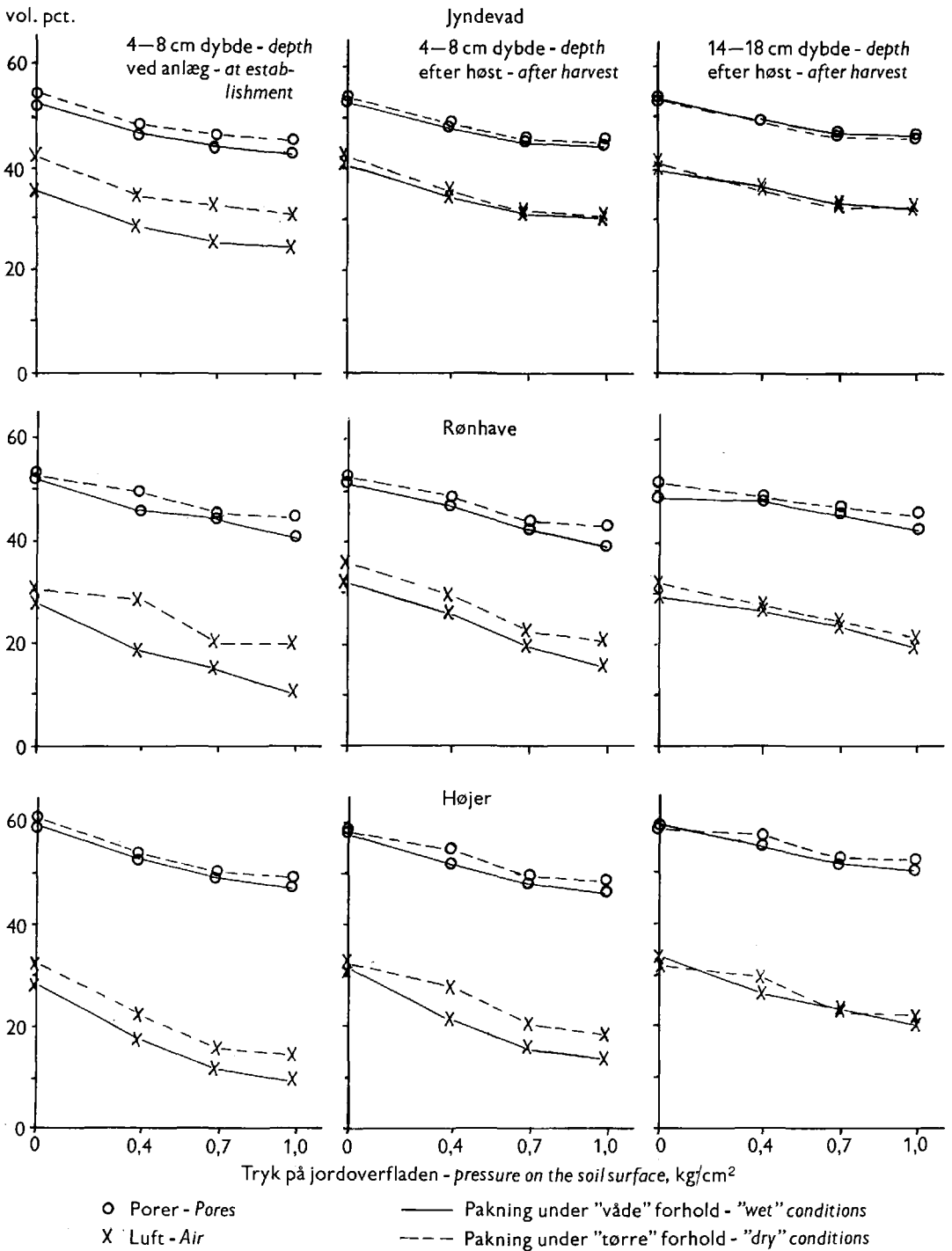


Fig. 3. Trykkets indflydelse på pore- og luftindhold ved pakning under »våde« og »tørre« forhold be-
 lyst ved prøveudtagning efter anlæg og efter høst. (Lysimeterforsøg).
*The influence of different specific pressures on pore- and air volume of the topsoil after com-
 paction under »wet« and »dry« conditions illustrated by soil samples taken after estab-
 lishment and after harvest. (Lysimeter experiment).*

I figurens venstre side ses resultaterne af prøveudtagning i 4-8 cm dybde umiddelbart efter pakningen på de tre jorde. På alle jordtyper var der forskel i vandindholdet på pakningstidspunktet. På Jyndevadjorden var forskellen 5 vol.pct. i det upakkede kar, på Rønhavejorden 2,5 vol.pct. og på Højerjorden 3,5 vol.pct.

Et tryk på 0,4 kg/cm² reducerede pore- og luftindholdet i Jyndevadjorden med henholdsvis 5,7 og 6,9 vol.pct. i forhold til upakket, i Rønhavejorden med 6,1 og 9,6 vol.pct. og i Højerjorden med 7,1 og 11,2 vol.pct. ved pakning under »våde« forhold. Under »tørre« forhold var reduktionen i Jyndevad- og Højerjorden af samme størrelse, mens reduktionen i Rønhavejorden var henholdsvis 2,7 vol.pct. porer og 2,5 vol.pct. luft. Stigende tryk på jorden reducerede pore- og luftindholdet yderligere. Et tryk på 1,0 kg pr. cm² reducerede pore- og luftindholdet med henholdsvis 9,6 og 11,3 vol.pct. i forhold til upakket i Jyndevadjorden, med 11,1 og 17,4 vol.pct. i Rønhavejorden og med 12,1 og 18,8 vol.pct. i Højerjorden ved pakning under »våde« forhold.

Under »tørre« forhold var reduktionen af samme størrelse i alle tre jordtyper.

De ændringer, der registreredes efter pakningen, kunne måles igen efter høst som vist i figur 3. I Jyndevadjorden var forskellen mellem »våd« og »tør« dog tildels udjævnet. Efter høst blev der endvidere udtaget prøver i 14-18 cm dybde. I figur 3 ses, at ændring i jordens pore- og luftindhold også kunne måles i denne dybde, omend ændringen var noget mindre end i 4-8 cm dybde.

4.2. Retentionskurver og porestørrelsesfordeling

Retentionskurver for de tre jordtyper er vist i figur 4. Prøverne blev udtaget i naturlig lejring efter høst i det upakkede forsøgsled i årene 1971, 1972 og 1974. Hvert punkt på kurven er gennemsnit af 9 fællesbestemmelser.

Af figuren ses det, at jorden er vandmættet ved pF 0. Det vil sige, at vandindholdet svarer til det totale porerumfang. Ved at ændre tryk (pF) ændres samtidig jordens vandindhold.

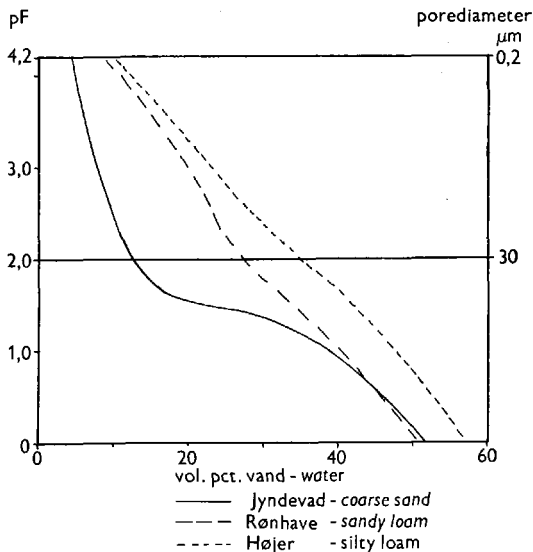


Fig. 4. Retentionskurver i upakket forsøgsled i 4-8 cm dybde efter høst. Gennemsnit af 3 år. (Lysimeterforsøg).

Retention curves in uncompacted treatment in 4-8 cm depth after harvest. Average of 3 years. (Lysimeter experiments).

Når jorden ved et givet tryk ikke afgiver mere vand, er det anvendte tryk lig med den vandbindende kraft i jorden. Under afdræningen er det de store porer, der tømmes først, og porediameteren for et givet tryk kan beregnes ved hjælp af ligningen, der er angivet på side 838.

Ved pF 2,0, hvilket svarer til et tryk på ÷ 1,0 meter vandsøjle, ses det, at der i Jyndevadjorden var 12,5 vol.pct. vand tilbage, i Rønhavejorden 27,5 vol.pct. og i Højerjorden 35,0 vol.pct. vand. Dette svarer til, at alle porer med en ækvivalentdiameter > 30 μm tømtes for vand. Ved pF 4,2 (planternes visnegrænse) var der henholdsvis 4,5, 8,6 og 9,6 vol.pct. vand i jorden, hvilket svarer til, at alle porer > 0,2 μm tømtes for vand.

Markkapacitet er jordens vandindhold efter vandmætning, når nedsivning efter 3-5 dages forløb praktisk taget er ophørt. På sandjorde svarer det ca. til pF 1,7, på de fleste morænelerjorde ca. til pF 2,0 og for jorde med stort lerindhold ca. til pF 2,3-2,5 (Aslyng 1968).

Vandindholdet mellem markkapacitet og visnegrænsen er det vand, der er til rådighed for planterne, afhængig af planteart og for-dampningsintensitet.

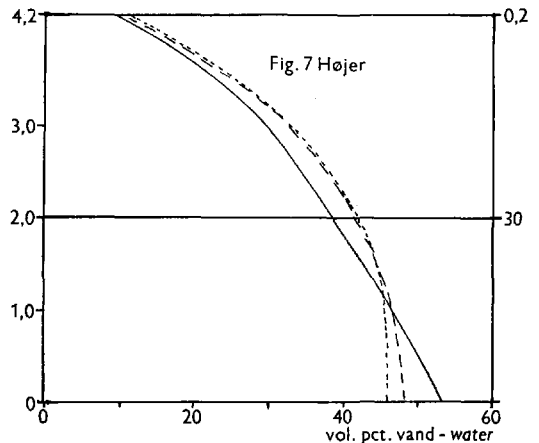
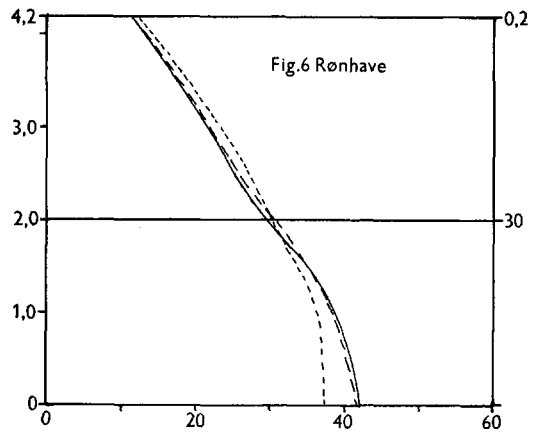
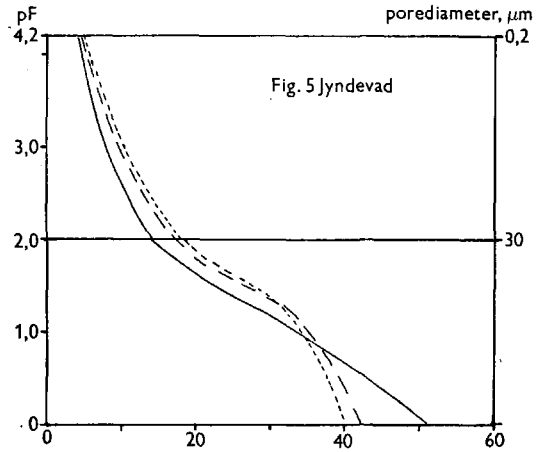
I nærværende beretning anvendes følgende inddeling af poresystemet til beskrivelse af de tre jordtyper:

- Store porer > 30 μm
- Mellemstore porer 30-0,2 μm
- Små porer < 0,2 μm

4.2.1. Forskelligt antal overkørsler - markforsøg

Lindner (1963, 1966) fastslår, at jordpakning medfører ændringer i jordens porestørrelsesfordeling, hvilket betyder, at andelen af store, hurtigt drænbare porer aftager, og andelen af mellemstore og små porer forøges. I markforsøget belyses de ændringer, der er sket efter forskelligt antal pakninger med traktor med alm. dæktryk.

Figur 5 viser retentionskurver for forsøget på sandjord ved Jyndevad efter pakning under »våde« forhold. I det upakkede forsøgsled ses jordens totale porerumfang at være 51,4 vol. pct. Een pakning med traktor reducerede porerumfanget til 41,9 vol.pct. og 4 pakninger til 39,7 vol.pct. Den største ændring i pore-rumfanget skete altså ved den første pakning. Af figuren ses det, at kurverne krydser hinanden. Andelen af store porer blev formindsket, og andelen af mellemstore porer forøgedes. Ved pF 2,0 var vandindholdet 14,0, 17,3 og 18,0 vol.pct. efter henholdsvis 0, 1 og 4 pakninger. Pakningen har altså forøget den tilgængelige vandmængde, idet vandindholdet ved visnegrænsen (pF 4,2) var omtrent det samme uanset pakningsgraden. Samtidig med at jordens vandindhold forøgedes ved sammentrykningen, formindskedes dens luftind-



- upakket - no compaction
- - - 1 pakning - 1 compaction
- · - · 4 pakninger - 4 compactions

Fig. 5-7. Retentionskurver i 6-10 cm dybde efter høst. Gennemsnit af »våde« forhold i 2 år. (Markforsøg).

Retention curves in 6-10 cm depth after harvest. Average of »wet« conditions in 2 years. (Field experiment).

hold. Czeratzki (1966) og Kuipers (1966) anvender porestørrelsen $> 30 \mu\text{m}$ som mål for jordens luftindhold, da det er disse porer, der hovedsagelig tjener til bortledning af vand samt til luftskiftet i jorden.

Porestørrelsesfordelingen, der kan aflæses i højre side af figur 5, er efter ovenstående gruppeinddeling vist i tabel 2. Een pakning reducerede andelen af porer $> 30 \mu\text{m}$ med 12,8 pct. og 4 pakninger med 15,7 pct. i forhold til upakket. Samtidig skete der en mindre forøgelse af såvel de mellemstore som de små porer.

Retentionskurver for Rønhavejorden er vist i figur 6 og porestørrelsesfordelingen i tabel 2. I det upakkede forsøgsled var porerumfanget 42,3 vol.pct. Een pakning reducerede til 41,7 og 4 pakninger til 36,5 vol.pct.

get 53,0 vol.pct. Een pakning reducerede det til 47,7 og 4 pakninger til 45,7 vol.pct. Ligesom på sandjorden skete den største sammenstrykning altså ved den første pakning.

Andelen af store porer blev reduceret betydeligt ved pakningen. Een pakning reducerede denne andel med 8,4 vol.pct. til 6,0 vol.pct. og 4 pakninger med 10,5 vol.pct. til 3,9 vol.pct. Såvel andelen af mellemstore som små porer blev forøget lidt ved pakningen, mest efter første pakning.

Den store reduktion i andelen af store porer betød, at muligheden for et tilstrækkeligt luftskifte blev stærkt forringet.

4.2.2. Forskelligt tryk på jordoverfladen – lysimeterforsøg

Som vist i forsøgsplanen på side 837 er der i ly-

Tabel 2. Porestørrelsesfordeling i vol.pct. i 6–10 cm dybde, markforsøg
Pore size distribution by volume per cent in 6–10 cm depth. Experiments in the field

	Total porer <i>pores</i>	Porestørrelse μm <i>Pore size</i>		
		>30	30–0,2	$<0,2$
<i>Jyndevad – sandjord – sandy soil</i>				
Upakket – <i>no compaction</i>	51,4	37,4	9,9	4,1
1 pakning – <i>1 compaction</i>	41,9	24,6	12,5	4,8
4 pakninger – <i>4 compactions</i>	39,7	21,7	13,0	5,0
<i>Rønhave – lerjord – sandy loam soil</i>				
Upakket – <i>no compaction</i>	42,3	12,4	19,0	10,9
1 pakning – <i>1 compaction</i>	41,7	12,1	18,5	11,1
4 pakninger – <i>4 compactions</i>	36,5	6,3	17,3	12,9
<i>Højer – marskjord – silty loam marsh soil</i>				
Upakket – <i>no compaction</i>	53,0	14,4	29,2	9,4
1 pakning – <i>1 compaction</i>	47,7	6,0	31,3	10,4
4 pakninger – <i>4 compactions</i>	45,7	3,9	31,0	10,8

Såvel andelen af store som mellemstore porer reduceredes ved pakningen, mens de små porers andel forøgedes lidt. De største ændringer skete efter 4 pakninger. I modsætning til sandjorden blev de vandholdende porers andel altså ikke forøget ved pakningen.

Retentionskurver for Højerjorden er vist i figur 7, og porestørrelsesfordelingen i tabel 2. I det ubehandlede forsøgsled var porerumfan-

simeterforsøget anvendt forskelligt tryk på jordoverfladen, og ændringen som følge deraf belyses i det følgende.

Retentionskurver for to udtagningsdybder i pløjelaget på sandjorden er vist i figur 8. Prøverne er udtaget efter pakning under »våde« forhold. I det upakkede forsøgsled var porerumfanget 51,5 vol.pct. i 4–8 cm dybde. Et tryk på $0,4 \text{ kg/cm}^2$ reducerede porerumfan-

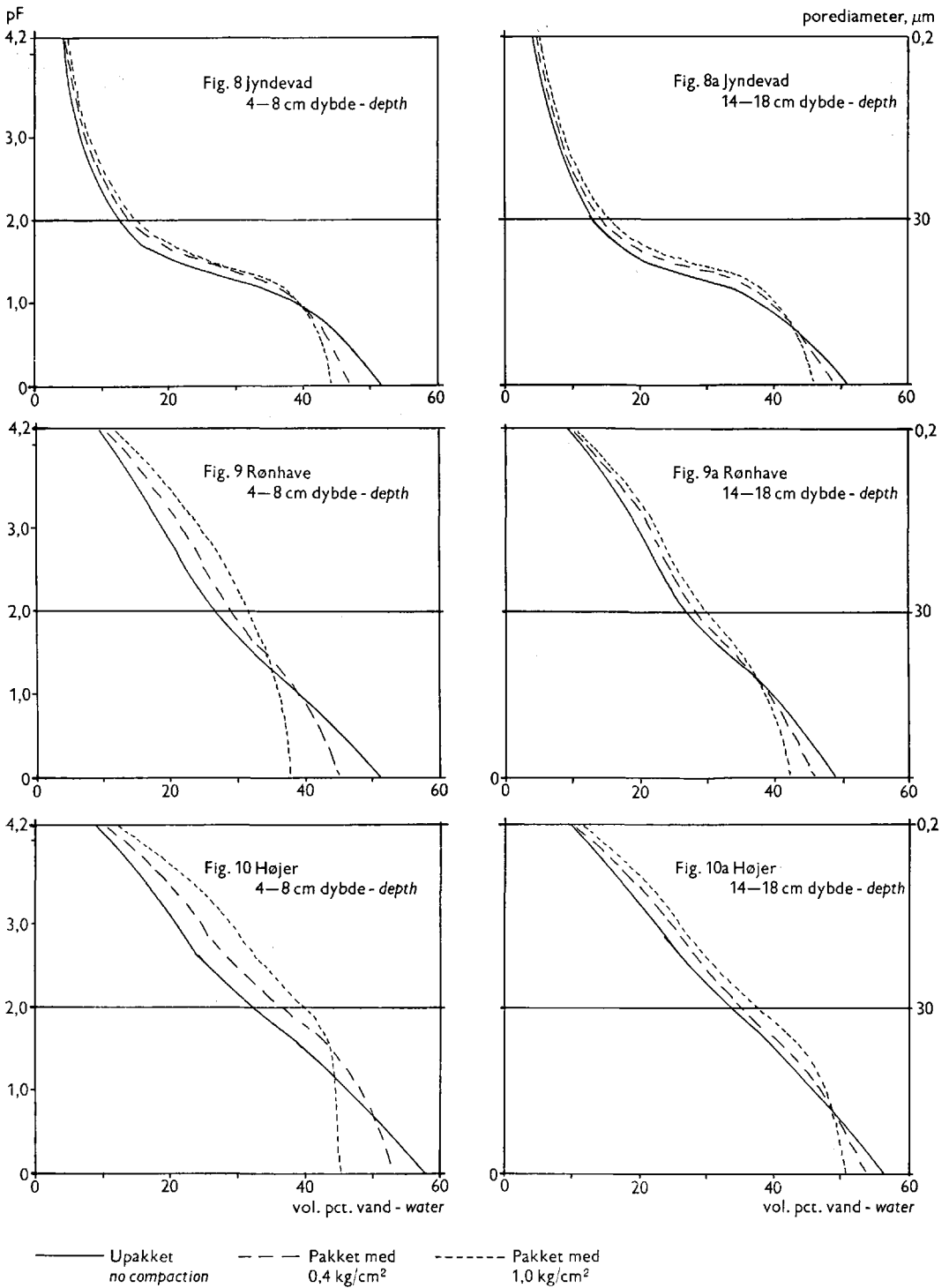


Fig. 8—10a. Retentionskurver fra 2 dybder efter høst. Gennemsnit af »våde« forhold i 2 år. (Lysimeterforsøg).

Retention curves from 2 depths after harvest. Average of »wet« conditions in 2 years (Lysimeter experiments).

get til 47,0 vol.pct. og 1,0 kg/cm² til 43,9 vol.pct. I 14-18 cm dybde var de tilsvarende pore-rumfang 51,5, 48,7 og 45,8 vol.pct. Ændringerne i denne dybde var altså mindre end i det øverste lag.

Porestørrelsesfordelingen i de to udtagingsdybder er vist i tabel 3. I 4-8 cm dybde reduceredes poreandelen > 30 μm med 10,3 vol.pct. ved et tryk på 1,0 kg/cm². I 14-18 cm dybde var den tilsvarende reduktion 8,4 vol.pct. Andelen af mellemstore og små porer var omtrent ens i de to dybder, og ændringerne som følge af trykket var ligeledes af samme størrelsesorden.

på 1,0 kg/cm². Anvendes andelen af porer > 30 μm som mål for luftindholdet, har et tryk på 1 kg pr. cm² altså reduceret dette, så det kommer under den kritiske grænse på 10-15 vol.pct. som angivet af *Aslyng* (1968).

4.3. Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord
På jordprøver udtaget i naturlig lejring efter høst målttes der hydraulisk ledningsevne for vandmættet jord. For at begrænse strukturændringer under målingen blev der anvendt en 0,01 molær CaCl₂-opløsning.

Ledningsevnen afhænger af jordtypen som vist i figur 11., der viser de tre jordes lednings-

Tabel 3. Porestørrelsesfordeling i lysimeterforsøget, vol.pct.
Pore size distribution in the lysimeters by volume per cent

	4-8 cm dybde - depth				14-18 cm dybde - depth			
	Total porer pores	Porestørrelse μm Pore size			Total porer pores	Porestørrelse μm Pore size		
	>30	30-0,2	<0,2	>30	30-0,2	<0,2		
<i>Jyndeved - sandjord - sandy soil</i>								
Upakket	51,5	38,8	8,3	4,4	51,5	38,4	8,8	4,3
0,4 kg/cm ²	47,0	33,2	9,0	4,8	48,7	34,3	9,8	4,6
1,0 kg/cm ²	43,9	28,5	10,3	5,1	45,8	30,0	10,9	4,9
<i>Rønhave - lerjord - sandy loam soil</i>								
Upakket	50,8	24,4	17,7	8,7	49,4	22,6	17,9	8,9
0,4 kg/cm ²	45,0	16,5	18,8	9,7	45,8	17,6	18,7	9,5
1,0 kg/cm ²	37,6	6,0	20,6	11,0	42,0	12,4	19,4	10,2
<i>Højer - marskjord - silty loam marsh soil</i>								
Upakket	58,2	25,9	23,0	9,3	56,9	23,4	23,5	10,0
0,4 kg/cm ²	53,3	17,5	25,5	10,3	54,2	19,0	25,0	10,2
1,0 kg/cm ²	45,3	5,4	27,8	12,1	50,4	12,6	26,8	11,0

Retentionskurver for de to lerjorde er vist i figur 9 og 10. I begge jorde bevirkede pakningen, at andelen af store porer reduceredes, og andelen af mellemstore og små porer forøgedes, som vist i tabel 3. For de store porers vedkommende var der tale om en betydelig reduktion. I Rønhavejorden blev andelen af porer > 30 μm reduceret med 18,4 vol.pct. til 6,0 vol.pct. og i Højerjorden med 20,5 vol.pct. til 5,4 vol.pct. i 4-8 cm dybde. I 14-18 cm dybde var ændringen mindre, men andelen af porer > 30 μm blev dog omtrent halveret ved et tryk

evne. Den var størst på den grovkornede sandjord ved Jyndeved. Figuren viser samtidig, at ledningsevnen aftog gennem måleperioden. Dette kan skyldes partikeltransport, kvældning, frigørelse af indespærret luft samt ændringer i ionadsorption eller elektrolytkoncentration (*Aslyng* 1968).

Den hydrauliske ledningsevne er meget følsom overfor ændringer i jordens struktur, hvilket fremgår af figur 12, der viser ledningsevnen ved 3 pakningsgrader som funktion af tiden. Det ses, at ledningsevnen var størst og vi-

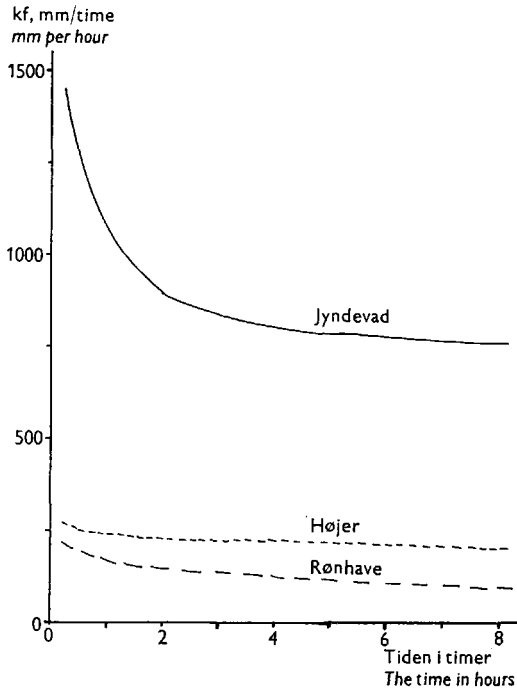


Fig. 11. Ændringer i hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord gennem måleperioden. Upakket forsøgsled i 6–10 cm dybde efter høst.
The changes in hydraulic conductivity of saturated soil during the period of measuring. Uncompacted treatments in 6–10 cm depth after harvest.

ste den største ændring med tiden ved stort porerumfang, hvorimod et lille porerumfang gav en lille ledningsevne og en lille ændring med tiden. Samme forhold ses også på Jydevadjorden, men i forstærket grad, mens forskellene på Højerjorden knap var så store. De største forskelle mellem forsøgsleddene – og dermed mellem porerumfangene – målt ved de første aflæsninger. Senere har de ovenfor nævnte forhold ændret ledningsevnen. I de følgende beskrivelser af den hydrauliske ledningsevne omtales aflæsning efter 80 minutters gennemstrømning.

Ved pakningen ændres pore størrelsesfordelingen som tidligere beskrevet, hvilket betyder, at andelen af store, hurtigt drænbare porer

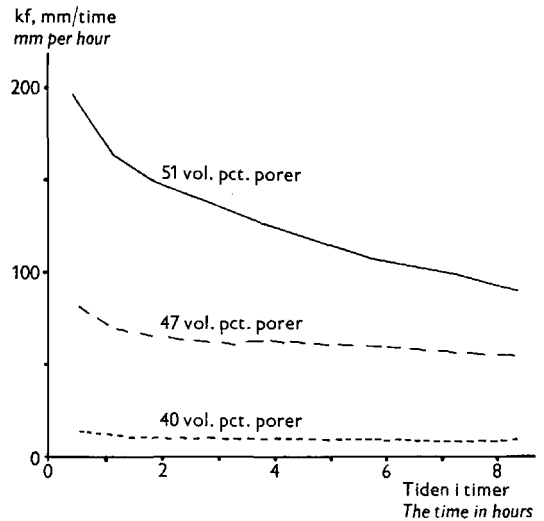


Fig. 12. Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord ved forskellig porøsitet i 4–8 cm dybde på lerjord. (Rønhave). Lysimeterforsøg.

The influence of different porosity on the hydraulic conductivity of saturated sandy loam soil in 4–8 cm depth. (Rønhave). Lysimeter experiments.

(Lindner 1963, 1966) reduceres, mens andelen af mellemstore, vandholdende porer forøges.

I figur 13 er relationen mellem vol.pct. porer $> 30 \mu\text{m}$ og den hydrauliske ledningsevne vist. Figuren er tegnet på grundlag af målinger på alle tre jordtyper, såvel i markforsøget som i lysimeteranlægget. Jydevadjorden, der havde den største andel af porer $> 30 \mu\text{m}$, ligger længst til højre på kurven, mens Rønhave- og Højerjorden ligger på den venstre halvdel.

Statistiske beregninger på forholdet mellem pore størrelse og mættet hydraulisk ledningsevne viste, at 2. grads funktionerne var forskellige fra sted til sted og gav for høj ledningsevne ved de laveste værdier af porer $> 30 \mu\text{m}$. Logaritmiske funktioner som vist i figur 14 er lineære. Hældningen er omtrent ens ved Højer og Rønhave, mens Jydevad afviger lidt. Der er en stor parallelforskydning mellem jordene. Ved de lave volumenprocenter var

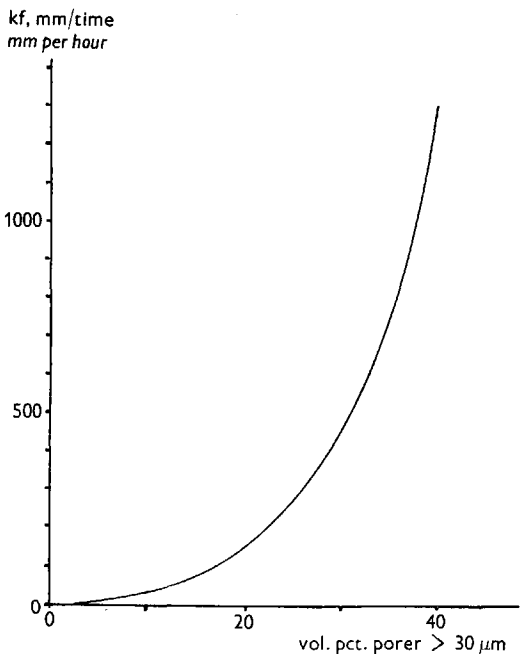


Fig. 13. Relationen mellem porer $>30 \mu\text{m}$ og hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord. Gennemsnit af Jyndevad, Rønhave og Højer 1971-74.
The relation between vol.p.c. pores $>30 \mu\text{m}$ and hydraulic conductivity of saturated soil. Average of Jyndevad, Rønhave and Højer 1971-74.

der en ret stor spredning omkring regressionslinierne. Korrelationskoefficienterne er statistisk sikre, som det fremgår af figuren, såvel på de enkelte jorde som på gennemsnit.

En ændring i poreandelen $> 30 \mu\text{m}$ fra f.eks. 40 til 35 procent vil halvere den hydrauliske ledningsevne, og en ændring fra 20 til 10 procent vil ændre den hydrauliske ledningsevne fra 60 til 17 mm pr. time. På såvel Rønhave- som Højerjorden er der ofte målt mindre end 10 vol.pct. porer $> 30 \mu\text{m}$, hvilket giver en særdeles lav ledningsevne.

4.4. Skæremodstand (forskydningsmodstand)

Samtidig med udtagning af jordprøver til porositetsbestemmelse blev der i nogle tilfælde foretaget måling af skæremodstanden.

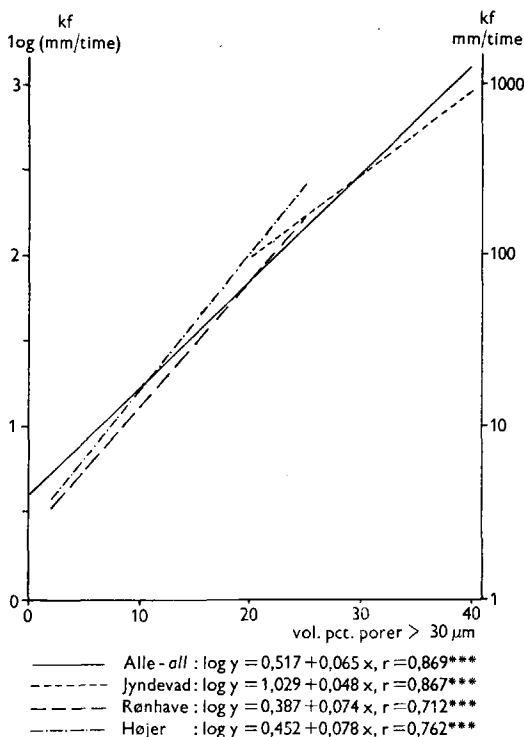


Fig. 14. Relationen mellem porer $> 30 \mu\text{m}$ og hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord.
The relations between vol.p.c. pores $>30 \mu\text{m}$ and hydraulic conductivity of saturated soil.

Resultaterne er vist i figur 15, hvor målingerne fra forskellige år og tidspunkter er sammenlignet. Korrelationsberegninger har vist statistisk sikker sammenhæng mellem skæremodstand og porerumfang. Kurverne har omtrent samme hældning på de enkelte forsøgssteder, mens beliggenheden er forskellig. Dette skyldes forskelle i jordens vandindhold på måletidspunktet, samt jordvariationer fra år til år.

4.5. Aggregatstørrelsesfordeling

Ved Højer blev der udtaget jordprøver i det bearbejdede lag til tørsigtning. I figur 16 er vist resultater fra 1974, som stort set er identiske med de øvrige års sigteanalyser. Ved pakning under »våde« forhold øgedes antallet

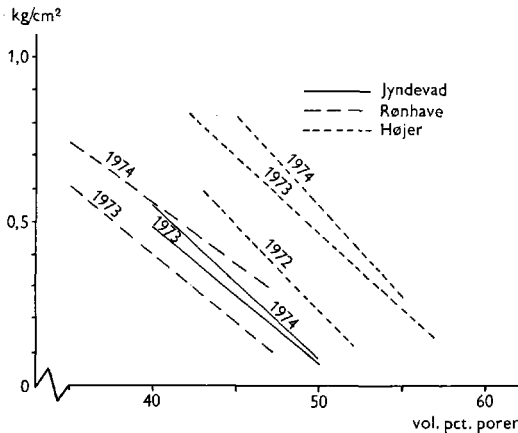


Fig. 15. Relationen mellem skæremodstand og porerumfang på forskellige jordtyper og tidspunkter.

The relations between shear strength and pore volume at different soil types and time for measuring.

af aggregater $> 6,0$ mm med stigende pakningsgrad, mens antallet af mellemstore og små aggregater aftog. Ved pakning under »ideelle« forhold ændredes aggregatfordelingen kun lidt.

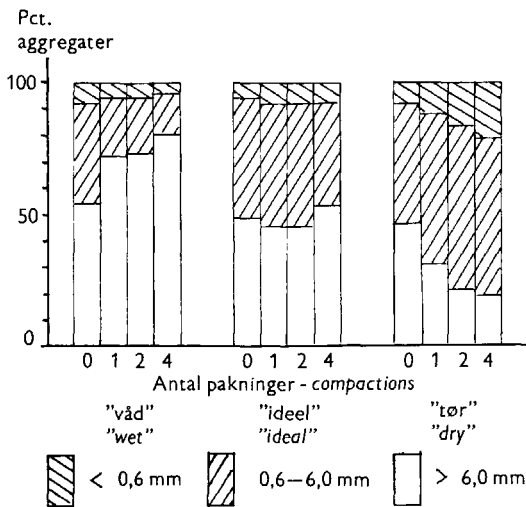


Fig. 16. Aggregatstørrelsesfordeling i 0-5 cm dybde. Højer 1974.

Aggregat size distribution in 0-5 cm depth. Højer 1974.

Under »tørre« forhold reduceredes mængden af aggregater $> 6,0$ mm, mens mængden af mellemstore og små aggregater forøgedes. De nævnte forskelle skyldes, at jorden oftest var ret fugtig ved anlæg af det »våde« forsøgsled, hvorfor den pressedes sammen og blev revet op i store aggregater af harven. Under »tørre« forhold var aggregaterne i overfladen ofte ret tørre, hvorfor de knustes under traktorhjulene ved pakningen og findeltes yderligere ved harvningen.

5. Diskussion

5.1. Jordfysiske målinger samt jordfugtighedens og klimaets indflydelse

Ved Rønhave og Højer varierede jordens vandindhold ved anlæg ikke mere fra år til år og har derfor ikke øvet væsentlig indflydelse på porerumfanget som følge af pakningen. Derimod gav mindre forskelle i jordens vandindhold sig udslag i betydelige forskelle i luftindholdet. Ved Jyndevad, hvor jordens vandindhold – især ved pakning under »våde« forhold – varierede fra år til år, sås dette tydeligst. I figur 17 er et tørt og et vådt år ved anlæg af forsøgsled A vist. Vandindholdet i det tørre år 1971 var 11,6 vol.pct. i det upakkeede forsøgsled, i det våde år 1974 var det 19,5 vol.pct. Porerumfanget var henholdsvis 50,4 og 50,5, altså i realiteten ens. Af figuren ses det, at kurverne for porerumfang falder nær sammen, hvorimod det høje vandindhold i 1974 har betydet, at luftindholdet dette år var betydeligt lavere end i det tørre år 1971. Det samme forhold gjorde sig også gældende på lerjordene.

Jordens fugtighed ved anlæg spiller altså en stor rolle for luftindholdet efter pakning, idet vandet ved pakning skal fordeles i et mindre porerumfang. Ændringer i jordens pore- og luftindhold kunne også registreres i den nederste del af pløjelaget, så det er sandsynligt, at pakningen også vil kunne registreres under pløjedybden. Svenske forsøg viser da også, at virkningen af tung belastning af jorden kunne måles i 120 cm dybde (Eriksson et al. 1974).

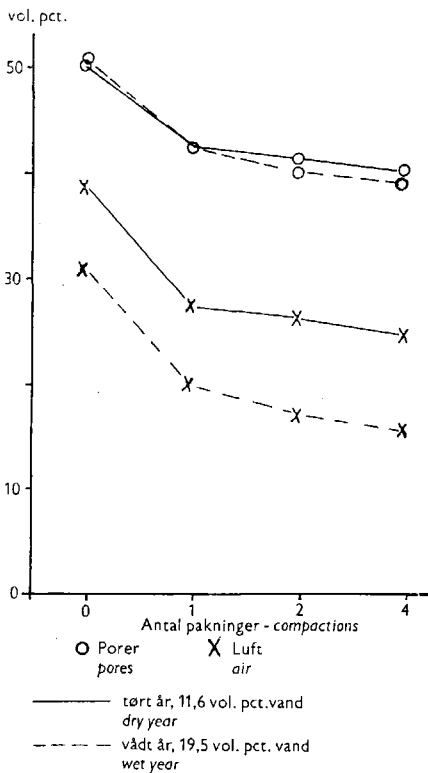


Fig. 17. Virkningen af pakning i et tørt (1971) og et vådt (1974) år med forskelligt vandindhold i 6–10 cm dybde ved pakning. Jyndeved.

The influence of different compactions on the pore- and air volume in a dry year (1971) and a wet year (1974) with different content of water in 6–10 cm depth at compaction time. Jyndeved.

Håkansson (1967) angiver et dæktryk på 0,6 kg/cm² som værende passende ved såbedstilberedning. Nærværende undersøgelse har vist, at et specifikt tryk på 0,7 kg/cm² kun i enkelte tilfælde reducerede jordens luftindhold til mindre end 11 vol.pct., mens et tryk på 1 kg ved pakning under »våde« og »ideelle« forhold i mange tilfælde reducerede luftindholdet til mindre end 11 vol.pct. Dette var derimod ikke tilfældet ved pakning under »tørre« forhold.

Jordens totale porerumfang, såvel som porestørrelsesfordelingen i de ubehandlede forsøgsled på sandjorden, var ens i markforsøget og i lysimeteranlægget som vist i tabel 4. I Rønhavejorden var porerumfanget i det ubehandlede forsøgsled i marken 42,3 vol.pct. mod 50,8 vol.pct. i lysimeteranlægget. I Højerjorden var de tilsvarende porerumfang 53,0 og 58,2 vol.pct.

I Rønhavejorden var andelen af porer > 30 μm 12,0 vol.pct. større, mens de mellemstore og små porers andel var lidt mindre i marken end i lysimeteranlægget.

I Højerjorden var andelen af porer > 30 μm i markforsøget 11,5 vol.pct. større, og andelen af mellemstore porer var 6,2 vol.pct. mindre end i lysimeteranlægget, mens andelen af små porer var af samme størrelsesorden. I marken var jorden altså for lerjordenes vedkommende trykket sammen, således at der var flere mellemstore og færre store drænbare porer end i lysimeteranlægget. Disse forskelle mellem lysimeter- og markforsøg må tages som udtryk for, at den jordpakning, der skete i marken forud for anlæg af forsøget (som ikke har ligget samme sted hvert år), ikke har kunnet ophæves ved pløjningens og vejrligets (frostens) indflydelse. I det upakkede forsøgsled i lysimeteranlægget er tryk på jordoverfladen aldrig forekommet.

Når der på sandjorden i modsætning til lerjorden ikke blev registreret forskelle mellem jorden i marken og i lysimeteranlægget, skyldes det, at sandjorden forekommer i »enkeltkornsløjring«, og en pakning derfor let ophæves ved pløjning. Vandindholdet ved markkapacitet er for en given jord en ret karakteristisk størrelse, der opnås hvert forår ved vækstperiodens begyndelse. For danske sandjorde varierer dette mellem 10 og 18 vol.pct., for sandblandede lerjorde mellem 25 og 35 vol.pct. (Aslyng 1968).

Tabel 5 viser de tre jorders vandindhold efter udtagning af jordprøver i det ubehandlede forsøgsled ved anlæg. Sættes markkapacitet i sandjorden lig med pF 1,7 ses det af figur 4, at vandindholdet da er 16 vol.pct. Sammen-

Tabel 4. Porestørrelsesfordeling i vol.pct. i de ubehandlede forsøgsled i marken og i lysimeteranlægget
Pore size distribution by volume per cent in the uncompacted treatments in the field and the lysimeter

	Total porer	Porestørrelse - Pore size, μm		
		>30	30-0,2	<0,2
<i>Jyndeved - sandjord - sandy soil</i>				
Mark - Field	51,4	37,4	9,9	4,1
Lysimeter	51,5	38,8	8,3	4,4
<i>Rønhave - lerjord - sandy loam soil</i>				
Mark - Field	42,3	12,4	19,0	10,9
Lysimeter	50,8	24,4	17,7	8,7
<i>Højer - marskjord - silty loam marsh soil</i>				
Mark - Field	53,0	14,4	29,2	9,4
Lysimeter	58,2	25,9	23,0	9,3

lignes dette med tabel 5 under »våde« forhold, ses det, at der er god overensstemmelse mellem vandindholdet i marken og vandindholdet bestemt i laboratoriet. Af figur 4 fremgår ligeledes, at vandindholdet ved visnegrænsen er 4,5 vol.pct. Den tilgængelige vandmængde bliver altså $16,0 \div 4,5 = 11,5$ vol.pct. eller 1,2 mm pr. cm roddebyde i pløjelaget, hvilket er i overensstemmelse med Jørgensen (1975), der finder en plantetilgængelig vandmængde i 0-50 cm dybde på 11 vol.pct.

på begge disse jorde. Vandindholdet ved visnegrænsen er i Rønhavejorden 8,5 vol.pct., hvilket giver $27,5 \div 8,5 = 19,0$ vol.pct. eller 1,9 mm plantetilgængeligt vand pr. cm roddebyde i pløjelaget. I Højerjorden er vandindholdet ved visnegrænsen 9,5 vol.pct., hvilket giver $35,5 \div 9,5 = 26,0$ vol.pct. eller 2,6 mm pr. cm roddebyde.

Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord er større og aftager betydeligt mere med tiden, desto mere grovkornet og porøs den er. Æn-

Tabel 5. Jordens vandindhold i 6-10 cm dybde ved anlæg om foråret.
 Gennemsnit af 1970-1974
Content of water in the topsoil at establishment in Spring. Average of 1970-1974

	Vandindhold i volumenprocent		
	<i>Content of water by volume per cent</i>		
	»våde« »wet« forhold	»ideelle« »ideal« forhold	»tørre« »dry« forhold
Jyndeved	17	13	12
Rønhave	28	28	26
Højer	37	37	35

Antages markkapaciteten i lerjordene at være ved pF 2,0, vil den som vist i figur 4 for Rønhaves vedkommende, tilbageholde 27,5 vol.pct. vand og for Højers vedkommende 35,5 vol.pct. vand. Ved sammenligning med tabel 5 ses der at være god overensstemmelse

dringer i andelen af store porer betyder store ændringer i ledningsevnen. Dette er i overensstemmelse med Kuntze (1965), der dog regner med porer $> 50 \mu\text{m}$.

Måling af mættet hydraulisk ledningsevne er forbundet med ret stor usikkerhed. I nær-

værende undersøgelse har standardafvigelsen været op til 200-300 procent af gennemsnittet. Endnu større variationer er fundet af *Andersson* (1955).

Trods de store variationer giver målingerne et udmærket indtryk af jordens evne til at bortlede vand, og der er da også som vist i figur 14 fundet statistisk sikker sammenhæng mellem vol.pct. porer $> 30 \mu\text{m}$ og den hydrauliske ledningsevne.

Forskelle i jordens tæthed vises væsentligt bedre ved måling af skæremodstanden end ved måling af jordens porerumfang. Skæremodstanden er dog afhængig af jordens vandindhold på måletidspunktet, idet lavt vandindhold giver høje værdier, og et højt vandindhold giver lavere værdier for skæremodstanden (*Krüger* 1960). Dette er i overensstemmelse med nærværende undersøgelse (figur 15). På grund af vandindholdets indflydelse kan skæremodstanden kun betragtes som et relativt mål for jordens tæthed, men kan give et udmærket førstehåndsindtryk af tætheden efter forskellige behandlinger.

Variationerne på fællesbestemmelserne var ret store afhængig af jordtype og homogenitet. I de ubehandlede forsøgsled var jorden ret heterogen, hvilket gav en meget stor spredning på fællesbestemmelserne. Med stigende pakningsgrad steg jordens homogenitet, hvilket betød, at variationen på fællesbestemmelserne blev mindre. Beregninger har vist, at variationen var mindst på sandjorden, noget større på lerjorden ved Rønhave og størst på lerjorden ved Højer. Det vil sige, at der skal tages færre fællesbestemmelser på sandjorden for at opnå en given sikkerhed på målingerne end på lerjorden.

På grund af de nævnte variationer er det vanskeligt at fastsætte et bestemt antal fællesbestemmelser, men beregningerne viste, at 15-20 fællesbestemmelser under de fleste forhold vil være tilstrækkeligt. Er jorden meget homogen, kan færre klare det, men er den meget heterogen, bør der tages betydelig flere fællesbestemmelser.

5.2. Relationer mellem porøsitet, luftindhold og udbytte

Da vandmangel ofte var den begrænsende faktor for udbyttet ved Jyndevad, var det ikke muligt at finde nogle relationer mellem de fysiske forhold og udbyttet. Kun i det relativt fugtige år 1972 øgedes udbyttet med såvel stigende porerumfang som luftindhold ved alle tre pakningstidspunkter, dog mest ved den »våde« pakning. Det er ikke muligt ud fra dette ene år at sige noget generelt om, hvilket pore- og luftindhold der er det optimale. De øvrige år var udbytterne omtrent ens uanset pore- og luftindhold men lå på et lavere niveau.

Ved Rønhave blev de største udbytter i gennemsnit målt ved et porerumfang på 41-44 vol.pct. og et luftindhold på 11-15 vol.pct. (figur 18 og 19). Ved Højer blev de største udbytter målt ved et porerumfang på 50-54

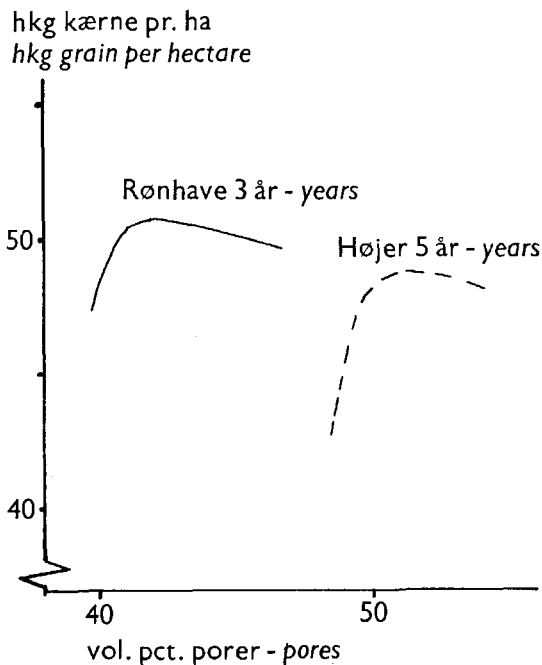


Fig. 18. Forholdet mellem jordens porerumfang i 6-10 cm dybde og udbyttet. *The relation between the yield and the pore volume in 6-10 cm depth.*

hkg kærne pr. ha
hkg grain per hectare

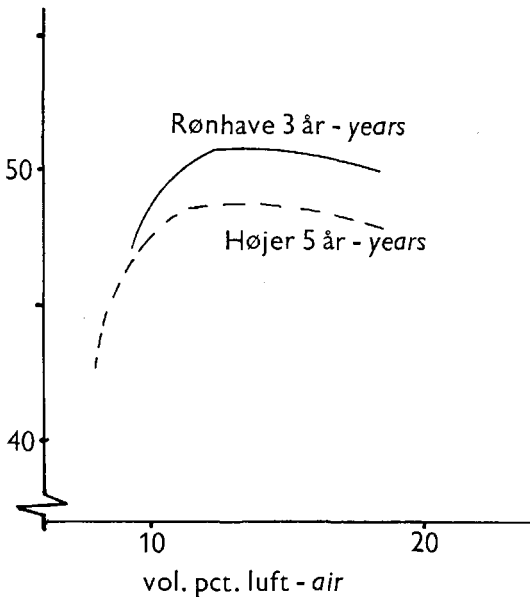


Fig. 19. Forholdet mellem jordens luftindhold i 6-10 cm dybde og udbyttet.
The relation between the yield and the air content in 6-10 cm depth.

vol.pct. og et luftindhold på 11-15 vol.pct. og et luftindhold på 11-15 vol.pct.

For begge lerjorde gælder det, at udbyttet reduceredes betydeligt, desto mere såvel porøs luftindhold afveg fra det optimale.

Undersøgelsen viste, at jorde med forskellig teksturel sammensætning havde vidt forskelligt optimalt porerumfang, mens det optimale luftindhold var af samme størrelse, hvilket er i overensstemmelse med *Aslyng* (1968), der skriver, at luftindholdet for almindelige landbrugsafgrøder skal være 10-15 procent af jordens totale rumfang.

5.3. Relationer mellem kvælstof, porøsitet, luftindhold og udbytte

Forsøget blev kombineret med forskellige kvælstofmængder for at undersøge, om kvælstof kunne kompensere for en dårlig jordstruktur som omtalt i 1317. beretning. Udbyttet

øgedes med den tilførte kvælstofmængde som vist i figur 20. Ved den lille kvælstofmængde var jorden ved Jyndevad mere følsom overfor pakning, end når der var tilført større mængder. Det så ud til, at det optimale porerumfang og luftindhold indsnævredes ved den lille kvælstofmængde, mens den store kvælstofmængde betød, at udbyttet var ret uafhængigt af såvel porerumfang som luftindhold.

Ved Rønhave og Højer var tendensen den samme begge steder, nemlig at større kvælstofmængder bevirkede, at såvel det optimale porerumfang som luftindhold forrykkedes nedad. Kvælstof kunne tilsyneladende kompensere lidt for en tæt jord. Ved Rønhave var det optimale porerumfang ca. 45 vol.pct. ved den lille N-mængde, 42 vol.pct. ved den mellemstore mængde og 41 vol.pct. ved den store N-mængde. De tilsvarende tal for luftindholdet var ca. 18, 12-15 og 10-12 vol.pct. Ved Højer var de tilsvarende tal for porerumfanget 52-54, 50-51 og 49-50, mens det for luftindholdet var 15-17, 11-13 og 9-11 vol.pct. for henholdsvis lille, mellemstor og stor N-mængde.

I denne forbindelse bør det bemærkes, at resultaterne er fra enårige forsøg. Forholdet kan være et andet ved undersøgelse af pakningens flerårige virkning. Derfor bør resultaterne ikke tydes derhen, at pakningens skadelige virkning kan opheves ved N-tilskud.

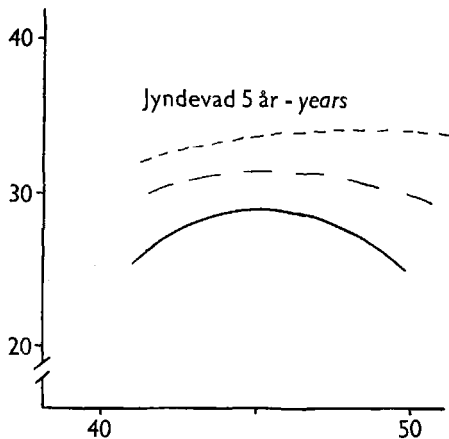
6. Konklusion

Pakning af jorden bevirkede, at såvel det totale porerumfang som luftindhold reduceredes. Ændringerne var større, desto fugtigere jorden var ved pakningen. Den største ændring skete ved første pakning. Anden og fjerde pakning forårsagede kun mindre ændringer i pore- og luftindholdet, men tilstrækkeligt til at luftindholdet nærmede sig den kritiske grænse for rodaktivitet.

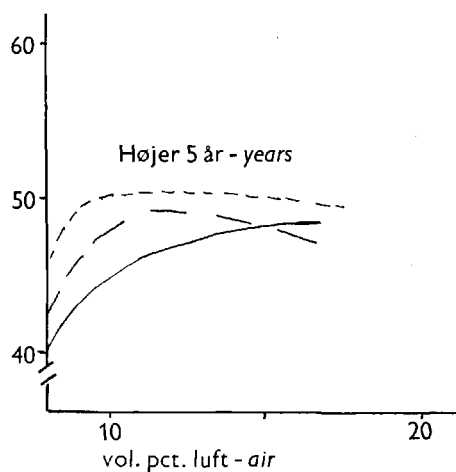
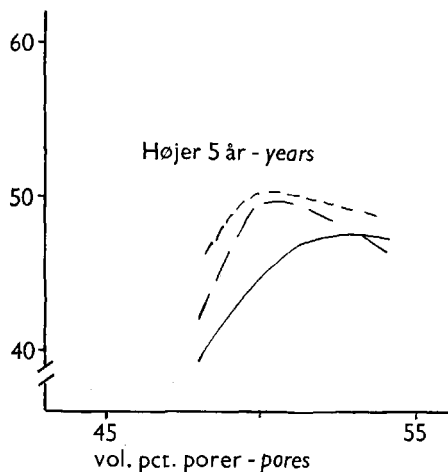
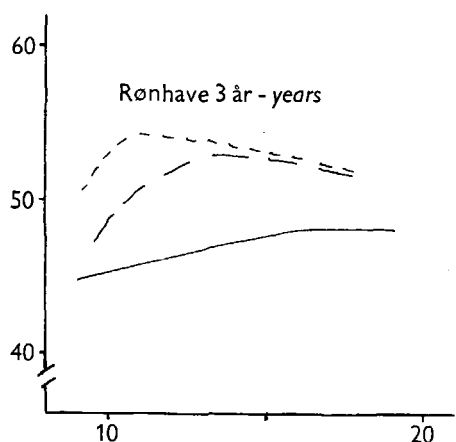
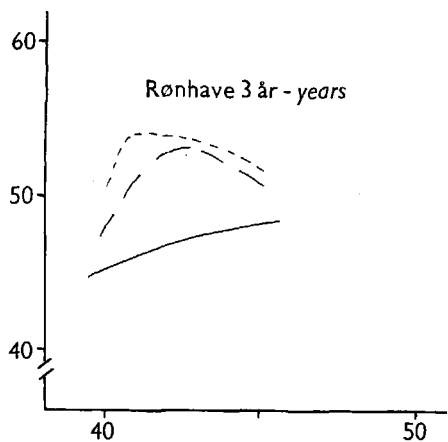
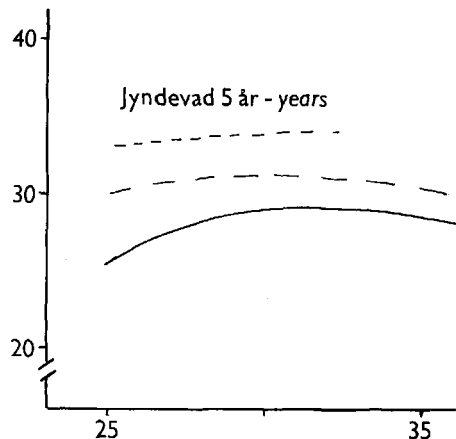
Virkingen af pakningen holdt sig vækstopperioden igennem og kunne måles igen efter høst.

Pakning under »våde« forhold med efterfølgende fugtigt klima gav mindreudbytter en-

hkg kærne pr. ha
hkg grain per hectare



hkg kærne pr. ha
hkg grain per hectare



————— 1 N - - - - - 2 N - · - · - · 3 N

Fig. 20. Kvælstoffets indflydelse på udbyttet ved forskelligt porerumfang og luftindhold i 6-10 cm dybde. Gennemsnit af 1970-74.
The influence of nitrogen on the yields at different volume of pores and air in 6-10 cm depth. Average of 1970-74.

kelte år, mens pakning under »tørre« forhold med efterfølgende tørt klima gav merudbytter.

Det optimale porerumfang var på lerjorden ved Rønhave 41-44 vol.pct. og på lerjorden ved Højer 50-54 vol.pct. Det optimale luftindhold var på begge jorde 11-15 vol.pct. På grund af vandmangel ved Jydevad de fleste år var det ikke muligt at måle nogle relationer mellem de fysiske forhold og udbyttet.

Et specifikt tryk på 1 kg/cm² reducerede i mange tilfælde jordens luftindhold til mindre end 11 vol.pct., mens dette kun i enkelte tilfælde skete ved et tryk på 0,7 kg/cm².

Ændringer i jordens totale porerumfang betød, at porestørrelsesfordelingen ændredes, således at der med stigende pakningsgrad blev færre store porer og dermed ringere mulighed for et passende luftskifte og afdræning af over-skudsvand.

Mindre ændringer i andelen af store porer forårsagede store ændringer i jordens hydrauliske ledningsevne.

Skæremodstanden gav et udmærket relativt udtryk for jordens tæthed.

Litteratur

Andersson, S. 1955. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord VIII. En experimentell metod. Grundförbättring, 8, 3-98.

Aslyng, H. C. 1968. Klima, jord og vandbalance i jordbruget. DSR-forlag, Den kgl. vet.- og landbohøjskole. Lærebog, 303 sider.

Czeratzki, W. 1966. Characterization of Tillage-Induced Soil Properties for Plant Growth. Grundförbättring, 19, 89-104.

Darcy, H. 1856. Les Fontaines publiques de la ville de Dijon, Dalmont, Paris, s. 590.

Eriksson, J., Håkansson, I. & Danfors, B. 1974. Jordpakning, markstruktur, grøda. Jordbruks-tekniska institutet, Uppsala, medd. nr. 354, 82 sider.

Harst, G. G. van der & Stakman, W. P. 1965. Soil moisture retention curves. Institute for land and water management research, Wageningen.

Håkansson, I. 1967. Tål marken våra tunga maskiner? Forsök och Forskning, 2, 2-8.

Jørgensen, V. 1975. Vanding af græs og kløvergræs, 1241. beretn. Tidsskr. f. Planteavl 79, 545-557.

Krüger, W. 1969. Über den Einfluss unterschiedlicher Bodenverdichtung auf einige bodenphysikalische Eigenschaften und das Pflanzenwachstum. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Landwirtschaft an der Humboldt Universität zu Berlin. 116 sider.

Kuipers, H. 1966. Die Bearbeitung schwerer Böden in den Niederlanden. Tagungsbericht der DAL, Berlin, nr. 82. Teil II.

Kuntze, H. 1965. Die Marschen. Schwere Böden in der landwirtschaftlichen Evolution. Verlag Paul Parey, Hamburg u. Berlin. 127 s.

Lindner, H. 1963. Über die Abhängigkeit der Scherfestigkeit von Böden verschiedener mechanischer Zusammensetzung von der Dichte, der Porengrößenverteilung sowie dem Wassergehalt. Albrecht-Thaer-Archiv, 7, 11-20.

Lindner, H. 1966. Zum Probleme der optimalen Bodendichte. Albrecht-Thaer-Archiv, 10, 1071-1079.

Neuhaus, H. 1963. Strukturschwankungen bei Marschböden in Abhängigkeit von Klima und Meliorationsmassnahmen. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Landwirtschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen. 137 sider.

Rasmussen, K. J. 1973. Harvningsintensitet til byg. 1106. beretning, Tidsskr. f. Planteavl 77, 443-470.

Shaffer, G. 1960. Eine Methode der Abscherwiderstandsmessung bei Ackerböden zur Beurteilung ihrer Strukturfestigkeit im Felde. Landwirtsch. Forsch., 13, 24-33.

Söhne, W. 1953. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. GrdIgn. d. Landtechn., 5, 49-63.

Manuskript modtaget den 8. juni 1976.