

Jordpakning ved forskellig belastning

Soil compaction with different surface pressure

Karl J. Rasmussen

Resumé

For at klarlægge, hvorledes jorden reagerer, når den udsættes for stigende belastning på overfladen, er der foretaget en række undersøgelser af tre forskellige jordtyper, nemlig grovsandet jord, sandblandet lerjord og lerjord.

Undersøgelserne er lavet i et lysimeteranlæg, hvor der oven på et 80 cm undergrundslag var placeret et 20 cm muldlag af de pågældende jordtyper.

Overfladebelastningen (det specifikke tryk) var 0, 40, 100, 160 og 240 kPa (100 kPa = 1 kg/cm²). Til sammenligning kan nævnes, at traktorer normalt belaster jorden med et specifikt tryk på 100–300 kPa afhængig af traktor- og dækstørrelse og af, hvilken vægt der overføres til traktoren fra det redskab, den trækker. Mejetærskere belaster jorden med 150–250 kPa, gyllevogne med 150–500 kPa og kunstgødnings- og kalkspredere med 500–800 kPa.

På grund af forskelle i belastningsteknik og belastningstid kan resultaterne af denne undersøgelse dog ikke direkte sammenlignes med, hvad der sker under et traktorhjul.

Pløjelagets porøsitet og luftindhold aftog med stigende belastning på alle tre jordtyper.

Ved den største belastning på 240 kPa aftog porøsiteten måleligt til ca. 60 cm dybde i lerjorden, til 30–40 cm dybde i den sandblandede lerjord og til ca. 30 cm dybde i den grovsandede jord.

I pløjelaget forekom nedre kritiske værdier for porøsiteten ved belastninger på 70 kPa på lerjorden, 180 kPa på den sandblandede jord, mens den grovsandede jord tålte en belastning på 250 kPa, inden denne kritiske grænse nåedes. Disse kritiske værdier var henholdsvis 50, 41 og 43 vol. %.

Det plantetilgængelige vandindhold ved markkapacitet (pF 2,0) var 9 vol. % i grovsandet jord, 19 vol. % i sandblandet lerjord og 28 vol. % i lerjord.

Stigende belastning gav kun mindre forøgelser i rumfanget af de mindste porer (< 0,2 μm) og mellem-porer (0,2–30 μm), mens rumfanget af grovporer (> 30 μm) reduceredes betydeligt.

Jordens vandledende evne (den hydrauliske ledningsevne) samt muligheden for luftskifte (luftpermeabilitet) ved vandindhold omkring markkapacitet (pF 2,0) aftog betydeligt med stigende belastning.

Strukturen i komprimeret, græsbevokset jord genskabtes ikke – selv i de allerøverste jordlag – i løbet af en 5 års periode.

Nøgleord: Jordpakning, porøsitet, luftindhold, tilgængeligt vand, porestørrelsesfordeling, ødometermåling, luftpermeabilitet, hydraulisk ledningsevne.

Summary

Soils were compacted with increasing surface pressure (0, 40, 100, 160 and 240 kPa) in lysimetres with coarse sand, sandy loam and silty loam soils with a topsoil layer of 20 cm and a subsoil layer of 80 cm.

In all soils increasing surface pressures resulted in a decreased porosity and air volume.

Surface pressures of 70 kPa on silty loam, 180 kPa on sandy loam and 250 kPa on coarse sand decreased the porosity to near critical levels for optimum plant growth of 50, 41 and 43 vol.% respectively.

Available soil water at field capacity (pF 2.0) was 9 vol.% in coarse sand soil, 19 vol.% in sandy loam soil and 28 vol.% in silty loam soil.

Surface pressure of 240 kPa decreased the porosity to near 60 cm depth in the silty loam soil, to 30–40 cm in the sandy loam soil and to about 30 cm depth in the coarse sand soil.

Increased surface pressure gave only small changes in the volume of small pores ($< 0.2 \mu\text{m}$) and medium pores ($30\text{--}0.2 \mu\text{m}$), whereas the volume of coarse pores ($> 30 \mu\text{m}$) decreased significantly with increasing surface pressure.

Saturated hydraulic conductivity and airpermeability at field capacity (pF 2.0) decreased significantly with increasing surface pressure.

Over a period of 5 years the structure in compacted soil was not re-created.

Key words: Soil compaction, porosity, air volume, pore size distribution, available water, air permeability, hydraulic conductivity.

Indledning

Ved færdsel med traktorer, redskaber og vogne på markerne udsættes jorden for en belastning, der medfører, at jorden under hjulene trykkes sammen. Den største sammentrykning sker i de øvre jordlag. Trykpåvirkningen aftager med dybden og kan registreres til en dybde, der er afhængig af belastningen på hjulet, hjulets bæreflade, jordtypen og fugtigheden (4, 6, 7).

Traktorer belaster normalt jorden med et specifikt tryk på 100–300 kPa afhængig af traktor- og dækstørrelse og af, hvilken vægt der overføres til traktoren fra det redskab, den trækker. Mejetærskere belaster jorden med 150–250 kPa, gyllevogne med 150–500 kPa og kunstgødnings- og kalkspredere med 500–800 kPa (4).

Eriksson et al. (6) viste, at det grove poresystem, dvs. porer $> 30 \mu\text{m}$, mindskes med stigende belastning og er fuldstændig sammentrykt

ved en belastning på 800 kPa. Allerede ved en belastning på 200 kPa begynder andelen af grove porer at antage kritiske værdier mht. afdræning, luftskifte og rodudvikling.

Pororumfang og luftpermeabilitet reduceredes måleligt ned til 50–60 cm dybde efter tung belastning (5).

Håkansson (9) fandt, at jorden var pakket ned til 50 cm dybde, og at pakningen var mest intensiv i ca. 40 cm dybde. Pakning i denne dybde eller dybere vil vedvare i årtier, selv på arealer med dyb, årlig frost (10).

Ved såbedstilberedning på pløjet jord kan jorden belastes med 50–100 kPa, inden der sker væsentlige forandringer i dens struktur. Efterhånden som jorden udtørres, kan den tåle større belastninger. En tør jord kan modstå op til 200–300 kPa (3).

Det er en almindelig antagelse, at frost til stor dybde, samt vekslende opfugtning og udtørring helt eller delvis kan retablere en komprimeret jord. *McGovan et al.* (15) fandt imidlertid, at udtørring og opfugtning alene ikke vil være i stand til at retablere kompakte lerjorde. Her kan det blive nødvendigt med grubning. *Blake et al.* (2) fandt, at jordens tæthed i en pakket lerjord ikke ændredes i løbet af en 9 års periode, selv om frostdybden ofte var større end den dybde, hvortil jorden var komprimeret.

Med det formål at undersøge belastningens indflydelse på en række jordparametre, samt klimaets og plantevækstens indflydelse i forbindelse med retablering af komprimeret jord, blev der i 1975 anlagt pakkingsforsøg i et lysimeteranlæg med 3 forskellige jordtyper.

Forsøgsplan, jordtyper og teknik

I lysimetre med en diameter på 100 cm og en dybde på 125 cm er der gennemført forsøg med jordpakning på følgende 3 jordtyper:

1. Grovsandet jord (Jyndevad)
Coarse sand
2. Fin sandblandet lerjord (Rønhave)
Sandy loam
3. Lerjord (Højer)
Silty loam

Teksturanalyserne i tabel 1 viser, at der trods nær samme lerindhold i de to lerjorde er væsentlige forskelle i indholdet af fin- og grovsand.

Muldlaget havde en tykkelse på 20 cm, undergrunden en dybde på 80 cm og derunder et lag sand og grus, der tjente som reservoir for overskudsvand, der kunne pumpes op.

Lysimetrene blev etableret i 1970 og anvendt til pakkingsforsøg indtil 1974. Resultaterne af disse forsøg er omtalt af *Rasmussen* (17).

Efteråret 1974 blev jorden gravet til ca. 50 cm dybde regnet fra overfladen af muldlaget, og i foråret 1975 blev der anlagt forsøg efter følgende plan med 2 genagelser:

1. Pløjelaget (ca. 20 cm) løsnet
Topsoil (20 cm) loosened
2. Ubehandlet
Untreated
3. Belastet med 40 kPa (0,4 kg/cm²)
Surface pressure 40 kPa
4. Belastet med 100 kPa (1,0 kg/cm²)
Surface pressure 100 kPa
5. Belastet med 160 kPa (1,6 kg/cm²)
Surface pressure 160 kPa
6. Belastet med 240 kPa (2,4 kg/cm²)
Surface pressure 240 kPa

Forsøgsled 1 blev gravet med en gravegreb til ca. 20 cm dybde. Hele overfladen i forsøgsled 3-6

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

Sted <i>Site</i>	Dybde <i>Depth</i> cm	Vægt % - by weight %					Betegnelse
		humus <i>humus</i>	ler <i>clay</i> <0,002 mm	silt <i>silt</i> 0,02-0,002 mm	finsand <i>fine sand</i> 0,2-0,02 mm	grovsand <i>coarse sand</i> 2,0-0,2 mm	
Jyndevad	0-20	1,8	3	2	18	75	grovsand
	20-100	1,1	3	1	19	76	
Rønhave	0-20	2,1	13	17	49	19	fin sand-blandet ler
	20-100	0,8	17	16	48	18	
Højer	0-20	2,2	15	13	70	0	ler (marsk)
	20-100	1,1	17	11	71	0	

blev belastet med de foreskrevne tryk med en 1000 cm² stor trykplade påmonteret en specialbygget traktors hydrauliske system. Ved anvendelse af denne teknik belastedes jorden i 5–10 gange så lang tid, som en kørende traktor belaster jorden. Belastningen gennemførtes efter fjernelse af de øverste 4 cm jordlag, der blev lagt på igen efter såning.

Belastning af jorden foregik ved vandindhold omkring markkapacitet, hvilket i gennemsnit af 3 år var 11,4, 23,5 og 30,5 vol. % i henholdsvis sandjord, lerblandet sandjord og lerjord.

Jorden i lysimetrene blev gravet i muldlagets dybde hvert efterår 1974, 1975 og 1976, og forsøgsbehandlingerne gennemførtes hvert forår i årene 1975, 1976 og 1977.

I 1975 og 1976 blev der sået byg, og i 1977 blev der sået byg med udlæg af alm. rajgræs i den ene halvdel af lysimetrene og rødkløver i den anden halvdel.

Afgrøderne blev høstet hvert år, men vil ikke blive omtalt.

Tabel 2. Volumenprocent porer i jorden efter høst. Gns. af 1975 og 1976
Pore volume after harvest, vol. %. Average of 1975 and 1976

Jordtype <i>Soil type</i>	Grovsand <i>Coarse sand</i>	Sandbl. ler <i>Sandy loam</i>	Ler <i>Silty loam</i>
<i>4–8 cm dybde</i>			
Løsnet	54,7	52,1	54,4
Upakket	52,7	45,6	52,4
40 kPa	48,1	42,7	48,9
100 kPa	45,1	40,6	45,7
160 kPa	44,8	39,3	44,8
240 kPa	43,6	39,0	42,8
LSD	1,7	2,4	2,0
<i>14–18 cm dybde</i>			
Løsnet	54,7	50,3	54,2
Upakket	52,8	44,2	49,0
40 kPa	48,2	42,6	48,4
100 kPa	45,5	39,4	44,5
160 kPa	45,3	36,7	42,7
240 kPa	44,0	34,1	41,7
LSD	1,8	2,5	1,8

Resultater

Porøsitetmålinger i pløjelaget

Umiddelbart efter pakningens gennemførelse samt efter høst blev der udtaget jordprøver til bestemmelse af pore-, vand- og luftindhold.

Der var god overensstemmelse imellem jordens porøsitet ved forårs- og efterårsudtagningen, og årsvariationerne var små, hvorfor kun resultater fra efterårene 1975 og 1976 vises i tabel 2.

I alle tre jorde har pakningen forårsaget en betydelig og signifikant reduktion i porerumfanget. Pakningen kan registreres efter høst i både 4–8 og 14–18 cm dybde, og der er signifikante forskelle mellem behandlingerne.

Efter den hårdeste belastning (240 kPa) er porerumfanget reduceret med 6,6–10,1 vol. % i de tre jorde, og luftindholdet er reduceret med 6,6–12,3 vol. % i forhold til den upakkede jord og har antaget kritisk lave værdier i de to lerjorde.

Porøsitetmålinger under pløjelaget

Porøsitetsændringer i dybden blev målt med gamma/neutronudstyr for hver 10 cm dybde ned til 70 cm. Princippet er beskrevet af *Aslyng* (1). Resultater fra 3 års målinger i lerjorden er vist i fig. 1. På grund af usikkerhed på målingerne i 0–20 cm dybde er disse erstattet af gravimetrisk bestemte porøsiteter i 4–8 og 14–18 cm dybde. Det ses, at der ned til 60 cm dybde er målt signifikante forskelle i porerumfanget. Ned til 30–40 cm dybde er der sket meget store reduktioner som følge af pakningen.

Forskellene mellem behandlingerne er ikke så store i sandjorden og i den sandblandede lerjord, og belastningen kan ikke registreres til så stor dybde som i lerjorden.

Porøsitetsændringer med tiden

Efter gennemførelse af forsøgsbehandlingerne i 1977, hvor der blev sået rajgræs og rødkløver, og indtil 1981 har jorden i lysimeteranlægget ikke været udsat for jordbehandling eller belastninger af nogen art. Derfor er det muligt at undersøge, om jorden efter pakning selv regenererer ved hjælp af klimaets og planterøddernes indvirkning.

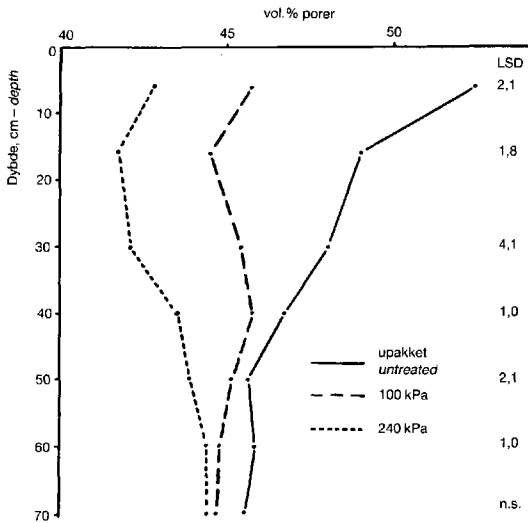


Fig. 1. Jordens porerumfang efter forskellig belastning på overfladen. Lerjord 1975-77.
Porosity of the soil after different surface pressure. Silty loam soil 1975-77.

Lerjordens porøsitet i 7 dybder er vist i fig. 2 efter undersøgelser i 1976 og 1981.

Gamma-målingerne i 20-60 cm dybde er i såvel 1976 som 1981 gennemsnit af 2 måletidspunkter.

Lerjordens porøsitet er vist i fig. 2. Stigende belastning har medført markante porøsitetsændringer ned til 40 cm dybde, men også i 50 og 60 cm dybde ses mindre ændringer som følge af belastningen. I større dybde er det kun små ændringer, der er sket.

I sandjorden er der sket meget store porøsitetsændringer ned til 20 cm som følge af stigende belastning. I 30 cm dybde kan mindre ændringer registreres, mens der i større dybder ikke forekommer målelige ændringer i porøsiteten. Undersøgelsen viser, at sandjorden efter belastning var lige så tæt i 1981 som i 1976 i alle dybder.

I den sandblandede lerjord har stigende belastning medført porøsitetsændringer ned til 30-40 cm dybde.

Undersøgelsen på alle tre jordtyper viser, at jorden efter sammenpakning ikke er regenereret inden for en 4-5 årig periode alene ved hjælp af

rodvirksomhed og klimaets påvirkning - selv ikke i de øverste jordlag.

Der er ikke målt frostdybde i jorden, men tabel 3 viser, at der hver vinter har været frost i kortere eller længere perioder.

Porestørrelsesfordeling og tilgængeligt vand

Jordens porestørrelsesfordeling efter høst 1976 er vist i tabellerne 4, 5 og 6.

Reduktionen i porerumfanget som følge af stigende belastning betyder, at porestørrelsesfordelingen ændres. Rumfanget af grove porer reduce-

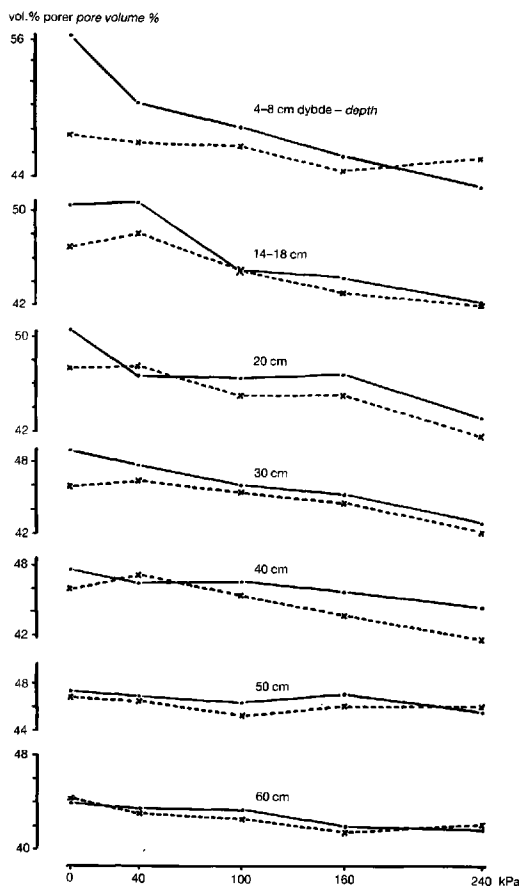


Fig. 2. Sammenhængen mellem belastning af jorden og porerumfanget efter pakning i 1976 og 5 år efter i 1981. Lerjord, Højer.

Changes in pore volume with increasing surface pressure in 1976 and 5 years after in 1981. Silty loam.

Tabel 3. Antal frostdage ved Højer
Number of days with frost at Højer

	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
1975/76	8	17	24	23	8
1976/77	23	20	14	4	6
1977/78	13	16	23	8	6
1978/79	21	30	28	14	3
1979/80	14	27	25	19	4
1980/81	13	19	17	7	6

Tabel 4. Porestørrelsesfordeling i volumenprocent efter
høst 1976. Grovsandet jord. Gns. af 3 fællesprøver
*Pore size distribution after harvest 1976, vol. %. Average
of 3 replicates. Coarse sand*

Porestørrelse:	Store	Mellem	Små
<i>Pore size:</i>	<i>Coarse</i>	<i>Medium</i>	<i>Small</i>
μm :	> 30	30-0,2	< 0,2
<i>4-8 cm dybde</i>			
Upakket	40,1	9,1	4,2
40 kPa	35,9	9,4	4,5
100 kPa	31,4	10,4	4,8
160 kPa	30,4	9,7	4,9
240 kPa	29,9	9,9	5,0
LSD	2,5	0,4	0,2
<i>14-18 cm dybde</i>			
Upakket	41,9	8,7	4,1
40 kPa	33,7	9,4	4,7
100 kPa	29,2	10,9	4,9
160 kPa	27,3	10,1	5,2
240 kPa	24,8	10,9	5,3
LSD	2,0	0,7	0,1

res betydeligt i begge udtagningsdybder i alle tre jorde. I sandjorden er der efter den hårdeste belastning stadig 25% grove porer, mens denne andel i de to lerjorde ved en belastning på ≥ 100 kPa er reduceret til mindre end 15%.

Den største belastning (240 kPa) har i den sandblandede lerjord reduceret andelen af grove porer til 5,7-8,8% og i lerjorden til 2,0-2,8%. Denne forskel i lerjordenes følsomhed over for pakning skyldes de teksturmæssige forskelle imellem jordene.

Trods forskelle i belastningsteknik og trykflade bekræfter disse resultater de af Rasmussen (17) omtalte, der viste, at når andelen af porer > 30

Tabel 5. Porestørrelsesfordeling i volumenprocent efter
høst 1976. Fin sandblandet lerjord. Gns. af 3 fælles-
prøver

*Pore size distribution after harvest 1976, vol. %. Average
of 3 replicates. Sandy loam*

Porestørrelse:	Store	Mellem	Små
<i>Pore size:</i>	<i>Coarse</i>	<i>Medium</i>	<i>Small</i>
μm :	> 30	30-0,2	< 0,2
<i>4-8 cm dybde</i>			
Upakket	17,8	20,0	9,3
40 kPa	19,1	19,1	9,2
100 kPa	13,8	19,6	9,9
160 kPa	12,8	20,3	10,0
240 kPa	8,8	20,9	10,5
LSD	3,4	1,0	0,4
<i>14-18 cm dybde</i>			
Upakket	16,3	19,0	9,6
40 kPa	16,7	18,7	9,6
100 kPa	10,7	19,4	10,4
160 kPa	9,5	20,1	10,5
240 kPa	5,7	19,7	11,1
LSD	3,5	1,4	0,5

Tabel 6. Porestørrelsesfordeling i volumenprocent efter
høst 1976. Lerjord. Gns. af 3 fællesprøver
*Pore size distribution after harvest 1976, vol. %. Average
of 3 replicates. Silty loam*

Porestørrelse:	Store	Mellem	Små
<i>Pore size:</i>	<i>Coarse</i>	<i>Medium</i>	<i>Small</i>
μm :	> 30	30-0,2	< 0,2
<i>4-8 cm dybde</i>			
Upakket	22,0	23,9	9,8
40 kPa	14,5	26,4	10,6
100 kPa	10,2	26,0	11,6
160 kPa	5,7	27,4	12,1
240 kPa	2,0	27,5	12,7
LSD	3,7	1,3	0,6
<i>14-18 cm dybde</i>			
Upakket	10,3	27,9	11,3
40 kPa	12,7	26,9	10,9
100 kPa	4,9	26,8	12,4
160 kPa	3,2	26,4	12,7
240 kPa	2,8	25,3	13,0
LSD	4,3	n.s.	0,5

μm anvendes som mål for jordens luftindhold, vil et specifikt tryk på ≥ 100 kPa reducere dette, så det kommer under den kritiske grænse på 10-15 vol. %, som angivet af Aslyng (1).

I og med at porerumfang og rumfang af grovporer reduceres, sker der en mindre forøgelse i rumfanget af såvel mellemstore som små porer.

Idet det antages, at markkapacitet svarer til afdræning ved pF 2,0 (sandjords markkapacitet regnes almindeligvis til pF 1,7–2,0 og lerjordes til pF 2,0–2,3) vil rumfanget af mellemporer i tabel 4, 5 og 6 være udtryk for jordenes vandindhold ved markkapacitet. De små porer tilbageholder den utilgængelige vandmængde.

Der er sket mindre forøgelser i disse to poreklassers volumen som følge af pakningen. Dette betyder dog ikke, at der totalt er sket ændringer i den plantetilgængelige vandmængde. Relativt er der sket en ændring, men absolut er vandindholdet det samme. Det er blot fordelt i et mindre rumfang som følge af pakningen.

Den tilgængelige vandmængde efter afdræning ved pF 2,0 er i gennemsnit 9,9 vol.% i sandjorden, 19,7 vol.% i den sandblandede lerjord og 26,5 vol.% i lerjorden.

I fig. 3, 4 og 5 er relationerne mellem belastning af jorden og jordens andel af porer $> 30 \mu\text{m}$ vist for de tre jordtyper i dybden 14–18 cm.

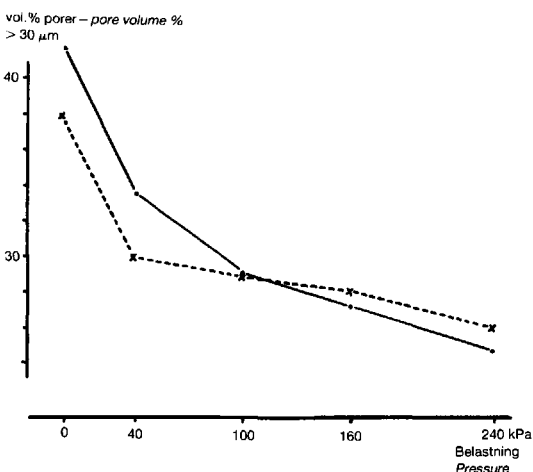


Fig. 3. Sammenhængen mellem belastning af jorden og rumfanget af porer $> 30 \mu\text{m}$ i 14–18 cm dybde efter pakning i 1976 — og 5 år efter i 1981 \times — \times . Grovsandet jord, Jyndevad.

Changes in the volume of coarse pores with increasing surface pressure in 14–18 cm depth in 1976 — and 5 years after in 1981 \times — \times . Coarse sand.

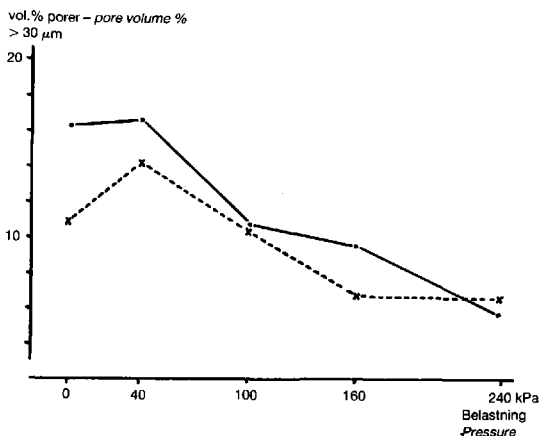


Fig. 4. Sammenhængen mellem belastning af jorden og rumfanget af porer $> 30 \mu\text{m}$ i 14–18 cm dybde efter pakning i 1976 — og 5 år efter i 1981 \times — \times . Fin sandblandet lerjord, Rønhave.

Changes in the volume of coarse pores with increasing surface pressure in 14–18 cm depth in 1976 — and 5 years after in 1981 \times — \times . Sandy loam.

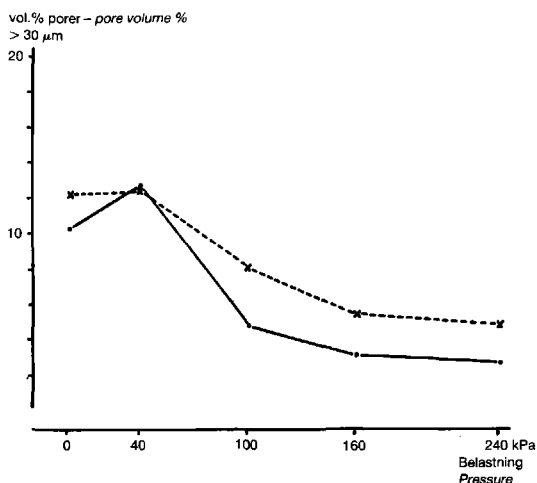


Fig. 5. Sammenhængen mellem belastning af jorden og rumfanget af porer $> 30 \mu\text{m}$ i 14–18 cm dybde efter pakning i 1976 — og 5 år efter i 1981 \times — \times . Lerjord, Højer.

Changes in the volume of coarse pores with increasing surface pressure in 14–18 cm depth in 1976 — and 5 years after in 1981 \times — \times . Silty loam.

I sandjorden og i den sandblandede lerjord er andelen af grovporer lidt mindre i 1981 end i 1976 i det upakkede forsøgsled og ved den laveste belastning. Ved de større belastninger er andelen af grovporer af samme størrelse i 1981 og 1976.

I lerjorden er andelen af grovporer større i 1981 end i 1976 efter de største belastninger.

I dybden 4–8 cm var forholdene de samme som i 14–18 cm dybde, men i intet tilfælde var der signifikante forskelle imellem 1976 og 1981.

Forholdet mellem jordens volumenvægt (pore-rumfang) og andelen af porer > 30 µm

På grundlag af et stort antal jordprøver udtaget dels i lysimeteranlægget, dels i et tidligere pakningsforsøg (17), og dels i andre markforsøg på de tre jordtyper er der beregnet regressionsanalyser på forholdet mellem jordens porøsitet og andelen af porer > 30 µm.

Fig. 6 viser relationen mellem jordens porøsitet og andelen af grovporer for de tre jordtyper. Regressionsligningerne er vist nederst i figuren.

I alle tre jorde aftager andelen af grovporer med aftagende porøsitet (stigende volumenvægt). Hældningen på kurverne er omtrent ens, og R^2 er signifikant på 99,9% niveauet på alle tre jorde.

I sandjorden er der ved en lav porøsitet stadig et stort rumfang grovporer, mens rumfanget i lerjorden nærmer sig nul ved en porøsitet på ca. 40 vol. %.

Rumfanget af porer > 30 µm angiver luftkapaciteten ved pF 2,0. Denne skal ifølge *Aslyng* (1) være mindst 10–15 vol. %. I den sandblandede lerjord svarer det til en porøsitet på 41–45 vol. % og i lerjorden på 48–52 vol. %, hvilket er de optimale værdier for porøsitet i disse to jorde (17).

Vandindholdets betydning for jordens pakning målt med ødometer

Pakning af jorden er en hurtig sammentrykning, der kun kan ske, når jorden indeholder luft. Sammentrykning under udpresning af vand – konsolidering – sker så langsomt, at den er uden betydning i forbindelse med færdsel på og bearbejdning af jorden. Hvis al luften presses ud, og jorden der-

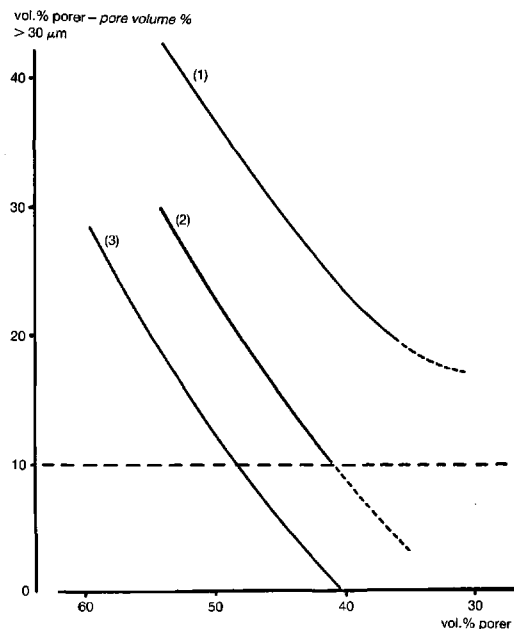


Fig. 6. Sammenhængen mellem jordens porerumfang og rumfanget af porer > 30 µm.

Relationship between the pore volume and the volume of coarse pores > 30 µm.

$$(1) \text{ grov sandbl. jord: } Y = 148,140 - 10,319x + 0,252x^2 - 0,0018x^3$$

$$\text{coarse sand} \quad R^2 = 0,941^{xxx}, n = 200$$

$$(2) \text{ sandbl. lerjord: } Y = -1,251 - 0,613x + 0,022x^2$$

$$\text{sandy loam} \quad R^2 = 0,955^{xxx}, n = 218$$

$$(3) \text{ lerjord: } Y = -11,189 - 0,473x + 0,019x^2$$

$$\text{silty loam} \quad R^2 = 0,938^{xxx}, n = 196$$

ved bliver vandfyldt under pakning, standser denne, og plastisk flydning indtræder, når der er mulighed herfor (1).

For at undersøge jordens sammentrykkelighed ved forskellig belastning og vandindhold blev der i laboratoriet gennemført målinger med ødometer, som beskrevet af *Jacobsen* (11). Det anvendte ødometer består af en fast cylinder med et bevægeligt stempel (areal 22,9 cm²), hvis højdeindstilling kan aflæses på et mikrometerur samtidig med aflæsning af belastningen.

Ved målingen blev en plexiglasring med samme indvendige diameter som stemplet fyldt med løs sigtet jord til ca. 3 cm højde og anbragt i ødometeret. Prøven blev derefter belastet trinvis med aflæsning af prøvehøjde og belastning for hvert trin. Trykket på jorden er beregnet som belastning/cylinderareal i kPa. Porøsiteten beregnes ud fra prøvens tørvægt, højde og diameter på følgende måde:

$$\text{Volumenvægt, } \rho_t = \frac{\text{g tør jord}}{\text{areal} \times \text{højde}}, \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Porøsitet, } n = (1 - \rho_t / \rho_r) 100, \%$$

hvor ρ_r er jordens reelle massefylde.

Ødometermålinger er foretaget på jordprøver fra de tre jordtyper: grovsand (Jyndevad), fin sandblandet ler (Rønhave) og ler (Højer). Der er anvendt 8 forskellige belastninger ved 8 forskellige vandindhold i sandjorden og 7 i de to lerjorde.

I figurerne 7, 8 og 9 er porøsiteten afsat som funktion af vandindholdet. På alle tre figurer er indtegnet vandindhold ved visnegrænse (pF 4,2) og vandindholdet ved markkapacitet, der i sandjorden ligger mellem pF 1,7 og 2,0 og i lerjordene mellem pF 2,0 og 2,3 (1).

I undersøgelsen er lavest anvendte vandindhold i alle tre jorde vandindholdet i lufttør jord, hvor det udelukkende er friktionen mellem aggregaterne, der modvirker pakningen.

Stigende belastning har ved alle vandindhold medført en reduktion i porerumfanget. I sandjorden er det kun små reduktioner i porerumfanget, der sker ved stigende vandindhold med store belastninger, mens reduktionen er stor i begge lerjorde, hvor den indre friktion mindskes med stigende vandindhold. Ved højt vandindhold og tryk deformeres aggregaterne (1).

Når al luft er presset ud, kan yderligere sammentrykning af jorden kun ske ved udpresning af vand. Jorden vil være vandmættet, når porøsiteten er lig med det volumetriske vandindhold (v). Dette er indtegnet på figurerne.

Ved vandindhold over markkapacitet forekommer der i alle tre jorde en betydelig reduktion i porerumfanget ved stigende belastning. Størst reduktion sker i den sandblandede lerjord (Rønhave).

I markforsøg med pakning er det »optimale« porerumfang bestemt til 41–44 vol. % i den sandblandede lerjord (Rønhave) og 50–54 vol. % på lerjorden (Højer) (17). Disse er indtegnet på fig. 8 og 9.

I den sandblandede lerjord vil en belastning på ca. 200 kPa og i lerjorden en belastning på ca. 70 kPa ved markkapacitet give et porerumfang, der ligger under det »optimale« porerumfang. Den

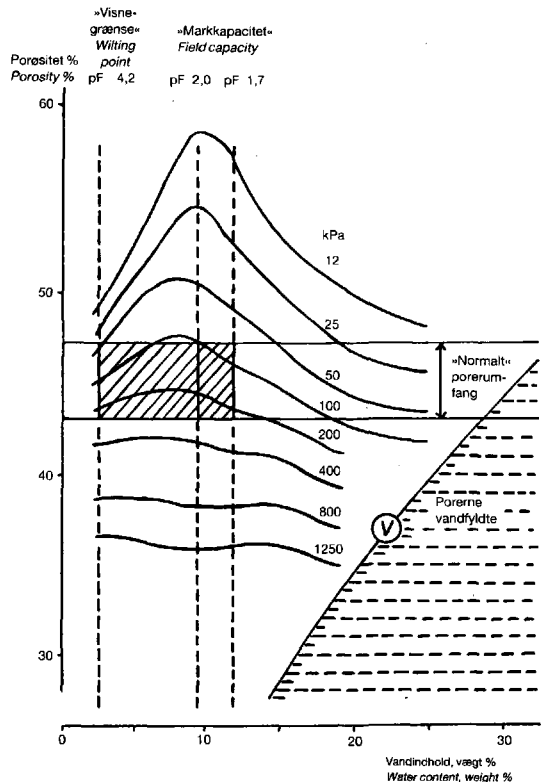


Fig. 7. Sammenhængen mellem jordens vandindhold, belastning og porøsitet, V = vandmætning. Ødometermålinger på grovsandet jord, Jyndevad.

Relationship between the soil water content, surface pressure and porosity. V = saturation of the pores. Coarse sand.

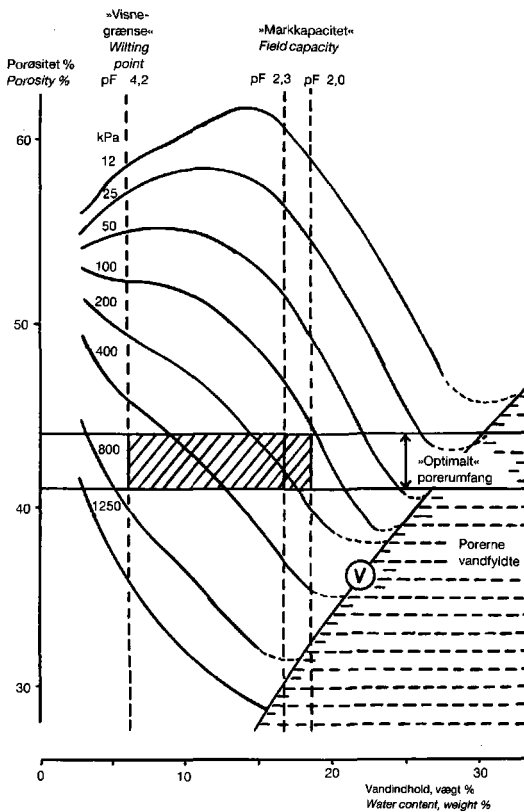


Fig. 8. Sammenhængen mellem jordens vandindhold, belastning og porøsitet, V = vandmætning. Ødometermålinger på fin sandblandet lerjord, Rønhave.
Relationship between the soil water content, surface pressure and porosity. V = saturation of the pores. Sandy loam.

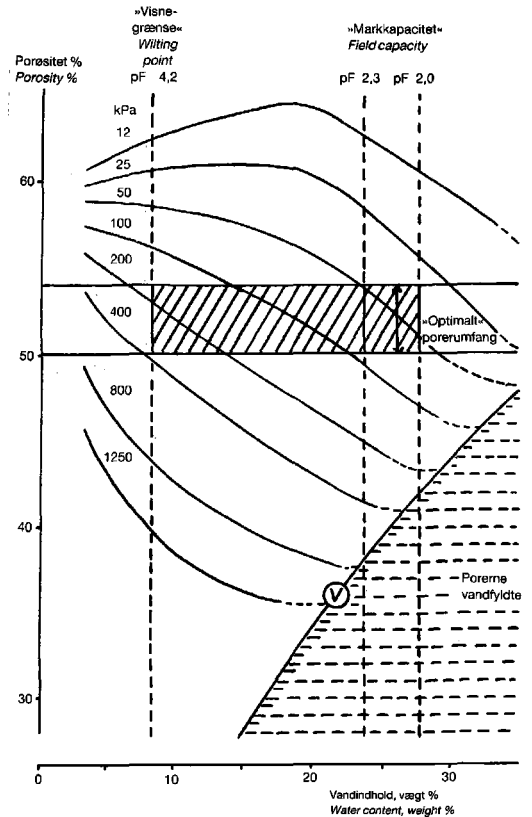


Fig. 9. Sammenhængen mellem jordens vandindhold, belastning og porøsitet, V = vandmætning. Ødometermålinger på lerjord, Højer.
Relationship between the soil water content, surface pressure and porosity. V = saturation of the pores. Silty loam.

sandblandede lerjord tåler altså en større belastning end lerjorden, inden der ske en skadelig påvirkning.

I sandjorden har det ikke været muligt at bestemme et optimalt område for porøsiteten. Derfor er det »normale« porerumfang, altså det porerumfang, man almindeligvis finder i marken efter bearbejdning om foråret, indtegnet på figuren. Det ses, at et specifikt tryk på 100 kPa kun ved vandindhold langt over markkapacitet vil reducere porerumfanget til mindre end det »normale«,

mens et tryk på 200 kPa ved et lavere vandindhold reducerer porerumfanget til under det »normale«. Dette viser, at stor belastning på fugtig sandjord kan være skadelig, hvilket også er konstateret i pakkingsforsøg under markforhold (17). Resultaterne kan dog ikke direkte overføres til markforhold, da belastningstiden i disse undersøgelser var 5–10 gange så lang, som når en traktor belaster et givet areal i marken.

Jordens porøsitet aftager med stigende belastning. På den retliniede del af kurven, der beskri-

ver plastisk sammentrykning af jorden, kan porøsitetens beskrives ved ligningen (1):

$$n = n_0 - k \log \frac{p}{p_0},$$

hvor n_0 er porøsiteten ved begyndelsestrykket, p_0 , som er mindre end p ; k er en konstant (hældningskoefficient), der afhænger af jordtypen.

I fig. 10 er hældningskoefficienten, k , beregnet for den rette del af kurverne for sammenhængen mellem belastning og porøsitet ved et givet vandindhold (w). For de to lerjorde er k omtrent ens, trods forskelle i deres tekstur. Dvs., at trykfor-

øgelse giver omtrent samme porøsitetsformindskelse på disse to jorde. Af kurverne ses det, at en belastning på > 70 kPa giver en porøsitet, der nærmer sig en nedre kritisk værdi på ca. 50% i lerjord. En belastning på > 180 kPa giver en porøsitet, der nærmer sig en nedre kritisk værdi på ca. 41% i den sandblandede lerjord, og en belastning på > 250 kPa giver en porøsitet, der nærmer sig en nedre kritisk værdi på ca. 43% i den grovsandede jord.

Sandjorden har den laveste k -værdi, dvs. den ringeste tendens til pakning.

Jordtypeforskelle, som findes i form af forskellig tekstur og forskellig form og tæthed af primær- og sekundærpartikler, medfører forskellig initialporøsitet i en nylig løsnet jord (såbed).

I fig. 10 er initialporøsiteterne angivet efter ekstrapolering fra de enkelte kurver til ordinaten. Initialporøsiteten ses at være lavest på den grovsandede jord og højest på lerjorden. Disse forskelle er i overensstemmelse med Rasmussen (18), der i såbedet fandt porøsiteter i sandjord på 62%, i sandblandet lerjord på 63% og i lerjord på 65%.

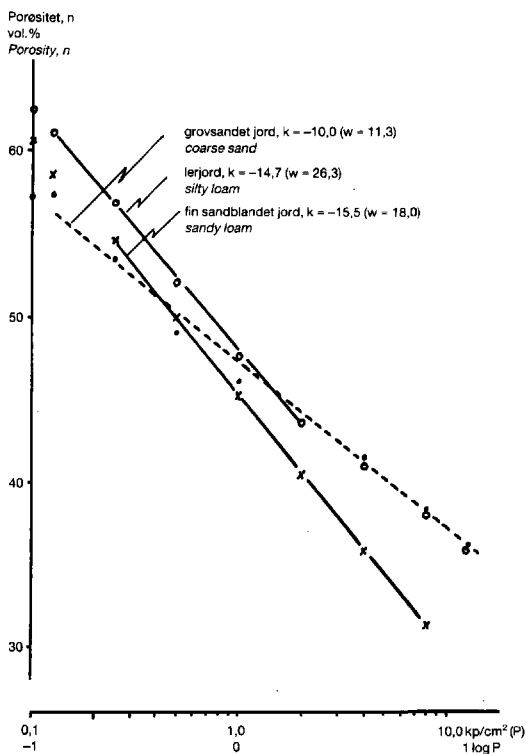


Fig. 10. Sammenhængen mellem belastning (p) og porøsitet (n) på grundlag af den rette del af linerne. k = hældningskoefficient, w = vandindhold.

Relationship between surface pressure (p) and porosity (n) on the basis of the straight part of the curves. k = coefficient of slope, w = water content.

Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord

Neuhaus (16) og Kuntze (14) angiver, at måling af hydraulisk ledningsevne er forbundet med stor usikkerhed. Dette bekræftes af resultaterne fra de tre jorde, der er vist i tabel 7 og 8.

I enkelte tilfælde var spredningen, s , lige så stor eller større end den gennemsnitlige k_f -værdi for de anvendte fællesprøver.

Trods den store variation er der i 1976 fundet statistisk sikre forskelle i begge dybder i sandjorden, i 14–18 cm dybde i sandblandet lerjord og i 4–8 cm dybde i lerjorden.

Af tabel 7 ses, at den hydrauliske ledningsevne er meget følsom over for jordpakning. I alle tre jorde aftager ledningsevnen betydeligt i begge dybder som følge af pakningen.

I lerjordene, hvor der ofte er mindre end 10% grovporer, er der målt særdeles lave k_f -værdier, mens der i den grovsandede jord, hvor der er ca. 25% grovporer, efter en belastning på 240 kPa stadig er en k_f -værdi på 380 mm/time.

Tabel 7. Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord (kf), efterår 1976. Gns. af 3 stk. 100 cm³ ringe, mm/time
Saturated hydraulic conductivity (kf) after harvest 1976.
Average of 3 replicates, mm per hour

Jordtype: Soil type:	Grovsand Coarse sand	Sandbl. ler Sandy loam	Ler Silty loam
<i>4–8 cm dybde</i>			
Upakket	1559	113	689
40 kPa	1031	85	108
100 kPa	793	80	94
160 kPa	589	14	5
240 kPa	421	12	<1
LSD	102	n.s.	593
<i>14–18 cm dybde</i>			
Upakket	2004	84	54
40 kPa	983	99	49
100 kPa	575	16	1
160 kPa	646	5	1
240 kPa	380	2	<1
LSD	83	37	n.s.

Tabel 8. Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord (kf), efterår 1981. Gns. af 12 stk. 100 cm³ ringe, mm/time
Saturated hydraulic conductivity (kf) after harvest 1981.
Average of 12 replicates, mm per hour

Jordtype: Soil type:	Grovsand Coarse sand	Sandbl. ler Sandy loam	Ler Silty loam
<i>4–8 cm dybde</i>			
Upakket	499	44	356
40 kPa	567	61	182
100 kPa	542	71	107
160 kPa	461	38	56
240 kPa	427	8	33
LSD	n.s.	n.s.	n.s.
<i>14–18 cm dybde</i>			
Upakket	699	78	690
40 kPa	585	84	150
100 kPa	463	51	149
160 kPa	356	12	49
240 kPa	364	8	51
LSD	90	39	141

Tabel 8 viser mættet hydraulisk ledningsevne på jordprøver udtaget i 1981. I 4–8 cm dybde er der i ingen af jordene signifikante forskelle, men dog en tydelig tendens til aftagende kf-værdi med stigende belastning.

I 14–18 cm dybde er der signifikant aftagende kf-værdier med stigende belastning af jorden. I sandjorden er kf-værdien i upakket jord ca. dobbelt så stor som efter belastning med 240 kPa. I lerjordene er kf-værdien 10–14 gange så stor i upakket som i hårdt belastet jord.

Målingerne viser altså, at der – trods niveauforskelle i 1976 og 1981 – ca. 5 år efter pakningen stadig kan måles en stor effekt af denne.

Luftpermeabilitet

Jordens luftskifte er afhængig af dens tæthed og vandindhold. Et relativt udtryk for luftskiftebetingelserne kan fås ved måling af luftpermeabiliteten, som beskrevet af *Kmock* og *Hanus* (13).

For at få sammenlignelige resultater blev luftpermeabiliteten målt på jordprøver, der var afdrænet ved pF 2,0. Resultaterne er vist i tabel 9.

På trods af relativt store standardafvigelser på luftpermeabiliteten er der målt signifikante for-

skelle. I alle tre jordtyper og i begge dybder afviger målingerne ved de to største belastninger (160 og 240 kPa) signifikant fra upakket jord og i flere tilfælde også fra jord, der er belastet med 40 kPa. Der er ingen signifikante forskelle mellem de to højeste belastninger.

Diskussion

Belastning af jorden med stigende specifikt tryk medfører aftagende porøsitet og rumfang af grovporer, hvilket er i overensstemmelse med *Eriks-son et al.* (6), *Rasmussen* (17) og *Eriksson* (7).

Rumfanget af grovporer anvendes som udtryk for jordens luftkapacitet ved markkapacitet. *Aslyng* (1) angiver, at luftkapaciteten for almindelige landbrugsafgrøder skal være 10–15 vol. % for opnåelse af god vækst. Rumfanget af grovporer i sandjorden var ca. 25% efter en belastning på 240 kPa, mens rumfanget af grovporer i den sandblandede lerjord var under 10% ved en belastning på 160 kPa, og under 10% ved en belastning på 100 kPa på lerjorden, som vist i fig. 4 og 5.

Eriksson et al. (6) angiver, at rumfanget af grovporer antager kritiske, små værdier ved en belastning på 200 kPa, og at denne belastning

Tabel 9. Luftpermeabilitet (koo) ved pF 2,0, $10^{-8} \times \text{cm}^2$, 5 år efter pakning. Gns. af 12 fællesprøver, efterår 1981
Soil air permeability at pF 2.0 5 years after compaction.
Average of 12 replicates in 1981

Jordtype: <i>Soil type:</i>	Grovsand <i>Coarse sand</i>	Sandbl. ler <i>Sandy loam</i>	Ler <i>Silty loam</i>
<i>4–8 cm dybde</i>			
Upakket	57	10	10
40 kPa	40	11	7
100 kPa	28	8	7
160 kPa	35	5	2
240 kPa	29	3	3
LSD	8	3	3
<i>14–18 cm dybde</i>			
Upakket	52	12	25
40 kPa	38	12	14
100 kPa	25	7	5
160 kPa	24	3	4
240 kPa	21	2	5
LSD	6	4	5

derfor må betragtes som en kritisk grænseværdi. Nærværende undersøgelser viser imidlertid, at den kritiske grænseværdi afhænger af jordtypen, samt at mindre belastninger end 200 kPa kan være kritiske.

Ved store belastninger, hvor porerumfanget nærmer sig 40 vol. %, vil rumfanget af grovporer nærme sig 0 i lerjorden ved Højer, mens den grovsandede jord stadig vil opretholde et grovporevolumen på over 20 vol. %. Et grovporevolumen på 10–15% svarer i lerjorden til et porerumfang på 48–52 vol. %, og i den sandblandede lerjord til 40–45 vol. %. Dette er sammenfaldende med tidligere undersøgelser (17), der viste, at disse porerumfang og grovporevolumener var optimale ved bygdyrkning.

Rumfanget af mellemporer (30–0,2 μm) angiver med god tilnærmelse, hvor stort et rumfang vand jorden kan stille til rådighed for planterne. Såvel rumfanget af mellem som små (< 0,2 μm) porer øgedes med stigende belastning, hvilket kan tolkes derhen, at såvel den tilgængelige som den utilgængelige vandmængde øges med stigende belastning. Dette er imidlertid ikke tilfældet, da jorden trykkes sammen til et mindre volu-

men, som den tilstedeværende vandmængde fordeles i. Derved øges det relative vandvolumen, men absolut vil vandindholdet stort set være det samme.

Ved høje akseltryk fandt *Håkansson* (9), at lerjord var komprimeret ned til en dybde på 50 cm. I nærværende undersøgelse har den højeste belastning (240 kPa) signifikant reduceret jordens porerumfang ned til ca. 60 cm dybde i lerjorden. I den sandblandede lerjord er der målt porøsitetændringer til 30–40 cm dybde, og i sandjorden til ca. 30 cm dybde.

Undersøgelser af pløjelagets porerumfang viste for alle tre jordes vedkommende, at dette stort set var ens efter prøveudtagning i 1976 og 1981. Da der ikke er lavet nogen form for jordbearbejdning til større dybde end ca. 4 cm, og der ikke er foregået færdsel af nogen art, må det konkluderes, at rodvæksten, skiftende opfugtning og udtørring, samt vekslende frysning og optøning ikke har været i stand til at retablere den komprimerede jord i løbet af en 5 års periode, selv om der hver vinter har været frost i kortere og længere perioder. Samme iagttagelser er også gjort af bl.a. *McGovan et al.* (15), *Blake et al.* (2) og *Ketcheson et al.* (12).

I den grovsandede jord og i lerjorden målt i 1976 meget store, signifikante forskelle i jordens hydrauliske ledningsevne i dybden 4–8 cm, mens forskellene var mindre og usikre i den sandblandede lerjord. I 1981 var forskellene mellem belastningerne imidlertid fuldstændig udjævnet i sandjorden, mens der endnu i de to lerjorde kunne måles forskelle i den hydrauliske ledningsevne, som dog ikke var signifikante. Når den hydrauliske ledningsevne i denne dybde – i modsætning til grovporeandelen – er forbedret, må det skyldes etablering af et kontinuert poresystem som følge af rod- og regnormeaktivitet. I dybden 14–18 cm er der i alle tre jorde i 1981 stadig signifikant lavere hydraulisk ledningsevne for stigende belastning, selv om ledningsevnen er forbedret betydeligt – især i de to lerjorde.

Hansen (8) fandt i de samme jordtyper under markforhold kf-værdier, der var betydeligt lavere end de her fundne. Dette skyldes, at rumfanget af

grovporer var lavere under markforhold end i lysimeteranlægget.

Luftpermeabiliteten ved pF 2,0 var for alle tre jorders vedkommende signifikant lavest efter de to største belastninger ved måling i både 4–8 og 14–18 cm dybde i 1981.

Såvel porestørrelsesfordelingen som den hydrauliske ledningsevne og luftpermeabiliteten viste ved målinger 4–5 år efter komprimeringen, at naturlig retablering af jorden ikke sker i løbet af en kort årrække, uanset om der dyrkes byg eller græs og kløver.

Belastning af løs jord med stigende specifikt tryk (ødometermåling) viste, at lerjorden fra Højer tålte mindre belastninger ved vandindhold omkring markkapacitet end den sandblandede lerjord fra Rønhave, inden porerumfanget reduceredes til mindre end »optimalt« porerumfang på 50–54 vol. % i lerjorden og 41–43 vol. % i den sandblandede lerjord, som fundet af *Rasmussen* (17).

De største belastninger på 1250 kPa gav porerumfang på 29 og 36 vol. % i henholdsvis sandblandet lerjord og lerjord.

Selv om en direkte sammenligning ikke kan foretages mellem pakning i marken, i lysimeter og i ødometer, viser undersøgelsen, at der er sammenhæng mellem resultaterne fra de tre pakningsmetoder, hvilket er i overensstemmelse med *Söhne* (19, 20), der fandt, at pakningskurver for sigtet jord, efter at være trykket sammen til en porøsitet svarende til naturlig lejring, falder sammen med pakningskurver for den naturligt lejrede jord.

Konklusion

Undersøgelser i lysimetre med 2 gentagelser af hver af tre jordtyper: grovsandet jord, fin sandblandet lerjord og lerjord viste, at jordene var meget homogene, hvorfor et lille antal fællesprøver (3 stk.) af 100 cm³ ringe var tilstrækkeligt til at vise sikre forskelle i porøsitet.

Porøsitet og luftindhold i pløjelaget aftog med stigende belastninger i alle tre jordtyper.

Belastninger på henholdsvis ca. 70 kPa på lerjord, ca. 180 kPa på fin sandblandet lerjord og ca.

250 kPa på grovsandet jord medførte porøsiteter, der nærmede sig nedre kritiske værdier på ca. 50% i lerjord, ca. 41% i fin sandblandet lerjord og ca. 43% i grovsandet jord.

Det plantetilgængelige vandindhold ved markkapacitet (pF 2,0) var 9 vol. % i grovsandet jord, 19 vol. % i sandblandet lerjord og 28 vol. % i lerjord.

Det specifikke tryk, der forårsager skadelig pakning, var stigende med aftagende lerindhold i jorden.

Ved belastninger på 240 kPa er der målt reduceret porøsitet i ca. 60 cm dybde i lerjorden, 30–40 cm dybde i sandblandet lerjord og ca. 30 cm dybde i grovsandet jord.

Stigende belastning gav kun mindre forøgelse i rumfanget af små porer (< 0,2 µm) og mellem porer (0,2–30 µm), mens der forekom store og statistisk sikre reduktioner i såvel det totale porerumfang som i rumfanget af grovporer (> 30 µm).

Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord samt luftpermeabiliteten reduceredes signifikant med stigende belastning.

Strukturen i komprimeret, græsbevokset jord, der ikke bearbejdedes, retableredes ikke i løbet af en 5 års periode.

Litteratur

1. *Aslyng, H. C.* (1976): Klima, jord og planter. DSR-forlag, 368 pp.
2. *Blake, G. R., Nelson, W. W. & Allmaras, R. R.* (1976): Persistence of subsoil compaction in a Mollisol. Soil Sci. Soc. Am. J. 40, 943–948.
3. *Bodholdt, O.* (1976): En bedre jordstruktur. Gartner Tidende 92, 754–756.
4. *Danfors, B.* (1977): Jordpakning – hjulustrustning. Jordbrugstekniska Institut, Sveriges Lantbruksuniversitet, Meddelande nr. 368, 53 pp.
5. *Danfors, B.* (1980): Measurements of compaction in the subsoil. Swedish University of Agricultural Sciences, Division of Soil Management. Report no. 60, 30–33.
6. *Eriksson, J., Håkansson, I. & Danfors, B.* (1974): Jordpakning – markstruktur – gröda. Jordbrugstekniska Institut, Sveriges Lantbruksuniversitet, Meddelande nr. 354, 82 pp.

7. *Eriksson, J.* (1982): Markpackning och rotmiljö. Inst. för markvetenskap, Sveriges Lantbruksuniversitet, rapport nr. 126, 138 pp.
8. *Hansen, L.* (1976): Jordtyper ved Statens Forsøgsstationer. Tidsskr. Planteavl 80, 742–758.
9. *Håkansson, I.* (1979): Behövs axelbelastningsnormer? Traktor journalen 14, 502–507.
10. *Håkansson, I.* (1982): Long-term effects of vehicles with high axle load on subsoil compaction and crop response. Proc. of the 9th Conference of the International Soil Tillage Research Organization, Osijek, Yugoslavia, 213–218.
11. *Jacobsen, B.* (1968): Mekaniske egenskaber hos nogle danske jorde. Licentiataffhandling, KVL, 44 pp.
12. *Ketcheson, J. W., Groenevelt, P. H., Kay, B. D. & Grant, C. D.* (1982): Effect of stover management on soil temperature. Proc. of the 9th Conference of the International Soil Tillage Research Organization, Osijek, Yugoslavia, 478–483.
13. *Kmock, M. G. & Hanus, M.* (1965): Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. 1, 1–10.
14. *Kuntze, H.* (1965): Die Marschen. Schwere Böden in der landwirtschaftlichen Evolution. Verlag Paul Parey, Hamburg u. Berlin, 127 pp.
15. *McGovan, M., Wellings, S. R. & Fry, G. J.* (1983): The structural improvement in damaged clay subsoils. J. Soil Sci. 34, 233–248.
16. *Neuhaus, H.* (1963): Strukturschwankungen bei Marschböden in Abhängigkeit von Klima und Meliorationsmassnahmen. Dissertation. Fakultät der Georg-August-Universität, Göttingen, 137 pp.
17. *Rasmussen, K. J.* (1976): Jordpakning ved færdsel om foråret. II. Jordfysiske målinger. Tidsskr. Planteavl 80, 835–856.
18. *Rasmussen, K. J.* (1981): Såbedets tilstand i forårsåede marker. En stikprøveundersøgelse 1972–1974. Beretning nr. S1539. Tidsskr. Planteavl 85, 75.
19. *Söhne, W.* (1953): Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grdln. d. Landtechn. 5, 49–63.
20. *Söhne, W.* (1955): Die Verdichtbarkeit des Ackerbodens unter Berücksichtigung des Einflusses organischer Bestandteile. Z. Pflanzenernähr., Ernte, Düng., Bodenk. 69, 116–125.

Manuskript modtaget den 5. september 1984.