

Sveriges Lantbruksuniversitet  
Institutionen för markvetenskap  
Avdelningen för jordbearbetning

**RAPPORTER FRÅN  
JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN.**

Nr 99, 2000

ISSN 0348-0976

ISRN SLU-JB-R-99-SE

*Inge Håkansson*

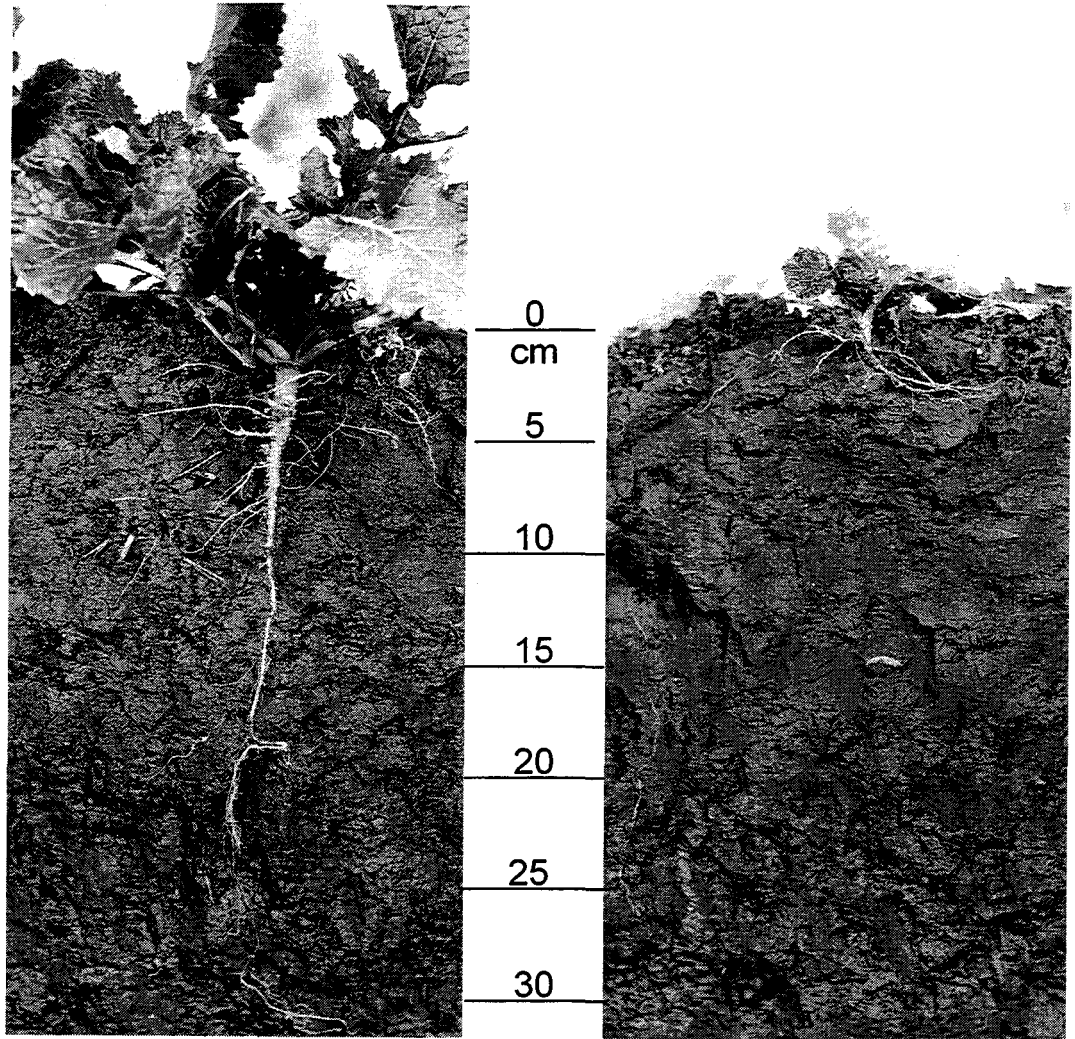
# **PACKNING AV ÅKERMARK VID MASKINDRIFT**

## **OMFATTNING - EFFEKTER - MOTÅTGÄRDER**

### *Summary*

#### **Machinery induced compaction of arable soils, incidence - consequences - counter-measures**

This book describes, in a Scandinavian perspective, various aspects of machinery induced soil compaction in agriculture from a scientific as well as a practical point of view. It is mainly based on experience from Sweden and other Scandinavian countries, where field experimentation on soil and crop responses to machinery traffic has been more extensive than in most other parts of the world. In nine chapters, the following subjects are discussed: 1) traffic intensity in arable fields, 2) stress distribution under tyres and tracks, 3) extent and persistence of soil compaction, 4) effects of compaction on soil properties and processes, 5) effects of compaction on crop growth and yield, 6) ecological and environmental effects of compaction, 7) methods to reduce compaction or its negative effects, 8) economic consequences of compaction, 9) present situation and need of stress limits.



*Fig. 1.* När en åkerjord packas förändras nästan alla dess egenskaper. Bilden visar två ca 30 cm djupa jordprofiler uttagna i ett rybsfält på ett par meters avstånd från varandra. Den vänstra profilen var uttagen i ett område, där jorden blivit lagom återpackad under såbäddsberedningen. Därför kunde rybsens rötter utvecklas obehindrat mot djupet och grödan tillväxa normalt. Den högra profilen var uttagen, där en stallgödselspridare gått fram under våta förhållanden. Jorden hade då packats så starkt att rötternas tillväxt stoppades upp på några cm djup och grödans utveckling blev mycket dålig.

© 2000 Inge Håkansson, Uppsala

## Förord

Körning med tunga maskiner packar marken. Detta har orsakat problem alltsedan fältarbetena började mekaniseras för över 50 år sedan. Så länge maskinerna var lätta, packades främst matjorden. I detta lager blir dock verkningarna kortvariga, eftersom jorden luckras av bearbetningar och naturliga processer. Maskinerna blir emellertid allt tyngre och numera packas även djupa avlager. Där blir verkningarna långvariga eller rent av permanenta, vid upprepade körningar ackumuleras verkningarna och inga jordbearbetningar eller naturliga processer kan återställa ursprungstillståndet.

När en mark packas så påverkas praktiskt taget alla dess egenskaper, fysikaliska såväl som kemiska och biologiska, och i regel i ogynnsam riktning. Grödornas avkastning sänks, bearbetningsbehov och energiåtgång vid bearbetningarna ökar, vattengenomsläppligheten minskar, ytavrinningen, erosionen och växtnäringens utlakning ökar, markens genomluftning och livsbetingelserna för många markorganismer försämras och denitrifikationen ökar. Kunskaper om packningens verkningar behövs därför i många sammanhang, inte bara de rent jordbrukstekniska.

I tidigare forskning har man främst studerat packningens effekter på markens fysikaliska egenskaper och på grödornas avkastning. De många och komplexa effekterna på markens kemiska och biologiska egenskaper och processer och på den yttre miljön är fortfarande betydligt sämre undersökta. De enskilda markprocesserna, till exempel gasutbytet i marken, påverkas överallt på ett likartat sätt om marken packas. Olika processers omfattning och relativa betydelse varierar emellertid med klimat, jordar och odlingsystem och följaktligen kan packningen få mycket olikartade konsekvenser i olika regioner. De praktiska rekommendationerna och motåtgärderna måste därför anpassas till de lokala förhållandena.

Denna bok behandlar packningsproblemen ur nordisk synvinkel och baseras främst på forskningen i Sverige och i våra närmaste grannländer. Svensk försöksverksamhet tillhör de mest omfattande i världen vad packningens effekter på grödorna beträffar. Då undertecknad deltagit i eller följt denna verksamhet under lång tid, känner jag det som en plikt att ge en översikt av kunskapsläget.

Boken är i första hand utformad som lärobok för undervisningen i lantbruk och miljövärd. Förhoppningsvis skall den emellertid också kunna användas som uppslagsbok av yrkesverksamma jordbrukare, jordbruksrådgivare, maskintillverkare och miljövärdare. Därför är varje enskilt kapitel skrivet så att det kan läsas separat. Detta medför en del upprepningar men jag hoppas att de som läser boken i ett sammanhang inte skall finna dessa alltför störande. De enskilda kapitlen inleds med sammanfattningar, som tillsammans ger en snabböversikt över bokens innehåll.

Uppsala, i maj 2000

*Författaren*

## Innehåll

	Sid.
<b>Kapitel 1 Körintensiteten på åkermark</b>	7
1.1 Hjulet -vårt mest använda jordbearbetningsredskap	7
1.2 Spårytans storlek	8
1.3 Spår fördelningen	10
1.4 Antalet tonkm per ha	12
1.5 Andra mått på körintensiteten	14
<b>Kapitel 2 Tryckfördelning under hjul och band</b>	15
2.1 Trycket i ett hjuls anliggningsyta mot marken	15
2.2 Tryckfördelningen i marken	17
2.3 Bandfordon	20
<b>Kapitel 3 Packningens omfattning och varaktighet i våra åkerjordar</b>	23
3.1 Samband mellan tryck och packning	23
3.2 Packningens omfattning i matjorden	27
3.3 Packningens omfattning i alven	33
3.4 Packningens varaktighet	37
<b>Kapitel 4 Packningens effekter på några markegenskaper och -processer</b>	41
4.1 Porvolym och porstorleksfördelning	41
4.2 Infiltration, vattengenomsläpplighet, dränering	43
4.3 Rotutveckling och -funktion	44
4.4 Markbiologiska effekter	48
4.5 Effekter av stark luckring	48
<b>Kapitel 5 Packningens effekter på grödorna</b>	51
5.1 Olika slag av effekter	51
5.2 Ettåriga effekter av återpackning av matjorden efter plöjning	52
5.3 Packningseffekter som kvarstår efter plöjning	61
5.4 Packningseffekter i oplöjd jord	65
5.5 Packning i alven	69
5.6 Effekter av körning med maskiner vid vallskörd	71
<b>Kapitel 6 Ekologiska och miljömässiga effekter</b>	75
6.1 Alla markegenskaper och -processer påverkas	75
6.2 Ytvattenavrinning, vattenhushållning och erosion	75
6.3 Utnyttjandet av insatsprodukterna i växtodlingen	77
6.4 Utlakning av växtnäring	77
6.5 Den biologiska aktiviteten i marken	78

	Sid.
<b>Kapitel 7 Metoder att minska packningen eller dess verkningar</b>	81
7.1 Åtgärderna måste anpassas till gårdens förhållanden	81
7.2 Allmänna odlingsåtgärder	82
7.3 Maskinutrustningen	83
7.4 Jordbearbetning	87
7.5 Körtdpunkt, körsätt och planering av körningarna	88
7.6 Framtida möjligheter	89
<b>Kapitel 8 Ekonomiska konsekvenser av packning</b>	93
8.1 Olika modeller för beräkning av packningsverkningar	93
8.2 Svensk modell för beräkning av avkastningsverkningar	94
8.3 Exempel på ekonomiska effekter	100
8.4 Dragkraftsbehov i packad jord	105
<b>Kapitel 9 Nuläge och behov av belastningsgränser</b>	107
9.1 Läget i praktiken	107
9.2 Behov av belastningsgränser	112
<b>Referenser</b>	117
<b>Sakregister</b>	121
<b>Faktarutor</b>	
1 Tryck och spänning	16
2 Ökande maskinstorlekar	22
3 Definition av jordpackning och packningstillstånd	24
4 Lite jordartskänedom	26
5 Definition av några markfysikaliska termer	28
6 Tjälldjup och tjälningfrekvenser	39
7 Alvluckring	40
8 Hur påverkas volymförhållanden och porstorlekar i en jord av packning	42
9 Rottillväxt och rotdjup	47
10 Penetrometern och vingborren	49
11 Packningsgrad och standardpackning	56
12 Reducerad bearbetning på olika jordar	68
13 Grödornas vattenbehov och vattenuttag ur marken	71
14 Tidig sådd på sand- och lerjord	86
15 Försök med vinschade redskap	91



# Kapitel 1

## Körintensiteten på åkermark

### Sammanfattning

Den sammanlagda årliga spårytan från traktorer och andra jordbruksmaskiner är i regel flera gånger så stor som fältytan. I genomsnitt överfars därför varje punkt på fälten flera gånger per år av tungt belastade hjul. Vid spannmålsodling brukar antalet årliga överfarter bli minst fyra och vid sockerbetsodling sex till åtta.

Ett annat mått på körintensiteten är antalet tonkm per ha. För en enskild maskin beräknas denna som maskinens vikt i ton multiplicerad med körsträckan i km per ha. För samtliga arbetsoperationer under året i en spannmålsgröda får man vanligen en sammanlagd körintensitet av ca 150 tonkm per ha och år och i en sockerbetsgröda nästan dubbelt så mycket. Den påverkan på marken, som en viss körning åstadkommer, beror emellertid också av andra faktorer, främst ringtrycket och markfuktigheten. Multiplicerar man tonkm-värdet med en omräkningsfaktor för ringtryck och markfuktighet, får man ett omräknat tonkm-värde som ger ett bättre begrepp om hur stark markpackning maskinerna kan åstadkomma.

Varken spårytan eller det omräknade tonkm-värdet ger emellertid en fullständig bild av hur maskinerna påverkar marken. Vid mera detaljerade beräkningar måste man även beakta bl.a. spår fördelningen.

### 1.1. Hjulet - vårt mest använda jordbearbetningsredskap

Det belastade hjulet har ibland sagts vara vårt mest använda jordbearbetningsredskap. Med traktorhjul och andra hjul "bearbetar" vi nämligen våra åkerjordar oftare än med någon annan typ av redskap. Om inte marken är mycket torr och hård, så leder körning med tunga maskiner till att matjorden och ofta också alven packas, ibland till stort djup. Som visas i senare kapitel kan detta radikalt förändra markens egenskaper och funktion och sänka skörden.

I detta kapitel påvisas hur omfattande körningen med traktorer och andra maskiner och fordon är i modernt jordbruk. Uppgifter ges om spårytans storlek, spår fördelningen på fälten och antalet tonkm per ha. Dessa enkla uppgifter ger visserligen bara en grov bild av de påkänningar som maskinerna utsätter marken för men de visar varför jordpackningsfrågorna är betydelsefulla och varför det är viktigt att söka begränsa packningen och dess negativa verkningar. Ibland leder körning med tunga maskiner dessutom till besvärande spårbildning. Då kan efterföljande arbeten försvåras och man kan tvingas till extra bearbetningar enbart för att utjämna spåren, vilket ibland kan ha lika stor ekonomisk betydelse som den packning körningen leder till.

Liksom det är ogynnsamt för växterna om jorden är starkt packad, så är det

emellertid också ogynnsamt om den är för lucker. Efter plöjning eller annan djup bearbetning behövs därför en måttlig återpackning av det luckrade lagret. En överfart av traktorhjul med låga marktryck ger ofta lagom stark återpackning.

## 1.2. Spårytans storlek

Den sammanlagda spårytan från samtliga jordbruksmaskiners hjul under ett år brukar vara flera gånger så stor som fältytan. Spårytans totala storlek varierar dock avsevärt och beror bl.a. av gårdens odlingsinriktning, jordarnas bearbetningsbehov och de använda maskinernas typ, arbetsbredd och hjulutrustning.

Man kan lätt beräkna den totala spårytan under en arbetsoperation om man känner körsträckan och hjulens sammanlagda bredd. För sådana arbeten som jordbearbetning och sådd kan de verkliga körsträckorna per ha uppskattas med tillräcklig noggrannhet på ett enkelt sätt. Den effektiva körsträckan i själva dragen uttryckt i km per ha blir 10 dividerat med den effektiva arbetsbredden i m. Till detta kan man göra ett schablon tillägg för vändningar, överlappningar och andra extrakörningar. För de nämnda arbetena blir tillägget vanligen 25 à 30 %, men på stora, regelbundna fält kan det bli något mindre och på små eller oregelbundna fält något större.

Vid exempelvis stallgödselspridning och olika fälttransporter blir extrakörningen procentuellt sett mycket större och mera varierande och kan inte uppskattas med en enkel schablon. Vid stallgödselspridning har den extra körsträckan visat sig kunna bli upp till fyra gånger så lång som spridningssträckan. Den beror bl.a. av maskinval, körmönster, gödselgiva, fältstorlek och fältform samt av in- och utfarternas antal och läge och kan ofta minskas radikalt, om man planerar kör-systemet noggrant.

I Tabell 1 visas hur stor spårytan efter hjulen på maskiner och fordon brukar bli i procent av fältytan vid normal jordbruksdrift, dels under några enskilda arbetsoperationer dels sammanlagt under året för olika typer av grödor. Värdena i tabellen är den sammanlagda spårytan för samtliga enskilda hjul, oberoende av om några av hjulen följer samma spår. Spårytan blir betydligt större vid plöjning eller annan djup jordbearbetning än vid harvning, eftersom redskapen är smalare. För samma arbete och vid likvärdig hjulutrustning ger stora traktorer vanligen mindre spåryta än små traktorer, eftersom hjulbredden ökar proportionsvis mindre än redskapens arbetsbredd.

I spannmåls- och oljeväxtgrödor får man vid traditionellt antal arbetsoperationer med normala maskiner och gängse hjulutrustning en sammanlagd årlig spåryta som är mellan 3 och 6 gånger så stor som fältytan. Detta betyder att varje punkt på fälten i genomsnitt överfars 3-6 gånger årligen av olika maskiners och fordons hjul. Värdena blir lägst om maskinerna har enkelmonterade, smala däck. Om man vill skona marken och använder dubbelmontage eller extra breda däck, så ökar den sammanlagda spårytan. Detta visar att spårytans storlek inte är något bra mått på påkänningarna på marken. För att man skall få en mer rättvisande bild



Tabell 1. Spårytans storlek i procent av fältytan samt antalet tonkm per ha vid användning av normal maskinutrustning och traditionell brukningsteknik. Värden ges dels för några enskilda fältarbeten dels för samtliga körningar under året i olika typer av grödor. Spårytans storlek är det sammanlagda värdet för samtliga hjul även då flera hjul följer samma spår

Arbete		Spåryta, % av fältytan	Antal tonkm per ha <sup>1</sup>
Plöjning	4 tons traktor, 3-skärig plog	90-170	35-50
	7 tons traktor, 6-skärig plog	65-130	30-45
1 harvning	5 tons traktor, enkla hjul, 6 m harv	25-50	9-12
	5 tons traktor, dubbelmontage, 6 m harv	40-75	9-12
Kombisådd	5 tons traktor, dubbelmont., 3 m såmaskin	100-170	25-35
Skördetröskning <sup>2</sup>	9-12 ton <sup>3</sup> , 4,5 m skärvidd	50-65	28-38
Sockerbetssskörd <sup>2</sup>	3-radig upptagare <sup>4</sup>	120-180	120-160
	6-radig upptagare, 20-40 ton <sup>3</sup>	120-180	120-160
Flytgödselspridning	regelbundna fält, många infarter	40-150	15-60
	oregelbundna fält, få infarter	80-250	30-110
Totalt under året	Spannmål och oljeväxter	300-650	100-220
	Rotfrukter och potatis	400-800	200-400
	Vall till ensilage, 3 skördar	600-1000	180-350

<sup>1</sup>Vid modellberäkningar enligt kapitel 8 multipliceras tonkm-värdena med en omräkningsfaktor som kan variera från nära 0 vid körning med lågtrycksdäck på torr och hård mark till 1,5 vid körning med högtrycksdäck på mycket våt mark. Vid beräkningar av alvpackningen görs dessutom avdrag av belastningen på varje axel. Här redovisade tonkm-värden är inte omräknade eller reducerade.

<sup>2</sup>Exklusive uttransport av skördeprodukten.

<sup>3</sup>Vikt vid tom resp. full tank.

<sup>4</sup>6 tons traktor med upptagare vägande 6 ton tom och 12 ton med full last.

av påkänningarnas omfattning krävs att man också tar hänsyn till däckstyp, ringtryck och belastning på de enskilda hjulen. Detta utvecklas mera i kapitel 8.1, där en modell för beräkning av packningens effekter på grödornas avkastning presenteras.

I rotfrukter och potatis blir spårytan i regel betydligt större än i spannmål, särskilt under skördarbetena. I vall varierar spårytans storlek mycket beroende på skördemetod, antal skördar per år och maskinval. Ju mindre vallfodret torkas i fält, desto tyngre skördegoods skall transporteras ut, desto fler lass får man per arealenhet och desto större spåryta ger själva transporten. Eftersom vallen måste skördas vid rätt utvecklingsstadium, kan man dessutom tvingas köra, när markytan är våt och vallsvålen lätt tar skada.

### 1.3. Spår fördelningen

Inte bara spårytantans totala storlek utan också spår fördelningen över fälten har betydelse för hur körningen påverkar marken och grödan. Spår fördelningen är särskilt betydelsefull vid såbäddsbereidning och sådd på sådana fält, där jorden luckrats genom plöjning eller djup stubbearbetning. Då bör matjorden återpackas (kapitel 5.2) och hela fältytan bör då täckas så jämnt som möjligt av spår från hjul med måttliga marktryck. Inga delytor bör förbli utan spår men inga delytor bör heller överfaras många gånger eller med för höga marktryck. När man kör i vallar eller andra etablerade grödor bör man i stället i möjligaste mån koncentrera körningarna till samma spår. Vid skördearbeten och andra höstarbeten som efterföljs av plöjning är spår fördelningen däremot av underordnad betydelse.

I Fig. 2 visas ett exempel på vilken spår fördelning man kan få på ett fält under ett traditionellt vårbruk med en serie arbetsoperationer, som utförs i olika körriktningar så att spår fördelningen blir nära nog slumpartad. I figuren har den totala fältytan delats upp i delytor med olika antal överfarer från 0 och uppåt. I verkligheten består de olika delytorna av små fläckar eller strimlor utspridda över fältet i ett oregelbundet mönster. Vid dubbelmontage är den helt obefarna ytan liten, särskilt på vändtegarna. Vid enkelmontage är den större och utgör på fältets

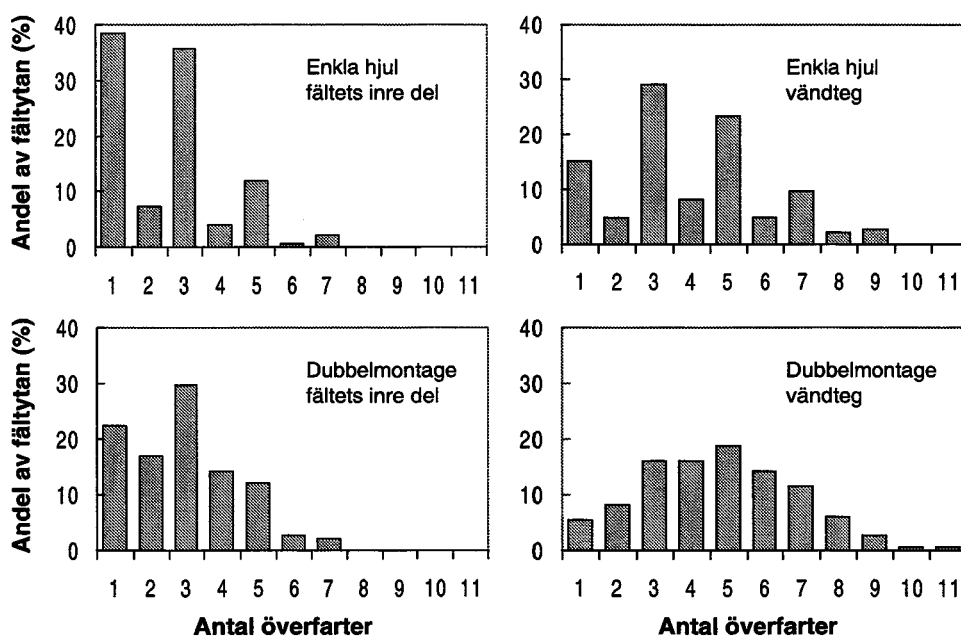


Fig. 2. Uppdelning av fältytan i delytor med olika antal överfarer av hjulen på traktor och såmaskin under ett vårbruk med 3 harvningar och kombisådd. Bredder: Harv 8 m, såmaskin 4 m, traktorns bakhjul 65 cm (enkla hjul) eller 94 cm (dubbelmontage), traktorns framhjul 55 cm.

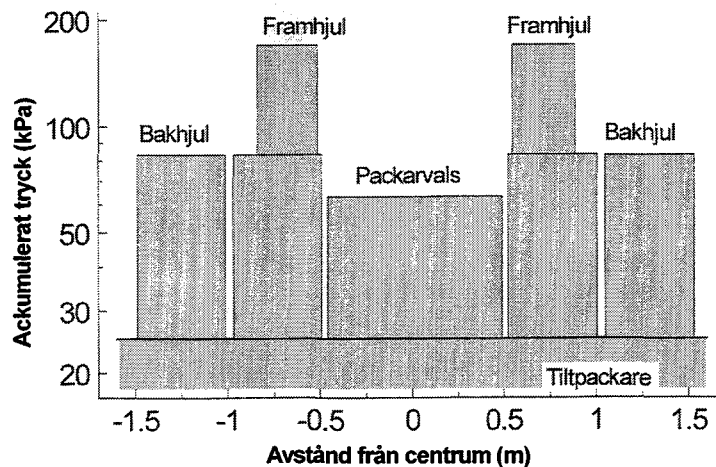


Fig. 3. Spårfördelning och summerat tryck i de olika spåren, när kombisådd med 3 m bred såmaskin är enda arbetsoperation efter det att ett fält vårplöjts med tiltpackare på plogen. Ekipaget är utrustat för s.k. fullbreddspackning. Traktorn har breda bakhjul i dubbelmontage. För att området mellan hjulspåren inte skall förbli opackat har en av såmaskinen belastad packarvals satts in.

inre del nära 40 %. Stora andelar av markytan blir överfarna 1-4 gånger och enstaka fläckar kan bli överfarna så många som 10 gånger.

Fig. 3 ger ett exempel på ett mera "organiserat" spårssystem. Där visas spårfördelning och tryck i de olika spåren vid vårsådd på ett fält, som plöjts på våren med tiltpackare på plogen. Efterföljande arbete inskränker sig till kombisådd av utsäde och handelsgödsel med ett ekipage för s.k. fullbreddspackning. Detta system har under senare år tillämpats med framgång på många lätta mineraljordar, exempelvis i Halland (faktaruta 14). I fig. 3 redovisas de summerade trycken i de olika spåren i logaritmisk skala. Packningsverkningarna i matjorden har nämligen ofta visat sig vara proportionella mot logaritmen på det summerade trycket (kapitel 3.1). Ekipage för denna typ av förenklat vårbruk kan vara utformade på något olika sätt men strävan är att hela bredden skall återpackas så jämnt som möjligt.

I vissa delar av världen odlas enbart grödor med stora radavstånd och då kan det vara möjligt att köra enbart i radmellanrummen och att utnyttja samma spårssystem år efter år. I Fig. 4 visas spårfördelningen i ett amerikanskt odlingsystem för majs och sojaböner, båda med 75 cm radavstånd. I detta system görs alla körningar under året i en och samma riktning och grödorna sås i toppen av fastliggande kupkammare. De årliga bearbetningarna inskränks till att man vid sådden rakar ner en del jord från kupkammarna och efter grödans uppkomst åter kuper upp dessa. Ett sådant system fordrar att samtliga grödor kan odlas med ett enhetligt och stort radavstånd, att effektiv kemisk ogräsbekämpning kan göras och att kupkammarnas lägen kan ligga helt fast. Det kan naturligtvis inte direkt över-

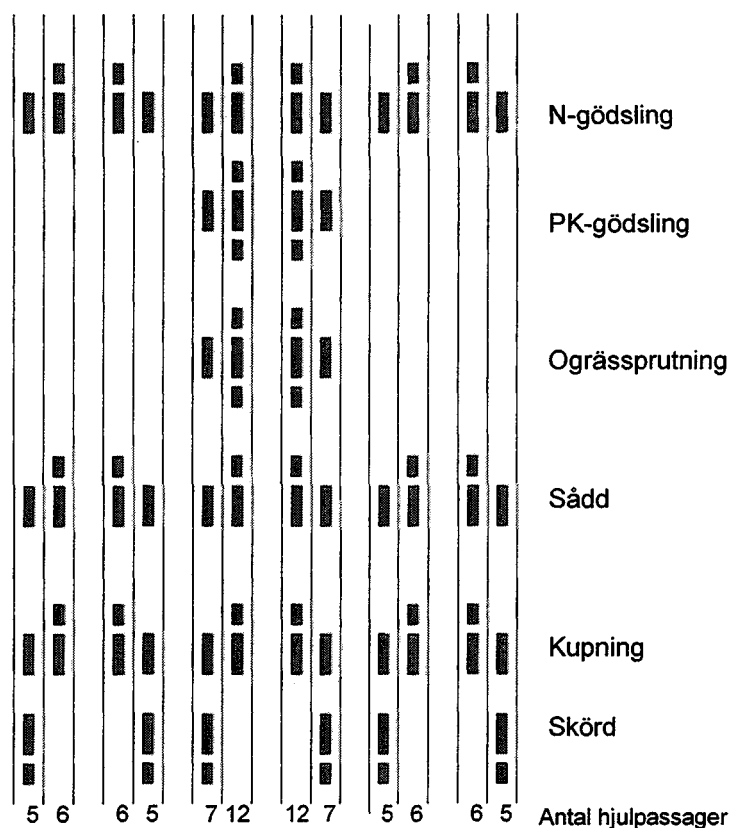


Fig. 4. Körmönster för alla arbetsoperationer under året i ett amerikanskt odlingsystem, där man växelvis odlar majs och sojabönor, båda med 75 cm radavstånd. Grödorna sås på toppen av kupkammor, som ligger fast från år till år. Figuren visar hur många hjul som passerar mitt i de olika radmellanrummen. Inga hjul får gå på kupkammorna och därför behöver jorden inte luckras genom plöjning. Vid sådden rakas en del jord ner från kupkammorna. Dessa återställs sedan genom ny kupning efter grödans uppkomst. (Efter Parsons m.fl., 1984.)

föras till skandinavisk spannmålsodling men det visar att man under vissa förutsättningar kan tillämpa körsystem, som radikalt minskar bearbetningsbehovet.

#### 1.4. Antalet tonkm per ha

En annan möjlighet att kvantifiera körintensiteten med maskiner och fordon är att ange antalet tonkm per ha, d.v.s. fordonens vikt i ton multiplicerad med resp. körsträckor i km per ha. Om exempelvis en traktor och vagn med en sammanlagd vikt av 10 ton körs en sträcka av 1 km per ha på ett fält, så blir körintensiteten 10 tonkm per ha. Med hjälp av tonkm-värden kan olika maskiners eller maskin-

systems möjliga jordpackningsverkningar (packningspotential) jämföras och därmed också riskerna för skadlig jordpackning.

I Tabell 1 redovisas normala tonkm-värden för ett antal arbetsoperationer och grödor. Plöjning, stallgödselspridning och sockerbetskörning är exempel på enskilda arbeten som ger många tonkm. Vid jordbearbetning ökar antalet tonkm per ha i regel endast obetydligt med ökad traktorstorlek, eftersom arbetsbredden på de redskap man använder brukar öka och körsträckan minska nästan i takt med traktorvikten. När skördemaskiner och transportfordon blir större, ökar arbetsbredden däremot ibland betydligt långsammare än vikten och antalet tonkm per ha kan därigenom ökas ganska mycket. Då är det extra viktigt att körsystemen planeras så att körsträckorna blir så korta som möjligt.

I spannmål och oljeväxter med konventionell brukning blir den sammanlagda årliga körintensiteten vid jordbearbetning, sådd, gödsling, sprutning och skörd vanligen 120-150 tonkm per ha. Bärar man halm, stubbearbetar och sprider stallgödsel ökar den till ca 200 tonkm per ha. I rotfrukter och potatis blir körintensiteten mycket större än i spannmål, särskilt under skörden.

Tonkm-värden baserade endast på de olika maskinernas vikter och körsträckor ger emellertid en ofullständig bild av maskinernas packningspotential, eftersom denna också beror bl.a. av hjulutrustningen. Används däck med höga marktryck, är packningspotentialen sålunda större än om däck med låga marktryck används. En viss körning ger dessutom upphov till mera packning under våta körförhållanden än under torra. En bättre bild av vilka packningsverkningar körningarna åstadkommer får man därför, om man också tar hänsyn till trycken i hjulens anliggningsytor mot marken (nedan kallade marktrycken) och markens aktuella fuktighet. I kapitel 8.2 presenteras en modell för beräkning av packningens verkningar på grödornas avkastning. Innan man i denna modell använder ett tonkm-värde för att beräkna avkastningseffekterna, multipliceras det med en omräkningsfaktor för marktrycket och markfuktigheten. Omräkningsfaktorn kan variera från 0 när man kör med lågtrycksdäck på mycket torr och hård mark till 1,5 när man kör med högtrycksdäck på mycket våt mark. En omräkningsfaktor över 1,5 är ej möjlig, eftersom man då helt enkelt kör fast.

Tonkm-värden baserade på maskinernas totalvikter är avsedda att ge upplysning om potentialen för packning av matjordslagret. För att få upplysning om potentialen för packning i alven behöver man också ta hänsyn till hur trycken under hjulen avklingar med djupet (kapitel 2.2). För detta ändamål har man infört en modifierad tonkm-beräkning, där man inte använder maskinernas totalvikter utan först reducerar vikten på varje axel. Ju djupare alvlager man intresserar sig för, desto större reduktion väljer man. I den i kapitel 8.2 presenterade beräkningsmodellen reducerar man sålunda axelbelastningen på maskiner som körs på markytan med 4 ton vid beräkningar för lagret 25-40 cm och med 6 ton vid beräkningar för lagret därunder. Endast den överskjutande delen av axelbelastningen används vid tonkm-beräkningen.

### 1.5. Andra mått på körintensiteten

Internationellt har man även använt andra mått än tonkm-värdena för att karakterisera olika maskiners eller maskinsystems packningspotential. I allmänhet har man då liksom vid tonkm-beräkningarna utgått från maskinernas vikt. Inga enkla mått av detta slag ger dock mer än ungefärliga jämförelsetal för maskinernas eller maskinsystemens packningspotential. Kuipers & van de Zande (1994) jämförde ett antal sådana mått. De hävdade att antalet tontimmar per ha var det teoretiskt sett bästa men samtliga jämförda mått gav praktiskt taget samma relativa skillnader mellan olika maskiner eller maskinsystem. I Sverige har vi därför mest använt det mått som är enklast att beräkna, nämligen antalet tonkm per ha. I regel är ju uppgifterna om såväl fordonsvikter som körsträckor lätta att få fram.

## Kapitel 2

# Tryckfördelning under hjul och band

### Sammanfattning

Ett mjukt lantbruksdäck med relativt lågt ringtryck och med den belastning som hjulet är byggt för ger på mark med normal bärighet ett tryck i anliggningsytan mot marken (marktryck), som är av samma storleksordning som ringtrycket. Andra däck eller andra belastnings- och körförhållanden kan ge marktryck, som avviker starkt från ringtrycket, antingen uppåt eller nedåt.

Teoretiska beräkningar och mätningar i fält har klarlagt, vilka trycktillskott (d.v.s. vilka tryck utöver dem som den ovanliggande jorden ger upphov till) som man får i olika marklager vid körning med belastade hjul. Inom matjordslagret beror trycktillskottet under en normal lantbruksmaskins hjul nästan enbart av marktrycket. Trycktillskottet avtar alltid med djupet men i allt långsammare takt ju högre belastning hjulen har. Två hjul i dubbelmontage samverkar och därför talar man hellre om axelbelastningen än om hjulbelastningen som avgörande för hur snabbt trycktillskottet avtar. I alvens övre del bestäms trycktillskottet av både marktrycket och axelbelastningen, i alvens djupare delar nästan enbart av axelbelastningen. Axelbelastningen är därför den faktor som främst bestämmer hur djupt de farliga trycken utbreder sig. I fuktig mark når de något djupare ner än i torr mark.

### 2.1. Trycket i ett hjuls anliggningsyta mot marken

Trycket i ett hjuls eller bands anliggningsyta mot marken kallas vanligen helt enkelt marktrycket. Oftast tänker man då på det genomsnittliga trycket i anliggningsytan, d.v.s. belastningen dividerad med anliggningsytans storlek. För ett luftfyllt gummihjul, som körs på bearbetad åkermark, är detta ofta av samma storleksordning som ringtrycket men avvikelserna kan vara stora. Marktrycket bestäms inte enbart av belastning och däckstorlek utan också på ett komplicerat sätt av däckstyp och ringtryck samt av markens egenskaper, främst av dess packnings- och fuktighetstillstånd.

Det är svårt att mäta det verkliga marktrycket under ett hjul, som rullar fram på ett fält, och därför är det ont om tillförlitliga mätresultat. De marktrycksdata som anges har i regel erhållits genom att man dividerat belastningen på hjulet med storleken på anliggningsytan. Inte heller anliggningsytans storlek kan emellertid mätas särskilt noggrant under ett rullande hjul, och oftast måste man därför nöja sig med att uppskatta storleken. Därvid kan man utgå från en mätning av anliggningsytans storlek, när maskinen står stilla, antingen på det aktuella fältet eller på ett hårt underlag, och göra antaganden om hur ytan förändras, när hjulet rör sig. När det bildas djupa spår antar man ibland helt enkelt att anliggningsytan

blir så stor den kan bli, vilket är hjulets bredd gånger en längd, som är ungefär lika med hjulets radie. Inga uppgifter om marktrycken är sålunda särskilt exakta. De tillförlitligaste värdena är antagligen sådana, som man fått när man gjort tryckmätningar på några cm djup i marken under rullande hjul.

Enligt teoretiska överväganden är överensstämmelsen mellan ringtryck och marktryck bäst, om däcket är mycket mjukt och marken hård. Mätningar som gjorts när man kört på relativt hård åkermark med en lantbruksmaskin med traditionella hjul med avsedd belastning och avsett ringtryck visar, att marktrycket då vanligen är något högre än ringtrycket, eftersom däcksstommen har en viss styvhet. Om däcket är styvt (tjockväggigt eller med kraftiga ribbor) och hårt belastat och marken är hård, kan marktrycket bli betydligt högre än ringtrycket. Är marken å andra sidan mjuk, så begränsas marktrycket av markens bärighet genom att hjulet sjunker så att ett spår bildas. Därigenom ökar anliggningsytan

### *Faktaruta 1*

#### **Tryck och spänning**

I denna bok används termen tryck för att karakterisera intensiteten av de påkänningar som maskinerna utsätter marken för, såväl i själva markytan som under denna. Detta görs för att språkbruket skall bli enkelt och ansluta till det man vanligen använder i praktiska sammanhang. I sträng fysikalisk mening är detta dock inte korrekt. Termen tryck skall egentligen reserveras för användning i gaser och vätskor, eftersom den är en s.k. skalär storhet, vilket innebär att den är oberoende av riktningen.

De mekaniska påkänningar som verkar i marken är däremot olika i olika riktningar (de är s.k. vektorer) och skall egentligen inte kallas tryck utan spänningar. Man skiljer på normalspänningar och skjuvspänningar. Normalspänning är en spänning, som verkar vinkelrätt mot den yta där den mäts. Om ett visst värde överskrids, så packas jorden. Skjuvspänning är en spänning som verkar i ytans plan och om den uppnår ett värde lika med jordens skjuvhållfasthet, så åstadkommer den en förskjutning (skjuvning) längs ytan. Vid en och samma normalspänning ökar ofta packningen om jorden samtidigt utsätts för skjuvspänning.

En fullständig karakteristik av de spänningar som ett belastat hjul åstadkommer i en punkt i marken kräver att man mäter tre s.k. normalspänningar och tre skjuvspänningar. Mätningarna skall göras i tre mot varandra vinkelräta plan. För enkelhets skull nöjer man sig emellertid ofta med att mäta de två mest betydelsefulla komponenterna i spänningsfältet under ett belastat hjul. Den ena komponenten är den vertikala normalspänningen, ofta rätt och slätt benämnd marktrycket (när man tänker på själva anliggningsytan) eller trycktillskottet (när man tänker på en djupare liggande nivå). Den andra är den skjuvspänning, som förorsakas av att hjulet producerar dragkraft eller slirar och som fortplantas ett stycke ner i marken. Jordens maximala motstånd mot skjuvningen, skjuvhållfastheten,  $\tau_{max}$ , ökar med normalspänningen enligt formeln  $\tau_{max} = c + \sigma \tan \phi$ , där  $c$  kallas jordens kohesion,  $\sigma$  är normalspänningen och  $\tan \phi$  är en faktor karakteristisk för det aktuella tillståndet i den enskilda jorden och kallas jordens inre friktionsvinkel. Av denna formel framgår bl.a. att en traktors dragkraft ökar när belastningen på drivhjulen ökar.



och marktrycket avtar. Samtidigt packas i regel marken under spåret och bärformågan ökar. När det minskade marktrycket överensstämmer med den ökade bärformågan i marken under spåret, upphör hjulet att sjunka. Ibland är marktrycket då lägre än ringtrycket. I mycket mjuk mark kommer ett styvt gummihjul att uppföra sig nästan som ett stelt hjul.

Endast ett fåtal mätningar har gjorts av tryckets fördelning i olika hjuls anliggningsytor mot marken. Dessa visar emellertid att tryckfördelningen ofta är mycket ojämn. Packningen i de övre marklagren kan då bli kraftigare än vid en jämn tryckfördelning. Däcksstommens styvhet och däcksmönstret betyder mycket för tryckfördelningen. Kör man på hård mark med ett styvt däck, så koncentreras trycket i anliggningsytans mitt, där det kan vara dubbelt så högt som medeltrycket. Är däcket däremot mjukt, så blir trycket högst vid kontaktytans ytterkanter och kan där vara mycket högre än medeltrycket. Om marken är mjuk och hjulet börjar sjunka, koncentreras trycket återigen i kontaktytans mitt. Har däcket kraftiga ribbor blir trycket naturligtvis betydligt högre under än mellan dessa.

## 2.2. Tryckfördelningen i marken

Sedan 1950-talet har man haft tillgång till metoder att teoretiskt beräkna trycktillskotten i marken under hjul eller band med olika dimensioner och belastningar. När man tänker på hur en maskin påverkar ett marklager, som ligger en bit under markytan, talar man helst om trycktillskottet och inte rätt och slätt om trycket. Ett sådant lager är ju redan belastat av ovanliggande jord och är därför redan utsatt för ett visst tryck. Trycktillskottet är det ytterligare tryck som maskinens hjul eller

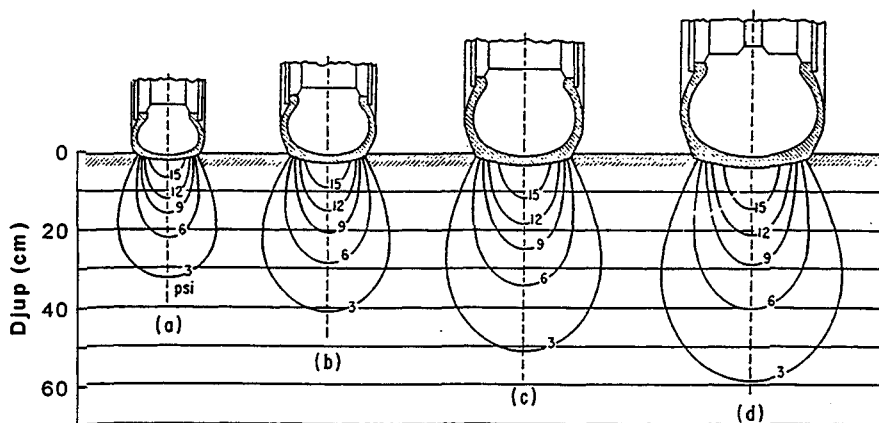


Fig. 5. Teoretiskt beräknade trycktillskott (angivna i psi; 100 kPa  $\approx$  14 psi) på olika djup i marken under hjul med belastningarna (fr.v.) 300, 500, 750 och 1000 kg och sådana dimensioner att ringtrycket i samtliga fall är 12 psi ( $\approx$  90 kPa). Bilden visar det vertikalt riktade normaltrycket i tvärsnittsytor i marken, vilka lagts i rät vinkel mot körspåret och rakt under anliggningsytans centrum. (Efter Söhne, 1958.)

band ger upphov till. Mätningar har bekräftat att de teoretiska beräkningarna av trycktillskotten är någorlunda realistiska.

I Fig. 5 visas exempel på teoretiskt beräknade trycktillskott i marken under några olika hjul. Trycktillskotten visas för tvärsnittsytor i marken lagda i rät vinkel mot körriktningen. De bilder man då får liknar genomskurna lökar och kallas ofta trycklökar. En trycklök enligt Fig. 5 visar emellertid endast det vertikala trycktillskottet i marken och ger inte en fullständig bild av belastningen. Den visar t.ex. inte de s.k. skjuvspänningarna (Faktaruta 1), vilka ökar när hjulen börjar slira. En bit ner i marken har dock packningens omfattning främst visat sig bero av det vertikala trycktillskottet och en trycklök visar därför ganska bra vilka påfrestningar olika marklager utsätts för.

Fig. 6 visar teoretiskt beräknade vertikala trycktillskott på olika djup i marken under olika hjul. Det är trycktillskotten rakt under anliggningsytornas mittpunkter som visas. Det förutsätts att hjulen är enkelmonterade och att anliggningsytorna är cirkelformade och har jämn tryckfördelning. Trycktillskotten under hjulen minskar alltid med djupet.

I Fig. 6A jämförs trycktillskotten under hjul med olika belastningar men hjulens storlek har anpassats till belastningen, så att marktrycket i samtliga fall är detsamma. Under det minsta hjulet med den lägsta belastningen avtar trycktill-

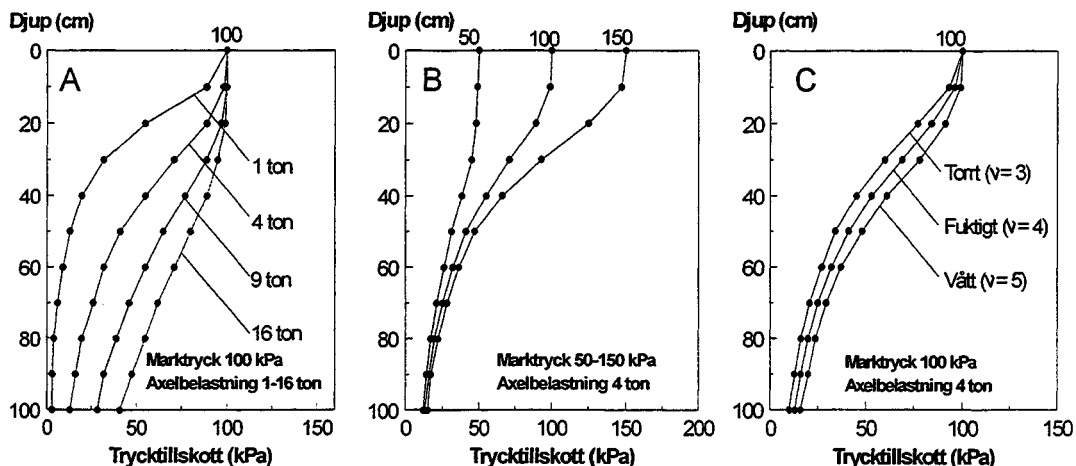
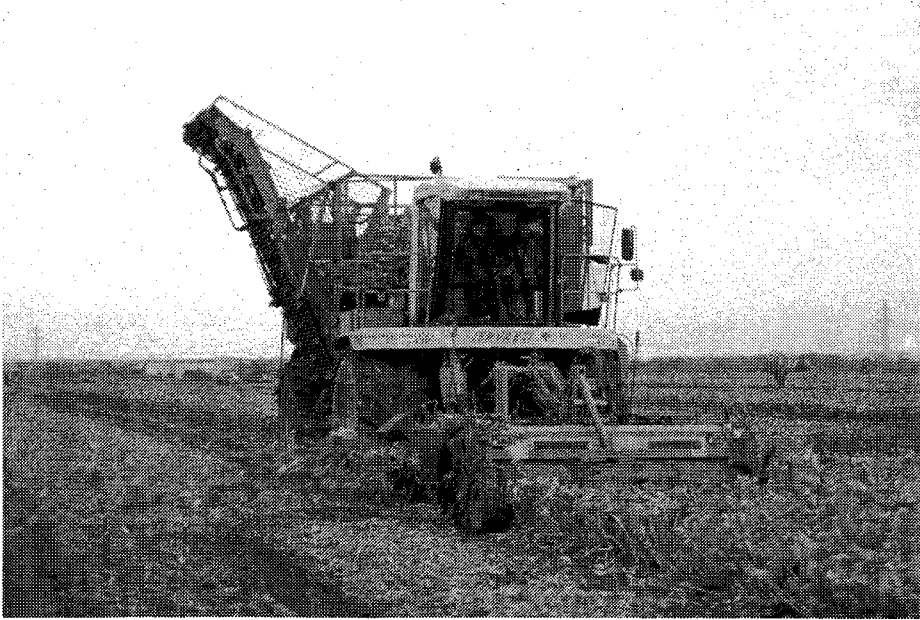


Fig. 6. Vertikalt trycktillskott på olika djup i marken rakt under centrum av cirkelformade, jämnt belastade ytor.

- A. Jämförelse mellan fyra ytor (hjul) med belastningarna 0,5, 2, 4,5 och 8 ton, d.v.s. med axelbelastningarna 1, 4, 9 och 16 ton. I samtliga fall är trycket i anliggningsytan 100 kPa.
- B. Jämförelse mellan tre ytor (hjul) med belastningen 2 ton, d.v.s. med axelbelastningen 4 ton, men med trycken 50, 100 resp 150 kPa i anliggningsytorna.
- C. Effekten av olika värden på den s.k. koncentrationsfaktorn ( $v$ ). Denna faktor varierar från 3 i torr mark till 5 eller mer i våt mark.



*Fig. 7. Jordbruksmaskiner med hög axelbelastning används allt oftare, bl.a. vid transporter och skördearbeten, och orsakar höga trycktillskott till stort djup. Sockerbetsupptagaren på bilden har en axelbelastning av nästan 20 ton vid full last. Det har visats (Fig. 16) att den kan orsaka packning i marken till mer än 70 cm djup. (Foto Thomas Nordström, Danisco.)*

skottet betydligt snabbare med djupet än under det största hjulet med den högsta belastningen. Samma trycktillskott som man har på 20 cm djup vid en hjulbelastning av 0,5 ton har man på 40 cm djup vid belastningen 2 ton, på 60 cm djup vid belastningen 4,5 ton och på 80 cm djup vid belastningen 8 ton.

I Fig 6B jämförs hjul med samma belastning men med olika marktryck. Lågt marktryck innebär att lasten bärs upp av ett stort lågtrycksdäck, högt marktryck att den bärs upp av ett mindre högtrycksdäck. Inom matjordslagret är trycktillskottet så gott som identiskt med respektive hjuls marktryck och skiljer sig starkt mellan hjulen. Skillnaderna minskar emellertid med djupet och på djup större än 50 cm är skillnaderna små. Vid högre axelbelastning än den i Fig. 6B sträcker sig dock inverkan av marktrycket djupare ner.

Tryckets utbredning under ett hjul beror inte enbart på hjulets belastning, dimensioner, styvhet och lufttryck utan också på markens egenskaper. I våt mark koncentreras trycktillskottet rakt under hjulet, i torr mark breder det ut sig mera i sidled och avklingar snabbare mot djupet. Farliga tryck når därför djupare ner i våt mark än i torr. När man beräknar trycktillskottet tar man hänsyn till detta genom en s.k. koncentrationsfaktor. I Fig. 6C visas hur denna påverkar tryckets utbredning. I våt mark med en koncentrationsfaktor av 5 når ett visst tryck något djupare ner än i torr mark med en koncentrationsfaktor av 3. Att marken packas

till större djup när den blir fuktigare beror därför inte enbart på att den blir mera packningskänslig utan också på att trycket koncentreras.

Beräkningsexemplen ovan visar att trycktillskottet i matjorden under vanliga jordbruksmaskiner främst beror av hjulens marktryck och således i hög grad av ringtrycket. I alvens övre del beror trycktillskottet i ungefär lika hög grad av marktrycket och av belastningen på hjulen. Längre ner i alven beror trycktillskottet främst av belastningen på hjulen. I dag används i svenskt jordbruk maskiner med hjullaster ända upp till 10 ton (axelbelastningar upp till 20 ton, Fig. 7) och då får man som Fig 6B visar stora trycktillskott djupt nere i alven.

Vad gäller trycktillskotten i alven, så kommer två hjul, som sitter tätt intill varandra att samverka. I alvens centrala och djupare lager spelar det ingen större roll om en viss last ligger på ett enda hjul eller på två hjul i dubbelmontage. I det senare fallet bestäms därför trycktillskottet av belastningen på bägge hjulen tillsammans (d.v.s. halva axelbelastningen) och inte av belastningen på det enskilda hjulet. Detta är orsaken till att man lämpligen anger axelbelastningen och inte belastningen på det enskilda hjulet som den faktor, som främst avgör hur djupt ner i alven packningsrisken sträcker sig.

Om två hjul följer efter varandra i en boggie, är kontaktytorna mot marken längre åtskilda än om hjulen är dubbelmonterade. De börjar därför inte samverka förrän på rätt stort djup. I alvens djupare lager blir dock trycktillskottet något större om axlarna är förenade i en boggie än om de sitter längre isär. Om belastningen på en boggie är 60-90 % högre än på en enkel axel är därför riskerna för packningsskador djupt nere i alven ungefär lika stora.

### 2.3. Bandfordon

Under banden på ett bandfordon har man vanligen ett lågt genomsnittligt marktryck. Om markens bärighet inte är mycket dålig, så koncentreras emellertid trycket under bandens bär- och drivhjul. Mellan dessa kan banden vara nästan avlastade. Hur ojämn tryckfördelningen är beror dock på bandkonstruktionen, markförhållandena och lastens fördelning. I Fig. 8 visas som exempel resultatet av en nyligen gjord mätning av trycket under ett tungt bandfordon.

Vid sådana fuktighetsförhållanden som normalt råder under jordbrukets fältarbeten är maximitrycket under banden mycket högre än genomsnittstrycket. Bandfordon kan därför orsaka betydande packning, även om det genomsnittliga marktrycket är lågt. Till detta bidrar antagligen också att trycket återkommer upprepade gånger, att banden åstadkommer mera vibrationer i marken än gummihjul och att trycket koncentreras till bandens bakre delar, när man tar ut dragkraft från fordonet. Detsamma kan hända om man som i Fig. 8 har en ojämn fördelning av lasten. Banden tenderar också att koncentrera trycket till markytans högsta punkter.

Det är sålunda tvivelaktigt om traditionella stålband minskar packningen vid körning på normal åkermark, men i detta avseende har det gjorts alltför få jäm-

förelser mellan band- och hjulfordon. Kör man däremot med ett bandfordon på våt mark med så låg bärighet att det bildas relativt djupa spår, så utjämnas trycket under banden och hela bandytan hjälper till att bära upp maskinen. Band tycks därför vara mera fördelaktiga när det gäller att säkra ett fordon framkomlighet på våt mark än när det gäller att minska packningen på väl upptorkad mark.

Moderna gummiband är mera flexibla än stålband och man kan utgå ifrån att de också är skonsammare mot marken och orsakar mindre jordpackning. Tyvärr har dock alltför få jämförelser gjorts mellan moderna gummiband och traditionella stålband för att man skall kunna dra generella slutsatser om hur mycket skonsammare gummibanden är. Inte heller har de i tillräcklig omfattning jämförts med gummihjul.

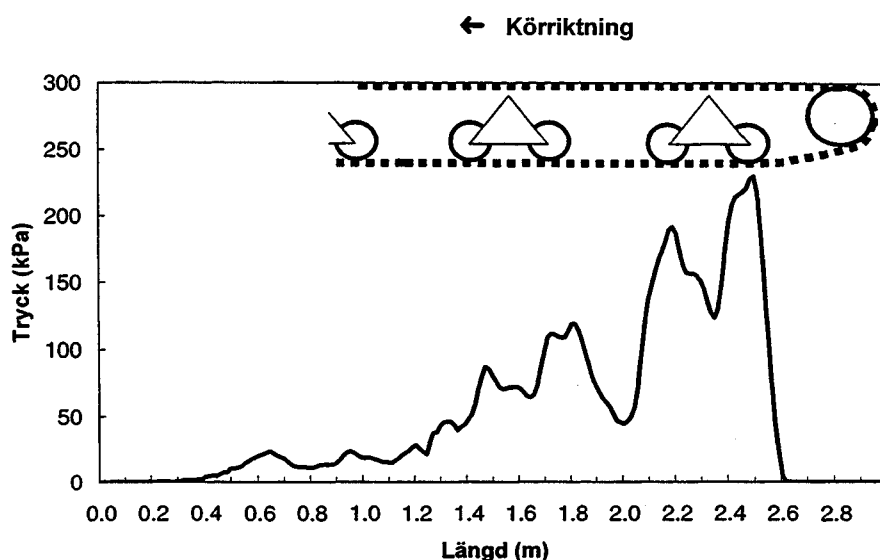


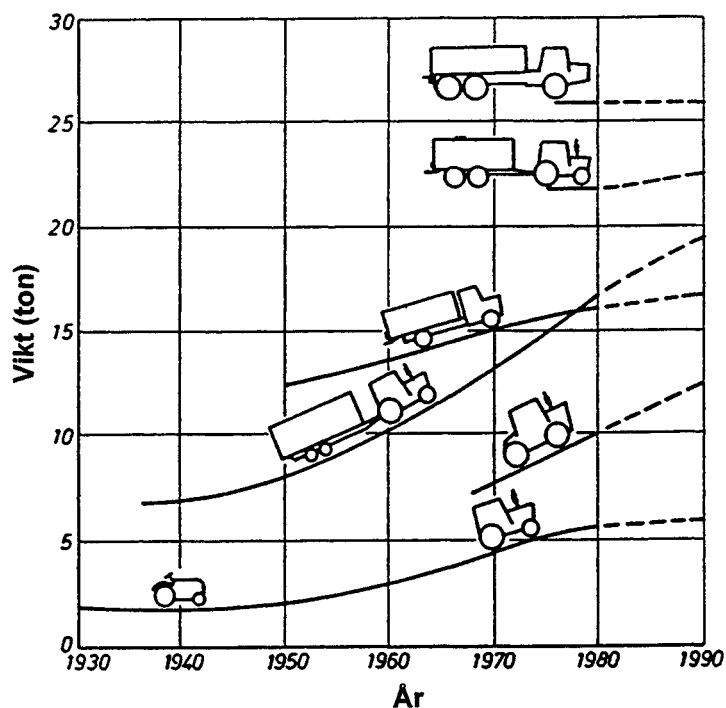
Fig. 8. Resultat av marktrycksmätningar under mittlinjen av ena bandet på ett tungt transportfordon med gummiband. En stor del av lasten låg på bandens bakre del, vilket gjorde tryckfördelningen ojämn. Liknande tryckfördelning får man emellertid också från en bandtraktor, när man tar ut dragkraft. Skissen upptill visar konstruktionen på den del av bandet som medverkade till att bära upp lasten. Bandet var belastat med 13 ton, var 75 cm brett och hade fyra par bärrullar. Nominellt var kontaktytan 3 m lång, kontaktarean 2,2 m<sup>2</sup> och marktrycket 58 kPa. Det första paret av bärrullar gav emellertid inget marktryck alls och det sista paret gav ett tryck långt över det nominella. (Efter Trautner & Arvidsson, 2000.)

## Faktaruta 2

### Ökande maskinstorlekar

Under den 50-årsperiod som gått sedan fältarbetena i svenskt jordbruk allmänt blev mekaniserade, har storleken på maskinerna successivt ökat. Detta illustreras av diagrammet nedan, vilket visar typiska vikter på traktorer och andra maskiner som sålts vid olika tidpunkter. Diagrammet sammanställdes på 1980-

talet (Håkansson & Danfors, 1981) och någon ny sammanställning har därefter inte gjorts. Trenden mot allt tyngre maskiner pågår emellertid alltjämt (Fig. 7). Många maskiner är nu så tunga att packningen når ner i de djupare avlagren och där riskerar man att skadorna blir permanenta,



## Kapitel 3

# Packningens omfattning och varaktighet i våra åkerjordar

### Sammanfattning

Med jordpackning menar man den process, då ett yttre tryck leder till att en viss jordmängds volym eller ett visst jordlayers djup och porositet minskar och dess skrymdensitet (tidigare benämnd volymvikten) ökar. I laboratorieförsök brukar skrymdensiteten i en från början lucker jord öka lika mycket varje gång trycket fördubblas. Vid samma tryckökning packas fuktig jord i regel mera än torr jord. Vid körning med maskiner i fält brukar densiteten i matjorden öka såväl med marktrycket och vattenhalten som med antalet överfarter.

Matjordslagret på åkermark genomgår en årlig cykel av luckring och packning. När jorden plöjs, brukar matjordens djup öka med 5-7 cm. Närmast därefter sätter sig jorden och djupet minskar ett par cm. Matjorden på ett höstplöjt fält är vid vinterns slut fortfarande några cm djupare än före plöjningen. Under ett traditionellt vårbruk packas emellertid jorden av traktorhjul och andra hjul och matjorden brukar återfå samma djup som före plöjningen.

Matjordens packningstillstånd kan karakteriseras med hjälp av den s.k. packningsgraden. Denna definieras som jordens skrymdensitet i % av skrymdensiteten efter en standardiserad packning med ett tryck av 200 kPa. Packningsgraden i matjorden efter körning med traktor på ett plöjt fält bestäms av jordens fuktighet vid körningen, av antalet överfarter samt av traktorns hjulutrustning, vikt och ringryck.

Maskinernas axelbelastning avgör hur djupt ner i alven packningen når. Vid en axelbelastning av 6 ton packas jorden ofta till mer än 40 cm djup, vid 10 ton till mer än 50 cm djup och vid ännu högre axelbelastning till närmare 1 m djup. Upprepade körningar ger ökad packning.

Packningens effekter motverkas av jordbearbetning samt av vattenhaltsväxlingar, tjälning och biologisk aktivitet. Alla dessa processer blir dock mindre intensiva med djupet. Packning i alven blir därför mycket varaktigare än i matjorden. På lätta jordar kan packningsverkningar i matjorden utplånas helt av en plöjning och en vinters tjäle men på lerjordar kvarstår de upp till fem år. Under bearbetningsdjupet är packningsverkningarna mycket varaktigare. På djup större än 40 cm (i sandjordar 30 cm) tycks de bli permanenta.

### 3.1. Samband mellan tryck och packning

När det sker en volymminskning i en jordmassa, som utsätts för mekanisk påverkan utifrån (tryck från hjul eller påverkan av bearbetningsorgan), brukar man tala om *packning* (faktaruta 3), när det sker en volymökning, talar man om *luckring*. Packning och luckring är alltså processer, som förändrar jordens till-

### Faktaruta 3

#### Definition av jordpackning och packningstillstånd

I denna bok används termen *jordpackning* i betydelsen en minskning av en viss jordmängds volym eller ett visst jordlayers djup under inverkan av ett pålagt yttre tryck, huvudsakligen genom att luft drivs ut. Termen används sålunda för en volymminskning i en sådan jordmassa, där en del av porsystemet är luftfyllt. En del av packningen sker omedelbart när trycket läggs på, och denna del tycks vara ganska lika på olika typer av jordar. En annan del är en något mera utdragen process och denna del är större på lerjordar än på sandjordar.

Om porsystemet i den jord, som utsätts för tryck, är helt vattenfyllt, brukar man inte tala om packning utan om *konsolidering*. För att volymen skall kunna minska måste då vatten och inte luft drivas ut genom tryckets inverkan. Detta är en

mycket långsammare och mera utdragen process än packning och någon omedelbar volymminskning sker inte. Denna process har sitt största intresse i geotekniska sammanhang (grundläggning o.d.) och inte i jordbruket.

Med termen packning avser man sålunda en process i jorden. Dess omfattning kan karakteriseras av den absoluta eller relativa *minskningen* av den aktuella jordmassans volym eller det aktuella jordlagrets djup, av *minskningen* av jordens porositet eller av *ökningen* av dess torra skrymdensitet. När det resulterande tillståndet i marken skall karakteriseras talar man om *packningstillståndet*. Detta kan karakteriseras med hjälp av jordens porositet, skrymdensitet eller packningsgrad (faktarutorna 5 och 11).

stånd. Med *packningstillståndet* åsyftar man det tillstånd, som dessa processer åstadkommer.

Packning inträffar, när det utifrån pålagda trycket är större än jordens bärförmåga. Ju högre trycket är vid en viss körning och ju fuktigare jorden är (upp till en viss gräns), desto intensivare blir packningen. En lucker jord är mindre motståndskraftig mot tryck (mera packningsbenägen) än en jord som redan är packad. Första överfarten av en maskin på en lucker jord orsakar därför en stor volymminskning (packning), andra överfarten en mindre förändring o.s.v. Ofta fortgår detta upp till ett stort antal överfarter. Vid upprepade överfarter i samma spår på en från början lucker jord ger varje fördubbling av antalet överfarter ofta samma volymminskning, eller matematiskt uttryckt, den ackumulerade packningen ökar med logaritmen på antalet överfarter.

Innan vi går in på vad som händer när man kör med maskiner i fält, skall några typiska resultat från laboratoriestudier av sambandet mellan tryck och packning presenteras. I Fig. 9A visas hur jordens skrymdensitet (denna och andra markfysikaliska termer förklaras i faktaruta 5) successivt ökar, när en från början mycket lucker jord utsätts för tryck på så sätt att trycket ökas stegvis och för varje steg får ligga på en kort stund (dock under betydligt längre tid än det tar för ett hjul att rulla över en punkt på marken). Kurvor i enlighet med diagrammet har erhållits för många olika jordar. Inom vissa gränser ökar skrymdensiteten proportionellt



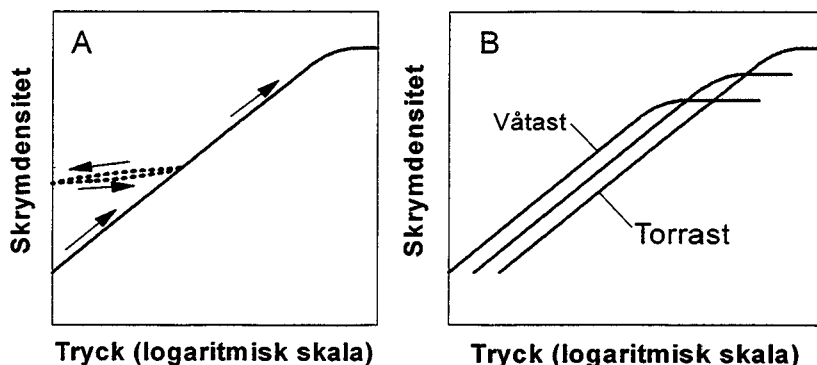


Fig. 9. Resultat av laboratorieförsök där en från början lucker jord utsätts för successivt ökande kortvariga tryck.

- A. Jordens skrymdensitet ökar rätlinjigt med logaritmen av trycket. Avbryts tryckökningen och jorden avlastas, så minskar densiteten bara obetydligt (streckad linje). Ökas sedan trycket åter, så ökar densiteten mycket lite, tills trycket åter kommit upp till värdet före avbrottet, men därefter ökar den som om inget avbrott skett.
- B. Packningskurvor för en och samma jord vid olika vattenhalt. Kurvorna är parallella inom det tryck- och vattenhaltsområde, som är normalt vid fältarbeten. Ju fuktigare jorden är, desto lägre är den densitet och det tryck då densitetsökningen upphör.

mot logaritmen av trycket.

Vid mätningar av detta slag på laboratoriet får man i regel vid en och samma tryckökning större förändring av skrymdensiteten i en lerjord än i en lättare jord, exempelvis en sandjord (angående olika jordarter se faktaruta 4). Detta innebär att kurvorna i diagrammet får större lutning för en lera än för lättare jord. Man säger också att lerornas kompressionsindex (vilket definieras som ökningen av skrymdensiteten, när logaritmen av trycket ökar med en enhet) är högre än de lättare jordarnas. Detta resultat kan emellertid inte direkt överföras till fältförhållanden. När man beräknat ett kompressionsindex i fält på basis av hur mycket skrymdensiteten i matjordslagret ökat vid en viss ökning av en maskins marktryck, har detta nämligen inte ökat med jordens lerhalt (Arvidsson, 1997a). Under den korta tid som ett hjul belastar jorden, hinner antagligen bara den momentana delen av packningen (se faktaruta 3) ske och den är ganska lika för alla jordar.

Vilken densitet man i laboriermätningarna får vid ett visst tryck beror också på jordens fuktighet. Inom det fuktighetsintervall som är vanligt under fältarbeten, ökar flertalet jordars densitet med vattenhalten. Fig. 9B visar resultat för samma jord vid olika vattenhalter. Man får då en serie parallella kurvor. Så länge kurvorna stiger, innehåller jorden så mycket luft att den kan packas genom den kortvariga belastningen. När nästan all luft är utdriven och porerna så gott som vattenfyllda, upphör emellertid packningen, eftersom vatten är mycket svårare att driva ut än luft. Därför uppstår det ett mottryck i porvattnet, som förhindrar ytter-

## Faktaruta 4

### Lite jordartskänedom

Den fasta substansen i jorden består av mineralkorn av olika storlek samt organisk substans (mull). En jords egenskaper bestäms i hög grad av dess kornstorlekssammansättning och mullhalt. I den svenska jordartsklassifikationen har man hittills brukat indela mineralpartiklarna i följande storleksklasser (mm):

Ler	Mjåla	Mo	Sand	Grus	Sten	Block
<0,002	0,002-0,02	0,02-0,2	0,2-2	2-20	20-200	>200

I åkerjordarna är innehållet av block, sten och grus vanligen ringa och dessa jordar klassificeras därför oftast med hänsyn enbart till sammansättningen av fraktionen <2 mm. I mineraljordarna bestäms egenskaperna framför allt av andelen ler. Jordarterna klassificeras därför främst efter lerhalten enligt följande:

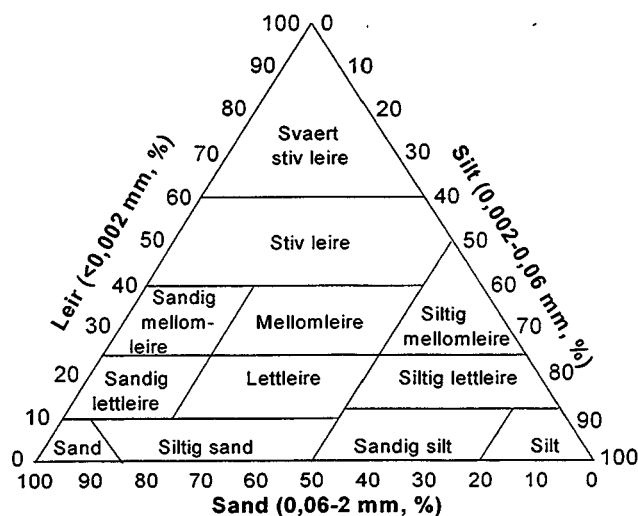
Ler-fattiga jordar	Svagt leriga jordar	Leriga jordar	Lättleror	Mellanleror	Styva leror	Mycket styva leror
<2 %	2-5 %	5-15 %	15-25 %	25-40 %	40-60 %	>60 %

Jordar med lerhalter under 25 % (ibland 40 %) indelas sedan i undergrupper efter vilken av de övriga fraktionerna som dominerar, t.ex. i sandiga eller mjåliga lättleror. Redan ett ringa mullinnehåll påverkar jordens egenskaper i hög grad. Matjordarna klassificeras efter mullhalten enligt följande:

Mullfattiga	Något mullhaltiga	Måttligt mullhaltiga	Mullrika	Mycket mullrika	Mineralblandade (t.ex. leriga) mulljordar	Mulljordar
<2 %	2-3 %	3-6 %	6-12 %	12-20 %	20-40 %	>40 %

En viss matjord kan sålunda klassificeras exempelvis som en måttligt mullhaltig lerig sand.

I många andra länder, exempelvis USA och Norge indelas fraktionen <2 mm endast i tre storleksklasser, nämligen ler (<0,002 mm), silt 0,002-0,06 mm) och sand (0,06-2 mm). Då kan jordartsindelningen åskådliggöras i ett diagram, en s.k. "jordartstriangel". Figuren nedan visar i form av ett sådant diagram den klassifikation som numera används i Norge.



ligare packning. Ju högre jordens vattenhalt är, desto mindre luft innehåller den. Därför upphör packningen vid lägre tryck och vid lägre densitet ju fuktigare jorden är.

Att den maximalt möjliga densiteten är lägre vid högre vattenhalt innebär dock inte att man i praktiken skall försöka motverka packning genom att köra när marken är mycket våt. Då ökar i stället slirningen och ältningen av jorden och man förstör jordens aggregatstruktur (angående markstruktur se faktaruta 5). Detta ger effekter som, åtminstone kortsiktigt, kan vara ännu mer negativa än de rena packningseffekterna.

Den streckade kurvan i Fig. 9A visar vad som händer om man först utsätter jorden för successivt ökande tryck upp till ett visst värde men sedan avbryter tryckökningen och avlastar jorden. Denna sväller då något men bibehåller nästan den densitet den hade när tryckökningen avbröts. Börjar man därefter öka trycket igen, så händer inte mycket förrän man åter kommit upp till det tryck som rådde före avlastningen. Då fortsätter densiteten att öka som om man aldrig avbrutit tryckökningen. Översatt till fältförhållanden innebär detta att om en jord packats genom ett tidigare tryck, så måste detta tryck överskridas innan jorden åter börjar packas. Tryck lägre än det tidigare pålagda åstadkommer endast ringa packning. Trycket vid denna brytpunkt brukar kallas förkonsolideringstrycket (engelska pre-compression stress) och kan i homogena laboratorieprover vara väl definierat. I fält gör dock jordarnas heterogenitet att förkonsolideringstrycket inte är lika klart markerat.

Vid körning med maskiner i fält är emellertid förhållandena mera komplicerade än i laborieförsöken och så enkla och tydliga resultat som i Fig. 9 får man inte. Detta visas bl.a. av att jordens densitet ökar med antalet överfarter av samma fordon. Ett av skälen är, att varje gång ett hjul rullar fram över marken, så ligger trycket endast på under mycket kort tid och flera överfarter krävs för att packningen skall hinna slutföras. Ett annat torde vara att när ett hjul rullar fram över en punkt på marken, så ändrar trycket hela tiden riktning, medan tryckriktningen i laborieförsöken är konstant.

## **3.2. Packningens omfattning i matjorden**

### *3.2.1. Matjordslagrets djupförändringar under året*

Som visats i kapitel 1 överfars hela fältens yta i genomsnitt flera gånger om året av olika hjul, som därvid packar jorden. En stor del av körningen och packningen är koncentrerad till korta perioder vid såbäddsberedningen och sådden samt vid skörden. Jorden luckras emellertid också genom plöjning och annan jordbearbetning.

Fig. 10 visar hur matjordslagrets djup brukar förändras under året på ett fält, som vårsås på traditionellt sätt och höstplöjs till normalt djup. I figuren förutsätts att fältet var plöjt föregående höst och att matjorden därför var lucker och hade

## Faktaruta 5

### Definition av några markfysikaliska termer

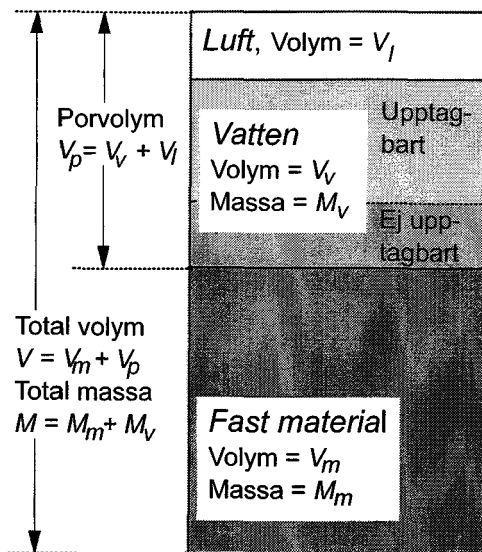
Nedan definieras några markfysikaliska termer. Definitionerna följer i huvudsak dem som utarbetats av Andersson & Wiklert (1970). De illustreras av figuren härintill, som visar volym förhållandena i en normal åkerjord, när denna har vattenmättats och därefter dränerats.

Jorden består av tre komponenter (faser), fast material, vatten och luft. Det fasta materialet består av mineral-korn av olika storlek samt organiskt material (se faktaruta 4). Hålrummen (porena) mellan materialkornen är fyllda med vatten och luft i olika proportioner. Porens andel av den totala volymen varierar beroende på jordens sammansättning och packningstillstånd. En del av det vatten, som kan hållas av jorden, är upptagbart för växterna men en större eller mindre del är så hårt bundet att det inte kan tas upp. I en lerjord minskar den totala volymen (jorden krymper), om vatteninnehållet minskar, men i så fall ökar volymen igen (jorden sväller), när jorden åter fuktas upp.

*Skrymdensiteten*, tidigare vanligen kallad volymvikten, är jordens massa per enhet av dess totala volym. Våta skrymdensiteten ( $\rho_v = M/V$ , g cm<sup>-3</sup> eller Mg m<sup>-3</sup>) inkluderar massan av såväl fast substans som vatten (d.v.s.  $M_m + M_v$ ; man brukar bortse från markluftens massa, som ju är mycket liten). Torra skrymdensiteten ( $\rho_t = M_m/V$ ) inkluderar endast massan av den fasta substansen. När man för enkelhets skull ofta endast talar om skrymdensiteten, menar man nästan alltid den torra skrymdensiteten.

*Kompaktdensiteten* ( $\rho_m = M_m/V_m$ ), tidigare ofta benämnd den fasta substansens specifika vikt, är den fasta substansens genomsnittliga densitet, d.v.s. dess massa per enhet av själva partikelvolymen.

*Porositeten* ( $n = V_p/V = (V_v + V_l)/V$ ) är volymsandelen porer av markens totala volym, ofta uttryckt i procent. Ibland talar man om markens vattenfyllda resp. luftfyllda porositet, d.v.s. den procentandel av den totala volymen



som är fylld med vatten resp. luft.

*Materialiteten* ( $m = V_m/V$ ) är volymsandelen fast substans av markens totala volym.

*Portalet* ( $e = V_p/V_m$ ) är markens porvolym per volymsenhet av den fasta substansen.

*Specifika volymen* ( $v = V/V_m$ ) är markens totala volym per volymsenhet av den fasta substansen.

*Markens struktur* definieras som det sätt på vilket de enskilda markpartiklarna (primärpartiklarna) är lagrade och hopfogade i förhållande till varandra. Strukturen kan vara av olika slag.

*Aggregatstruktur* innebär att primärpartiklarna är sammanfogade till större enheter, där sammanhanget mellan partiklarna inom aggregaten är klart starkare än sammanhanget mellan aggregaten. Lerjordarna har i regel aggregatstruktur. Ju starkare sammanhanget mellan partiklarna inom aggregaten är desto stabilare säger man att aggregatstrukturen är.

*Enkelkornsstruktur* innebär att det inte finns några klart urskiljbara och någorlunda stabila aggregat. Lerfattiga sandjordar har i regel enkelkornsstruktur.

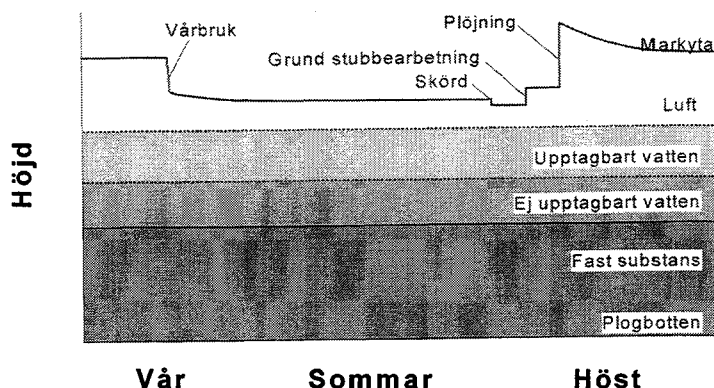


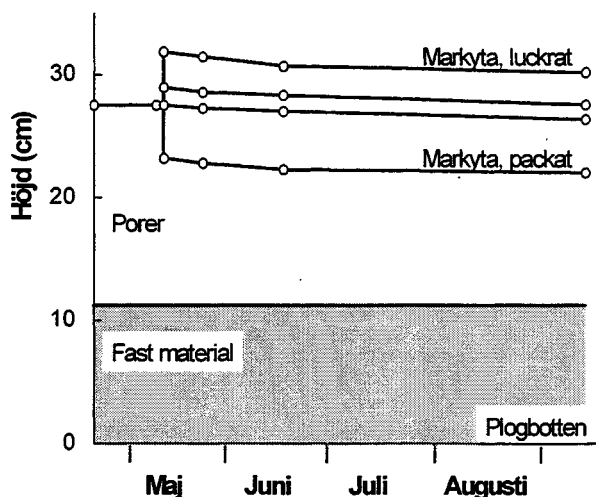
Fig. 10. Normala förändringar av det plöjda lagrets djup under året på ett fält, som höstplöjts föregående höst och där man under året utför traditionellt vårbruk, skörd, grund stubbearbetning och ny höstplöjning. Djupförändringar enligt detta diagram brukar man få på alla jordar, men förändringarna är något mindre på grova sandjordar än på övriga jordar. Diagrammet visar också hur matjordens totala volym kan uppdelas i delvolymerna av fast substans, vatten och luft, när jorden är vattenmättad till fältkapacitet. (Efter Andersson & Håkansson, 1966.)

stort djup vid vinterns inträde. Ända fram till vårbruket har matjorden fortfarande samma djup som den hade på senhösten. Under vårbruket minskar matjordsdjupet däremot betydligt. Genom harvningen bibehålls visserligen det ca. 4 cm djupa ytlagret i luckert tillstånd, men resten av matjorden packas av traktorhjul och andra hjul. Totaleffekten blir, att matjordens djup i regel minskar med 3-4 cm. Hur stor minskningen blir, beror dock av många faktorer, såsom jordarten, fuktigheten och antalet arbetsoperationer samt maskinernas tyngd, arbetsbredd, hjulutrustning och ringtryck.

Under veckorna efter sådden sätter sig det harvade ytlagret och matjordsdjupet minskar något. Därefter förblir djupet i regel nästan oförändrat ända fram till skörden. Är det en lerjord, så kan den krympa någon cm, om sommaren blir torr, men i så fall sväller den till det ursprungliga tillståndet, när det åter börjar regna. Under skörden kör man återigen med tunga maskiner. Om matjorden då inte är mycket torr, så packas den ytterligare och dess djup minskar.

Vid höstplöjningen luckras hela det plöjda lagret och matjordsdjupet ökar starkt. Efter en plöjning till normalt djup brukar matjordsdjupet vara omkring 7 cm större än strax efter skörden. Djupet ökar i regel mindre på grova sandjordar än på andra jordar och varierar också med plöjningsteknik och fuktighetsförhållanden. En större eller mindre del av djupökningen får man emellertid redan om man stubbearbetar fältet. I Fig. 10 förutsätts att man stubbearbetar grunt. Hade man stubbearbetat till samma djup som plöjningsdjupet, så hade matjordsdjupet redan då blivit nästan detsamma som efter plöjningen. Under tiden närmast efter plöj-

Fig. 11. Förändringar av det plöjda lagrets djup (= markytans höjd över plogbotten) under vegetationsperioden i ett försök på ett höstplöjt fält, där olika packnings- eller luckringsbehandlingar utfördes omedelbart före vårsådden. De skillnader i packningstillstånd, som man fick på våren, kvarstod nästan oförändrade under hela vegetationsperioden. (Efter Håkansson, 1966.)



ningen sätter sig jorden spontant ett par cm och vid vinterns inträde brukar matjorden ha ungefär samma djup som före vårbruket.

Att packningstillståndet i matjordens centrala och djupare delar inte ändras mycket under vegetationsperioden exemplifieras i Fig. 11. Denna visar matjordsdjupets förändringar från vårbruket fram till skörden i ett försök, där jorden packades eller luckrades olika starkt under vårbruket. Efter sådden var det därför stora skillnader i matjordsdjup och större delen av dessa kvarstod fram till skörden. Detta betyder att det packningstillstånd, som de djupare delarna av matjorden fick vid vårbruket, kom att bibehållas under hela växtsäsongen. I samtliga försöksled minskade djupet något under tiden strax efter sådden, vilket berodde på att den ca 5 cm djupa och från början luckra såbädden sjönk ihop när det regnade. Även i höstsådda grödor har det visat sig att om packningsskillnader uppkommer vid såbäddsberedningen, så kvarstår dessa till stor del fram till skörden. Eftersom tiden från sådd till skörd är längre än i de vårsådda grödorna, så kan man dock räkna med att en något större andel av packningsskillnaderna hinner utjämnas.

### 3.2.2. Effekter av körning med maskiner på matjordens packningsgrad

I kapitel 5.2 visas att matjorden vanligen blir alltför lucker när den plöjs och att den därför behöver återpackas. Det ideala är en måttlig, jämn återpackning över hela fältet. Vid ett vårbruk under normala fuktighetsförhållanden med dubbelmontage eller breda lågtrycksdäck på traktorerna brukar packningstillståndet i traktorspåren bli nära det optimala, d.v.s. nära det tillstånd som ger högst skörd. Samtidigt förblir en förhållandevis liten andel av fältytan opackad och alltför lucker. Med enkelmonterade standarddäck på traktorerna blir jorden i spåren däremot ofta för starkt packad, särskilt där flera spår korsar varandra, vilket de ju allra mest gör på vändtegarna. Dessutom är den helt opackade andelen av

fältytan stor.

Under skördarbeten, gödselspridning och andra arbeten med tunga maskiner, packas jorden i spåren ofta så starkt att den behöver luckras genom plöjning eller annan djup bearbetning. Detta är fallet särskilt om maskinerna har högtrycksdäck. Jordpackningen är därför ofta ett hinder för plöjningsfri odling eller direktsådd.

I Sverige har, särskilt under 1970-talet, ett stort antal ettåriga fältförsök genomförts för att studera effekterna av körning med tunga maskiner under vårbruket. Effekterna såväl på matjordens packningstillstånd som på grödornas avkastning har bestämts. Av anledningar som diskuteras i kapitel 5.2 har packningstillståndet därvid karakteriserats med hjälp av den s.k. packningsgraden (faktaruta 11). Denna definieras som jordens torra skrymdensitet i fält i procent av samma jords skrymdensitet efter det att den packats på ett standardiserat sätt på laboratoriet. Om flera jordar har samma packningsgrad så är deras packningstillstånd jämförbara även om skrymdensiteterna är olika.

För att studera om olika jordar reagerar olika har försök med likadana försöksmässiga körningar utförts på olika jordar i olika delar av Sverige. Försöksbehandlingarna gjordes så att man körde spår intill spår med normala jordbrukstraktorer på höstplöjda fält vid den tid på våren, då vårbruk normalt utförs på respektive jordar. Fig. 12 visar vilken packningsgrad som i genomsnitt erhöles i matjorden (närmare bestämt i lagret mellan harvningdjupet och plöjningsdjupet, d.v.s. från

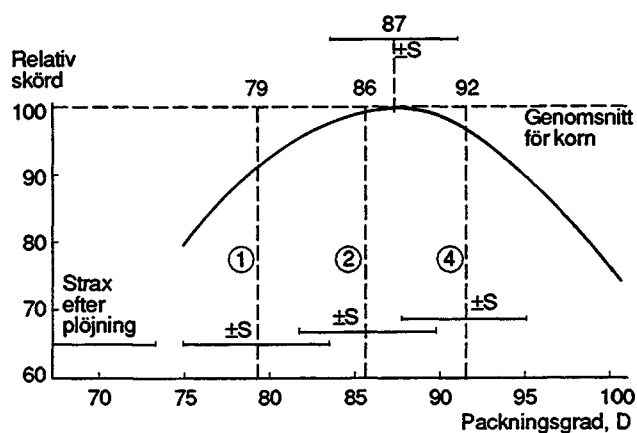


Fig. 12. Packningsgrad i matjorden i försök på höstplöjda fält, där man vid tiden för normalt vårbruk kört olika antal gånger spår intill spår med traktor med olika tyngd och marktryck. Diagrammet visar medeltal och standardavvikelse ( $\pm S$ ) i de olika försöksleden i ca 100 försök fördelade över hela Sverige. Försöksleden var 1) Ingen packning, 2) En överfart med 2-3 tons traktor med ett ringtryck av 50-80 kPa, 3) En överfart med 3-4 tons traktor med ett ringtryck av 100-120 kPa (visas ej; låg mitt emellan 2 och 4), 4) Fyra överfarter med 3-4 tons traktor med ett ringtryck av 130-160 kPa. Den genomsnittliga avkastningskurvan för korn är också inritad.

ca. 5 till 25 cm djup) vid olika körningar. I figuren visas också vilken packningsgrad som i genomsnitt gav högst skörd av vårkorn. Denna gröda odlades i samtliga försök. Avkastningseffekterna diskuteras närmare i kapitel 5.2.

Figuren visar att packningsgraden i matjorden på höstplöjda fält som inte packades på våren (försöksled 1) i genomsnitt var lägre än den optimala (den som gav högst avkastning). I regel ökade därför skörden, om matjorden återpackades måttligt. Efter en överfart med traktorhjul med låg belastning och lågt ringtryck (försöksled 2) var packningsgraden i genomsnitt strax under den optimala. En överfart med högre belastning och högre ringtryck (försöksled 3, visas ej i figuren) erhöles i genomsnitt en packningsgrad strax över den optimala. Fyra överfarter med den högre belastningen och ett ytterligare förhöjt ringtryck (försöksled 4) gav en packningsgrad, som i genomsnitt låg klart över den optimala och som i de flesta fall orsakade skördesänkning. Som standardavvikelsen visar, så varierade dock packningsgraden i de enskilda försöksleden ganska mycket mellan försöksplatserna. Orsakerna till variationerna är flera men de viktigaste torde ha varit hur fuktig jorden var vid körningarna och hur mycket den satt sig under vintern. Jordarten kan också ha spelat in något, likaså att det inte gick att få traktorer med exakt samma vikt, däckutrustning, ringtryck och körhastighet på de olika försöksplatserna.

Även i separata mätserier utan avkastningsbestämningar har packningsgraden i matjorden efter körning med olika slags maskiner bestämts. I en stor mätserie på 1970-talet bestämdes matjordens packningsgrad efter traktorkörning spår intill spår på höstplöjda fält vid tiden för vårbruket och i en mätserie på 1990-talet bestämdes packningsgraden efter körning med tyngre maskiner. Några exempel på resultaten visas i Fig. 13. Enligt dessa var markfuktigheten vid körtillfället och antalet överfarter de mest betydelsefulla faktorerna. Andra faktorer av betydelse var maskinernas vikt, hjulutrustning (enkel- eller dubbelmontage, stora eller små däck) och ringtryck. Körhastigheten och dragkraften (slirningen) hade endast mindre betydelse.

Mätresultaten visar, i likhet med en del utländska undersökningar, att när en lucker matjord belastas av fordonstrafik, så ökar dess packningsgrad i regel proportionellt mot logaritmen på såväl marktrycket som antalet överfarter. Detta gäller dock endast så länge det fortfarande finns luft kvar i jorden. I Fig 13B visas ett fall då jorden vid det våta körtillfället hade så litet luftinnehåll, att den inte kunde packas till högre packningsgrad än ca. 97. Efter 9 överfarter fick man därför högre packningsgrad under normala körförhållanden än under våta.

Vid laboratoriebestämningar av olika jordars packningsbenägenhet har som tidigare nämnts (avsnitt 3.1) lerjordarnas packningsgrad ökat mera än de lättare jordarnas, när trycket ökat. Vid körning med traktorer i fält har packningsgraden emellertid ökat ungefär lika mycket i lätta och styva jordar (Arvidsson, 1997a). En möjlig orsak är att belastningstiderna i de hittills utförda laboratorieförsöken varit mycket längre än belastningstiderna vid normala maskinkörningar i fält. När en sandjord utsätts för tryck, sker nämligen nästan hela den möjliga packningen ome-



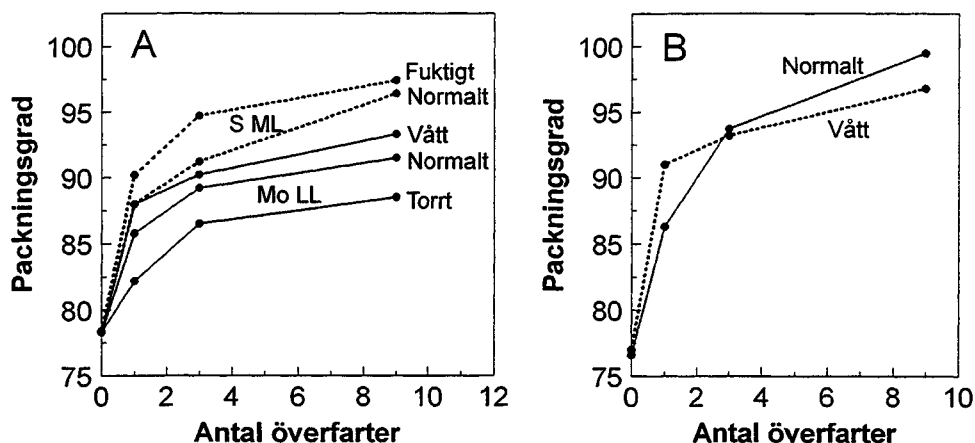


Fig. 13. Packningsgrad i matjorden efter olika antal överfarter med olika tunga maskiner på höstplöjda fält vid tiden för vårbruket. Körningarna gjordes under markfuktighetsförhållanden som varierade från våta till torra..

- A. Körning dels på en styvare mellanlera (S ML) dels på en molöttlera (Mo LL) med en tvåhjulsdreven traktor vägande 4,0 ton. Bakaxeln hade belastningen 3,0 ton, däcksdimensionen 12,4 x 36" och ringtrycket 110 kPa. (Efter Ljungars, 1977.)
- B. Körning på en molöttlera med en 9,9 tons hjullastare med däcksdimensionen 17,5 x 25" och ringtrycket 250 kPa. Medeltal för 0 och 1,5 tons last i skopan. (Efter Etana, 1995.)

delbart, medan packningsprocessen är mera utdragen i tiden i en lerjord. Skillnaden mellan de två jordarna i Fig. 13A får därför inte tolkas så att styvare leror alltid packas mera än lättare. Vid en del andra mätningar har det nämligen varit tvärtom.

### 3.3. Packningens omfattning i alven

Kör man på fuktig mark med en maskin med hög axelbelastning och med traditionell hjulutrustning, så får man packning inte bara i matjorden utan också därunder. Sålunda visade Danfors (1974) att körning på fuktig mark orsakade packning i alven och att denna blev starkare och sträckte sig allt djupare när axelbelastningen ökade. Mätresultaten överensstämde bra med vad teoretiska beräkningar av tryckets utbredning i marken under belastade hjul (Fig. 5 och 6) gav anledning förvänta och de ledde till en rekommendation att begränsa axelbelastningen till 6 ton på de maskiner och fordon, som används i svenskt jordbruk.

Tabell 2 visar resultat från mätningar i senare utförda svenska fältförsök, där man körde vid ett tillfälle med en lastad dumper, som totalt vägde 26 ton, varav 10 ton låg på framaxeln och 16 ton på boggien bak. Året efter körningen uppmättes statistiskt signifikanta packningsverkningar till ett djup av ca 50 cm. Vid mätningar tio år senare visade sig packningsverkningarna i alven vara praktiskt

Tabell 2. Torr skrymdensitet och skjuvhållfasthet i olika lager i alven i försök där man år 1977 kört fyra gånger spår intill spår med lastad dumper med 26 tons totalvikt (Från Etana, 1995). Skjuvhållfastheten anges i relativtal (obefaret försöksled = 100)

Försöksled	Torr skrymdensitet 1978 (g/cm <sup>3</sup> )		Relativ skjuvhållfasthet <sup>2</sup> , 35-45 cm		
	30-45 cm	45-60 cm	1978	1982	1988
Obefaret	1,47	1,42	100	100	100
Befaret	1,53	1,44	119	118	117 <sup>2</sup>
Signifikans <sup>1</sup>	*	Ej signifikant	***	***	***

<sup>1</sup> \* = signifikant (p<0,05), \*\*\* = mycket starkt signifikant (p<0,001).

<sup>2</sup>Mätt med vingborr (se Faktaruta 10). Penetrometermätningar i samma lager vid ett av tillfällena visade samma relativa skillnader mellan leden som vingborrmätningarna.

taget oförändrade.

Det maximala djup till vilket man riskerar att packa marken ökar sålunda, när maskinernas axelbelastning ökar. Teoretiska beräkningar av tryckets utbredning visar att det maximala packningsdjupet kan förväntas öka med roten ur axelbelastningen. I Fig. 14 sammanställs resultat från ett stort antal undersökningar i olika delar av världen, där man mätt upp det maximala packningsdjupet efter körning med tunga fordon. Det visar sig att de teoretiska beräkningarna hållit bra i praktiken, förutsatt att marken varit fuktig och packningsbenägen. När så varit fallet har det maximala packningsdjupet ökat enligt förväntningarna och nått ungefär till det djup som den inritade diagonallinjen anger. Vid många av undersökningarna har marken emellertid vid körtillfället varit relativt torr och motståndskraftig och därför inte packats till så stort djup. De punkter i diagrammet, som härrör från sådana mätningar, ligger mer eller mindre långt över linjen.

Körning med fordon med hög axelbelastning på fuktig mark orsakar sålunda packning djupt nere i alven, där effekterna blir mycket långvariga. Har fordonen normal hjulustrustning och jorden är fuktig, så orsakar fordon med 4 tons axelbelastning i typiska fall packning till mer än 30 cm djup, fordon med 6 tons axelbelastning packning till mer än 40 cm djup, fordon med 9 tons axelbelastning packning till mer än 50 cm djup och fordon med 12 tons axelbelastning packning till mer än 60 cm djup. I både Sverige, Tyskland och Ryssland har packning till mer än 80 cm djup uppmätts efter körning med mycket tunga militär- eller arbetsfordon. När man kör med traktorhjul i färan vid plöjning eller om det bildas mycket djupa spår, så medför en viss axelbelastning naturligtvis att jorden packas till betydligt större djup än det här angivna.

Upprepas körningen med tunga maskiner, så ökar packningen i alven successivt. Mätningar har visat att detta är fallet åtminstone upp till något tiotal överfar-

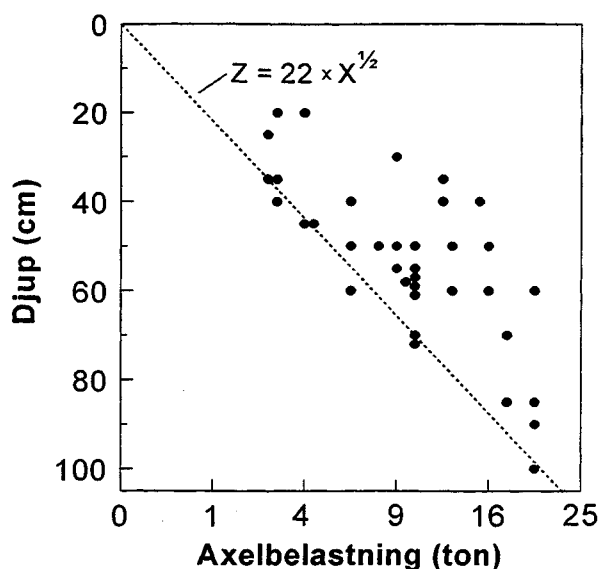


Fig. 14. Maximalt observerat packningsdjup vid olika axelbelastningar enligt mätningar i olika delar av världen. Resultaten överensstämmer med teoretiska förväntningar, vilka säger att packningsdjupet bör öka med roten ur axelbelastningen. (Diagrammet är baserat på litteraturuppgifter sammanställda av Håkansson & Reeder, 1994, och Alakukku, 1997).

ter men antagligen fortsätter packningen upp till ett mycket stort antal överfarer. I något fall (Jakobsen & Greasen, 1985) har man kunnat studera effekten av körning på mark, som aldrig tidigare överfarits av några tunga maskiner. Det visade sig då, att de ackumulativa packningsverkningarna i alven tilltog med logaritmen på antalet överfarer, liksom de visat sig göra i plöjd matjord (kapitel 3.2.2).

Fig. 15 visar resultat från mätningar, som gjorts i markprofiler från ett svenskt militärt övningsfält, där man kört med tunga pansarfordon under många år. Figuren visar volymen av de grova porerna (ekvivalent diameter  $>0,03$  mm) i procent av de olika lagrens totala volym. Det visade sig att ända ner till 1 m djup hade en mycket stor andel av de grova porerna försvunnit, d.v.s. de porer som svarar för huvuddelen av vattenrörelserna och luftning av jorden.

Under 1996-1997 uppmättes packningens djup och omfattning vid körning med tunga sexradiga betupptagare på åkermark på några platser i Skåne (Fig. 16). Man installerade mätkroppar med känsliga lägesgivare på några djup i marken, lät upptagarnas hjul passera rakt ovanför och registrerade givarnas vertikala rörelser. Om mätkropparna förflyttades nedåt när hjulen passerade, så betydde det att underliggande mark packades samman. (En mindre del av en mätkroppens nedtryckning kan dock bero på att underliggande jord pressas åt sidan.)

Fig. 16 visar resultat från en mätplats på sandjord. Den använda upptagaren

Fig. 15. Volymsmässig andel grova porer i olika marklager i körstråk för tunga militära pansarfordon (totalvikt ca 50 ton) på ett militärt övningsfält och i intilliggande obefarna jämförelseytor. (Efter Eriksson, 1976).

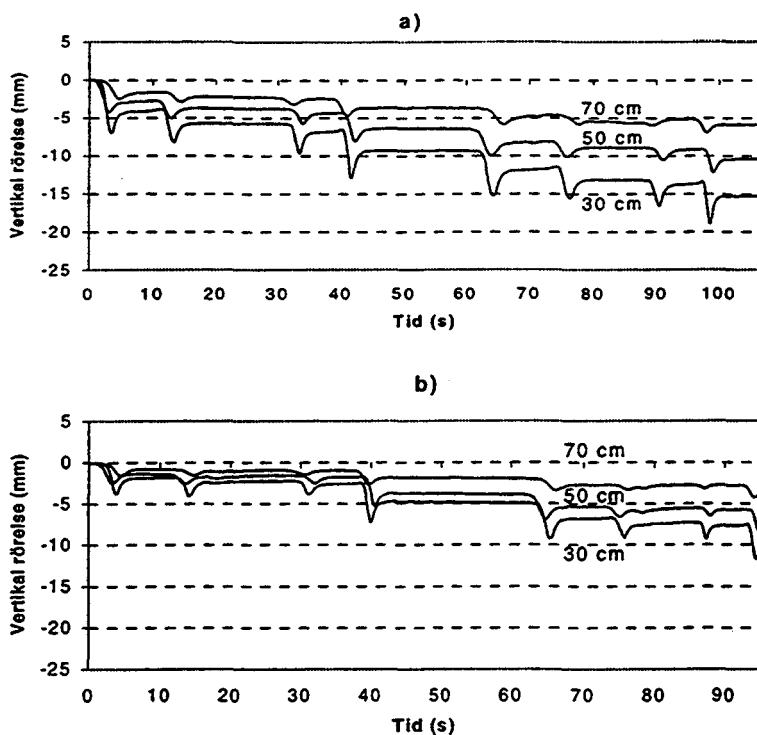
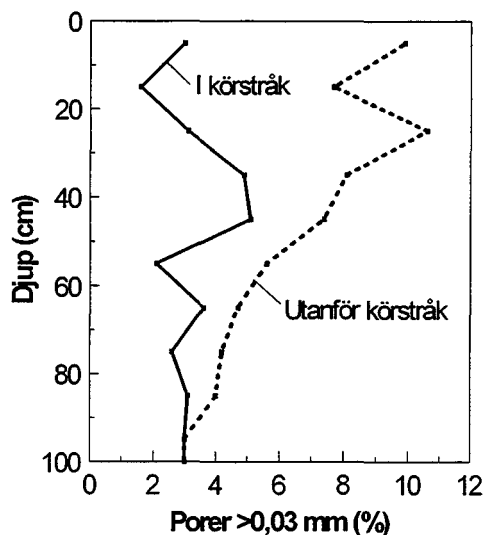


Fig. 16. Vertikala markrörelser på 30, 50 och 70 cm djup i en skånsk sandjord, när den överförs av en tung sexradig sockerbetsupptagare med två axlar. (Från Arvidsson, 1998.) Upptagaren kördes först sakta framåt och backades sedan tillbaka över mätplatsen. Detta upprepas två gånger, (a) med fullastad upptagare (totalvikt 35 ton) och (b) med tom upptagare (totalvikt 20 ton).

hade två axlar. Vid full last var framaxeln belastad med nästan 20 ton. Varje gång ett hjul passerade trycktes mätkropparna neråt men en del av rörelsen var elastisk och gick tillbaka när hjulet passerat. En del kvarstod dock efteråt och varje ny hjulpassage packade marken allt mer. Framaxeln hade högst belastning och orsakade starkast packning. Som beräkningar av tryckutbredningen (jfr. Fig. 6) ger anledning förvänta packades marken till mer än 70 cm djup, troligen till närmare 90 cm. Packningen blev starkare när upptagaren var fullastad (Fig 16a) än när den var tom (Fig 16b).

Vid nyligen genomförda mätningar med samma metodik på en uppländsk lerjord visade det sig att tunga maskiner orsakade packning djupt nere i alven, även när denna var starkt uttorkad (Trautner & Arvidsson, 2000b). Orsaken kan vara att de djupa torksprickor som bildats gjorde att trycktillskotten från maskinerna inte avtog med djupet så som hittills använda teoretiska modeller (Fig. 6) visar, utan förmedlades till stort djup utan att reduceras. Dessa resultat kräver att liknande studier görs också på andra jordar. Sådana kan ev. leda till att många jordar inte som hittills kan betraktas som okänsliga för packning, när de är torra.

### **3.4. Packningens varaktighet**

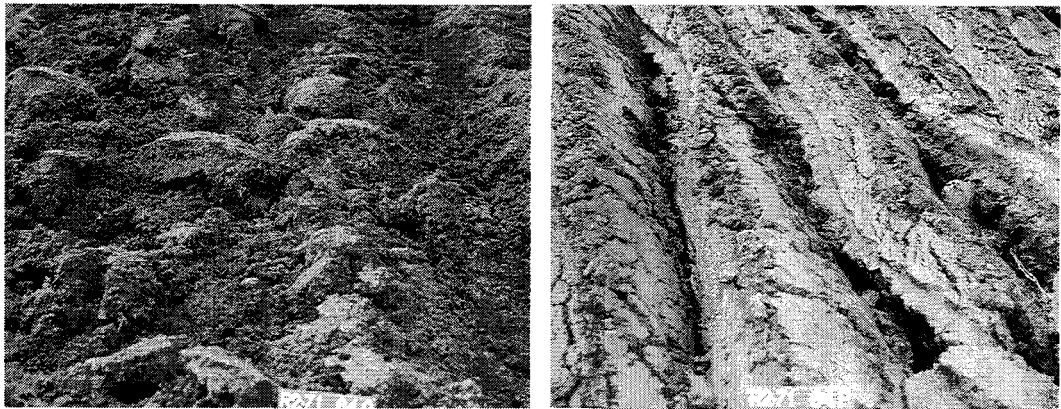
#### *3.4.1. Packning i matjorden*

Vattenhaltsväxlingar, tjälning, biologisk aktivitet och (i matjorden) jordbearbetning medverkar till att sudda ut packningens effekter. Både upptorkning och tjälning spränger sönder grova kokor nära markytan till mindre aggregat och åstadkommer sprickbildning mot djupet. Rötter och mikroorganismer medverkar till att stabilisera nya sprick- och aggregatytor. Rötter och daggmaskar åstadkommer vertikala kanaler i jordarna. Ju styvare jorden är, desto stabilare är i regel strukturen men samtidigt är det ofta mera negativt, om strukturen skadas.

Intensiteten i alla de strukturbefrämjande processerna avtar raskt med djupet. Sålunda kan matjordens ytlager i åkermark frysa och tina ett trettiotal gånger under en vinter. På djup >30 cm fryser däremot jorden aldrig mer än en gång per vinter och temperaturen går sällan under ett par minusgrader (faktaruta 6). Även vattenhaltsväxlingar och biologiska processer blir mindre intensiva med djupet. Därför får en packning allt varaktigare verkan, ju djupare jordlager som packas. I ett ytlager av några cm tjocklek tycks på alla jordar de naturliga processerna redan inom något år helt utplåna verkan av en packning, medan packning djupt nere i alven förblir permanent. I lagren däremellan beror packningens varaktighet bl.a. av jordarten, klimatet och brukningssystemet.

Om man söker karakterisera verkningarna av en packning i matjorden enbart med hjälp av jordens genomsnittliga skrymdensitet eller packningsgrad (faktarutorna 5 resp. 11), så kan man tro att en enda plöjning nästan helt förmår utplåna verkningarna. Så är också fallet på lerfattiga jordar men inte på lerjordar.

Efter en plöjning är den genomsnittliga skrymdensiteten och följaktligen också packningsgraden på alla jordar nästan densamma oberoende av om jorden packats



*Fig. 17.* Bilder av markytan i ett försök på en mellanlera i Uppland strax efter plöjning i oktober. Till vänster en opackad jämförelseruta, till höger en ruta som strax före plöjningen packades med traktor och vagn med en körintensitet av 350 tonkm per ha.

före plöjningen eller ej. På en lerjord leder emellertid en packning före plöjningen till att plog-tiltorna blir mera sammanhängande och täta (om plöjningen görs när jorden är våt) eller får en grövre och kokigare struktur (om plöjningen görs när jorden är torr). Detta illustreras i Fig. 17, vilken visar markytan i olika försöksrutor i ett packningsförsök på lerjord strax efter plöjning. Rutan t.h. hade packats genom körning med traktor och vagn före plöjningen, medan rutan t.v. var opackad. Enligt försöksresultaten (kapitel 5.3) tar det på lerjordar upp till fem år för packningsverknningar av detta slag att helt försvinna, men på en lerfattig jord tycks de vara försvunna redan efter en plöjning och en vinters tjäle. När man plöjt årligen, har man ännu inte observerat några helt permanenta packningsverknningar i matjorden på någon typ av jord.

#### 3.4.2. Packning i alven

En litteraturöversikt av Håkansson & Reeder (1994) visar att packning i alven får mycket långvarigare verkan än packning i matjorden. Detta gäller även i sådana lerjordar där djupa torksprickor bildas och i områden med djup årlig tjäle. I grövre jordar tycks packningens verknningar bli permanenta, eller åtminstone kvarstå under decennier, redan omedelbart under det normala plöjningsdjupet, alltså redan från 25-30 cm djup. I lerjordar tycks så bli fallet från 35 à 40 cm djup. Denna slutsats baseras på undersökningar i flera länder. I Tabell 2 visades resultat av mätningar i svenska försök, där man kört med fordon med en axelbelastning av 10 ton. Året efter körningen uppmättes packning till 50 cm djup och elva år senare kvarstod verkningsarna praktiskt taget oförändrade i lagret under 35 cm djup. Sammanfattningsvis kan man säga att på djup >40 cm är verkan av en packning i alla jordar så gott som permanent och i lerfattiga jordar och i klimat utan tjäle är

## Tjäldjup och tjälningfrekvenser

Alla lerjordsbönder vet att tjälen har en genomgripande och mycket gynnsam effekt på strukturen i matjordens ytlager på de styva lerorna. Tjälen har emellertid inte alls lika gynnsam verkan på lättare jordar p.g.a. att tjälen är av annan typ och att dessa jordar har sämre strukturstabilitet. Ej heller har tjälen lika gynnsam verkan i alven på någon typ av jord, troligen p.g.a. att tjälningfrekvensen är lägre och att temperaturen inte blir särskilt låg.

På en lätt jord är alla porer relativt grova. Vattnet fryser i de porer, där det befinner sig, och tjälen förändrar endast jordens struktur obetydligt. På en lerjord däremot är flertalet porer mycket små och håller vattnet hårt bundet. Därigenom sätts fryspunkten ned så starkt att vattnet inte fryser vid normala marktemperaturer. I stället börjar vattnet frysa i sprickor och andra grövre porer, där fryspunkten inte är nedsatt. Vatten sugas då ut ur de mindre porerna och strömmar fram till den is, som börjat bildas i de grövre porerna. I

dessa bildas klara isränder. I matjordens ytlager är frysningen snabb och det bildas ett tätt mönster av isränder, som spränger sönder grova kokor till mindre aggregat. I detta lager kan jorden frysa och tina 20 eller 30 gånger under en vinter. Temperaturen kan dessutom bli så låg, att större delen av vattnet fryser.

Antalet tjälningar minskar snabbt med djupet. På djup >35 cm fryser de svenska åkerjordarna högst en gång per vinter och temperaturen går sällan under ett par minusgrader. I dessa lager är därför tjälens strukturförbättrande verkan ringa, även under kalla och snöfattiga vintrar, och upp-torkningen under sommaren är mera betydelsefull. Dessa slutsatser kan dras av de mätningar som gjorts av packningsverkningsgarnas varaktighet i alven. På djup >35 cm har nämligen verkan av en packning kvarstått i det närmaste oförändrad efter många år (se exempelvis Tabell 2), även i lerjordar som flera gånger tjälats till 70 cm djup eller mer.

detta fallet redan på mindre djup.

Att packningsverkningsgarnas iakttagelser i de s.k. bottenmoränerna. Dessa är mycket starkt packade och detta anses bero på att de utsattes för extrema tryck, när de låg under inlandsisen för mer än 10.000 år sedan. Det finns inga exakta uppgifter om från vilket djup dessa packningseffekter fortfarande kvarstår, men man anser att på grövre moräner är detta fallet från ca 50 cm djup. Åtminstone från detta djup kan alvpackningen därför betraktas som helt permanent. Detta visar bla. att tjälens effekter på markstrukturen inte är tillnärmelsevis lika stora i alven som i matjordens ytlager.

Det har vidare visat sig mycket svårt att utplåna verkan av en packning i alven genom djupluckring. Ofta är det svårt, eller åtminstone dyrt, att åstadkomma en luckring till stort djup. En djupbearbetning stör dessutom markens struktur på ett sådant sätt att jorden efteråt blir mera packningsbenägen. En djupluckring gör därför ibland mer skada än nytta (faktaruta 7). Det är därför en mycket bättre strategi att så långt möjligt undvika alvpackning än att efteråt försöka utplåna dess verkningsgarn genom djupluckring.

## Faktaruta 7

### Alvluckring

Försök i olika länder rörande verkningarna av djupluckring pekar rätt entydigt på att sådan packning av alven, som förorsakas av körning med tunga maskiner, inte kan utplånas helt genom mekanisk luckring. På djup >40 cm är det överhuvud taget svårt att luckra jorden och detta gäller i synnerhet på stenig jord. Dessutom är alven ofta så fuktig under de tider på året, då fälten är fria från gröda, att djupbearbetning inte kan åstadkomma någon luckring. När man bearbetar alven, så minskar man också dennas hållfasthet och gör den mera packningsbenägen än den var dessförinnan (Lebert, 1992). I en del försök har alven därför några år efter en alvluckring t.o.m. varit mera packad än före luckringen.

Även under gynnsamma förhållanden är alvluckring sålunda inte alltid positiv och under ogynnsamma förhållanden kan den göra mer skada än nytta. Djupbearbetning kräver dessutom mycket energi. Framtida teknik kan visserligen förbättra möjligheterna till positiva resultat men förutsättningarna för att man skall få bestående positiva verkningar tycks vara att man efteråt drastiskt minskar belastningen på marken (Schulte-Karring & Haubold-Rosar, 1993).

I Sverige har man under senare år endast utfört ett fåtal försök med alvluckring. Några försök har utförts i grova torkkänsliga sandjordar med mullfri alv, i vilken ingen rotutveckling skedde. Djupbearbet-

ning omedelbart före sådden visade sig luckra den mullfria sanden så att rötterna kunde utvecklas till stort djup. En enda överfart av ett traktorhjul återpackade dock sanden så starkt att rotutveckling åter blev omöjlig. Äldre svenska alvluckningsförsök i olika jordar gav mycket varierande utslag i skörden, ömsom positiva, ömsom negativa. I medeltal var effekterna mycket små och motiverade inte kostnaderna. På den tiden var dock alven med största sannolikhet mindre packad än i dag och i mindre behov av luckring. Å andra sidan sker återpackningen snabbare nu än tidigare och troligen blir luckringseffekterna därför kortvarigare. Inga försök har heller gjorts med så stora försöksrutor att alvluckringens eventuella effekter på jordarnas dränering kunde slå igenom helt. Nya undersökningar av alvluckringens verkningar är därför motiverade.

Även om alvluckring eller annan djupbearbetning inte kan lösa de packningsproblem i alven, som orsakas av körning med tunga maskiner, så kan djupbearbetning ge bestående positiva effekter i en del andra fall. Om det exempelvis i alvens övre del finns ett tunt jordlager med avvikande kornstorlekssammansättning, som hindrar vattenrörelser, luftutbyte eller rotutveckling, så kan blandning av de olika jordlagren ibland förbättra markens odlingsegenskaper radikalt.



## Kapitel 4

# Packningens effekter på några markegenskaper och -processer

### Sammanfattning

Praktiskt taget alla egenskaper och processer i marken, fysikaliska såväl som kemiska och biologiska, påverkas i större eller mindre utsträckning av packningen. Porositeten minskar och därvid är det främst de grövsta porerna som drabbas, d.v.s. maskkanaler och gamla rotkanaler samt grövre sprickor och håligheter mellan kokor och aggregat. Därigenom försämras markens vattengenomsläpplighet och dräneringsegenskaper och nederbördsvattnets infiltration försvåras. Det ur odlingssynpunkt mest allvarliga är ofta att gasutbytet mellan marken och atmosfären försämras och att penetrationsmotståndet för rötterna ökar. Detta försämrar både grödornas rottillväxt och rötternas funktion och försvårar vatten- och näringsupptagningen. Vidare kan såbäddens kvalitet och grödornas etablering försämras. Livsbetingelserna för alla markorganismer påverkas också mer eller mindre starkt. I mycket lucker jord kan å andra sidan kontakten mellan jord och rötter bli för dålig och vattentransporten till rötterna vid torra alltför låg.

### 4.1. Porvolym och porstorleksfördelning

När marken packas påverkas praktiskt taget alla egenskaper och processer i marken, fysikaliska såväl som kemiska och biologiska i större eller mindre utsträckning. Därmed påverkas också många för grödorna viktiga tillväxtfaktorer. Primärt förändras sådana grundläggande markegenskaper som porvolym och porstorleksfördelning, det grova porsystemets kontinuitet och jordens hållfasthet. Dessa förändringar i sin tur påverkar rötternas tillväxt och funktion samt lagringen och transporten av vatten, luft och värme i jorden.

Packning innebär att ett visst jordelements totala volym eller ett visst jordlagers totala djup minskar. Den fasta substansens volym förblir emellertid oförändrad, och därför är det endast porernas volym som minskar. Alla porstorleksklasser påverkas dock inte lika mycket. Minskningen drabbar främst de grova porerna, såsom maskkanaler och gamla rotkanaler samt grövre sprickor och håligheter mellan kokor och aggregat. Detta kan visas bl.a. genom att man bestämmer jordens vattenhållande egenskaper. Ju grövre en por är desto lättare töms den på vatten vid dränering för att i stället fyllas med luft. Ju högre undertryck man utsätter porvattnet i jorden för (ju kraftigare dräneringen är), desto finare porer töms därför på vatten. Genom att mäta hur mycket vatten som dräneras bort vid en serie olika undertryck kan man bestämma porstorleksfördelningen. Fig. 18 visar porstorleksfördelningen efter olika stark packning av en lerjord. Porer med en diameter  $>30 \mu\text{m}$  (0.03 mm) försvann successivt ju mer jorden packades. Vid

## Faktaruta 8

### Hur påverkas volymförhållanden och porstorlekar i en jord av packning och luckring?

Figuren nedan är en principbild, som visar hur den totala volymen av ett visst jordlager, t.ex. det plöjda lagret, påverkas av packning och luckring. Vidare visas hur de parametrar som brukar användas för att karakterisera volymförhållandena påverkas och hänger samman samt hur olika porstorleksklasser brukar påverkas av packningen och luckringen. (Efter Håkansson m.fl., 1988).

Lagret ifråga innehåller en konstant mängd fast substans. Om det hade varit porfritt, d.v.s. porositeten ( $n$ ) varit 0 och materialiteten ( $m$ ) varit 100, skulle dess djup ( $H$ ) varit  $H_s$ , dess specifika volym ( $v$ ) varit 1, dess portal ( $e$ ) varit 0 och dess skrymdensitet ( $\rho$ ) varit  $\rho_m$ . (Dessa termer definieras i faktaruta 5.) Ingen jord har emellertid porositeten 0, då skulle den ju vara fast berg. Lagrets verkliga djup är därför större och varierar med packningstillståndet. Den heldragna kurvan visar sambandet mellan det aktuella lagerdjupet och de övriga parametrarna. Det ofärgade område

det under kurvan visar andelen porer.

För en och samma jord är bara ett begränsat avsnitt av kurvan aktuellt. Ett exempel ges för en mineraljord med relativt låg porositet. För denna jord antas lagerdjupet under fältförhållanden kunna variera mellan  $H_1 = 2,5 H_s$ , när jorden är genomluckrad, och  $H_2 = 1,67 H_s$ , när den är starkt packad (porositeten varierar mellan 60 % och 40 %). För andra jordar kan andra avsnitt av kurvan vara aktuella. För grövre moränjordar och sandjordar ligger det aktuella avsnittet i regel ungefär i enlighet med exemplet, d.v.s. dessa jordar har låg porositet och låg specifik volym. För lerjordar ligger det aktuella avsnittet något högre och för organogena jordar mycket högre, ibland t.o.m. ovanför det i figuren visade intervallet.

Området under de streckade kurvorna  $w_1$ ,  $w_2$  och  $w_3$  visar hur stor del av det totala porutrymmet i den i exemplet visade jorden som är fyllt med vatten vid tre vattenbindande tryck. 1 är ett lågt vattenbindande tryck (<100 hPa, d.v.s. under

1 m vattenpelare eller under normal dräneringsjämvikt), 2 ett medelhögt tryck (ca 200 hPa) och 3 ett högt tryck (ca 1,5 MPa, d.v.s. omkring vissningsgränsen). Resten av porutrymmet är luftfyllt. Packningstillståndet påverkar de vattenhållande egenskaperna på likartat sätt i flertalet jordar. Det är sålunda främst de grövsta porernas volym som minskar när en jord packas i fält och som ökar när den luckras. Volymen av de porer som är vattenfyllda (d.v.s. vattenhalten i vikts-%) vid ett vattenbindande tryck av ca 200 hPa eller högre förändras endast obetydligt när en jord packas eller luckras. Detta var underförstått bl.a. i diagrammet i Fig. 10.

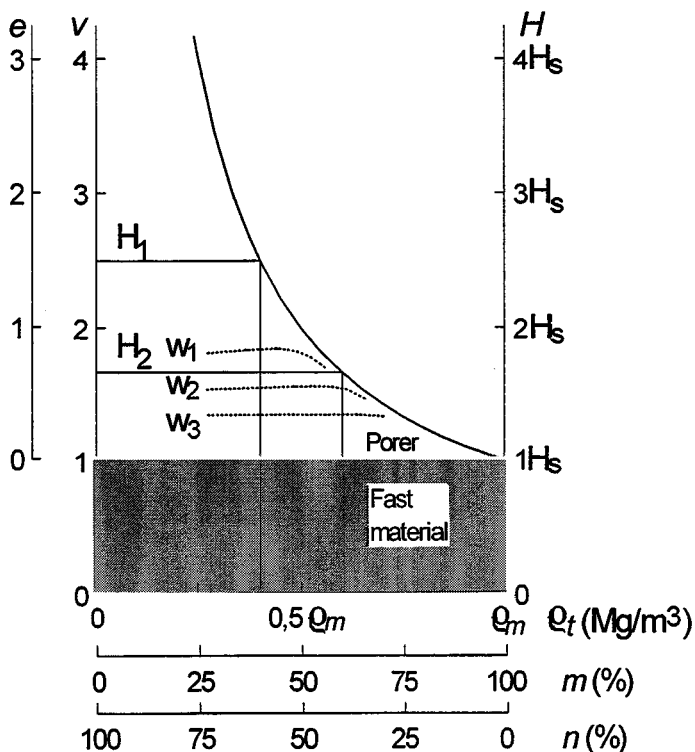


Fig. 18. Volymerna av fast material och porer av olika storlek i jordprover från en lerjord, som utsatts för en serie olika tryck från 0 upp till 800 kPa. Samtliga prover hade från början en volym av 100 cm<sup>3</sup>. (Från Eriksson m.fl., 1974).

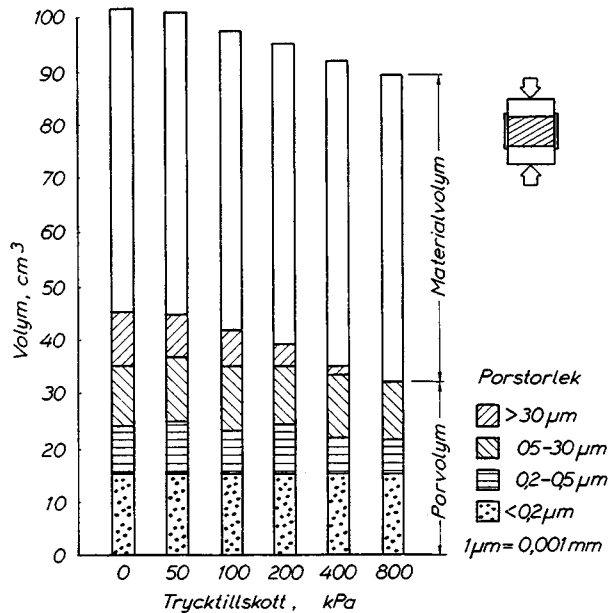
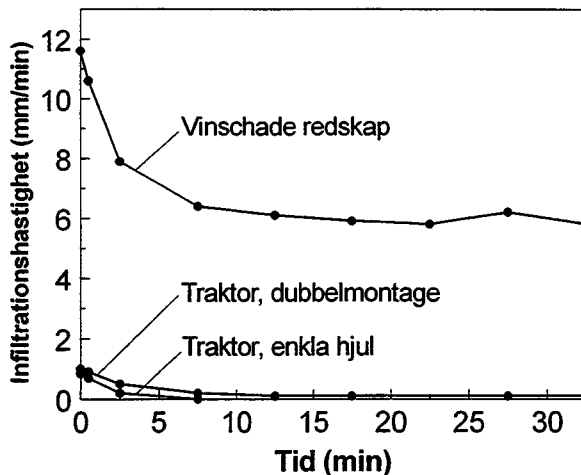


Fig. 19. Infiltrationshastighet i ett mångårigt packningsförsök på mycket styv lera. I två försöksled hade fältarbetena under 20 års tid utförts med traktor med enkla respektive dubbelmonterade bakhjul. I ett tredje led hade inga traktorer använts, utan redskapen hade vinschats över försöksrutorna. (Efter Håkansson m.fl., 1985.)



kraftig packning minskade även de finare porernas volym något. Även omvänt gäller att när man luckrar en jord och dess volym ökar, så är det främst det grova porsystemets volym som ökar (faktaruta 8).

#### 4.2. Infiltration, vattengenomsläpplighet, dränering

Det är de grövsta porerna i en jord, som svarar för huvuddelen av infiltrationen, vattengenomsläppligheten och gasutbytet, och packning påverkar därför ofta dessa markegenskaper mycket negativt. Detta exemplifieras i Fig. 19, som visar hur in-

Tabell 3. Torr skrymdensitet och mättad vattengenomsläpplighet i jordprover uttagna på olika djup i alven på en försöksplats i Skåne, där man året innan kört 4 gånger spår intill spår med en sockerbetsupptagare med en axelbelastning av nästan 20 ton (Arvidsson, 1997b)

	Skrymdensitet (g per cm <sup>3</sup> )		Genomsläpplighet (cm per tim)	
	30-35 cm	45-50 cm	30-35 cm	45-50 cm
Utan körning	1,68	1,57	1,89	8,27
Med körning	1,74	1,63	0,12	1,44
Signifikans	*	Ej sign.	***	***

filtrationshastigheten påverkades av olika packningsbehandlingar i ett mångårigt fältförsök. I ett av försöksleden hade redskapen vinschats över rutorna (se faktaruta 15) och där var infiltrationshastigheten hög under hela mättiden. I försöksrutorna där traktorer använts, och särskilt där dessa haft enkla hjul, var den däremot mycket låg redan från början och sjönk inom några minuter till nästan noll. På sådan jord är risken stor att det bildas ytvatten redan vid små regn. I det aktuella försöket berodde skillnaderna i infiltrationshastighet främst på packning i matjorden och alvens översta lager.

Även i alvens djupare lager kan vattengenomsläppligheten minska starkt om jorden packas. På försöksplatser i Skåne, där tunga sockerbetsupptagare packat jorden till minst 70 cm djup (jfr. Fig. 16), uttogs jordprover från olika alvlager. När vattengenomsläppligheten i dessa jordprover mättes på laboratoriet, visade det sig att denna minskats med upp till 90 % genom packningen (Tabell 3) p.g.a. den minskade volymen och kontinuiteten i det grova porsystemet. Man kan utgå ifrån att dräneringsegenskaper, luftinnehåll och gasutbyte i marken också försämrats.

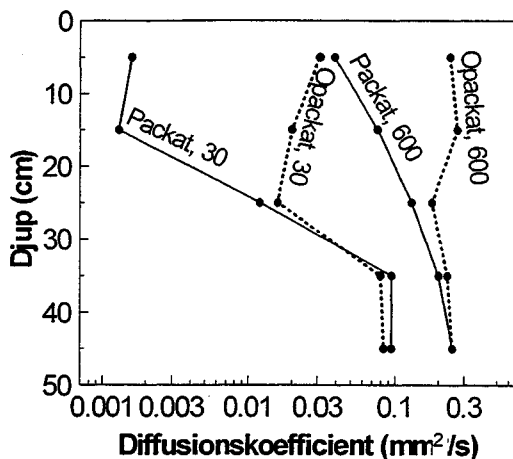
### 4.3. Rotutveckling och -funktion

För odlaren är det speciellt betydelsefullt, hur packningen påverkar de för grödan viktigaste tillväxtfaktorerna. De faktorer, som brukar anses mest kritiska i starkt packad jord, är penetrationsmotståndet för rötterna samt gasutbytet mellan mark och atmosfär och därmed syretillgången i marken. Högt penetrationsmotstånd hindrar rötternas tillväxt och dålig syretillgång skadar rötterna eller stör deras funktion. Av bägge dessa skäl försämrats växternas upptagning av vatten och näring.

#### 4.3.1. Gasutbytet i marken

Orsakerna till att dålig syretillgång i marken är skadlig för växterna är mycket komplexa. Dels behöver rötterna syre för sin andning och därmed för sin tillväxt,

Fig. 20. Diffusionskoefficient (= gasdiffusion i jorden dividerad med diffusionen i den fria luften) på olika djup i ett försök på en uppländsk lerjord, där matjorden packats genom körning med traktor på våren. Diffusionskoefficienten har bestämts på laboratoriet i prover från packade och opackade försöksrutor vid vattentensioner, som motsvarar dräneringsdjup av 30 och 600 cm under respektive nivå. (Efter McAfee, 1989.)



Tabell 4. Luftgenomsläpplighet (mm per tim) mätt i fält vid vegetationsperiodens början och slut på olika djup i ett försök på en uppländsk lerjord, där matjorden packats genom körning med traktor på våren. (Efter McAfee, 1989)

Djup (cm)	Datum	Opakat	Packat
0-5	30 maj	64	30
	2 September	12	10
10-15	30 maj	32	0,2
	2 September	12	1,6
25-30	30 maj	1,6	0,4
	2 September	1,6	2,4

dels inverkar syretillgången på bildningen av olika tillväxtreglerande ämnen i rötterna och dessas spridning till resten av växten. Vidare kan olika markorganismer bilda ämnen som är skadliga för rötternas funktion. Kemisk omvandling av olika näringsämnen och andra ämnen sker också. Vid stark syrebrist kan det t.ex. uppstå giftiga koncentrationer av aluminium i markvätskan.

Gasutbytet i marken sker såväl genom diffusion som genom s.k. massflöde och beror därför både av diffusionskoefficienten och luftgenomsläppligheten. Båda dessa minskar i hög grad om jorden packas, vilket exemplifieras i Fig. 20 respektive Tabell 4. I packad och våt jord är det inte ovanligt att syrehalten i markluften sjunker till låmgt under 10 %, d.v.s. till betydligt mindre än hälften av halten i atmosfären, samtidigt som koldioxidhalten stiger till uppemot 10 %.

Gasutbytet i marken bestäms i hög grad av markens luftfyllda porvolym. Hur stor luftfylld porvolym som krävs för fullgott gasutbyte är olika på olika jordar och vid olika strukturillstånd. Ändå har det visat sig, att den kritiska gränsen i det

årligen bearbetade lagret på våra åkerjordar ofta ligger vid ungefär samma värde, nämligen vid en luftfylld porvolym av ca. 10 % av jordens totala volym (Stepniewski m.fl., 1994). Under denna gräns blir syretillgången vanligen för dålig. På lerjordar i god struktur har det grova (luftfyllda) porsystemet bättre kontinuitet än i övriga jordar och där ligger den kritiska gränsen ibland något lägre. På sandjordar har det grova porsystemet dålig kontinuitet och där ligger den kritiska gränsen ofta betydligt över 10 % (Lindström, 1990). Det senare tycks också gälla en del mulljordar. I ostörda marklager (i alven eller i matjordslager som inte bearbetats under några år) har det luftfyllda porsystemet bättre kontinuitet än i lager som bearbetats årligen och detta gynnar gasutbytet. Den kritiska gränsen sänks därför men hur mycket den sänks varierar mellan jordarna.

#### 4.3.2. Penetrationsmotståndet i marken

De mest lättframkomliga vägarna för rötterna i marken och de där rottillväxten mot djupet går snabbast är grova, sammanhängande porer i form av vertikala sprickor och biopor, t.ex. maskkanaler och gamla rotkanaler. Grödorna får därför störst rotdjup på jordar som har ett rikt och sammanhängande system av sådana porer till stort djup (faktaruta 9). Packning minskar såväl det grova porsystemets totala volym som dess kontinuitet och därigenom minskar rötternas tillväxthastighet.

I regel är det endast en del av rötterna hos en gröda, som hittar sådana grova, sammanhängande porer, där de kan tillväxa obehindrat, och i en del jordar saknas sådana porer eller är mycket osammanhängande. Åtminstone inom vissa delsträckor måste många rötter därför tränga fram genom en förhållandevis homogen jordmassa. Detta är dock inte enbart av ondo, eftersom åtminstone några av rötterna behöver ha mera intim kontakt med jorden än vad de får i stora, öppna porer. Vid alltför dålig kontakt mellan rötter och jord har det visat sig att rötternas upptagning av vatten och näringsämnen försåras. Rötterna behöver därför kunna penetrera jorden också i områdena mellan de grova porerna och där får jordens penetrationsmotstånd inte vara alltför högt ens om det finns ett rikt och sammanhängande system av grova porer.

Jordens penetrationsmotstånd kan mätas med en s.k. penetrometer (faktaruta 10). En sådan har visat sig ge användbara relativvärden på jordens motstånd mot rötternas tillväxt och i många undersökningar har man visat, att när penetrationsmotståndet ökar så minskar rottillväxten. Boone m.fl. (1994) angav att ett penetrationsmotstånd av 3 MPa ofta är en kritisk gräns, över vilken rottillväxten blir mycket ringa, och redan vid halva detta värde blir rötternas tillväxthastighet vanligen klart nedsatt. Den kritiska gränsen för penetrationsmotståndet kan emellertid vara något olika för olika växtslag och beror också av jordarten och strukturillståndet. På sådana lerjordar, som har ett tämligen sammanhängande system av sprickor, gamla rotkanaler, maskkanaler o.d., ligger den kritiska gränsen högre än på sandjordar och andra jordar som saknar ett sådant system. Stenizer

## Rottillväxt och rotdjup

Flertalet grödor utvecklar rötter till stort djup i marken, om penetrationsmotståndet inte är för stort. Rötterna hos flertalet svenska jordbruksgrödor har en djuptillväxt av 2-3 cm per dygn (ca. 1 mm per timme), om marktemperaturen är gynnsam, marken väl luftad, penetrationsmotståndet lågt och växterna väl försörjda med vatten och näring. Vårstråsädens rötter tillväxer då mot djupet med denna hastighet fram till tiden för axgång och når under gynnsamma förhållanden ett djup av 130-150 cm. Höstsådda grödors rötter har längre tid på sig och hinner ner till ännu större djup. Figuren nedtill t.v. ger ett exempel på rotutvecklingen i en korngröda på en lera i gott struktur-tillstånd.

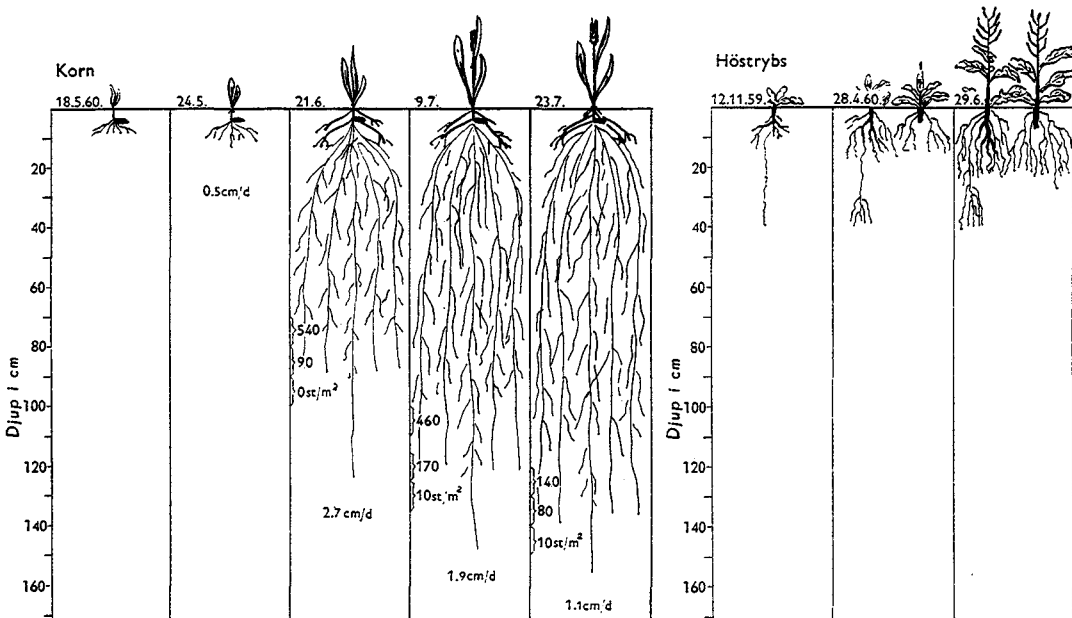
I alven är rottätheten mycket mindre än i matjorden men under torrperioder hinner grödan ändå utnyttja huvuddelen av det växttillgängliga vatten som finns inom rotzonen. Minskar rotdjupet så minskar det vattenmagasin som växterna kan utnyttja och grödans torkkänslighet ökar.

När markens penetrationsmotstånd ökar, så avtar rötternas tillväxthastighet. Penetrationsmotståndet mäts ofta med en s.k. penetrometer (faktaruta 10). Vid ett penetrationsmotstånd över 1,5 MPa blir rötternas tillväxthastighet ofta påtagligt

nedsatt. I många jordar upphör rottillväxten helt vid ett penetrationsmotstånd av 3 - 3,5 MPa, i en del enkelkornjordar redan vid 2,5 MPa. Finns det ett sammanhängande system av torksprickor, maskkanaler, gamla rotkanaler o.d. i alven, vilket främst är fallet på lerorna, så kan rötterna tillväxa mot djupet i dessa även om penetrationsmotståndet i jordmassan i övrigt är stort. I det senare fallet försvåras dock rötternas förgrening.

I lättare mineraljordar saknas ofta sammanhängande grova porer i alven. Rottillväxten måste då ske genom en mera homogen jordmassa, där penetrationsmotståndet ofta är 1,5 MPa eller högre. Detta leder till nedsatt tillväxthastighet och litet rotdjup. Figuren nedtill t.h. är ett exempel på detta. I en del jordar, främst jordar med stort innehåll av mellansand, upphör rottillväxten redan ett par cm under plöjningsdjupet.

Ibland har andra förklaringar till dålig rotutveckling i alven på sandjordarna framförts, såsom torkspärrar eller för lågt näringsinnehåll. Dessa förklaringar tycks dock inte stämma. Däremot kan syrebrist i jorden hämma rottillväxten eller skada rötterna på nästan alla typer av jordar. Detsamma gäller låga pH-värden, vilket hämmar rotutvecklingen främst på en del mul- och gyttejordar.



Rotsystemet vid några tidpunkter under växtsäsongen på två olika jordar. T.v. vårkorn sått den 5 maj 1960 på en lera i gott struktur-tillstånd, t.h. höstrybs sådd i augusti 1959 på en moig sand. (Från Wiklert, 1961.)

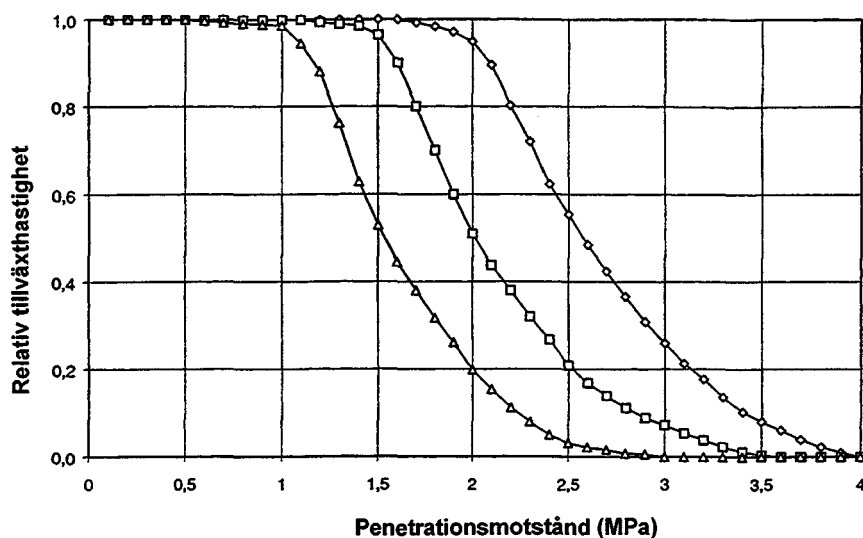


Fig. 21. Penetrationsmotståndets inverkan på rötternas relativa tillväxthastighet. (Från Stenitzer & Murer, 2000). Den mittre kurvan kan ses som en normalkurva, som gäller för medelstyva rötter på en jord med enstaka grova porer. Den vänstra kurvan gäller om rötterna är mycket mjuka eller om jorden helt saknar grova porer. Den högra kurvan gäller om rötterna är mycket styva eller om jorden har ett rikare system av grova porer.

& Murer (2000) sammanfattade tillgängliga uppgifter om penetrationsmotståndets inverkan på rötternas tillväxthastighet i ett diagram (Fig. 21).

#### 4.4. Markbiologiska effekter

Man kan anta att packningstillståndet i större eller mindre grad påverkar alla de biologiska processer som äger rum i marken, exempelvis den organiska substansens omsättning och växtnäringsämnenas mineralisering. Markbundna växtsjukdomar, växtparasiter och ogräs kan också påverkas. Effekterna av packning eller luckring på sådana processer är dock än så länge mycket dåligt undersökta. En del markbiologiska effekter diskuteras i kapitel 6.

#### 4.5. Effekter av stark luckring

Även stark luckring av en jord försämrar vissa för grödorna väsentliga tillväxtfaktorer. Sålunda försämras kontakten mellan jorden och rötterna. Dessutom får en mycket lucker jord i torrt tillstånd en alltför låg omättad (kapillär) vattenledningsförmåga. Bägge dessa faktorer försvårar växternas vatten- och näringsförsörjning. Orsakerna till de negativa verkningarna av stark luckring är

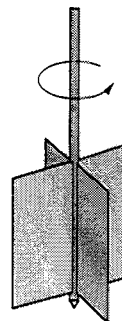
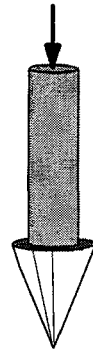


## Penetrometern och vingborren

En *penetrometer* används ofta vid studier av det motstånd rötterna möter, när de tillväxer i marken. Penetrometern består av en stav med en spets som kan ha olika storlek och form beroende på syftet med mätningen. I jordpackningsstudier används oftast en konisk spets med spetsvinkeln  $30^\circ$ . Penetrometern trycks ned i jorden under det att man mäter den kraft som erfordras för nedtryckningen. Genom att konens bas är vidare än själva staven minskar friktionen mellan staven och jorden. Motståndet bestäms därför främst av markegenskaperna runt spetsen. Penetrationsmotståndet brukar anges i kPa eller MPa som den kraft som krävs för att trycka ner penetrometern per ytenhet av konbasens tvärsnittsytta.

Penetrometern kan inte exakt mäta det motstånd, som en levande rot måste övervinna för att tillväxa. Främsta skälet är att penetrometern trycks rakt ned, medan roten kan följa grova porer, om sådana finns, eller böja av, om motståndet i en annan riktning är lägre. En penetrometer ger därför endast ett ungefärligt mått på penetrationsmotståndet för rötterna. Det värde man erhåller måste dessutom bedömas med hänsyn till jordens sammansättning, vattenhalt och struktur.

*Vingborren* är ett annat mätinstrument som används i liknande syfte. Den består av en stav med ett radiellt påsvetsat plåtkors. Den slås ner tills plåtkorset nått det avsedda mätdjupet. Sedan vrids den runt med en momentnyckel, varvid man mäter det största moment som erfordras för vridningen. Detta erhålls just som plåtkorset börjat vrida sig. Därefter minskar momentet starkt. När man jämfört mätningar med vingborr och med penetrometer i jordar som behandlats på olika sätt har båda metoderna vanligen givit ungefär samma relativa skillnader mellan behandlingarna.



dock fortfarande dåligt undersökta. Några kritiska gränser har hittills inte fastställts men dessa varierar troligen med förhållandena. Sålunda är växterna mera beroende av en god kapillär ledningsförmåga för vatten, när vattenbehovet är stort (potentiella avdunstningen hög) än när det är litet (potentiella avdunstningen låg). Jordens värmeledningsförmåga är också lägre i lucker än i packad

jord och därför blir temperaturvariationerna i markytan större. I jordpackningsförsök har det exempelvis allt som oftast observerats att om det blir en frostnatt strax efter grödans uppkomst, så blir frostskadorna på växternas ovanjordiska delar svårare i opackade än i packade försöksrutor.

# Kapitel 5

## Packningens effekter på grödorna

### Sammanfattning

Ettåriga fältförsök har visat att plöjning eller annan djup bearbetning luckrar jorden för mycket och att en måttlig återpackning gynnar grödan. Återpackningen får dock inte bli för stark. En given jord ger högst skörd vid en viss skrymdensitet eller porositet. Den optimala skrymdensiteten (porositeten) är emellertid olika för olika jordar. Genom att i stället karakterisera tillståndet med hjälp av den s.k. packningsgraden, elimineras skillnaderna mellan jordarna. På alla typer av jordar ligger optimal packningsgrad för vårsträsäd i genomsnitt mellan 85 och 88. Den varierar dock bl.a. med fuktigheten under vegetationsperioden och är något olika för olika grödor.

I en mångårig försöksserie har man studerat effekterna av körning före höstplöjningen med relativt lätta traktorer och vagnar, så att packningen i huvudsak begränsades till matjorden. Det visade sig att packningsverkningarna i matjorden utplånades av en plöjning och en vinters tjäle på lätta jordar men inte på styvare. Även på styva lerjordar ebbade dock verkningarna ut inom fem år, förutsatt att jorden plöjdes årligen. Skördenedsättningen ökade med markens fuktighet vid körningarna och med marktrycket och var ungefär proportionell mot såväl körintensiteten som jordens lerhalt.

I andra mångåriga försök körde man med maskiner med 10 tons axelbelastning vid ett tillfälle. Körningen orsakade packning till ca 50 cm djup på såväl lätta som styva jordar. I alven kvarstod packningsverkningarna praktiskt taget oförändrade vid den tioåriga försöksperiodens slut och grödornas avkastning sänktes under hela perioden. Packningsverkningar på djup större än 40 cm blir sålunda nästan permanenta och körning med fordon med höga axelbelastningar är därför ett allvarligt hot mot jordarnas långsiktiga produktionsförmåga.

Stubbearbetning till halva plöjningsdjupet har ofta givit lika god skörd som traditionell plöjning på lerjordar men inte på sandjordar. Sandjordarna tycks vara de mest känsliga för den starka packning av matjordens bottenlager, som blir följderna när den årliga luckringen uteblir. Det stubbearbetade ytlagret tycks dock på alla jordar ha nästan samma behov av återpackning under såbäddsberedningen som ett plöjt lager. Den sista slutsatsen baseras dock endast på ett enskilt försök.

Körning i växande gröda orsakar inte enbart jordpackning utan också skador på själva växterna. Vallen är den etablerade gröda där körningen är intensivast. Försöksmässig körning vid vallskörd under våta förhållanden, då hjulen slirade starkt, sänkte skörden drastiskt vid nästa skördetillfälle.

### 5.1. Olika slag av effekter

Effekterna av körning med maskiner och fordon på åkermark har under årens lopp studerats i ett stort antal försök både i Sverige och grannländerna. Körningens

effekter på grödorna är av olika slag. När man kör i redan etablerade grödor, får man direkta körskador på växterna. Särskilt i vallarna kör man mycket vid skörd och gödslingar och effekterna av detta har studerats i ett flertal försök. När man kör på plöjd mark under såbäddsberedningen, så ökar packningsgraden i matjorden, och detta påverkar växtbetingelserna för den gröda man sår. Denna effekt har studerats i ett stort antal ettåriga försök. Ett packat matjordslager luckras igen (packningsgraden sänks) vid efterföljande plöjning, men är det en lerjord så förblir den ändå i sämre strukturtillstånd under några år. Betydelsen av dessa efterverkningar för grödornas avkastning har studerats i en serie fleråriga försök på olika jordar. Om man kör med fordon med hög axelbelastning, så packas inte bara matjorden utan också alven. Alvpackningens varaktighet och effekter har studerats i en serie mångåriga försök.

De allra flesta av försöken har genomförts inom ramen för ett konventionellt brukningssystem med plöjning till alla ettåriga grödor. I några få försök har också packningens verkningar vid plöjningsfri odling studerats. Nedan redovisas de resultat som erhållits i de olika typerna av försök.

## **5.2. Ettåriga effekter av återpackning av matjorden efter plöjning**

Såväl praktisk erfarenhet som ett stort antal försök världen över har visat att all packning av matjorden inte är av ondo. Efter plöjning eller annan djup bearbetning är nämligen det bearbetade lagret i regel alltför luckert och om det återpackas måttligt under såbäddsberedningen så gynnas grödans tillväxt. Som nämnts i kapitel 4 beror detta antagligen främst på att återpackningen förbättrar rötternas vatten- och näringsupptagning. Utan återpackning förblir jorden vanligen alltför lucker ända fram till skörden (Fig. 11). Vid konventionella brukningsmetoder packas dock matjorden ofta för mycket och då sänks skörden ånyo.

### *5.2.1. Hur kan det aktuella packningstillståndet karakteriseras?*

Internationellt karakteriserar man vanligen ett jordlagers packningstillstånd med hjälp av dess torra skrymdensitet (tidigare ofta benämnd volymvikten). Alternativt använder man porositeten men det spelar ingen roll vilken av dessa man använder, eftersom den ena kan erhållas ur den andra genom enkel omräkning (faktaruta 8). Som komplement används ofta andra parametrar, främst den luftfyllda porvolymen eller penetrationsmotståndet.

Den aktuella skrymdensiteten i ett årligen bearbetat lager ger viktig information om hur lagret fungerar, eftersom en förändring av skrymdensiteten inverkar starkt på det grova porsystemets omfattning och utformning och därmed på lagrets egenskaper. Optimala förhållanden för grödans tillväxt erhålls vid en viss skrymdensitet och både högre och lägre skrymdensitet (lägre resp. högre porositet) sänker skörden. Den optimala skrymdensiteten är dock olika för olika jordar. Vid jämförbara packningstillstånd kan olika jordar sålunda ha mycket olika skrymdensiteter. När man vill jämföra packningstillstånden i olika jordar, är därför var-

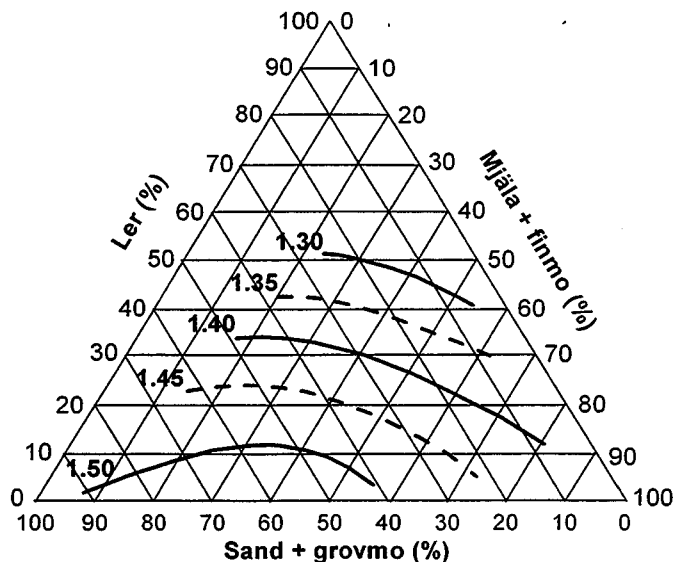


Fig. 22. Den för grödorna optimala skrymdensiteten är olika på olika jordar. Figuren visar med hjälp av en s.k. jordartstriangel (jfr. faktaruta 4) hur den optimala skrymdensiteten (i g per  $\text{cm}^3$ ) i matjorden beror av jordens procentuella innehåll av ler, av mjåla + finmo (= silt) och av grovmo + sand. Resultat av försök på mullfattiga till måttligt mullhaltiga jordar i östra Tyskland (Efter Petelkau, 1984.) På jordar med hög lerhalt är den optimala skrymdensiteten under 1,3 g per  $\text{cm}^3$ , på jordar med hög sandhalt över 1,5 g per  $\text{cm}^3$ . Vid ökad mullhalt minskar den optimala skrymdensiteten och kan på rena mulljordar bli under 0,4 g per  $\text{cm}^3$ .

ken skrymdensiteten eller porositeten någon lämplig parameter.

Att den för grödorna optimala skrymdensiteten varierar exemplifieras av resultat från avkastningsförsök på jordar med olika kornstorlekssammansättning i östra Tyskland (Fig. 22). De optimala värdena och de kritiska gränserna kan t.o.m. variera mellan jordar som jordartmässigt klassificeras lika men som har olika geologiskt ursprung. Jordartsklassifikationen är nämligen ganska grov och tar inte hänsyn till sådana faktorer som mineralsammansättning och kornform. Dessutom påverkas optimivärdena i ännu högre grad av mullhalten än av mineraljordens sammansättning. Redan inom en och samma åker kan de optimala skrymdensitets- och porositetsvärdena därför variera mycket.

För att få ett mått på packningstillståndet som är oberoende av jordarten har man försökt relatera den aktuella skrymdensiteten till något referensvärde erhållet genom en standardiserad packning av jorden. I Sverige har vi sedan många år använt ett sådant förfarande och beräknat den s.k. packningsgraden ( $D$ ). Denna definieras som jordens torra skrymdensitet i procent av skrymdensiteten i samma jord efter det att den packats på ett standardiserat sätt på laboratoriet med ett statiskt tryck av 200 kPa (faktaruta 11).

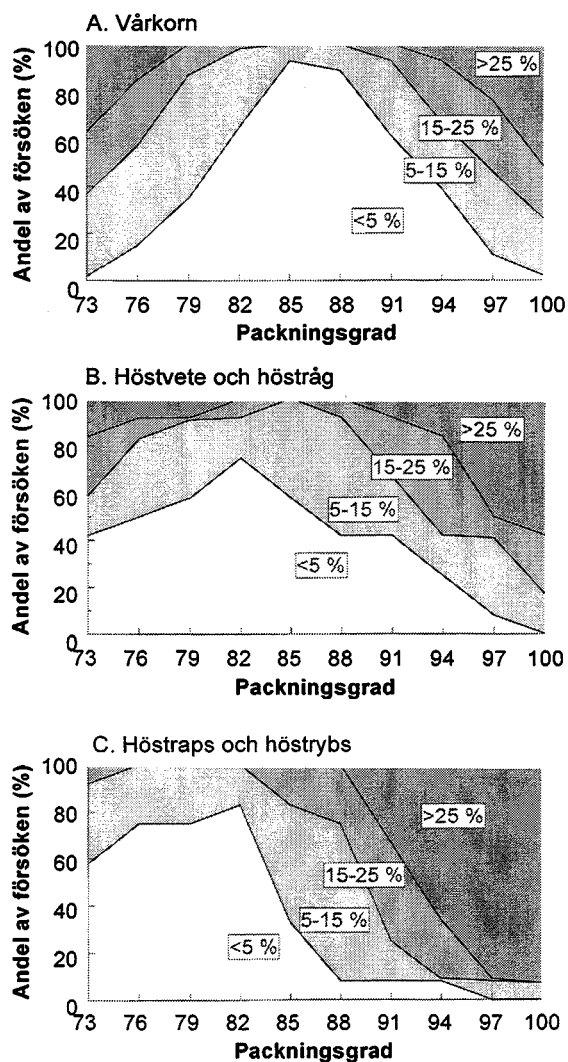


Fig. 23. Diagram som visar i hur stor procent av antalet försök med olika grödor (A = vårkorn; B = höststråsäd; C = höstoljeväxter) som man erhållit skördesänkningar av olika storlek, när packningsgraden varierat mellan 73 och 100. (Efter Eriksson m.fl., 1974, med tillägg av senare försöksresultat).

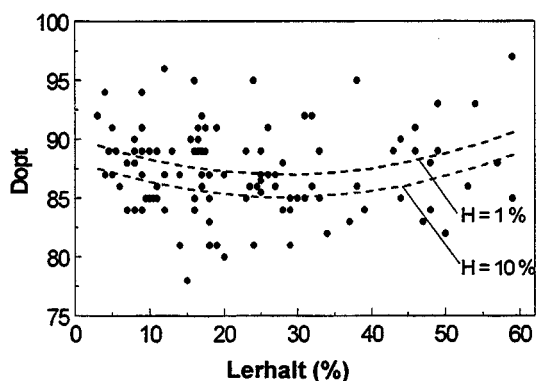


Fig. 24. Den optimala packningsgraden ( $D_{opt}$ ) för korn på jordar med olika lerhalt i matjorden. Resultat från en serie om ca 100 försök i olika delar av Sverige. Statistiskt beräknade sambandskurvor har ritats in för jordar med mullhalter (H) av 1 % och 10 % (Från Håkansson & Lipiec, 2000).

### 5.2.2. Skörderesultat

Många fältförsök har genomförts, främst i Sverige men också i Norge, Polen m.fl. länder, för att studera grödornas avkastning vid olika packningstillstånd i matjorden och där detta karakteriserats med hjälp av packningsgraden. I de flesta av dessa försök har grödan varit vårkorn. I Fig. 23 sammanfattas resultaten av ett stort antal svenska försök med denna och en del andra grödor. Bäst avkastning av vårkorn har i genomsnitt erhållits när packningsgraden ( $D$ ) varit ca. 87. Såväl högre som lägre  $D$ -värden har sänkt skörden, och sänkningen har varit större ju mera  $D$ -värdet avvikit från det optimala. Det optimala  $D$ -värdet har varit praktiskt taget detsamma på alla jordar oberoende av jordarten (Fig. 24), och det var just detta som eftersträvades, när man började uttrycka packningstillståndet på detta sätt. Om man i stället använt skrymdensiteten direkt, så hade optimet varierat mycket mellan de olika jordarna.

Den optimala packningsgraden är sålunda nästan oberoende av jordarten. Den är däremot något olika för olika grödor. I försök där man samtidigt odlat flera vårsådda grödor har det optimala  $D$ -värdet i genomsnitt legat högst för vete, korn och sockerbetor och lägst för potatis. Skillnaden är dock i genomsnitt endast några få packningsgradsenheter. Råg, havre, ärter, raps, rybs och åkerbönor har sina optimalvärden däremellan (se Fig. 27 nedan). För höstsådda grödor har i försöken det optimala  $D$ -värdet legat något lägre än för motsvarande vårsådda grödor (Fig. 23). Inom grödorna kan det dock finnas sortskillnader men dessa har endast studerats i några få försök. I dessa visade det sig exempelvis att det optimala  $D$ -värdet låg lägre för den gamla havresorten Stormogul än för nyare havresorter. Möjligen kan detta bero på att den just var en gammal sort och provades ut, medan matjorden var luckrare än idag, eftersom fältarbetena då ännu inte var mekaniserade. (Detta är dock en ren spekuliation men skulle den vara riktig, så innebär den att jordpackningen kan vara mera negativ för grödorna än nyare fältförsök visar.)

En detalj värd att notera är att korn i försöken har reagerat mindre negativt på hög packningsgrad än havre, medan många jordbrukare säger sig ha observerat motsatsen. Förklaringen är antagligen att korn på försommaren brukar gulna mera än havre, om den växer på starkt packad jord. Så var också ofta fallet när korn och havre odlades jämsides i samma försök. Vid skörden visade sig dock havren vara den mest känsliga.

I Fig. 25 visas resultat från ett modellförsök med olika stark vattentillförsel till grödan under våren och försommaren. I en serie sådana försök framgick att om denna period blir kontinuerligt våt, så ligger det optimala  $D$ -värdet något lägre än i genomsnitt, men om den blir kontinuerligt torr, så ligger det något högre. I den större fältförsöksserie med korn, som redovisades av Håkansson (1990), var effekterna av det genomsnittliga fuktighetstillståndet under vegetationsperioden emellertid inte alls lika entydiga som i modellförsöken. Troligen berodde detta på att i modellförsöken (Fig. 25) hölls fuktighetstillståndet i jorden genom bevattning

## Faktaruta 11

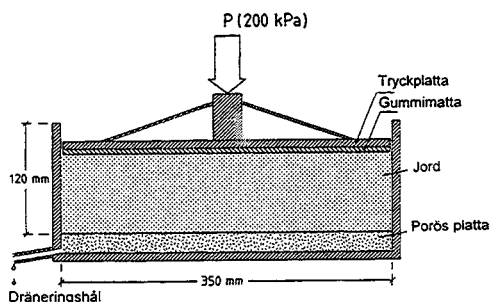
### Packningsgrad och standardpackning

Många olika parametrar har använts för att karakterisera en jords packningstillstånd. De vanligaste är skrymdensiteten och porositeten. En porositet eller skrymdensitet, som i en jord betyder ett mycket luckert tillstånd, kan emellertid i en annan jord betyda ett extremt packat tillstånd. I exempelvis en mullfattig skånsk moränjord kan skrymdensiteten variera från 1,3 g per  $\text{cm}^3$  när den är nyplöjd till 1,7 g per  $\text{cm}^3$  när den är starkt packad. I en mullfattig sandjord kan motsvarande gränser vara 1,3 och 1,6 g per  $\text{cm}^3$ , i en mullrik styv lera 1,0 och 1,3 g per  $\text{cm}^3$  och i en lerig mulljord 0,4 och 0,6 g per  $\text{cm}^3$ .

För att komma ifrån detta problem har man sedan länge i svensk försöksverksamhet karakteriserat matjordens packningstillstånd med hjälp av den s.k. packningsgraden ( $D$ ). Denna definieras som jordens torra skrymdensitet i fält i % av torra

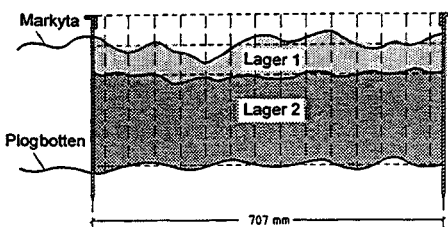
skrymdensiteten i samma jord sedan den på laboratoriet packats på ett standardiserat sätt i en s.k. ödometer. Standardpackningen görs i en stålcylander med 35 cm diameter med dränering i botten. Cyindern fylls med lös, våt jord, som belastas med ett tryck av 200 kPa tills volymminskning och dränering upphör. Därigenom får man den stakaste packning som är möjlig med det använda trycket.

Matjordens skrymdensitet i fält bestäms oftast genom rammätning. En 0,5  $\text{m}^2$  stor plåtram slås ned genom matjordslaget och djup och jordmängder i olika delager bestäms. I svällnings/krympningsjordar (leror) måste skrymdensiteten bestämmas när jorden har en fuktighet nära fältkapacitet, så att skrymdensiteten inte ökas genom att jorden krympt. Någon metod att korrigera densitetsvärdena för sådan krympning finns ännu inte.



*T.h.: Principbild av 0,5  $\text{m}^2$  ram för bestämning av skrymdensiteten i olika delager i matjorden.*

*T.v.: Schematisk bild av ödometer för standardpackning.*



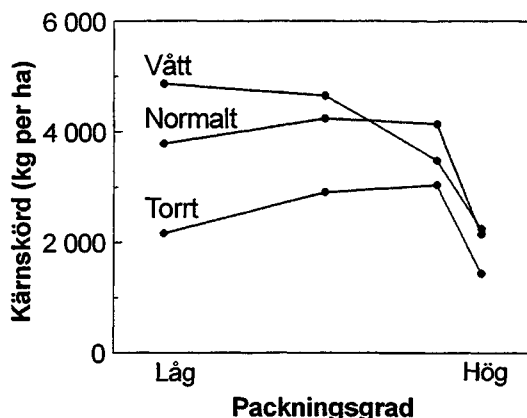
Är packningsgraden,  $D$ , enligt denna skala 100 eller högre, så är jorden starkt packad. I nyplöjd jord är  $D$  omkring 65. Efter plöjningen sätter sig jorden (Fig. 10) och  $D$  ökar. På ett höstplöjt fält på våren brukar  $D$  ligga strax under 80 (Fig. 12). Packas inte jorden av maskiner står sig detta värde nästan oförändrat sommaren

igenom (Fig. 11).

Detta sätt att karakterisera packningstillståndet har hittills nästan enbart använts i årligen luckrade marklager. Skall det användas i alven eller i obearbetade matjordslager, så krävs modifieringar av metodiken samt ytterligare forskning rörande användningssättet.



Fig. 25. Skörd av korn vid olika packningstillstånd i ett försök, där jorden genom bevattning eller avskärmning av nederbörden hölls vid olika fuktighetstillstånd under våren och försommaren. Under våta förhållanden erhöles högst skörd vid låg packningsgrad, under torra förhållanden vid betydligt högre packningsgrad. Försöket utfördes innan man började använda packningsgraden för att karakterisera jordens tillstånd och denna kan därför inte anges exakt. (Efter Edling & Fergedal, 1972.)



eller avskärmning av nederbörden ganska konstant under den aktuella perioden, medan det varierade mera i fältförsöken. I de senare kunde förhållandena under en kort kritisk period vara mycket mera utslagsgivande än de genomsnittliga förhållandena under hela perioden. Vid sådden vet man heller inte hur vädret kommer att bli, så därför bör man i praktiken eftersträva den packningsgrad, som i genomsnitt är bäst, för exempelvis korn alltså ca. 87.

En annan faktor som kan förskjuta det optimala *D*-värdet är manganets tillgänglighet för växterna. I jordar med manganbrist observerar man i praktiken ofta att bristsymptomen är mindre i packade hjulspår än mellan dessa. Manganbrist uppträder främst, där syretillgången i jorden är god, eftersom manganet då oxideras till svårslöslig form. Packning minskar syretillgången och förbättrar manganets tillgänglighet. Betydelsen av detta undersöktes i en serie försök på 1970-talet, i vilken man studerade effekten av olika packningsgrader i matjorden på avkastningen hos korn med och utan manganbesprutning. I några av försöken låg det optimala *D*-värdet lägre i manganbesprutade än i icke manganbesprutade försöksled men i försöksserien som helhet var skillnaderna små och variabla. Troligen berodde detta på att manganets tillgänglighet är mycket oberäknelig och ofta varierar starkt under vegetationsperiodens gång beroende på hur väderleken varierar.

Några packningsförsök har också gjorts med olika kvävegivor. Vid en giva av 120 kg N per ha låg packningsgradsoptimet något högre än vid en giva av 60 kg per ha, men skillnaden var så pass liten och osäker att den har ringa praktisk betydelse (Fig. 26). Antagligen kan också flera andra faktorer påverka packningsgradsoptimets läge.

Effekten av de faktorer som hittills studerats i försöken och som visat sig kunna förskjuta det optimala *D*-värdet sammanfattas i Fig. 27.

Fig. 26. Avkastning av korn vid olika packningsgrader i matjorden och olika kvävegivor. Medeltal av 11 försök i olika delar av landet åren 1978-81. För den högre kvävegivan låg avkastningskurvans topp vid en något högre packningsgrad än för den lägre givan men denna förändring var inte statistiskt signifikant.

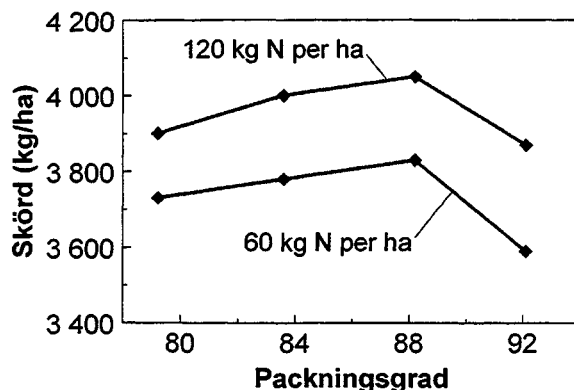
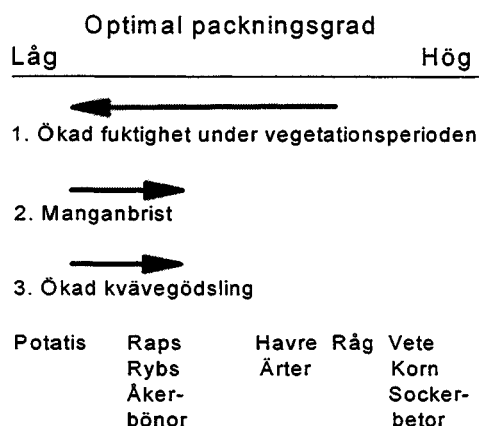


Fig. 27. Riktning och relativ storlek på förskjutningen av packningsgradsoptimet när 1) fuktigheten under vegetationsperioden ökar, 2) manganbrist uppträder och 3) kvävegödslingen ökar. Därunder visas i vilken ordningsföljd olika vår-sådda gröders packningsgradsoptima i genomsnitt ligger. För olika sorter av samma växtslag kan dock optimet ligga något olika.



### 5.2.3. Orsaker till de ettåriga effekterna

På många håll i världen har man studerat orsakerna till att grödorna växer sämre, när matjordens packningsgrad är över den optimala. De två faktorer som oftast ansetts avgörande är för högt penetrationsmotstånd och för dålig syretillgång i marken. I kapitel 4 angavs att ett penetrationsmotstånd av 3 MPa ofta är en kritisk övre gräns för rötternas tillväxtmöjligheter och att en luftfylld porvolym av 10 % brukar vara en kritisk undre gräns för syreförsörjningen. I Fig. 28 visas att båda dessa gränser är starkt beroende av markens packningsgrad och fuktighetstillstånd.

I figuren karakteriseras markens fuktighetstillstånd med hjälp av vattentensionen. Denna är ett uttryck för hur hårt vattnet är bundet till markpartiklarna. I en jord som är fuktig men dränerad till ett djup av 1 m är vattentensionen i markens ytskikt 10 kPa (= 100 hPa eller 100 cm vattenpelare). När jorden torkar

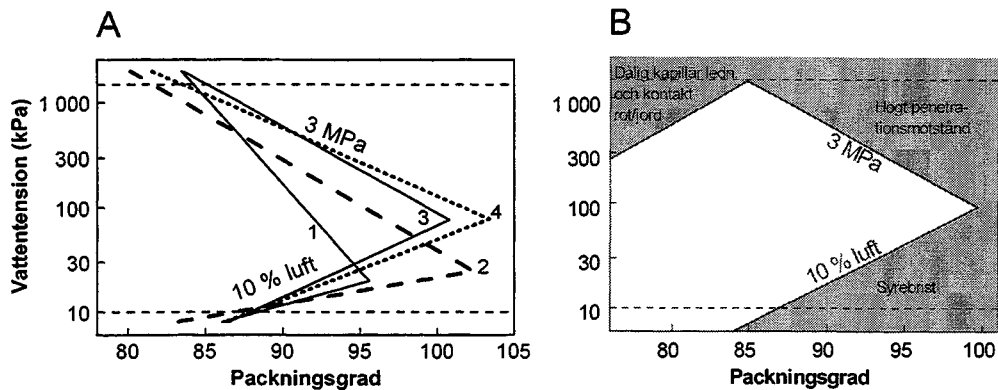


Fig. 28. A. Diagram som visar vid vilka kombinationer av packningsgrad och markfuktighet den luftfyllda porvolymen är 10 % (den nedre grenen av varje vinkelböjd linje) och penetrationsmotståndet är 3 MPa (den övre grenen av linjen) i fyra olika jordar. 1 = sand, 2 = mo, 3 = mjåla, 4 = lättlera. Markfuktigheten karakteriseras här med hjälp av vattentensionen. (Efter Håkansson & Lipiec, 2000.)

B. Schematiskt diagram som visar de kombinationer av packningsgrad och vattentension, där rötterna kan tillväxa och fungera normalt (det icke skuggade området) respektive blir allvarligt hämmade av syrebrist (nedtill t.h.), av för högt penetrationsmotstånd (upptill t.h.) eller av för dålig kapillär vattentransport eller dålig kontakt med jorden (upptill t.v.). (Efter Håkansson & Lipiec, 2000.)

ökar tensionen, och när den s.k. vissningsgränsen är nådd och växterna inte kan ta ut mera vatten är tensionen 1500 kPa.

Fig. 28A visar lägena för de kritiska gränserna i fyra jordar med olika kornstorlekssammansättning. I samtliga dessa hade gränserna nästan samma lägen. Detta är antagligen den främsta orsaken till att den för grödorna optimala packningsgraden är praktiskt taget densamma på alla typer av jordar. Hade i stället skrymdensiteten eller porositeten använts för att karakterisera packningstillståndet, så hade de kritiska gränsernas lägen varierat mycket mera mellan jordarna.

Fig 28B visar ett schematiserat diagram över de kritiska gränsernas normallägen och de främsta problemen för grödan vid olika packningsgrad och fuktighetstillstånd i marken. I situationer som representeras av den icke skuggade delen av diagrammet begränsas inte grödans tillväxt allvarligt. Under förhållanden som representeras av någon av de skuggade ytorna sätts däremot tillväxten ned, eftersom en av de kritiska gränserna passerats. I diagrammets nedre, högra del är syretillgången för dålig och i diagrammets övre, högra del är penetrationsmotståndet för högt.

Anledningarna till att grödans tillväxt är dålig när packningsgraden är för låg är sämre klarlagda än när packningsgraden är för hög, och här krävs nya undersökningar. I fältförsök har det emellertid visat sig att alltför låg packningsgrad

begränsar grödornas tillväxt framförallt vid torr väderlek. Därför finns problemen, så som figuren visar, främst i den övre, vänstra delen av diagrammet. Mycket tyder på att nedsatt omättad (kapillär) ledningsförmåga för vatten och/eller bristande kontakt mellan rötterna och den luckrade jorden är grundorsakerna. Båda dessa faktorer kan leda till försämrad upptagning av vatten och näringsämnen och då i första hand av de mest svårörliga ämnena. Troligen medverkar dock flera andra faktorer till att alltför lucker jord ger sämre skörd. Sålunda har exempelvis kvickroten i en del försök varit mera konkurrenskraftig i lucker än i packad jord.

Olika grödor kan reagera något olika på de enskilda tillväxtfaktorerna. I Fig. 27 visades att den optimala packningsgraden normalt skiljer sig något mellan olika grödor. Det är emellertid troligt att ordningsföljden mellan grödorna kan variera beroende på vilken tillväxtfaktor som i det enskilda fallet är mest kritisk. I genomsnitt för alla genomförda försök var exempelvis den optimala packningsgraden för potatis klart lägre än för korn men i några av de enskilda försöken var optimet detsamma. Likaså visade det sig i försök med ärter att optimet låg lägre än för korn på en jord med stark smitta av ärtrottröta men vid samma värde som för kornet på en jord utan sådan smitta (Grath, 1996).

I nyare fältförsök har grödornas näringsupptagning i jord med olika packningsgrader studerats. Det har visat sig att upptagningen av många näringsämnen hämmas både när jorden är för packad och för lucker. Ett exempel ges i Fig. 29, som visar innehållet av kväve (N), fosfor (P) och kalium (K) i en korngröda ca

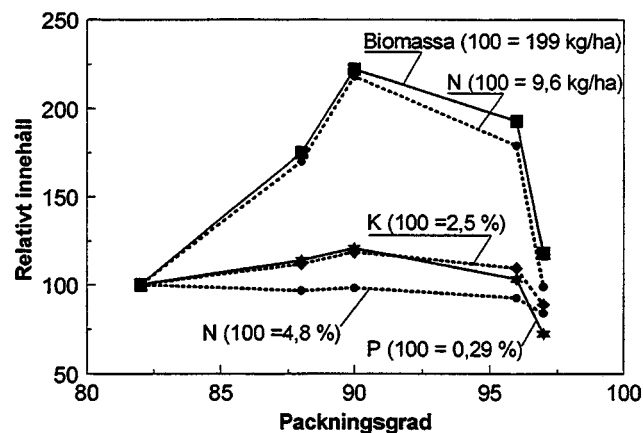


Fig. 29. Relativt innehåll av biomassa och av kväve (N) den 22 maj samt koncentration av kväve, fosfor (P) och kalium (K) i den ovanjordiska delen av en korngröda sådd den 25 april i ett försök, där matjordslagret packats med traktor till olika packningsgrader. Värdena i det opackade jämförelseledet längst t.v. = 100. Koncentrationerna av fosfor och kalium sattes ned vid både högre och lägre packningsgrad än den optimala, av kväve endast vid högre packningsgrad. (Efter Arvidsson, 1997a.)

tre veckor efter uppkomst. Koncentrationen av samtliga dessa ämnen var nersatt i det starkast packade försöksledet, medan endast P- och K-koncentrationen var nedsatt i det luckraste ledet. Resultaten kan förklaras dels av att rötternas tillväxt och funktion påverkas av packningstillståndet dels av att näringsämnenas bindning, mineralisering och transport påverkas.

### 5.3. Packningseffekter som kvarstår efter plöjning

#### 5.3.1. Skördresultat

Årlig plöjning eller annan djup jordbearbetning i samverkan med olika naturliga processer utplånar så småningom effekterna av en packning i matjorden. Efter en enda plöjning och en vinters tjäle har effekterna dock i regel inte hunnit försvinna (Fig. 17). De efterverkningar av packning i matjorden som kvarstår efter plöjning har studerats i en serie om 21 mångåriga försök på olika platser i Sverige från Skåne till Västerbotten. De första försöken startades redan i början av 1960-talet, de sista är nyligen avslutade. I försöken packades jorden varje höst under flera år genom körning med traktor och vagn. Axelbelastningen var <5 ton, varför packningen i stort sett begränsades till matjorden och packningen i alven var ringa. Vid körningen var jorden i regel våt och packningskänslig. Strax efteråt plöjdes jorden till normalt djup. Under resten av året behandlades samtliga försöksrutor lika och i enlighet med normal jordbrukspraxis.

Fig. 30 visar skörderesultatet i det försöksledet, som årligen överfors med en körintensitet av 350 tonkm per ha. Detta är två à tre gånger så mycket som den totala årliga körintensiteten på praktiskt brukade spannmålsfält, vilken brukar ligga omkring 150 tonkm per ha.

Fig. 30A visar den genomsnittliga skörden i hela försöksserien i det packade försöksledet i % av skörden i det opackade jämförelseledet. Den relativa skörden minskade successivt under de första fyra åren men därefter upphörde skördesänkningen. Detta kan tolkas så att efter fjärde året rådde ett jämviktsläge mellan den årliga packningen och de faktorer som motverkar denna, främst den årliga plöjningen, vattenhaltsväxlingarna, tjälningen och den biologiska aktiviteten. En enda plöjning och en vinters tjäle kan således i regel inte helt utplåna verkningarna av packning i matjorden. I genomsnitt var packningens effekter på grödorna ungefär proportionella mot körintensiteten i tonkm per ha. Vid en körintensitet av 120 tonkm per ha var nämligen avkastningssänkningen ungefär en tredjedel av vad den var vid 350 tonkm per ha.

När varje enskilt försök packats årligen under 7-10 år, avbröts packningen och efterverkningarna bestämdes under några år. Dessa visade sig klinga av efterhand och femte året efter sista packningen spårades inga efterverkningar (Fig. 30C). Det tar alltså 4 à 5 år för efterverkningar av årlig packning både att slå igenom helt efter det att packningen påbörjats och att försvinna helt sedan packningen avslutats. Om inte jordarna i försöken plöjts årligen, hade packningens efterverkningar sannolikt blivit långvarigare.

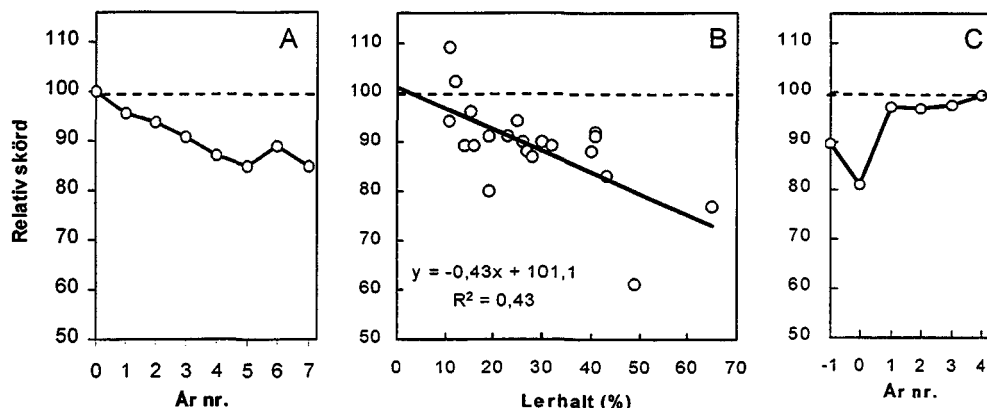


Fig. 30. Relativ skörd (opackat = 100) i en serie om 21 mångåriga försök där packning upprepades årligen strax före höstplöjningen. Körintensiteten var 350 tonkm per ha med fordon med en axelbelastning < 5 ton.

- Genomsnittlig relativ skörd i det packade försöksledet i hela försöksserien under de första sju åren efter försökens start.
- Relativ skörd i de enskilda försöken som funktion av jordens lerhalt. Genomsnitt fr.o.m. år 4 t.o.m. året efter sista packningen.
- Genomsnittlig relativ skörd i det packade försöksledet i hela försöksserien efter det att den årliga packningen avslutats. År 0 är sista året med packning. (Efter Arvidsson & Håkansson, 1994.)

Den relativt lugna förändring av försöksutslagen med tiden som visas i Fig. 30A och 30C erhöles endast som genomsnitt för hela försöksserien. I de enskilda försöken varierade utslagen starkt från år till år, även under den period då de genomsnittliga utslagen var konstanta. Årsvariationerna orsakades antagligen av ett stort antal faktorer, såsom fuktigheten i jorden vid körningarna, tjälningsförhållandena under vintern, väderleken strax före, under och efter vårbruket samt körsättet (även om man försökte köra så lika som möjligt). Variationerna kunde inte förklaras av någon enskild faktor.

Det var betydande skillnader i genomsnittlig packningseffekt mellan de enskilda försöken. En stor del av dessa skillnader kunde förklaras av en enda faktor, nämligen jordens lerhalt. Fig. 30B visar den genomsnittliga relativa skörden i varje enskildt försök från och med fjärde försöksåret till och med året efter sista packningshösten, d.v.s. under den period då effekten i försöksserien som helhet var konstant. Relativskörden har där prickats in som funktion av jordens lerhalt. Jordar med låg lerhalt visade inga eller små utslag men ju högre lerhalten var desto mer negativa blev utslagen. Resultaten kan tolkas så, att på de lättaste jordarna kan en enda plöjning och en vinters tjäle utplåna verkningarna av en packning, medan det på lerjordarna krävs flera plöjningar och flera års påverkan av tjäle och andra naturliga processer.

Tabell 5. Relativ skörd (opackat = 100) i två försök, i vilka matjorden årligen under flera år packades med traktor och vagn (axelbelastning <5 ton) på hösten strax före plöjningen. Packningen gjordes vid olika markfuktighet (normalfuktigt och vått) och med olika körintensitet (120 och 350 tonkm per ha), dels med högtrycksdäck på vagnen (ringtryck 300 kPa), dels med lågtrycksdäck (ringtryck 100 kPa). Traktorn hade normal hjulutrustning i bägge fallen. (Efter Arvidsson & Håkansson, 1994)

Körintensitet och ringtryck	Normalfuktigt	Vått
Ingen körning	- 100 -	
120 tonkm per ha, 100 kPa	96	89
350 tonkm per ha, 100 kPa	90	78
350 tonkm per ha, 300 kPa	85	-

För några av försöksplatserna ligger punkterna i Fig. 30B rätt långt från genomsnittslinjen. Detta beror på att flera av de faktorer, som påverkade utslagen, varierade mellan försöken. Bland dessa kan nämnas fuktigheten i jorden vid körningen, växtföljden och väderleken under vegetationsperioden. Även fordonens typ, vikt och hjulutrustning varierade något mellan försöksplatserna. I försöken visade sig skördesänkningen i % vara praktiskt taget oberoende av skördenivån, d.v.s. i absoluta tal ökade den i direkt proportion till skördenivån. Några skillnader i procentuellt försöksutslag mellan olika grödor erhöles inte.

I två av försöken studerades betydelsen dels av olika hjulutrustningar på vagnarna dels av markfuktigheten vid körningen. Båda dessa faktorer visade sig ha stor betydelse för försöksutslagen (Tabell 5). Körning på våt mark orsakade mer än dubbelt så stor skördesänkning som körning på normalfuktig mark. Högtrycksdäck på vagnarna orsakade 50 % större skördesänkning än lågtrycksdäck. Resultaten av den presenterade försöksserien sammanfattas i principdiagrammet i Fig. 31.

De efterverkningar på jordarnas strukturtillstånd som presenterats i detta avsnitt tycks inte påverka behovet av återpackning av jorden under såbäddsberedningen. Endast ett fåtal försök har utförts för att belysa detta men i dessa visade sig behovet av återpackning efter plöjning vara ungefär detsamma i jord som packats före plöjningen och hade en ofördelaktig struktur och i jord som inte packats och hade gynnsammare struktur.

### 5.3.2. Orsaker till packningens efterverkningar

Orsakerna till att packningen påverkar grödorna negativt även efter det att jorden luckrats genom plöjning är mycket svårare att klarlägga än de i avsnitt 5.2.3 beskrivna orsakerna till packningens ettåriga effekter. Antagligen samverkar ett stort antal tillväxtfaktorer, både fysikaliska, kemiska och biologiska, till efter-

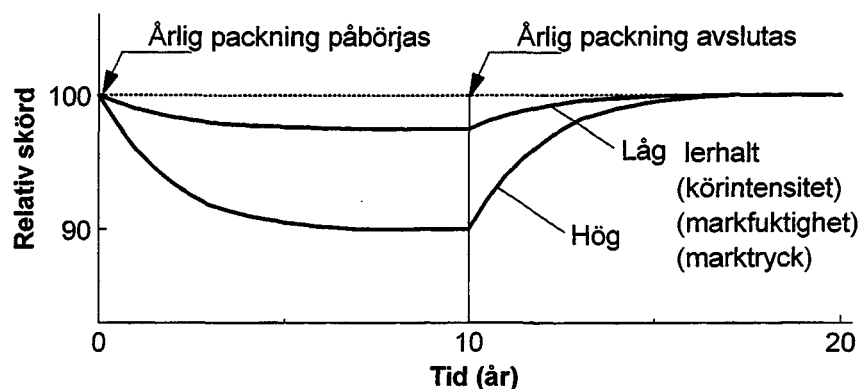


Fig. 31. Principdiagram, som visar efterverkningarna på grödornas avkastning av årligen upprepad packning av matjorden. Det förutsätts att man kör med maskiner med så pass låg axelbelastning att alven inte packas i nämnvärd omfattning och att jorden plöjs årligen. På en jord med hög lerhalt är effekterna större än på en jord med låg lerhalt. På en och samma jord är effekten också större vid hög körintensitet än vid låg, vid hög markfuktighet än vid låg och vid högt marktryck än vid lågt.

verkanseffekterna och ibland tycks den ena, ibland den andra vara den mest utslagsgivande. För att klarlägga orsakerna i ett enskilt fall hade ett mycket stort antal tillväxtfaktorer behövt mätas under hela vegetationsperioden och detta har inte gjorts. Packningsgraden så som den mäts enligt faktaruta 11 ger ingen förklaring. Efter plöjning är denna nämligen ofta densamma oberoende av om jorden packats före plöjningen eller ej. Däremot har det stor betydelse hur aggregatens storleksfördelning och stabilitet påverkas och vilka konsekvenser detta får för en lång rad markegenskaper och -processer.

I lerfattiga jordar är aggregatbildningen alltid svag och strukturvariationerna små. I lerjordar däremot är aggregatbildningen påtaglig och strukturvariationerna mycket större och betydelsefullare. Strukturen varierar mycket både i tiden och rummet och det är svårt att mäta såväl strukturtillståndet i sig självt som hur detta inverkar på olika tillväxtfaktorer. I försöken på lerjordar var strukturen alltid grövre i packade än i opackade försöksrutor. Detta gjorde bl.a. att såbäddens kvalitet genomgående blev sämre, vilket ofta försämrade grödornas uppkomst. I regel gjordes endast enkla observationer av såbäddens kvalitet men i en del fall gjordes mera noggranna mätningar (Tabell 6). Andelen aggregat <2 mm i såbädden var mindre och andelen aggregat >2 mm följaktligen större i packade försöksrutor än i opackade. Såbädden gav därför sämre avdunstningsskydd och torkade ut snabbare.

Grövre struktur kan vidare leda till en ojämnare rotfördelning i marken och sämre möjligheter för rötterna att komma åt svårörlig växtnäring. Det kan också leda till syrebrist i aggregatens inre, vilket ökar denitrifikationen och förlusten av



Tabell 6. Såbäddens kvalitet strax efter vårsådd i några mångåriga försök (samma som i Fig. 30) där matjorden packats före höstplöjningen. Medeltal av bestämningar vid 12 tillfällen i sådana försök som låg på lerjordar (Efter Arvidsson & Håkansson, 1994)

	Djup (cm)	Aggregat <2 mm (%)			Vattenhalt (vikts-%)			
		Lager 1 <sup>1</sup>	Lager 2	Lager 3	Lager 1	Lager 2	Lager 3	Lager 4
Utan packning	4,2	38,1	49,2	51,0	10,8	13,5	15,5	19,4
Med packning <sup>2</sup>	4,5	32,4	45,7	49,5	9,5	11,8	13,3	17,5
LSD <sup>3</sup>	n.s.	3,4	3,5	n.s.	0,8	1,0	1,1	1,0

<sup>1</sup>Lager 1 är såbäddens översta tredjedel, lager 2 dess mellersta tredjedel och lager 3 dess djupaste tredjedel. Lager 4 är ett tunnt lager under harvningsbotten.

<sup>2</sup>350 tonkm per ha årligen.

<sup>3</sup>LSD = minsta signifikanta skillnad; n.s. = ej signifikant.

kväve.

I flera av försöken visade sig rotogräsen, främst kvickroten, vara ett betydligt större problem i opackade försöksrutor än i packade. Detta gjorde att packningseffekten i flera fall var några procentenheter mindre än den skulle varit om inga rotogräs funnits på försöksplatserna. Om detta berodde på att själva körningen skadade kvickrotens skott och utlöpare eller på att kvickroten efteråt växte sämre i den packade jorden är inte klarlagt. Lite tillspetsat kan man säga att jordpackning är en effektiv metod att bekämpa perenna ogräs men det är väl ändå inte en metod att rekommendera.

Ett annat exempel på de komplexa och ofta oförutsedda effekter, som observerades i försöken, är värt att nämna. Fig. 30B visar att packningen på en försöksplats med en lerhalt av 11 % gav en genomsnittlig skördeökning på 9 %. Denna effekt var av allt att döma reell och inte orsakad av slumpen. Så länge försöket pågick kunde inte orsaken fastställas. Vid försökets avslutning klarlades det emellertid att platsen var starkt infekterad av havrecystnematoder och att antalet gamla cystor var större i opackade än i packade försöksrutor. Antagligen hade nematoderna missgynnats av packningen och därför skadat grödan mindre i packade än i opackade rutor. Då var det emellertid för sent att säkerställa, huruvida detta var orsaken till den positiva packningseffekten.

#### 5.4. Packningseffekter i oplöjd jord

Vid plöjningsfri odling, d.v.s. om man enbart stubbearbetar i stället för att plöja, så genomgår det stubbearbetade lagret en årlig cykel av luckring vid stubbearbetningen och packning vid övriga arbetsoperationer liksom vid plöjning (Fig. 10). Hur stora djupförändringarna blir beror emellertid av bearbetningsdjupet. Stubbearbetning till samma djup som plöjningen ger nära nog samma djupförändringar som denna, medan grundare bearbetning ger proportionsvis

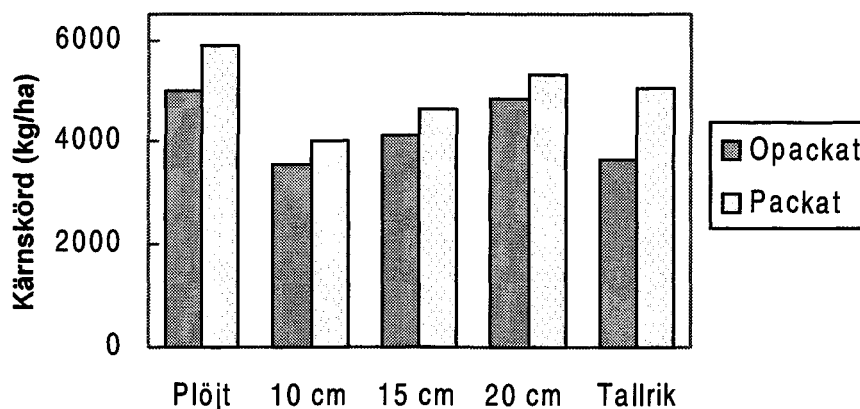


Fig. 32. Kärnskörd av korn i ett försök på en uppländsk mellanlera med rutor, som hösten innan antingen plöjts till drygt 20 cm djup eller stubbearbetats med kultivator till 10, 15 eller 20 cm djup eller med tallriksredskap till 10 cm djup. Vid vårbruket lämnades en del av varje ruta opackad, medan en annan del återpackades medelst två överfarter spår intill spår med en 4,9 tons traktor med ett ringtryck av 50 kPa. (Efter Arvidsson, 1997b.)

mindre förändringar.

Hittills har det endast gjorts ett fåtal försök rörande behovet av återpackning vid plöjningsfri odling. Man kan emellertid anta att djup stubbearbetning medför ungefär samma återpackningsbehov som plöjning. Även vid grundare stubbearbetning tycks det finnas behov av återpackning. Detta stöds av ett försök, i vilket effekten av återpackning var nästan densamma i stubbearbetade som i plöjda försöksrutor, även där stubbearbetningen gjordes till endast 10 cm djup (Fig. 32).

Om man slutar plöja och övergår till grundare bearbetning så kommer det lager som ligger mellan det nya, grundare och det gamla, större luckringsdjupet inte att förbli luckert under någon längre tid. Redan utan körning med maskiner och fordon skulle detta lager av naturliga orsaker inom ett par år sätta sig till ett packningstillstånd nära det optimala. Vanligen gör emellertid körningarna att detta lager snabbt packas, så att packningsgraden blir högre än den optimala. Packningseffekterna ackumuleras successivt och blir mera varaktiga än i bearbetade lager. I försök där man 8 år tidigare övergått från normaldjup plöjning till grundare stubbearbetning fann Comia m. fl. (1994) packningsgrader i det aktuella lagret, som låg omkring 95, och i försök som legat i 16-17 år fann Etana m. fl. (1999) packningsgrader över 100.

Den aktuella packningsgraden ger emellertid en mycket ofullständigare information om funktionen i ett lager som inte luckras årligen än i ett årligen bearbetat lager. I ett obearbetat lager är nämligen det grova porsystemets utformning inte lika starkt kopplat till jordens packningsgrad som i ett årligen bearbetat lager. Där kan det finnas skillnader i det grova porsystemets kontinuitet och stabilitet som är lika viktiga som den genomsnittliga packningsgraden.

Metoden att bestämma packningsgraden utarbetades ursprungligen för årligen luckrade jordlager och har hittills mest använts i sådana. Det finns därför mycket mindre information om optimal packningsgrad och kritiska gränser i obearbetade lager. Man kan dock förutsätta, att den optimala packningsgraden är densamma i obearbetad som i årligen luckrad jord. När man inte stör de naturliga processerna i jorden förbättras emellertid det grova porsystemets stabilitet och kontinuitet efterhand och därför blir en hög packningsgrad mindre skadlig för grödorna än i bearbetade lager.

Vid slopad bearbetning förbättras de grova porernas stabilitet och kontinuitet mera i svällnings/krympningsjordar (lerjordar) än i lättare jordar. Följaktligen kan man förvänta att när packningsgraden är över den optimala i ett obearbetat lager, så kompenseras detta i högre grad av förbättrad struktur stabilitet och -kontinuitet i lerjordar än i lättare jordar. I de försök med plöjningsfri odling på lerjordar, där Comia m.fl. (1994) och Etana m.fl. (1999) fann att packningsgraden i matjordens bottenlager var omkring 100, växte grödorna bra och gav hög skörd.

Lerjordslager som inte bearbetas kan sålunda trots hög packningsgrad fortfarande ha tillfredsställande egenskaper. I sandjord däremot ackumuleras vanligen packningsverkningarna utan att strukturen förbättras. Följaktligen är packningen ett svårare hinder mot kontinuerlig användning av reducerad bearbetning eller direktsådd på sandjord än på lerjord. I de svenska försöken har plöjningsfri odling sålunda ofta givit lika bra eller bättre skörd än plöjning på lerjordar men mycket sällan på sandjordar (faktaruta 12), trots att packningsgraden i matjordens djupare lager troligen ökats ungefär lika mycket i båda grupperna av jordar.

Det som ovan sagts om packning och strukturutveckling i olika marklager har lett till en förmodan att det är viktigare vid plöjningsfri odling än vid plöjning att maskinernas marktryck är låga. Så blev också fallet i två mångåriga fältförsök med plöjningsfri odling på mellanleror i Skåne resp. Norrbotten, där konsekvent användning av enkla standardhjul och av dubbelmontage på traktorerna jämfördes (Tabell 7). I dessa försök gav dubbelmontage inte högre skörd än enkla hjul i plöjda försöksrutor men på stubbearbetade rutor ökade skörden med ett par procent.

I avsnitt 5.3 visades att när man plöjer årligen, så kvarstår verkan av en packning i matjorden under längre tid i styva jordar än i lätta. I marklager som inte bearbetas regelbundet (d.v.s. i en större eller mindre del av matjorden vid direktsådd eller plöjningsfri odling eller i alven) tycks det enligt vad som ovan visats vara alldeles tvärtom. Därför är det svårare att överge den traditionella bearbetningen på sandjordar än på lerjordar och vill man ändå göra detta så är det ännu viktigare att alla maskiner har låga marktryck.

Under de första åren efter övergång till minskat bearbetningsdjup utvecklas det grova porsystemets kontinuitet gradvis (Voorhees & Lindstrom, 1984). Följaktligen är det troligt att relationerna mellan packningsgrad och skörd också förändras gradvis. Detta behöver emellertid studeras ytterligare, innan helt säkra slutsatser

Tabell 7. Genomsnittlig relativ skörd (årlig plöjning, enkla hjul = 100) i två mångåriga försök med totalt 28 skördeår på lättleror, där man året runt använde traktorer med enkla bakhjul resp. dubbelmontage i försöksrutor som antingen plöjdes till ca 25 cm djup eller stubbearbetades till ca. 12 cm djup (Från Arvidsson m.fl., 1992)

	Enkla hjul	Dubbelmontage
Plöjning varje år	100	99
Plöjning ca vart femte år	93	95
Aldrig plöjning	92	94

### Faktaruta 12

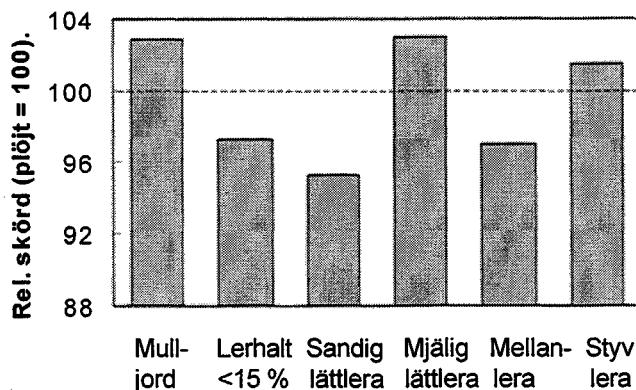
#### Reducerad bearbetning på olika jordar

Reducerad bearbetning innebär att man använder mindre intensiv bearbetning än den traditionella, vilken vanligen består av plöjning till ca 25 cm djup, ibland föregången av stubbearbetning, samt såbäddsberedning med två eller flera harvningar. Man kan t.ex. minska plöjningsdjupet tillfälligt eller permanent, ersätta plöjningen med grundare stubbearbetning, minska antalet harvningar eller slopa bearbetningen helt (direktså).

I Sverige har reducerad bearbetning vanligen inneburit s.k. plöjningsfri odling. Därvid har plöjningen ersatts med stubbearbetning till halva plöjningsdjupet eller något djupare. Detta har ofta gett bra re-

sultat på lerjord, mindre ofta på sandjord. På lerjord utvecklas då i matjordens bottenlager under det nya, mindre bearbetningsdjupet ett stabilt och sammanhängande system av grova porer, som möjliggör för en del rötter att tränga ner i alven, även om lagret blir starkt packat av tunga maskiner. På sandjord däremot ackumuleras packningen i matjordens bottenlager utan att ett stabilt system av grova porer bildas, vilket kan hämma rotutvecklingen mycket starkt. I svenska försök med plöjningsfri odling har skördeutslagen därför varit olika på olika typer av jordar. I figuren nedan visas de genomsnittliga skörderesultaten på jordar med olika textur.

Relativ skörd i svenska försök med plöjningsfri odling (traditionell plöjning = 100) på olika typer av jordar (Efter Rydberg, 1992).





*Fig. 33. På 9 svenska försöksplatser gjordes åren 1976-1978 försöksmässig körning med fullastad dumper (totalvikt 26 ton, varav 10 ton på framaxeln och 16 ton på boggien bak). Körningen resulterade i signifikanta packningsverkningar till ca 50 cm djup och 11 år senare kvarstod verkningarna i alven praktiskt taget oförändrade (Tabell 2).*

kan dras för olika jordar. Det skulle vara av stort intresse exempelvis att genomföra mångåriga försök som visar om det verkligen blir bättre förutsättningar för minskning av bearbetningsdjupet på sandjord, om man samtidigt radikalt minskar körningen med tunga maskiner och därmed jordpackningen.

### **5.5. Packning i alven**

I internationellt samarbete mellan sju länder i norra Europa och Nordamerika med relativt djup årlig tjäle har en serie fleråriga alvpackningsförsök med gemensamma försöksbehandlingar utförts. Försöksmässig körning (1 och 4 överfarer spår intill spår) gjordes med fordon med en axelbelastning av 10 ton på enkel axel eller 16 ton på boggie och ett ringtryck av 250-300 kPa (Fig. 33). Körningen gjordes på fuktig mark och vid ett enda tillfälle. I de svenska försöken orsakade körningen mätbar packning till ca 50 cm djup och packningsverkningarna i alven kvarstod praktiskt taget oförändrade elva år efter körningen (Tabell 2). Försöken i de övriga länderna gav liknande resultat.

De genomsnittliga avkastningseffekterna i hela försöksserien i försöksrutor med fyra överfarer av det tunga fordonet visas i Fig. 34. Under de första två åren

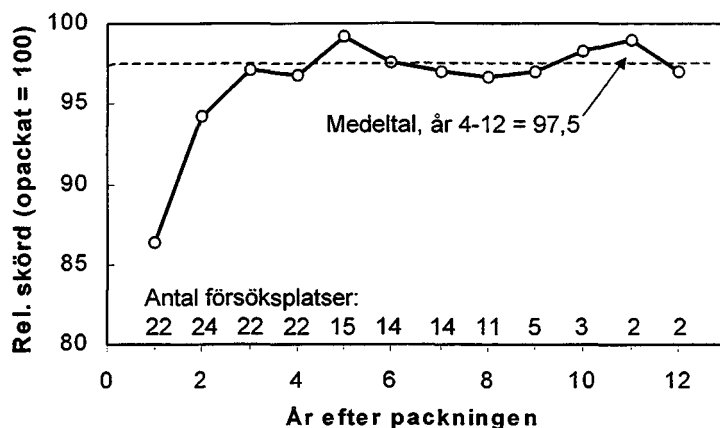


Fig. 34. Genomsnittlig relativ skörd (opackade rutor = 100) i en serie om 24 försök i 7 länder i norra Europa och Nordamerika. Körning med fordon med en axelbelastning av 10 ton gjordes som en engångsåtgärd vid försökens start, varvid hela ytan i försöksrutorna täcktes med spår fyra gånger (körintensitet ca. 1200 tonkm per ha, oreducerat värde). (Efter Håkansson & Reeder, 1994.)

sänktes grödornas avkastning kraftigt, vilket till stor del måste ha berott på packning i matjorden. Efter ca tre år bör emellertid effekterna av matjordspackningen ha försvunnit (jfr avsnitt 5.3). Därefter har skördesänkningen antagligen enbart orsakats av packningen i alven. Fr.o.m. år 4 sänktes skörden i genomsnitt med 2,5 %. Sänkningen var ungefär lika stor på lätta som på styva jordar och det fanns inga tecken på att den avtog med tiden. Två försök i Finland pågår ännu 17 år efter den försökmässiga packningen. Där fortsätter skördenedsättningen alltjämt oförminskad och dessutom har det visat sig att kväveinnehållet i den skördade spannmålen relativt sett minskas dubbelt så mycket som kärnsköörden.

Troligen berodde skördesänkningen främst på försvårad rotutveckling, och denna effekt tycktes vara praktiskt taget permanent. Alvpackningens effekter på såväl skörden (-2,5 %, Fig. 34) som på penetrationsmotståndet på 40-cm-nivån (+17 %, Tabell 2) var nämligen praktiskt taget konstanta under försöksperioden. Vidare var effekterna både på penetrationsmotståndet och på skörden ca. fyra gånger så stora efter fyra överfarter som efter en. Skördeförlusten ökade sålunda proportionellt mot penetrationsmotståndets ökning.

P.g.a. att rotutvecklingen försvåras leder alvpackning till att rötternas tillväxthastighet mot djupet minskar. Därigenom minskar i regel också det maximala djup till vilket rotsystemet under en växtsäsong hinner utvecklas. Detta i sin tur medför att det för grödan åtkomliga vattenmagasinet i marken minskar, vilket kan minska grödans vattentillgång under torrperioder och sänka skörden (faktaruta 13).

Under skandinaviska klimatförhållanden finns det troligen inga jordar som har för lucker alv. Det torde därför aldrig finnas något behov av att packa alven, så

som man behöver återpacka en nyplöjd matjord. Möjligen kan ett sådant behov föreligga i torrare klimatområden, där det skulle kunna medverka till att grödorna tar upp mindre av det knappa vattnet under vegetationsperiodens första del och lämnar en större andel kvar till vegetationsperiodens senare del.

I några av de amerikanska försöken i den internationella försöksserien körde man både med fordon med axelbelastningen 10 ton och 18-20 ton. Den högre belastningen orsakade alvpackning till större djup än den lägre belastningen och skördeförlusterna blev större (Lindstrom & Voorhees, 1994). I Skåne finns nystartade försök, i vilka man kört med betupptagare med nästan 20 tons axelbelastning (Fig. 16). Några skörderesultat från dessa som visar alvpackningens effekter föreligger emellertid ännu inte.

### 5.6. Effekter av körning med maskiner vid vallskörd

När man kör i växande gröda, exempelvis vid övergödsling, sprutning, kupning och ogräsharvning, packar man inte bara marken, utan man skadar också själva växterna. Växtskadornas omfattningen beror naturligtvis i hög grad av vilken

#### *Faktaruta 13*

##### Grödornas vattenbehov och vattenuttag ur marken

För grödornas tillväxt krävs vatten. Detta är nödvändigt för att bladens klyvöppningar inte skall slutas och växternas behov av koldioxid för fotosyntesen strypas. Vattenbehovet beror av väderleken. Från grödor som helt täcker marken och har så god vattentillgång, att bladens klyvöppningar ständigt är öppna, avdunstar nästan lika mycket vatten som från en fri vattenyta, d.v.s. avdunstningen är nästan lika med den s.k. potentiella avdunstningen. Under normalt svenskt sommarväder behöver en marktäckande gröda ta upp en vattenmängd, som motsvarar ca 3 mm nederbörd per dag för att produktionen inte skall sjunka. Under torra och blåsig perioder kan det behövas dubbelt så mycket. Totalproduktionen av växtmassa (torrsubstans) brukar bli proportionell mot den andel av det potentiella vattenbehovet som täcks av nederbörden och vattenuttaget ur marken. Från våren fram till högsommaren är grödornas vattenbehov ca 100 mm per månad, därefter mindre.

Under maj - juli är nederbörden i regel mindre än behovet och då behöver grödorna ta ut vatten ur markens förråd.

Detta tillsammans med behovet för rötterna att ta upp näring gör att marken måste möjliggöra god rotutveckling för att skörden skall bli hög. Odlingsjordar med god vattenhushållning är i regel sådana där rotdjupet blir stort (> 1 m). I en del jordar kan grödorna komma åt 200 mm vatten eller mer. I torkkänsliga jordar är rotdjupet mera begränsat, ibland bara till matjorden, och det för grödorna åtkomliga vattenmagasinet kan då vara så litet som 30 mm.

För att ettåriga grödors vattenbehov skall kunna täckas krävs att rötterna kan tillväxa snabbt och till stort djup i marken. Detta är möjligt om marken har lågt penetrationsmotstånd eller ett sammanhängande system av grova porer (faktaruta 9). Eljest blir rötternas tillväxthastighet låg och det åtkomliga vattenmagasinet litet. Packning av alven gör därför grödan mera torkkänslig.

gröda man kör i och dennas utvecklingsstadium, av fuktigheten i marken, av spårytans storlek, av marktrycket och däcksmönstret och av om man kör enbart i radmellanrum eller fasta spår. Vid körningar i en gröda är troligen körskadorna på växterna nästan alltid betydelsefullare än verkningarna av jordpackningen.

Vallen är den gröda, där man kör mest intensivt efter beståndets etablering. Särskilt vid skördetillfällena kör man ofta mycket intensivt i en vall. Försök har genomförts för att studera verkningarna av körning med traktor och vagn vid vallskörd på vallens fortsatta avkastning. De genomsnittliga effekterna i försöken visas i Tabell 8. Värdena i tabellen inkluderar även skörd 1 under första vallåret, alltså en skörd då ännu ingen körning gjorts. Flertalet av försöken genomfördes under 1970-talet och försöksåren kom att bli betydligt torrare än normalt. Därför blev effekterna i medeltal mindre än de skulle blivit om åren varit normalfuktiga eller våta. De få gånger då man körde under våta förhållanden, fick man nämligen dramatiskt ökade efterverkningar. Detta var särskilt fallet, när traktorhjulens slirade mera synbart.

Av skörderesultaten och observationerna drogs den slutsatsen att körskadorna på växterna var betydelsefullare än packningseffekten. En stor del av skördesänkningen orsakades antagligen av att körningen skadade de knoppar, från vilka nya skott skulle utvecklas. Detta gjorde att utvecklingen av nya skott försenades. Den relativa skördesänkningen blev därigenom större ju tidigare nästa skörd följde. Körning vid ett tillfälle minskade ofta skörden endast vid det närmast följande skördetillfället men inte senare trots att packningsverkningar kvarstod i marken. Vid starka skadeverkningar, och särskilt i norra Sverige, var effekterna dock mera uthålliga.

I södra Sverige, där övervintringsproblemen är relativt små, reparerades körskadorna ofta över vintern. I norra Sverige tenderade vinterns påfrestningar däremot

*Tabell 8. Genomsnittlig skördesänkning (%) i 24 försök i slättervall, där körning med relativt lätt traktor och vagn (ekipagets totalvikt ca 8 ton) gjordes strax efter varje vallskörd. Försöken genomfördes under åren 1969-1978 och var fördelade över hela landet. Normal körintensitet innebar ett kördrag per meter rutbredd med ekipaget (ca 80 tonkm per ha), dubbel körintensitet två kördrag per meter (ca 160 tonkm per ha) (Efter Håkansson m.fl., 1990)*

Vallår	Antal försök	Körintensitet vid varje vallskörd	
		Normal	Dubbel
Vall I	23	4	6
Vall II	24	4	5
Vall III	15	7	10
Vall IV	2	15	21



att öka skadeverkningarna. Särskilt i norra Sverige är det därför viktigt att köra så skonsamt som möjligt i vallarna. I synnerhet måste hjulens slirning vara så liten som möjligt.

Fordonens hjulutrustning tycktes ha stor betydelse för effekternas storlek. Tyvärr tyder dock observationer i försöken och i andra sammanhang på att den optimala hjulutrustningen (däcksdimension, ringtryck, däcksmönster m.m.) är olika under olika körförhållanden. Vad exempelvis däcksmönstret beträffar erhöles en del motsägelsefulla resultat. Det är därför svårt att ge bestämda råd om lämpligaste hjulutrustning i enskilda fall. Dessa förhållanden förtjänar vidare studier. Mycket tyder dock på att skördeeffekterna står i nära samband med de körskador på växterna man kan se med blotta ögat. Därför bör man vid varje tillfälle välja utrustning och körsätt, som ger så små synliga körskador som möjligt. En analogi kan dras med resultaten av försök med mekanisk bekämpning av kvickrot. Där visade det sig, att den mätbara bekämpningseffekten stod i nära samband med de synliga skador man åsamkade kvickrotsplantorna.



# Kapitel 6

## Ekologiska och miljömässiga effekter

### Sammanfattning

Eftersom packningen påverkar praktiskt taget alla egenskaper och processer i marken, kan den få betydande ekologiska och miljömässiga konsekvenser, oftast av negativ art. Markens minskade genomsläpplighet för vatten kan leda till ökad ytvavrinning och jorderosion. Rotdjup och rottäthet i marken minskar. Därigenom utnyttjas växtnäringen sämre och både gödslingsbehovet och risken för växt-näringsläckage ökar. Luftningen av marken försämras och denitrifikationen och frigörelsen av vissa växthusgaser ökar. Antalet dagmaskar minskar och sjukdoms-angreppen på grödornas rötter kan öka. Baljväxtbakteriernas kvävefixering kan bli starkt nedsatt. Markbiologiska, markkemiska, ekologiska och miljömässiga effekter av packningen har emellertid hittills studerats i alltför ringa omfattning för att deras betydelse mera generellt skall kunna uppskattas. Nya undersökningar är därför angelägna.

### 6.1. Alla markegenskaper och -processer påverkas

Som påpekats ovan påverkar packningen praktiskt taget alla egenskaper och processer i marken. Packningen kan därför ha betydande inverkan inte bara på grödornas avkastning utan också på hur stora de ekologiska och miljömässiga effekterna av jordbruksdriften blir. Alltför få undersökningar har emellertid hittills gjorts för att man skall kunna dra mera allmängiltiga slutsatser om effekternas omfattning. Av allt att döma är emellertid packningens miljökonsekvenser betydande och i huvudsak negativa. Packningen är dessutom en faktor som kan påverkas och därför är det viktigt att man bättre klarlägger dess olika miljöverknings. Nedan exemplifieras och diskuteras vilka miljökonsekvenser packningen kan ha.

### 6.2. Ytvattenavrinning, vattenhushållning och erosion

En av packningens mest påtagliga effekter är att den drastiskt minskar markens genomsläpplighet för vatten (Tabell 3) och därmed också regnvattnets infiltrationshastighet (Fig. 19). Vid kraftiga regn kan ytvattenavrinningen därför öka markant och den andel av nederbörden som infiltrerar i marken minskar i motsvarande mån. Därigenom minskar ofta den vattenmängd som står till grödornas förfogande. Detta är speciellt allvarligt i sådana delar av världen, där man har ett torrt klimat med få och häftiga regn. Troligen får det dock ibland avsevärd betydelse även under skandinaviska förhållanden, speciellt på sluttande mark.

Med ökad ytvattenavrinning ökar också jorderosionen. Internationellt sett är erosionen det största hotet mot världens tillgång på produktiv åkermark. Betydan-

de åkerareal totalförstörs årligen av erosion och på ännu större areal minskar produktiviteten, bl.a. genom att det i första hand är markens värdefullaste beståndsdelar (mullen, leret, växtnäringen) som eroderas bort. Det är därför angeläget att fastställa hur mycket erosionen påskyndas av jordpackningen. Detta är naturligtvis allra viktigast i de delar av världen där erosionsproblemen är som störst, men åtminstone lokalt har ju erosionen stor betydelse även i Skandinavien. Med ökad ytvattenavrinning och jorderosion ökar dessutom transporten av fosfor och en del andra ämnen till vattendragen.

I utländska undersökningar har man visat, att erosionen vid häftiga regn ofta startar tidigare och blir mer omfattande i maskinernas hjulspår än mellan dessa (Fig. 35). I vissa fall har man fått katastrofalt ökad erosion, när jorden packats. Ett sådant fall har rapporterats från ett försöksfält i Etiopien (Janne Eriksson, personligt meddelande). Fältet, som låg på sluttande mark, harvades och såddes med traktor, varvid matjordens djupare lager packades av traktorhjulen, medan en några cm djup såbädd luckrades. Efter sådden föll ett häftigt regn. På det traktorbrukade fältet orsakade detta så stark ytvattenavrinning, att hela såbädden med utsäde och allt flöt iväg nerför sluttningen. På intilliggande fält, som brukats med oxar, var infiltrationshastigheten hög och skadorna blev ringa.

Från USA rapporteras emellertid också att en lucker jord inte alltid är till fördel ur erosionssynpunkt. Ibland eroderas nämligen en lucker jord lättare av vatten än en måttligt packad. Likaså kan risken för vinderosion öka på en lätt jord om denna luckras och finfördelas starkt (Voorhees m.fl., 1979). Ytlagret får då färre stora, hårda klumpar, som motstår vindens verkningar.

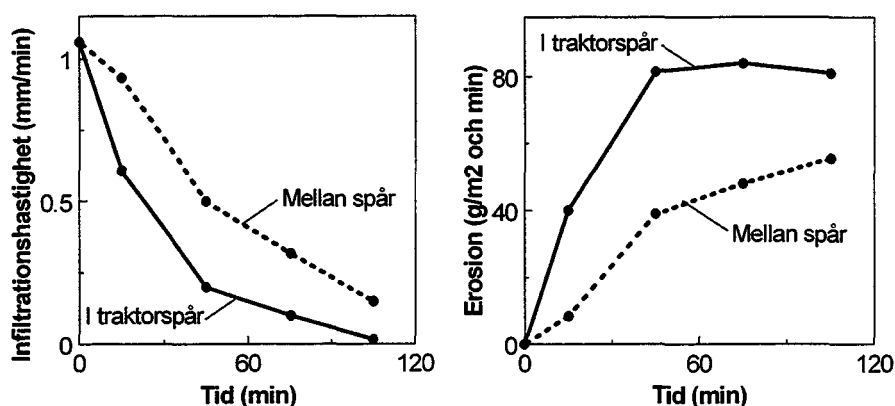


Fig. 35. Resultat från en erosionsmätning på lättlera i Minnesota. Med hjälp av en regnsimulator gav man 63 mm vatten per timme under en tid av två timmar samtidigt som man mätte vatteninfiltrationen och jorderosionen dels i traktorspårerna dels i områdena mellan dessa. (Efter Young & Voorhees, 1982.)

### 6.3. Utnyttjandet av insatsprodukterna i växtodlingen

Goda och jämna grödor med ett tillräckligt tätt och djupt rotsystem är en förutsättning för att produktionsmedlen i växtodlingen skall utnyttjas effektivt. Detta gäller solljuset och vattnet likaväl som gödselmedlen, herbiciderna och de övriga insatsprodukterna. Goda och jämna grödor får man endast om såväl markens allmänna strukturtillstånd som packningsgraden är gynnsamma. För att minimera såväl miljöeffekterna som resursförbrukningen per producerad enhet måste man därför eftersträva bästa möjliga marktillstånd.

En betydelsefull effekt av packningen är att den ökar både behovet att bearbeta jorden och energiåtgången vid enskilda bearbetningar. Detta diskuteras mera i kapitel 8.4. Därigenom ökar traktorernas bränsleförbrukning och utsläppet av avgaser till atmosfären.

### 6.4. Utlakning av växtnäring

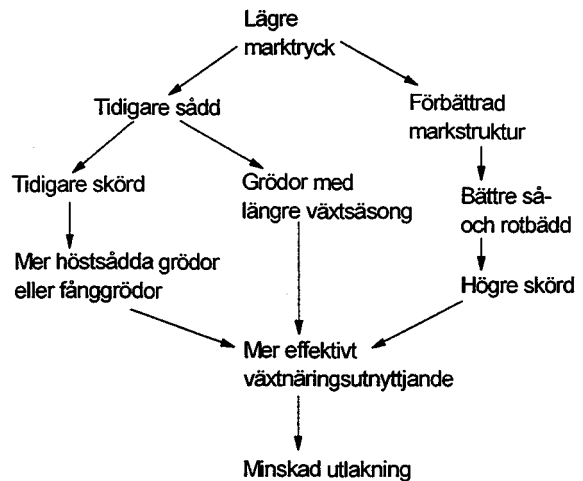
Många undersökningar har visat att stark packning försämrar rötternas tillväxt och funktion och därmed grödornas växtnäringssupptagning (t.ex. Lipiec & Stepniewski, 1993; Grath, 1996; Arvidsson, 1997a). Detta sänker inte bara skörden vid oförändrad gödsling. Det leder också till att mera växtnäring lämnas kvar i marken vid växtsäsongens slut och riskerar att lakas ut under vinterhalvåret. Sålunda uppmättes exempelvis i ett mångårigt lysimeterförsök på sandjord i östra Tyskland (Tabell 9) en sammanlagd kväveutlakning under en tioårsperiod av 311 kg ha<sup>-1</sup> från jord med optimalt packningstillstånd men 469 kg ha<sup>-1</sup> från en starkare packad jord. Som tidigare nämnts kan emellertid växtnäringssupptagningen också bli sämre i jord med alltför låg packningsgrad, särskilt under torra förhållanden (Arvidsson, 1997a).

Fig. 36 visar i princip hur övergång från högtrycksdäck till lågtrycksdäck på traktorer och maskiner vid vårbruket kan medverka till förbättrat utnyttjande av insatsprodukterna i växtodlingen. Om man fortfarande sår vid samma tid som förut, så kan packningsskadorna i marken minskas och växtnäring m.m utnyttjas bättre. Om man i stället väljer att så tidigare, så behöver man inte få större struk-

Tabell 9. Vatten- och kvävebalans i marken under en tioårsperiod i ett lysimeterförsök på sandjord i Tyskland med olika packningsbehandlingar (Efter Petelkau m. fl., 1988)

Packnings-tillstånd	Vattenbalans (mm)				Kvävebalans (kg per ha)			Totalts-skörd (ton ha <sup>-1</sup> )
	Nederbörd	Vatteninnehåll	Dränering	Avdunstning	Gödsling	Upptagning av grödorna	Utlakning	
Optimalt	5427	+155	1390	3882	1690	1452	311	88
Packat	5427	+135	1734	3558	1690	1254	469	75

Fig. 36. Olika sätt att förbättra utnyttjandet av växtnäringen och minska utlakningen vid övergång från högtrycksdäck till lågtrycksdäck på traktorer och maskiner.



turskador än vad man fick med högtrycksdäcken vid den normala såtiden. Den tidigare sådden gör det emellertid möjligt antingen att odla grödor eller sorter med längre vegetationsperiod och högre avkastningspotential eller att öka arealen höstsådda grödor. Vilken av dessa möjligheter man än väljer, så kan man ofta öka effektiviteten i växtproduktionen och minska miljöstörningarna.

### 6.5. Den biologiska aktiviteten i marken

Det är ingen tvekan om att packning påverkar så gott som alla organismer i marken och deras livsvillkor. Detta får effekter på nästan alla biologiska markprocesser. Effekterna är emellertid varierande och komplexa och än så länge mycket ofullständigt utredda. Vad markfaunan beträffar så är daggmaskarna de organismer som är mest undersökta. I flera undersökningar har det visats att dessa påverkas negativt av jordpackning. Sålunda visade exempelvis Boström (1986) att antalet daggmaskar i traktorbearbetade försöksrutor i ett mångårigt packningsförsök var betydligt lägre än i rutor över vilka redskapen vinschats (Tabell 10). Daggmaskarna kan påverkas av körning med tunga maskiner genom att skadas eller stängas inne i sina gångar vid själva körningen eller genom att de efteråt får sämre livsvillkor och rörelsemöjligheter i den packade jorden.

Vad mikroorganismerna beträffar, så kan redan de markrörelser som sker när ett hjul rullar fram påverka deras aktivitet. En del av mikroberna kan då bringas i kontakt med nya substrat. Markens organiska substans består nämligen delvis av små fragment, som skyddas av omgivande lerpartiklar och därför är svåra att komma åt för mikroberna. En del av dessa fragment friläggs genom markrörelserna. Efter en packning är det därför sannolikt att mikrobernas aktivitet tillfälligt ökar, liksom den har visats öka omedelbart efter en jordbearbetning. Några regelrätta undersökningar av detta tycks dock ännu inte ha gjorts. Något senare torde emellertid de aeroba mikrobiella processerna (de som kräver god syretill-

Tabell 10. Daggmaskarnas antal och vikt i ett försök, där alla fältarbeten under en tid av 20 år utförts antingen med traktor med enkla hjul, med traktor med dubbla hjul eller med vinschade redskap så att inga traktorhjul gick i försöksrutorna (Efter Boström, 1986)

	Enkla hjul	Dubbla hjul	Vinschning	Signifikans
Antal maskar per m <sup>2</sup>	16	33	92	**
Biomassa, g per m <sup>2</sup>	6	10	23	*

gång) vanligen minska, i varje fall om packningen allvarligt försämrat markens gasutbyte. De anaeroba mikrobiella processerna (de som sker vid dålig syretillgång), exempelvis denitrifikationen, ökar däremot efter packningen.

Eftersom packning minskar både luftgenomsläpligheten och gasdiffusionen i marken (McAfee, 1989; Horton m.fl., 1994), blir det lätt syrebrist i packad mark under fuktiga perioder. Detta gäller särskilt om temperaturen och därmed syreförbrukningen är hög. Syrebrist försämrar växtrötternas tillväxt och funktion inte bara p.g.a. fysiologiska störningar inuti rötterna, utan också p.g.a. ofördelaktiga processer i den omgivande marken. Vid stark syrebrist bildas ämnen som är giftiga för många växter och djur, bl.a. svavelväte. Den kan också göra rötterna mindre motståndskraftiga mot rotsjukdomar.

Packning kan ha stor betydelse för hur mycket växthusgaser som binds till jorden eller frigörs från denna. De växthusgaser, som är viktigast i detta sammanhang är koldioxid (CO<sub>2</sub>), lustgas (N<sub>2</sub>O) och metan (CH<sub>4</sub>). Jorden betraktas som en betydelsefull källa för atmosfärens innehåll av N<sub>2</sub>O och en sänka för CH<sub>4</sub>. (Mosier m.fl., 1991). I norska undersökningar av Hansen & Bakken (1993) och Hansen m. fl. (1993) visade det sig att packning genom körning med maskiner periodvis minskade jordens upptagning av CH<sub>4</sub> med 50%. Samtidigt ökades frigörelsen av N<sub>2</sub>O till atmosfären avsevärt. Frigörelsen av N<sub>2</sub>O i packad och våt jord beror främst på denitrifikation, för vilken dålig syretillgång är en förutsättning. Denitrifikation innebär att nitratkvävet i marken omvandlas antingen till N<sub>2</sub>O eller till kvävgas. Denna process kan vara mycket snabb och betydelsefull. I de norska undersökningarna förlorades i en packad gräsvall på en sandjord under en våt växtsäsong så mycket som 50 kg N ha<sup>-1</sup> (40 % av på våren tillfört gödselkväve) genom denitrifikation. Hittills har det dock gjorts alltför få undersökningar för att man skall kunna uttala sig mera generellt om packningens betydelse för denitrifikationen eller för produktionen av någon av växthusgaserna.

Också frigörelsen av koldioxid (CO<sub>2</sub>) påverkas av packningen genom att det organiska materialets nedbrytningshastighet förändras. Som tidigare nämnts kan själva markrörelserna när hjul rullar fram utlösa en tillfällig topp i nedbrytningen av organisk substans och därmed i frigörelsen av CO<sub>2</sub>. Ätminstone om jorden är fuktig kan emellertid syreinhållat i en större eller mindre del av jorden ganska snart efter en packning bli så lågt att nedbrytningshastigheten minskar. De kort-

Tabell 11. Antalet bakterieknölar på huvud- och sidorötter av ärter i lagret 0-15 cm i ett packningsförsök på sandjord i Halland (Från Grath, 1996)

	Packningsgrad i matjorden					Sign. <sup>1</sup>
	79	83	87	91	96	
Antal rotnölar på huvudrötterna	7,6	6,5	5,1	4,2	2,9	***
Antal rotnölar på sidorötterna	28	22	27	26	22	n.s.

<sup>1</sup> \*\*\* = mycket starkt signifikant ( $p < 0.001$ ), n.s. = ej signifikant.

siktiga och de långsiktiga förändringarna av nedbrytningshastigheten kan därför vara motriktade. Det är inte klarlagt huruvida packning av marken på lång sikt påverkar frigörelsen av CO<sub>2</sub> och markens mullinnehåll. Troligen kan den verka i olika riktningar under olika förhållanden, bl.a. beroende på hur starkt man packar och hur snart efteråt man luckrar marken.

Ändras den organiska substansens nedbrytningshastighet, så påverkas också växtnäringssämnenas mineralisering. Packning har sålunda rapporterats påverka nitrifikationen i jorden men även på denna punkt är kunskaperna än så länge dåliga. I flera undersökningar har det däremot visats att packning minskar bildningen av *Rhizobium*-knölar på baljväxternas rötter och därmed kvävefixeringen. I Tabell 11 ges ett exempel på detta från ett svenskt packningsförsök med ärter på sandjord.



## Kapitel 7

# Metoder att minska packningen eller dess negativa verkningar

### Sammanfattning

Det finns många metoder att minska packningen av marken eller att mildra packningens verkningar. Vilka metoder som är mest betydelsefulla och ekonomiskt mest motiverade varierar i hög grad från gård till gård.

Körskadorna på marken hålls nere, om man så långt möjligt undviker att köra, när marken är våt, om fälten är väl dränerade och om man väljer grödor, i vilka körningen koncentreras till de torraste perioderna under året. God anpassning av redskapsstorleken till traktorstorleken, fyrhjulsdrivna traktorer i stället för tvåhjulsdrivna samt stora däck eller dubbelmontage och låga ringtryck har också stor betydelse. Körsträckorna minimeras om man kombinerar olika arbetsmoment så snart detta låter sig göra. Skörde-, spridnings- och transportarbeten bör planeras så att körsträckorna blir så korta som möjligt. Permanenta fältvägar för tyngre transporter och fastliggande spårssystem för återkommande körningar reducerar körintensiteten på resten av fältytan. Olika fordon på fält och på väg gör att man kan välja fordon som är bättre anpassade till förhållandena. Plöjning luckrar matjorden och eliminerar en betydande del av packningsverkningarna i detta lager. Alvluckring är en mera tvivelaktig åtgärd.

På lång sikt bör man söka utveckla nya system för jordbrukets fältarbeten, vilka är mer skonsamma mot jorden än dagens. Ett historiskt system av detta slag var de s.k. ångplogarna omkring förra sekelskiftet, då redskapen vinschades över fälten. I eventuella nya system måste skonsamhet mot marken kunna kombineras med flexibilitet och hög kapacitet.

### 7.1. Åtgärderna måste anpassas till gårdens förhållanden

Många författare har diskuterat vilka möjligheter man har att minska packningen eller dess negativa verkningar (bl.a. Eriksson m.fl., 1974; Soane, 1985; Håkansson m.fl., 1988; Bondarev m.fl., 1990; Medvedev m.fl., 1993 och Tijink m.fl., 1993). Vilka åtgärder som har störst betydelse och vilka som är ekonomiskt motiverade varierar dock starkt från gård till gård.

En del av de åtgärder som kan vidtas är enkla och kräver främst uppmärksamhet och förutseende men knappast några investeringar. Detta gäller sådant som att anpassa ringtrycket efter de aktuella körförhållandena, att välja arbete med hänsyn till aktuell markfuktighet och att planera körsystemen för transporter, skördearbeten o.d. så att körsträckorna på fälten blir så korta som möjligt. Sådana åtgärder kan på många gårdar eliminera en avsevärd del av packningsskadorna, kanske upp till en tredjedel.

En annan del av packningsskadorna kan elimineras på ett ekonomiskt fördelaktigt sätt genom investeringar i däck och maskiner som är skonsamma mot marken. Nedan (kapitel 8.1) presenteras en beräkningsmodell, som främst är avsedd att göra det möjligt att beräkna packningskostnaderna, så att dessa kan beaktas när man gör ekonomiska kalkyler inför val av maskinsystem eller enskilda maskiner.

Nedan diskuteras ett antal metoder, som kan medverka till att minska packningsskadorna. På en enskild gård vid ett enskilt tillfälle kan fler eller färre av dessa åtgärder vara aktuella. En del av dessa åtgärder diskuteras på andra ställen i boken och nämns bara kortfattat här, medan andra endast diskuteras här och därför behandlas mera utförligt. Olika åtgärders ekonomiska konsekvenser exemplifieras i nästa kapitel.

Mest betydelsefull av alla åtgärder för minskning av packningen är att man så långt möjligt undviker att köra, när marken är våt. Detta är dock lättare sagt än gjort och kräver såväl förutseende och flexibilitet som en lämplig maskinutrustning. Odlingsssystemets allmänna uppläggning har också stor betydelse för möjligheterna att undvika packningsskador och för vilka åtgärder som är motiverade.

## **7.2. Allmänna odlingsåtgärder**

### *7.2.1. God dränering*

Täckdikning främjar en snabb och jämn upptorkning, varigenom jorden packas mindre och maskinernas framkomlighet förbättras. Den gör det möjligt att starta fältarbetena tidigare på våren eller efter kraftiga regn och förbättrar därför möjligheterna att odla grödor med lång växtsäsong. Den kan också förbättra övervintringen av höstsådda grödor och vallar. Täckdikning är dock en dyrbar åtgärd, som måste bedömas även ur många andra synpunkter och det skulle föra för långt att närmare diskutera dessa här.

### *7.2.2. Val av grödor*

Strukturutvecklingen i marken främjas av grödor, som utvecklas jämnt och snabbt och som har stort rotdjup och lämnar mycket skörderester. Dessutom är det gynnsamt om grödan täcker marken under så stor del av året som möjligt. Den förbrukar då mycket vatten och håller marken väl upptorkad och relativt okänslig för packning. Av de vanliga jordbruksgrödorna är det vallen som bäst svarar mot detta önskemål. Å andra sidan är körningen vid vallskörd numera ofta intensiv och skadar dessutom själva vallväxterna. Detta gäller i synnerhet om man tar tre eller flera skördar per år och har sådana kvalitetskrav att vallen måste skördas vid rätt utvecklingsstadium, även om marken är våt.

I de ettåriga grödorna beror packningens omfattning både av den totala körningsmängden och av körtidpunkterna under året. Vid höstsädd är marken oftare torr än vid vårsädd och därför ger höstsädd i regel mindre packningsskador än vårsädd.

Vid plöjning på lerjord ser man sålunda nästan alltid att markstrukturen är bättre efter höstsäd än efter vårsäd. I rotfrukter och potatis är körintensiteten högre än i stråsäd, särskilt vid skörden då markens dessutom ofta är våt. Vanligen är också axelbelastningarna höga. I dessa grödor blir packningsskadorna därför ofta betydande.

#### *7.2.3. Kalkning, gödsling och inbrukning av skörderester*

Kalkning, särskilt med bränd eller släckt kalk, främjar markstrukturen, vilket minskar en del av packningens negativa verkningar. Detsamma gäller alla åtgärder som ökar markens mullinnehåll, såsom tillförsel av stallgödsel och inbrukning av skörderester. Vad stallgödseln beträffar kan emellertid spridningen medföra stora packningsskador och spridningstekniken måste därför ägnas stor uppmärksamhet.

Markstrukturen gynnas också av rationell gödsling med handelsgödsel, genom att detta befrämjar grödornas utveckling och ökar rotdjupet och vattenförbrukningen. Eftersom goda grödor producerar en stor mängd skörderester har mineralgödsel på lång sikt visat sig öka markens mullinnehåll.

#### *7.2.4. Pionjärväxter*

En del växter anses ha rötter med särskild förmåga att penetrera en packad alv och att bana väg för rötterna hos efterföljande, mera känsliga grödor. Hur pass effektiva olika tänkbara "pionjärväxter" är och i vilken omfattning sådana kan utnyttjas praktiskt är emellertid ännu ganska outforskat. De kan dock inte genomluckra en packad alv utan endast skapa rotkanaler genom de packade skikten. Redan detta kan emellertid underlätta för efterföljande grödors rötter att tränga ner till djupare och kanske mindre starkt packade lager och därigenom kanske vara till betydande gagn.

### **7.3. Maskinutrustningen**

#### *7.3.1. Maskinkapaciteten*

God maskinkapacitet gör att man kan köra, när förhållandena är som mest gynnsamma, och undvika att köra när marken är våt. Om större maskiner utnyttjas på detta sätt, behöver de inte ge upphov till ökad packning. Ökad maskinkapacitet är dock mycket kapitalkrävande.

#### *7.3.2. Effektivt utnyttjande av traktorernas kapacitet*

Onödig körning kan undvikas, om man anpassar redskapen väl till traktorstorleken. När man byter till ny traktor, bör man därför ofta byta redskap samtidigt. Vidare är det ofta en fördel att kombinera olika arbeten, närhelst det går. Exempel på kombinerade arbetsoperationer, som ofta (men inte alltid) minskar den totala körintensiteten, är kombisådd och tiltpackare på plogen.

### 7.3.3. Fyrhjulsdrift och tyngdöverföring

Fyrhjulsdrift gör det möjligt att utnyttja traktorns hela tyngd för produktion av dragkraft. Vid jordbearbetning kan en fyrhjulsdreven traktor kanske producera 25 % större dragkraft än en lika tung bakhjulsdreven traktor. Redskapens arbetsbredd kan då ökas så att antalet tonkm per ha blir ca 25 % mindre. Tyngdöverföring från delburna redskap kan göra att en och samma traktor kan dra något bredare redskap, vilket också minskar körmängden.

### 7.3.4. Breda däck eller dubbelmontage och låga ringtryck

Breda däck eller dubbelmontage ger stor anliggningsyta och lågt marktryck och ger avsevärt lägre packningsgrad i spåren än standarddäck. Sådan hjulutrustning kommer dock till sin fulla rätt endast om man samtidigt sänker ringtrycket. Med de bredare däcken eller dubbelmontaget blir dock en större andel av fältytan packad. I regel blir den genomsnittliga packningsgraden på fälten därför ungefär densamma som med enkla standarddäck. Efter ett vårbruk har dock fälten en mycket jämnare packningsgradsfördelning, vilket är en stor fördel. Den återpackade andelen av fältytan är större, utan att packningsgraden någonstans blivit avsevärt högre än den för grödorna optimala.

Under alla fältarbeten bör man hålla så låga ringtryck som omständigheterna medger. Man bör därför variera trycket efter belastning och körförhållanden. Under senare år har det kommit fram däck, som gör det möjligt att använda betydligt lägre ringtryck än tidigare. Därigenom kan marktrycken sänkas betydligt och packningen av matjorden minskas. Lågtrycksdäcken möjliggör också tidigare sådd (faktaruta 14). Utrustning som tillåter smidiga och snabba ändringar av ringtrycket är till stor hjälp, särskilt vid sådana transportarbeten, där man växlar mellan körning på fält och på väg. Det finns utrustningar, som möjliggör snabb ändring av ringtrycket under gång, men tyvärr är de än så länge ganska dyra.

### 7.3.5. Begränsad axelbelastning

Hög axelbelastning kan förorsaka packning till stort djup i alven, där effekterna blir mycket långvariga, kanske permanenta, och mycket svåra att utplåna. För att undvika permanenta packningsskador får maskinerna inte åstadkomma trycktillskott, som överskrider bärförmågan (hållfastheten) i marklager på större djup än 35 à 40 cm. Detta kan uppnås genom en begränsning av axelbelastningen och/eller marktrycket. Skall syftet nås enbart genom att begränsa marktrycket, måste gränsen emellertid sättas mycket lågt. När marktrycket reduceras, så reduceras nämligen trycktillskottet i alven mycket mindre än i matjorden (Fig. 6). En undersökning av Danfors (1994) visade exempelvis att när ringtrycket på fordon med 8-10 tons axelbelastning sänktes från 150 till 50 kPa, så minskade packningen på djupet 40-50 cm endast obetydligt, medan den på djupet 30-40 cm minskade påtagligt. Om man inte minskar marktrycket till ett mycket lågt värde (under alvens

aktuella förkonsolideringstryck), så måste man därför begränsa axelbelastningen.

Redan för många år sedan rekommenderades i Sverige en axelbelastningsgräns på 6 ton för att permanenta packningsskador i alven skulle undvikas (Håkansson & Danfors, 1981). Senare undersökningar visar att denna gräns knappast är för lågt satt, utan att den snarare bör sättas ännu lägre om man kör med högtrycksdäck på fuktig mark. Använder man mycket breda lågtrycksdäck eller dubbelmontage, kan den dock höjas med något ton. Fordon med axelbelastningar över den rekommendabla bör endast köras i ett glest nät av körstråk, som fastläggs permanent.

Vid körning på torr mark har man hittills allmänt ansett att man kan använda högre belastningar än de nämnda utan att skada marken. Vid mätningar helt nyligen på en uppländsk lerjord visade sig dock packningen på stort djup i alven bli störst, när marken var som torrast och hade djupa torksprickor. Det krävs nu mätningar på flera platser för att se om detta gäller även på andra lerjordar. Att lerfattiga sandjordar blir mera packningskänsliga när de torkas ut starkt är dock känt sedan gammalt. Frågan om vilka belastningar som utan risk kan användas på olika jordar under torra förhållanden är därför fortfarande osäker.

### *7.3.6. Plöjningstraktorns hjul upp ur fåran!*

En av de viktigaste orsakerna till packning i alven har hittills varit traktoreernas färhjul vid plöjning. En kniv på sista plogkroppen, som skär bort en del jord från färkanten och lägger ner den i fåran, så att traktorhjulen går på denna jord och på färkanterna, är ett steg i rätt riktning. Allra helst bör plöjningsutrustningen dock utvecklas på ett sådant sätt, att traktorns hjul helt och hållet kan flyttas upp ur fåran. Detta är desto angelägnare, ju tyngre traktorena blir.

### *7.3.7. Olika fordon på fält och väg*

Det ställs olika krav på fältfordon och vägfordon. Därför skall man så långt möjligt använda olika fordon på fält och på väg. Fältfordonen bör vara lätta och ha mjuka däck med låga marktryck. Genom att körhastigheten är låg kan ringtrycket vara lägre än vid körning på väg. Vägfordonen däremot måste kunna köras med hög hastighet och deras stabilitet och trafiksäkerhet kräver vanligen att ringtrycket är högt. I ekonomiska kalkyler inför ett maskininköp bör man ta hänsyn till packningskostnaderna och inte bara till de rena maskin- och arbetskostnaderna. Detta gäller särskilt för maskiner med lång årlig användningstid såsom maskiner på maskinstationer eller i maskinringar. Eventuellt ökade maskinkostnader måste emellertid då få slå igenom i taxorna. Med den beräkningsmodell som presenteras i kapitel 8.1 är det i regel möjligt att göra en någorlunda säker kalkyl över de packningskostnader som en maskin kommer att ge upphov till under sin framtida användning.

## Faktaruta 14

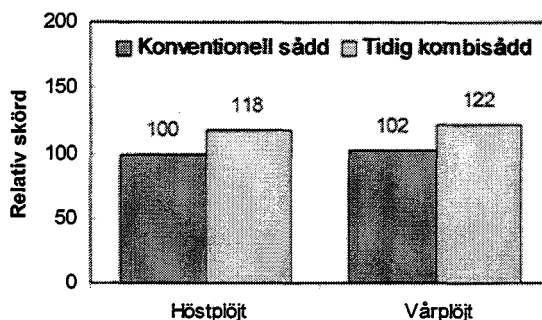
### Tidig vårsådd på sand- och lerjord

Extrema lågrtrycksdäck kan minska jordpackningen radikalt och öka möjligheterna att köra under fuktiga förhållanden. Under senare år har man utvecklat system för mycket tidig vårsådd, där sådden görs en till tre veckor före traditionell såttid. Detta kräver vanligen att man sår utan föregående vårharvning. Är jorden tillräckligt fuktig, så behövs inte det avdunstningsskydd som en traditionell såbädd ger. Den tidiga sådden gör det möjligt att bättre utnyttja vegetationsperioden och har visat sig vara av intresse främst på styvare leror och sandjordar.

På sandjordarna kan man med fördel uppskjuta plöjningen till våren. Detta kan för-

dröja mineraliseringen av den organiska substansen och minska kväveutlakningen under vintern. Vårplöjning kan ofta göras ett par veckor före traditionell vårbrukstid. Med tillpackare på plojen, kan man så med kombisåmaskin omedelbart efteråt utan att harva. För att matjorden skall bli jämnt återpackad, måste hela såmaskinens arbetsbredd täckas av hjulspår dels från traktorn (breda däck eller dubbelmontage) dels från någon tryckenhet som går mellan traktorspårerna (Fig. 3). Man brukar då tala om "fullbreddspackning". I försök på sand- och grovmojordar i Halland har detta system givit över 20 % högre skörd än traditionell brukning.

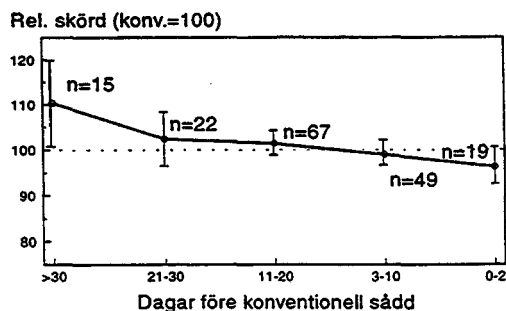
*Genomsnittlig spannmålsskörd i 14 försök på sandjordar i Halland, där vårplöjning med tillpackare på plojen och med kombisådd som enda efterföljande arbetsoperation jämfördes med traditionellt vårbruk. Vid kombisådden användes s.k. fullbreddspackning. (Efter Arvidsson, 1997c).*



Vid tidig sådd på styva lerjordar kan man i regel inte vårplöja. Om man överhuvudtaget skall plöja, så måste man göra det på hösten och utjämna markytan genom höstharvning. Har man gjort detta, så kan man kombiså utsäde och gödsel i en arbetsoperation på våren, så snart själva markytan torkat upp. Då måste emellertid traktorn ha däck med

mycket låga marktryck. I försök på styva leror har detta ibland givit betydande avkastningsökning, särskilt när den traditionella sådden försenats. På lättleror med instabil struktur kan man dock för närvarande inte rekommendera denna såddteknik.

*Resultat av försök på lerjordar i Mellansverige med tidig sådd utan föregående vårharvning på höstplöjda och höstharvade fält. n = antal försök där den tidiga sådden gjorts inom det angivna tidsintervallet. Efter Arvidsson, 1997c.)*



### 7.3.8. Bandfordon

I vissa fall ger bandfordon i stället för hjulfordon antagligen betydande minskning av packningen. Minskningen är dock inte så stor som man skulle tro, om man ser till det genomsnittliga marktrycket under banden. Som diskuterats i kapitel 2.3 är nämligen maximitrycket under ett band oftast mycket högre än genomsnittstrycket. Alltför få jämförelser har emellertid gjorts mellan hjul och band för att säkra slutsatser skall kunna dras.

## 7.4. Jordbearbetning

### 7.4.1. Plöjning

Plöjning luckrar jorden och bidrar till att utplåna packningens verkningar. Stubbearbetning åstadkommer likartad luckring, fastän oftast till mindre djup. Nyluckrad jord har en packningsgrad betydligt under den för grödorna optimala och behöver därför återpackas (kapitel 5.2). Efter plöjningen är packningsgraden ungefär densamma oberoende av hur packad jorden var i förväg. I lerjord kvarstår dock efterverkningar av en föregående packning i form av grövre struktur och hårdare aggregat (kapitel 5.3). I årligen plöjd jord kan efterverkningarna spåras upp till fem år. I jord som inte plöjs blir packningens efterverkningar långvarigare.

### 7.4.2. Reducerad bearbetning

Vid reducerad bearbetning minskar ofta den totala körintensiteten med tunga maskiner, varigenom de långsiktiga packningsverkningarna kan minska något. Åtminstone på vissa jordar, främst sandjordarna, behöver emellertid matjordslagret luckras regelbundet för att packningsverkningarna inte skall ackumuleras. Jordpackningen tycks vara det största hindret mot reducerad bearbetning på de svenska sandjordarna (faktaruta 12). På lerjordarna förbättras däremot efterhand det grova porsystemets kontinuitet, vilket i stor utsträckning kompenserar för den ökande packningsgraden (kapitel 5.4 och faktaruta 12). Vid traditionell bearbetning är jordpackningsproblemen större ju högre jordens lerhalt är, p.g.a. att efterverkningar kvarstår i dessa jordar efter plöjning. Vid reducerad jordbearbetning tycks det vara alldeles tvärtom, eftersom de naturliga luckrande processerna har mycket mindre verkningar på lätta jordar än på leror.

### 7.4.3. Djupbearbetning

Om alvpackningen har nått en viss omfattning kan dess verkningar mildras genom djupbearbetning (alvluckring eller djupplöjning), om denna utförs när marken är väl upptorkad. I regel kan djupbearbetning dock inte helt utplåna alvpackning orsakad av tunga maskiner (faktaruta 7). Djupbearbetning är också kostnadskrävande och effekterna oftast kortvariga och ibland t.o.m. direkt skadliga. Därför är det bättre att söka förhindra att alvpackning uppstår än att försöka bota den i efterhand.

## 7.5. Körtidpunkt, körsätt och planering av körningarna

### 7.5.1. Tidpunkten för körning

Tidpunkten för en körning betyder mycket för körskadornas omfattning, främst därför att jordens vattenhalt varierar starkt med tiden. Ju torrare körförhållanden man kan välja, desto mindre blir skadorna. För sådana arbeten som sådd och skörd kan man naturligtvis ändå inte välja tidpunkt enbart med hänsyn till packningen. I stället måste man se till att man har sådan dränering och sådan maskinutrustning att jorden trots detta inte blir för starkt packad. Vidare måste man planera arbetena så att man kan köra med maximal kapacitet under de mest tjäniliga dagarna.

### 7.5.2. God planläggning av körsystemet

Vid sådana arbeten som vallskörd och stallgödselspridning är en god planläggning av körsystemet synnerligen viktig. Observationer vid flytgödselspridning på praktiskt brukade fält visar att den totala körsträckan inom fälten ibland blir upp till fem gånger så lång som själva spridningssträckan. Genom noggrann planering kan man ofta minska körsträckan avsevärt och därigenom minska inte bara jordpackningen utan också körtiden vid spridningen. Om man ägnar någon timme vid skrivbordet åt att med hjälp av en karta planera körsystemet på ett fält, så kan man ofta minska tidsåtgången vid körningen på fältet med flera timmar och därigenom minska både kostnaderna och jordpackningen.

Vid exempelvis gödselspridning är det en stor fördel att så långt möjligt få spridningssträckan per lass och vid ensilageskörd uppsamlingssträckan per lass att överensstämja med fältlängden. Mycket långa fält kan behöva delas av. Många och välbelägna in- och utfarter håller extrakörningarna på fälten nere och har stort ekonomiskt värde. Under flertalet transport- och spridningsarbeten bör tomkörningarna koncentreras till samma spår, såvida den totala körsträckan då inte ökar alltför mycket.

### 7.5.3. Fastliggande körstråk eller fältvägar för transporter

På lång sikt är det en klar fördel att koncentrera tyngre transporter o.d. till ett glest nät av fastliggande körstråk och inte köra odisciplinerat var som helst på fälten. I körstråken kan man eventuellt förbättra maskinernas framkomlighet och minska markens packningsbenägenhet genom extra dräneringsledningar eller genom att stabilisera matjordens struktur med kalk. För att minska packningskadorna i alven, måste sådana körstråk emellertid ligga fast under decennier och inte flyttas då och då.

### 7.5.4. Fastliggande spårsystem (controlled traffic)

På en del håll i världen har man sökt introducera maskinsystem med fasta spårsystem för samtliga fältarbeten. Vanligen försöker man vidmakthålla samma



spårssystem under perioder om flera år. Spåren kan ligga på inbördes avstånd från några meter upp till ett tiotal meter. Ibland har man använt vanliga maskiner med för ändamålet anpassade arbetsbredder, ibland har man konstruerat specialmaskiner (Fig. 37). Med ett fast spårssystem koncentreras packningen till en mindre del av fältytan. Detta minskar luckringsbehovet på resten av fältytan, vilket är av särskilt värde, där man av något skäl vill bedriva bearbetningsfri odling. I Amerika har detta system gått under namnet "controlled traffic".

En enklare och kortvarigare variant är spårmarkering vid sådden och körning i dessa spår vid efterföljande sprutningar och gödslingar. I Sverige är dock huvudskälet för detta inte att man vill minska packningen utan att man vill öka precisionen i gödselspridningen och sprutningen och minska nerkörningen av grödan.

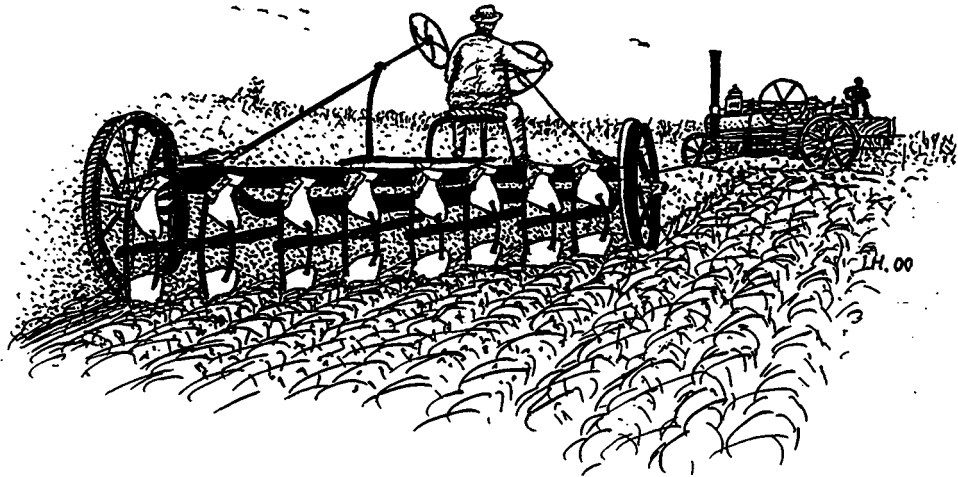
## 7.6. Framtida möjligheter

En del av de nuvarande jordpacknings-skadorna kan inte elimineras, om man inte utvecklar helt nya maskinsystem för fältarbetena. Det är viktigt att tillverkare av jordbruksmaskiner och av däck- och bandutrustning till dessa hjälper till att lösa packningsproblemen genom att utveckla skonsammare utrustning. För att alvpackningen inte skall öka på ett oacceptabelt sätt krävs att man bryter nuvarande trend mot allt tyngre maskiner, som körs okontrollerat över fältens hela yta. På lång sikt måste man därför förändra maskinsystemen radikalt. Givetvis måste man även av nya maskinsystem kräva hög arbetskapacitet, eftersom detta är en förutsättning för att fältarbetena skall kunna utföras kostnadseffektivt och vid lägliga tidpunkter. Även om det är viktigt att den skadliga packningen minskas, så är det nämligen ofta ännu viktigare att arbetena kan utföras så nära den optimala tidpunkten som möjligt.

Ett system för fältarbetenas mekanisering, som innebär att nästan hela fältytan går fri från packning, är att vinscha redskapen. Detta tillämpades omkring förra sekelskiftet, när man använde de s.k. ångplogarna (Fig. 37). Möjligen kan ett sådant system i en framtid åter bli konkurrenskraftigt, men det måste naturligtvis då moderniseras och automatiseras. Den minskade packning, som ett sådant maskinsystem förorsakar, skulle också medföra minskat bearbetningsbehov, betydligt lägre energiförbrukning vid fältarbetena, bättre såbäddskvalitet, minskat väderleksberoende vid sådd och skörd, högre skörd, ökad infiltrationskapacitet samt minskad ytvattenavrinning, erosion och växtnäringsslutning.

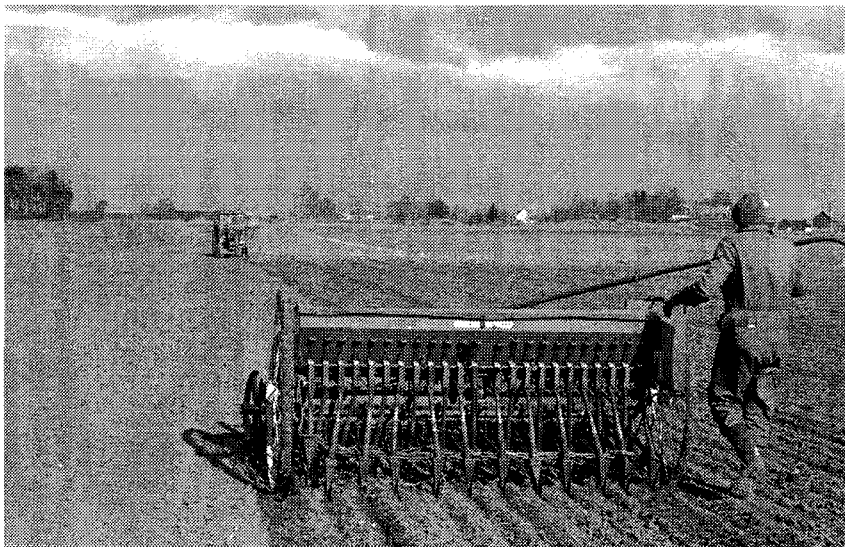
Ett sådant maskinsystem är kanske en utopi. Två mångåriga försök på styva leror i Västergötland under 1960-1980-talen har emellertid visat, att vinschning av redskapen verkligen har potential att öka skördarna kraftigt och att effektivisera resursutnyttjandet i växtodlingen. Vid samma insats av produktionsmedel ökade nämligen skörden med närmare 30 % under en 20-årig försöksperiod (faktaruta 15). Ändå tog man bara delvis till vara de betydande läglighetsvinster som ett sådant system bör kunna medföra (Fig 36).

Ansträngningar borde därför göras att utveckla jordpackningsfria maskinsystem för jordbrukets fältarbeten. Ansatser i denna riktning har gjorts här och var i världen. I bl.a. England och Israel har man byggt s.k. "gantries" (Fig. 38), bestående av en lång tvärgående ram med hjul i varje ände, vilka endast tillåts gå i ett fast spårssystem. Olika redskap och maskiner fästs under ramen och utför arbete i området mellan spåren. I Finland experimenterar man med en lätt förarlös traktor (Fig. 39) som går på gummiband och styrs automatiskt med hög precision med hjälp av ett GPS-system. Modern teknik har ökat möjligheterna att konstruera lätta, automatstyrda maskiner, som förenar skonsamhet mot marken med hög arbetskapacitet.



*Fig. 37.* Vinschning av redskapen över fälten var en metod som användes omkring förra sekelskiftet, då kraftkällorna var tunga, svårörliga ångmaskiner. Systemet kunde vara olika utformat, t.ex. som på bilden med en ångmaskin i ena änden av fältet och en ankarvagn i den andra och vinschning av redskapen mellan dessa.

## Försök med vinschade redskap

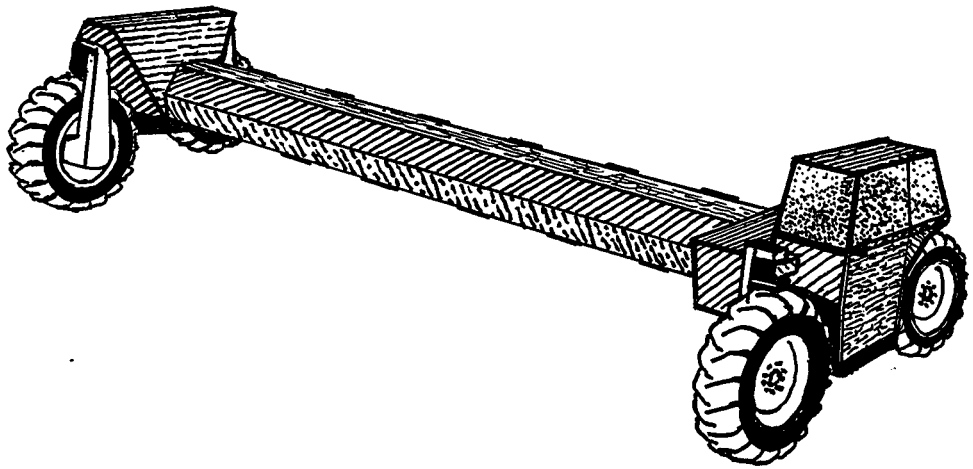


I två mångåriga försök på styva, svårbrukade och packningskänsliga lerjordar i Västergötland jämfördes åren 1968-82 normal traktor användning med vinskning av redskapen över försöksrutorna. Konventionell brukning med traktor med enkla hjul gav lägst skörd. I vårsäd ökade skörden i genomsnitt för de två försöken med 6 %, när traktorn hade dubbelmonterade bakhjul. Detta berodde på en kombination av den direkta verkan av dubbelmontaget på matjordens aktuella packningsgrad och de minskade långsiktiga verkningarna på markstrukturen.

Försöksrutor där redskapen vinschades gav 23 % högre avkastning än rutor där traktor med enkla hjul användes. Vinschningen kombinerades också med tidigare sådd, och då ökade skörden ytterligare något. Möjligheterna till tidigare sådd utnyttjades emellertid inte fullt ut. Ej heller utnyttjades de möjligheter som den tidigare skörden, och därmed också den tidigare skörden, erbjöd att så mera höstgrödor. Hade detta gjorts, så hade det vinschade ledet antagligen givit ytterligare skördeökningar.

*Genomsnittlig relativ skörd av vårstråsäd (traktor med enkla hjul = 100) i försök på två styva lerjordar i Skaraborgs län åren 1968-82. "Normal" packning genom användning av traktor med enkla hjul jämfördes med minskad packning genom dubbelmontage av traktorns bakhjul och genom vinskning av redskapen (Från Håkansson m.fl., 1985)*

Försöksplats	Normal såtid			Tidig sådd, vinskning
	Traktor med enkla hjul	Traktor med dubbelmontage	Vinskning	
Stensfält, 11 år	100 (2 920 kg/ha)	107	120	127
Skultorp, 8 år	100 (2 910 kg/ha)	105	126	125
Medeltal, 19 år	100 (2 915 kg/ha)	106	123	126



*Fig. 38.* En s.k. "gantry" byggd i England för att helt skona huvuddelen av fältytan från hjultryck. Hjulen går i ett fast spårsystem. Under maskinens ram fäster man redskap, som arbetar i området mellan spåren.



*Fig. 39.* En lätt finsk förarlös prototyptraktor, som går på gummiband och som kan styras automatiskt med hjälp av ett GPS-system..

## Kapitel 8

# Ekonomiska konsekvenser av packning

### Sammanfattning

Olika modeller har utvecklats för att beräkna effekterna på markens egenskaper och på grödornas avkastning av den jordpackning som maskin användningen medför. I Sverige har en modell för beräkning av avkastningseffekterna utarbetats på basis av de egna försöksresultaten. Med denna kan följande fyra kategorier av avkastningseffekter beräknas: 1) ettåriga effekter av återpackning av matjorden efter plöjning; 2) fleråriga effekter av sådana packningsverkningar som kvarstår i matjorden efter plöjning; 3) mångåriga effekter av packning i alven; 4) effekter av körning vid vallskörd. Modellen är främst avsedd att användas för beräkningar på enskilda gårdar och bygger på sådana uppgifter om maskiner, jord m.m. som normalt finns på gårdarna. Beräkningar med modellen visar att packningen ofta har stor ekonomisk betydelse. Skördeförsluster på mer än 10 % är vanliga.

Efter plöjning eller annan djup luckring behövs en måttlig men inte för stark återpackning. Smala hjul på traktorn vid såbäddsberedningen orsakar ofta skördeförsluster på flera procent genom att de opackade delytorna är relativt stora medan jorden under hjulspåren packas för starkt. Med breda däck eller dubbelmontage blir en större andel av fältytan återpackad till en packningsgrad nära den optimala. På lerjordar är de efterverkningar av packningen som kvarstår efter plöjning ibland större än de ettåriga effekterna och orsakar ofta skördesänkningar på 5-10 %. Också alvpackningen orsakar numera betydande förluster. Dessa ökar dessutom med tiden, särskilt på gårdar med många tunga transporter.

Vid tunga körningar, exempelvis vid stallgödselspridning och tyngre transporter, kan "jordpackningskostnaderna" i form av skördeförsluster, ökade bearbetningskostnader m.m. vara lika höga som maskin- och arbetskostnaderna. Maskinsystemet på en gård kan inte optimeras, om man inte tar hänsyn till jordpackningskostnaderna. De motåtgärder mot packningen som är ekonomiskt motiverade varierar dock starkt från gård till gård.

### 8.1. Olika modeller för beräkning av packningsverkningar

Jordpackningen förorsakar betydande ekonomiska förluster för jordbrukarna, främst genom att den sänker grödornas avkastning men också genom att den ökar bearbetningsbehovet och bränsleförbrukningen vid bearbetningarna. Därutöver får den betydande ekologiska och miljömässiga konsekvenser av olika slag.

Man kan inte optimera maskinsystemet på en gård utan att ta hänsyn till "jordpackningskostnaderna". För att kunna välja de fördelaktigaste maskinerna behöver man ha möjlighet att beräkna och i sina ekonomiska kalkyler inkludera de förväntade packningskostnaderna för olika maskiner eller maskinsystemen. Under senare år har man sökt utveckla beräkningsmodeller för detta ändamål. Effekterna

på grödorna liksom andra effekter av packningen är emellertid mycket komplexa och beror av odlings- och klimatförhållandena. Det finns ännu ingen som helst möjlighet att konstruera en s.k. mekanistisk modell (d.v.s. en modell, som helt och hållet bygger på de fysiska orsakssammanhangen), med vilken effekterna på grödornas avkastning och andra packningseffekter kan beräknas med den noggrannhet som erfordras, om resultaten skall användas till ledning för praktiska åtgärder. Detta skulle kräva att man kunde beräkna alla viktiga effekter av körningen på egenskaperna och processerna i marken och därifrån effekterna på grödorna.

Forskare på flera håll i världen har emellertid utvecklat jordpackningsmodeller, som går mindre långt. Det finns sålunda flera modeller för att beräkna effekterna på markens skrymdensitet eller porositet vid körning med fordon med olika belastningar, hjulutrustningar och marktryck (Gupta & Raper, 1994). I flertalet fall startar man med en nyligen luckrad jord med viss textur och vattenhalt och beräknar vilken skrymdensitet körningen ger upphov till i olika lager. Känner man den optimala eller kritiska skrymdensiteten för den aktuella jorden kan resultaten ge information även om vissa av packningens effekter på grödorna.

Beräkningar av detta slag är dock än så länge rätt osäkra och ger endast en ofullständig bild av körningens effekter på grödorna. I stället för skrymdensiteten eller porositeten kan man beräkna jordens packningsgrad. Detta kan bedömas vara något lättare och dessutom ge mera allmängiltiga och direkt användbara resultat. Beräkning av packningsgraden i matjorden är första steget i den del av den nedan presenterade svenska packningsmodellen, där de ettåriga effekterna på grödornas avkastning beräknas.

Vill man beräkna packningens samlade effekter på grödorna är den enda möjligheten än så länge att använda en s.k. statistisk modell, som utgår från avkastningsresultaten i de utförda fältförsöken. Detta kräver dock att man har en betydande mängd lokalt tillämpliga försöksresultat, vilket än så länge är fallet endast i begränsade delar av världen. För amerikanska förhållanden har Gunjal m.fl. (1987) och Oskoui & Voorhees (1991) sökt utveckla sådana modeller men dessa omfattar endast vissa av packningens verkningar på grödorna.

Skandinavien tycks vara den del av världen, där tillgången på lokalt tillämpliga försöksresultat är bäst. Nedan presenteras en modell, som främst bygger på svenska försöksresultat och som är avsedd för beräkning av både de kortsiktiga och de långsiktiga verkningarna av packningen på grödornas avkastning. Den omfattar packningseffekterna såväl i matjorden som i alven och dessutom effekterna av körning med maskiner vid vallskörd.

## **8.2. Svensk modell för beräkning av packningens avkastningsverkningar**

En statistisk modell för beräkning av jordpackningens effekter på grödornas avkastning utarbetades av Arvidsson & Håkansson (1991). Den är främst avsedd att användas på enskilda gårdar för att underlätta valet av ekonomiskt fördelaktiga

maskinlösningar. Med nuvarande version av modellen kan man beräkna följande fyra kategorier av effekter: 1) ettåriga effekter av återpackning av matjorden sedan denna luckrats genom plöjning; 2) fleråriga effekter av sådana packningsverknningar i matjorden som kvarstår efter plöjning; 3) mångåriga effekter av packning i alven; 4) effekter av körning med maskiner vid vallskörd.

Modellen bygger på de genomsnittliga avkastningseffekter, som erhållits i försöken under en serie år. I försöken varierade dock resultaten av en viss försöksbehandling på en och samma försöksplats ganska starkt mellan åren beroende på variationer i väderlek och andra årsmånsförhållanden. När man skall fatta beslut exempelvis om inköp av en ny maskin, vet man emellertid inte hur förhållandena kommer att bli under maskinens användningstid. Därför måste besluten baseras på de förväntade konsekvenserna av de val man kan göra. De genomsnittliga effekterna under tidigare år utgör då den bästa grundvalen för besluten.

Med modellen kan beräkningar göras för enskilda maskiner, för grupper av maskiner eller arbeten eller för hela gården. Först beräknas separat var och en av de kategorier av effekter som är aktuella, varvid effekterna anges i procent av de enskilda grödornas avkastning. Därefter summerar man de olika effekterna i respektive grödor. Med hjälp av grödornas arealer och skördevärden beräknar man slutligen de totala "packningskostnaderna" för de maskinalternativ man vill jämföra.

### *8.2.1. Ettåriga effekter av återpackning av matjorden sedan denna luckrats genom plöjning*

Denna del av modellen används för att beräkna den typ av effekter på grödorna, som presenterats i kapitel 5.2, d.v.s. effekterna på grödornas avkastning av matjordens aktuella packningsgrad. Vid beräkningen måste man på en och samma gång beakta alla körningar, som utförs efter den senaste plöjningen fram till dess att den nya grödan är etablerad. Alla dessa körningar sammantagna bestämmer nämligen packningsgraden i matjordslagret (från harvningsdjupet till plöjningsdjupet) vid vegetationstidens början och därigenom också packningstillståndet under resten av vegetationsperioden ända fram till skörden (jfr. Fig. 11). Sålunda beaktar man alla arbeten under såbäddsberedningen och sådden liksom ev. efterföljande vältningar, gödslingar och sprutningar fram till grödans uppkomst. Ev. stallgödselspridning inkluderas också, förutsatt att den endast följs av yttlig bearbetning. Körningar efter grödans uppkomst behöver man däremot i regel inte beakta, eftersom jorden då vanligen torkat upp och blivit motståndskraftig. Dessutom har en del rötter då redan hunnit utvecklas i matjorden.

Först beräknar modellen med hjälp av maskinernas hjulutrustning, arbetsbredd m.m. hur stora andelar av det enskilda fältets yta, som under den aktuella serien av arbetsoperationer täcks 0 gånger, 1 gång, 2 gånger o.s.v. av hjulspår från de använda maskinerna. Ett exempel på en sådan beräkning gavs i Fig. 2. Sedan görs ytterligare uppdelning i mindre delytor, var och en med samma kombination av

överfarter av enskilda hjul. Med hjälp av markfuktigheten vid de olika körningarna och de enskilda hjulens marktryck beräknas sedan packningsgraden i var och en av de mindre delytorna och därefter packningsgradsfördelningen för fältet som helhet. Vanligen görs en uppdelning mellan vändtegen och fältets inre del. Beräkningarna exemplifieras i Fig. 40, där resultaten för samma vårbruk och samma maskiner som i Fig. 2 visas.

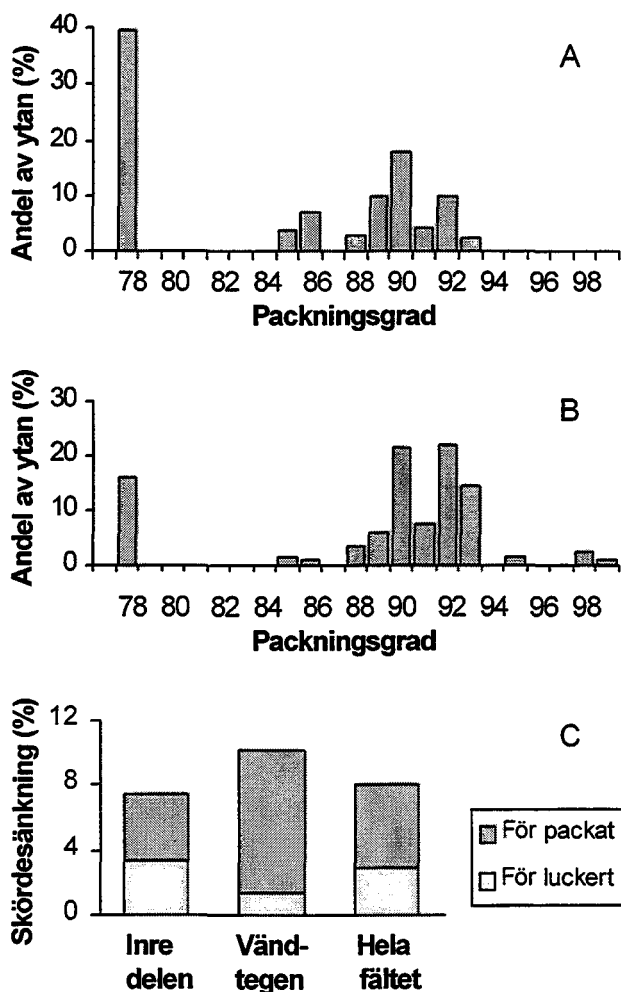
Med packningsgradsfördelningen som grund beräknar modellen sedan den sannolika procentuella skördeförlusten i var och en av de delytor, som har packningsgrader under resp. över den optimala. I enlighet med försöksresultaten (kapitel 5.2) antas sambandet mellan packningsgrad och skörd vara detsamma på alla jordar men något olika för olika grödor. Därefter summeras skördeförlusterna för alla delytor med packningsgrader över resp. under den optimala. Detta görs dels för fältets inre del dels för vändtegen (Fig. 40C) och beroende på vändtegens andel av fältytan beräknas till sist förlusten för hela fältet.

*Fig. 40.* Exempel på beräknade ettåriga verkningar av packning i matjorden under ett traditionellt vårbruk på ett höstplöjt fält. I detta exempel har samma vårbruk som i Fig. 2 valts. Det omfattar tre körningar med 8 m harv och en körning med 4 m kombisåmaskin dragna av en traktor med 65 cm breda, enkla bakhjul.

A. Packningsgradsfördelningen efter vårbruket på fältets inre del.

B. Packningsgradsfördelningen efter vårbruket på vändtegen.

C. Den sannolika skördesänkningen i årets gröda på fältets inre del, på vändtegen och på hela fältet. Skördesänkningen är beräknad i procent av den skörd som skulle erhållits, om hela fältytan haft optimal packningsgrad.





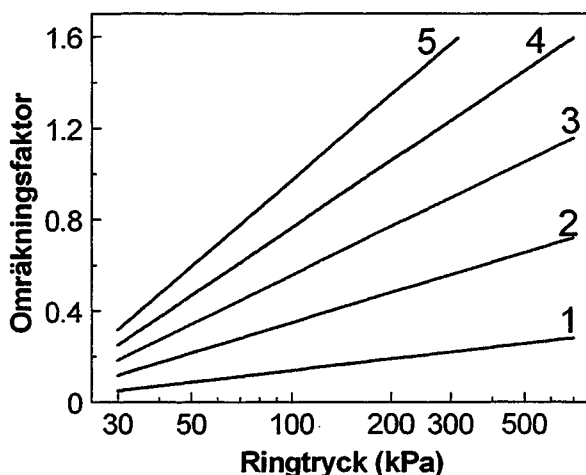
### 8.2.2. Fleråriga effekter av packningsverkningar i matjorden som kvarstår efter plöjning

Med denna del av modellen beräknas den typ av efterverkningar, som presenterats i kapitel 5.3, d.v.s. de effekter på grödornas avkastning, som erhålls efter det att jorden luckrats genom plöjning. Samtliga körningar under året är av intresse i detta sammanhang. Primärt görs beräkningarna för varje arbetsoperation för sig och sedan kan effekterna summeras enligt önskemål, exempelvis för alla arbeten med en viss maskin eller i en viss gröda, för olika grupper av arbeten eller för samtliga arbeten under året. Detta är möjligt, eftersom försöken visat att man kan betrakta effekten på grödorna som direkt proportionell mot körintensiteten inom hela det tonkm-intervall, som är aktuellt i praktisk jordbruksdrift.

För den enskilda arbetsoperationen beräknas först körmängden i tonkm per ha, d.v.s. maskinens vikt i ton gånger körsträcken i km per ha. För flertalet arbeten beräknas körsträcken med hjälp av maskinens arbetsbredd men man gör ett schablon tillägg för extrakörning genom vändningar, dubbelkörning o.d. Vid jordbearbetning, sådd och liknande arbeten är schablon tillägget vanligen 20 à 30 % av den effektiva körsträcken. För en del arbeten, exempelvis stallgödselspridning och ensilageskörd, kan man inte använda schablon tillägg för extrakörningen, eftersom denna varierar mycket från fall till fall och ibland uppgår till flera hundra procent.

Innan ett tonkm-värde används för beräkning av avkastningseffekten, multipliceras det med en omräkningsfaktor som bestäms av hjulens marktryck och markens fuktighet vid körningen (Fig. 41). Markfuktigheten karakteriseras med hjälp av en subjektiv skala (Tabell 12). Omräkningsfaktorn stiger proportionellt mot fuktighetsklassen och mot logaritmen på marktrycket. Den blir som högst ca. 1,5, vilket är faktorns värde just innan hjulen sjunker så mycket att maskinen har svårt att ta sig fram. Faktorns värde har bestämts bl.a. på basis av de försöksresultat

Fig. 41. Omräkningsfaktor för marktryck och markfuktighet. Marktrycket antas i regel vara lika med eller något över ringtrycket. Markfuktighetsklassen anges i en subjektiv skala mellan 0 och 5 enligt Tabell 12. Vid ett normalt vårbruk är fuktighetsklassen mellan 3 och 3,6 och för traktorerna blir då omräkningsfaktorn i regel mellan 0,4 och 0,9 beroende på hjulutrustningen.



Tabell 12. Subjektiv markfuktighetsskala att användas vid beräkning av omräkningsfaktorn enligt Fig. 41.

Klass	Beskrivning
1	Marken mycket torr och hård; för hård för plöjning (t.ex. på sommaren efter långvarig torka)
2	Marken ganska torr och hård; i hårdaste laget för plöjning (t.ex. på sommaren efter ett par veckors ordentlig torka)
3	Marken dränerad och därefter ytterligare upptorkad; optimal fuktighet för plöjning (t.ex. vid slutet av en torr vårbruksperiod)
4	Marken ofullständigt dränerad; markanta körspår bildas utom av hjul med mycket låga marktryck; betydande slirning vid plöjning (t.ex. i besvärliga surhålör vid vårbruk)
5	Marken våt, vanligen med en del ytvatten; djupa spår även av fordon med god hjulutrustning; fordon med höga marktryck kör fast; plöjning knappast möjlig

tat, som presenterades i Tabell 5. Med hjälp av det omräknade tonkm-värdet beräknas skördesänkningen i efterföljande års grödor. I enlighet med försöksresultaten (Fig. 30) antas skördesänkningen bli direkt proportionell mot både det omräknade tonkm-värdet och markens lerhalt. Den procentuella skördesänkningen antas bli lika för alla grödor. Den sammanlagda effekten under samtliga (upp till fem) efterverkansår anges i procent av en årsskörd. I Tabell 13 exemplifieras effekternas storlek.

Tabell 13. Sammanlagd skördeförlust under några efterverkansår (kr/ha) p.g.a. den matjordspackning som orsakas av 1 respektive 100 omräknade tonkm per ha vid olika lerhalter i matjorden och olika skördevärden. (Beräkningen bygger på att skördeförlusten per omräknad tonkm/ha stiger rätlinjigt från 0 i lerfri jord till 0,077 % vid lerhalten 50 %)

Körmängd	Skördevärde (kr/ha och år)	Matjordens lerhalt (%)				
		10	20	30	40	50
1 tonkm/ha	5 000	0,77	1,54	2,31	3,08	3,85
	10 000	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70
100 tonkm/ha	5 000	77	154	231	308	385
	10 000	154	308	462	616	770

### 8.2.3. Effekter av packning i alven

Effekterna av packning i alven beräknas på basis av de försöksresultat, som presenterats i kapitel 5.5. Beräkningen görs på ett sätt som liknar det för efterverkningarna i matjorden (8.2.2). Samtliga körningar under året med fordon med tillräckligt höga axelbelastningar för att orsaka alvpackning är därvid av intresse. För den enskilda körningen beräknas först körmängden i tonkm per ha, men då används inte fordonens hela vikt, utan matjorden betraktas som en skyddskudde, som "lyfter av" en viss del av belastningen från varje axel.

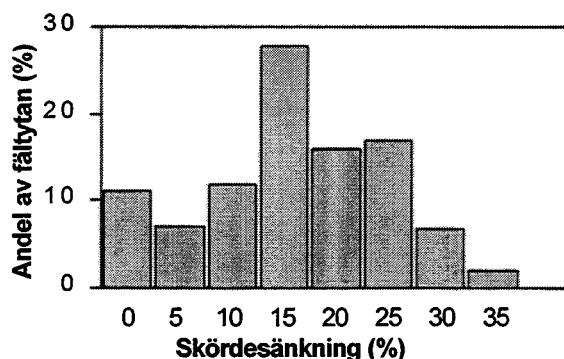
Vid beräkningen delas alven i två lager, 25-40 cm och >40 cm. För det övre lagret (25-40 cm) lyfts 4 ton per axel av, innan körmängden beräknas. Endast den överskjutande lasten ingår i tonkm-beräkningen utom för traktorns färhjul vid plöjning, där hela lasten ingår. För det undre lagret (>40 cm) reduceras axelbelastningen med 6 ton innan körmängden beräknas, eftersom skyddskudden då är tjockare, och för traktorns färhjul vid plöjning reduceras belastningen med 3 ton. Liksom när matjordspackningens efterverkningar beräknas, används en omräkningsfaktor för marktrycket och för markfuktigheten vid körtillfället men denna har något annorlunda värden än för matjorden. Det är naturligtvis en schablonisering av de verkliga förhållandena att på detta sätt reducera axelbelastningen, men Fig. 14 visar att det är en rimlig metod.

Den förväntade avkastningssänkningen beräknas med utgångspunkt från antalet reducerade och omräknade tonkm och från de försöksresultat som visas i Fig. 34. Det antogs att skördesänkningarna i försöken till hälften berodde på packningen i lagret 25-40 cm och till hälften på lagret därunder. I modellen antas, att effekterna på grödorna av packning i lagret 25-40 cm ebbat ut successivt under en tid av 10 år, medan de i lagret >40 cm blir permanenta. Detta är troligen en underskattning av effekternas varaktighet i det övre lagret men å andra sidan är kanske inte effekterna i det undre lagret fullkomligt permanenta.

I modellen antas att för lagret 25-40 cm den sammanlagda avkastningssänkningen under de följande tio åren efter en packning, i procent av en årsskörd, är en fyrtiondel av det reducerade och omräknade tonkm-värdet. Detta betyder att om man under många år kör på ett och samma sätt, så kommer man till ett jämviktsläge, där man hela tiden får vidkännas en skördesänkning av 1 % för varje fyrtiotal reducerade och omräknade tonkm per år. För lagret >40 cm antas att avkastningssänkningen i procent för all framtid blir en fyrahundradel av det för detta lager erhållna reducerade och omräknade tonkm-värdet. Varje nytt tillskott av 400 tonkm per ha framräknat på detta sätt antas alltså ge en permanent sänkning av jordarnas produktionsförmåga med 1 %. Kör man ofta med maskiner med höga axelbelastningar kan detta tillskott uppnås inom loppet av något tiotal år.

För båda lagren gäller, att avkastningseffekterna per reducerad och omräknad tonkm tills vidare antas vara lika stora på alla jordar. Försöksunderlaget är ännu för litet för att visa, om effekterna skiljer sig mellan olika typer av jordar, och i så fall hur mycket. Endast de genomsnittliga effekterna från samtliga försök är tillräckligt säkra. För praktiskt bruk är detta dock ingen stor nackdel, eftersom

Fig. 42. Exempel på beräknade skördeskador i en vall, som utsatts för tung körning. Exemplet gäller andra vallskörden i ett fält, där första skörden tagits till ensilage under ogynnsamma fuktighetsbetingelser. Fältytan har delats upp i delytor med skördesänkning av olika storlek.



alvpackningen i försöken givit negativa effekter på både styva och lätta jordar och nästan alla gårdar har varierande jordar.

#### 8.2.4. Effekter av körning med maskiner vid vallskörd.

I denna del av modellen beräknas den typ av effekter, som presenteras i kapitel 5.6. Liksom vid beräkningen av de ettåriga effekterna enligt kapitel 8.2.1 startar man här med en beräkning av spår fördelningen på fälten (jfr. Fig. 2). Därvid utgår man från maskinernas hjul- och arbetsbredder och gör tillägg för dubbelkörningar, vändningar, in- och utkörning m.m. På basis av de i försöken erhållna avkastningsresultaten beräknas sedan avkastningsförlusterna. Därvid beaktar man de enskilda hjulens belastning och marktryck, markfuktigheten vid körningen, vallåldern och antalet skördar per år. Vidare beaktas läget i landet, eftersom skörde förlusterna i försöken efter en och samma typ och intensitet av körning blev större i norra Sverige än i södra. Beräkningsresultaten kan redovisas dels för fältets inre del dels för vändtegen. Bl.a. kan den arealmässiga fördelningen av ytor med olika stor avkastningssänkning redovisas (Fig. 42) liksom den totala skörde förlusten för fältet som helhet.

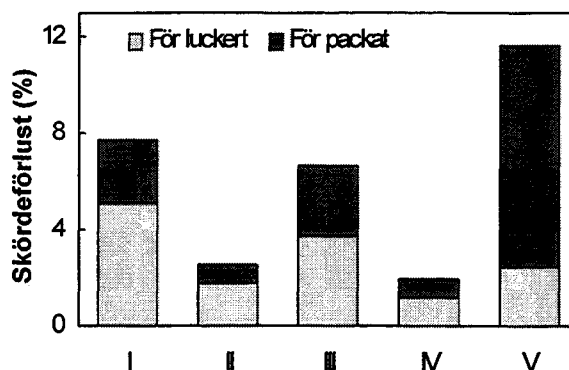
### 8.3. Exempel på ekonomiska effekter

I detta avsnitt ges några exempel på beräknade ekonomiska effekter av jordpackningen i enskilda situationer med användande av de olika delarna i den i kapitel 8.2 beskrivna beräkningsmodellen. Nuläget vad de totala effekterna för hela Sveriges åkermark beträffar diskuteras i kapitel 9.

#### 8.3.1. Effekter av återpackning av matjorden efter plöjning

I detta exempel jämförs de ettåriga packningseffekterna i en vårsädesgröda efter olika vårbruksförfaranden på ett höstplöjt fält. Maskiner typiska för ett familj jordbruk används. Exemplet illustrerar användningen av den i kapitel 8.2.1 presenterade delen av modellen. Ett traditionellt vårbruk med separata harvningar

Fig. 43. Beräknade ettåriga packningseffekter av fem olika körsystem under vårbruket. Staplarna visar den totala skördeförlusten i procent av den skörd som skulle erhållits, om hela fältytan haft optimal packningsgrad (d.v.s. ca. 87). En uppdelning har gjorts på förluster i delytor där jorden är för lucker respektive för packad.



jämförs med ett vårbruk med harvsådd. Vårbruket görs under normala fuktighetsförhållanden och traktorerna har antingen enkla hjul eller dubbelmontage. I ett fall sprids stallgödsel strax före harvningen. Följande fall jämförs:

- I Harvsådd med kraftuttagsdriven harv + kombisåmaskin; traktorn har enkla standarddäck.
- II Som i I men med en separat harvning; traktorn har dubbelmonterade bakhjul.
- III Tre separata harvningar och kombisådd; traktorn har enkla standarddäck.
- IV Som i III men traktorn har dubbelmonterade bakhjul.
- V Som i III men föregånget av stallgödselspridning.

Traktorvikten vid harvsådd är 6,1 ton, vid separat harvning 5,0 ton och vid separat sådd 4,0 ton. Stallgödselspridaren väger 7 ton vid halv last. Arbetsbredderna är 5,5 m för harven, 3 m för såmaskinen och 5 m för stallgödselspridaren.

Skördeförlusten blev störst i system V, mindre i system I och III och minst i system II och IV (Fig. 43). I system V blev en stor andel av fältytan alltför starkt packad vid stallgödselspridningen. I system I och III (traktor med enkla hjul) orsakades betydande förluster av att en stor andel av fältytan förblev opackad, medan packningsgraden i många av spåren blev för hög. I system II och IV (traktor med dubbelmontage) blev förlusterna små, eftersom större delen av fältytan packades, men endast till en packningsgrad nära den optimala.

### 8.3.2. Effekter av packningsverkningar i matjorden som kvarstår efter plöjning

I Tabell 14 ges exempel på vilka efterverkningar som erhålls av de körningar man normalt utför i två olika grödor, nämligen i vårsäd resp. sockerbeter. Därvid används den i kapitel 8.2.2 presenterade delen av modellen. Maskiner typiska för svenska familj jordbruk används. För flertalet arbeten används sålunda en 6,0 tons traktor. Både skördetröskan och sockerbetsupptagaren väger 8 ton vid halv tank. Arbetsbredden är 7 m för harven, 1,6 m för plogen, 5 m för skördetröskan och 12 m för sprutan. I tabellen visas dels de beräknade tonkm-värdena dels skördeförlusterna i efterföljande grödor på jordar med lerhalterna 10 % och 40 %.

Tabell 14. Beräknat antal tonkm per ha under året och sammanlagda skördeföruster i efterföljande grödor (uttryckta i % av en årsskörd) av de packningseffekter som kvarstår i matjorden efter plöjning. Beräkningen avser traditionella årliga arbetsoperationer i vårsäd och sockerbetor genomförda med normala maskiner med de däcksalternativ som brukar stå till buds. Skördeförusten beräknas för jordar med lerhalterna 10 % och 40 %

Arbete	Vårsäd				Sockerbetor			
	Tonkm/ha		Skördeförust (%) <sup>2</sup>		Tonkm/ha		Skördeförust (%) <sup>2</sup>	
	A <sup>1</sup>	B <sup>1</sup>	10 % ler	40 % ler	A <sup>1</sup>	B <sup>1</sup>	10 % ler	40 % ler
Harvning	28	11-25	0,3	1,1	36	14-32	0,4	1,5
Sådd	12	5-11	0,1	0,5	12	5-11	0,1	0,5
Konstg.spridn.	7	3-7	0,1	0,3	7	3-7	0,1	0,3
Sprutningar	4	1-4	0,1	0,2	25	7-23	0,2	0,9
Hackning	-	-	-	-	16	5-14	0,2	0,6
Skörd	35	9-42	0,4	1,5	175	105-210	2,5	9,9
Stubbearb.	18	9-14	0,2	0,7	-	-	-	-
Plöjning	37	18-44	0,5	1,9	37	18-44	0,5	1,9
Summa	141	60-140	0,9-2,2	3,7-8,6	308	160-330	2,5-5,1	9,9-20,3

<sup>1</sup>Tonkm-värdena anges A) för normala maskiner före omräkning och B) efter omräkning för marktryck och fuktighet (jfr Fig. 41), varvid det lägsta värdet erhållits när lågtrycksdäck använts under de torraste förhållanden, som normalt råder vid respektive arbete, det högsta värdet när standarddäck använts under fuktiga förhållanden.

<sup>2</sup>För enskilda arbeten anges skördeförusten för ett omräknat tonkm-värde mitt i det i kolumn B angivna intervallet.

Tabell 15. Exempel på beräknade skördeföruster i efterföljande grödor orsakade av sockerbetsskörd med en tvåradig upptagare, som ger en körmängd av 200 tonkm per ha (icke omräknat värde). Jordens lerhalt är 10 eller 40 %, fuktighetstillståndet normalt (fuktighetsklass 3,4; Tabell 12) eller vått (fuktighetsklass 4,4) och marktrycket under samtliga hjul 100 eller 200 kPa

Lerhalt (%)	Fuktighets-tillstånd	Skördeförust i		Skördeförust i kr/ha vid skördevärdet			
		% av en årsskörd		6 000 kr/ha		10 000 kr/ha	
		100 kPa	200 kPa	100 kPa	200 kPa	100 kPa	200 kPa
10	Normalt	1,9	2,7	114	162	190	270
10	Vått	2,6	3,7	156	222	260	370
40	Normalt	7,8	10,7	468	642	780	1 070
40	Vått	10,3	14,5	618	870	1 030	1 450

Det är stor skillnad i antalet tonkm/ha mellan vårsäd och sockerbetor. Största delen av denna skillnad erhålls vid skörden. Sockerbetsskörden brukar ge minst lika många tonkm som alla körningar under året i en vårsädesgröda. Om den görs när fälten är våta, blir antalet omräknade tonkm påfallande stort och orsakar betydande skördesänkningar i efterföljande grödor, särskilt på lerjordar.

Vad jordens lerhalt, hjulustrustningen och fuktighetsförhållandena vid körningarna kan betyda illustreras ytterligare i Tabell 15. Där visas de beräknade efterverkningarna orsakade av sockerbetsskörd med en tvåradig betupptagare, som väger 6 ton tom, dras av en 6 tons traktor och ger en körmängd av 200 tonkm per ha före omräkning för markfuktighet och marktryck. Värdena i tabellen visar klart hur viktigt det är, särskilt på jordar med höga lerhalter, att välja rätt hjulustrustning och gynnsamma körtidpunkter. De visar också ett av skälen till att sockerbetor numera mest odlas på lättare jordar. Tidigare, medan skörden gjordes för hand, odlades sockerbetor i större omfattning än nu på styva jordar.

### 8.3.3. Effekter av packning i alven

Användningen av den i kapitel 8.2.3 presenterade delen av modellen illustreras av följande exempel. En enaxlig transportvagn, som väger 4 ton tom och lastar 10 ton, dras av en 7 tons traktor (Tabell 16). Utan last väger hela ekipaget 11 ton och

Tabell 16. Antal reducerade och omräknade tonkm samt skördesänkning i efterföljande grödor p.g.a. packning i lagren 25-40 cm och >40 cm när transportvagnen i exemplet tom eller fullastad körs en sträcka av 1000 m/ha (d.v.s. med ett spår på var tionde meter). Markfuktighetsklassen är 3 eller 4,4 (jfr. Tabell 12). Vidare anges den körsträcka som under en femtonårig efterverkansperiod ger en sammanlagd skördesänkning p.g.a. alvpackning av 1 kr om skördevärdet är 5 000 kr per ha och år

Fuktighetsklass	Lager	Antal tonkm		Skördesänkning (%) <sup>1</sup>		Körsträcka (m) <sup>2</sup>	
		Tom	Lastad	Tom	Lastad	Tom	Lastad
3,0 <sup>3</sup>	25-40 cm	1,0	6,0	0,03	0,15	667	70
	>40 cm	0,0	3,6	0,0	0,009		
4,4 <sup>4</sup>	25-40 cm	2,3	14,3	0,06	0,36	333	30
	>40 cm	0,0	8,9	0,0	0,022		

<sup>1</sup>För lagret 25-40 cm redovisas den sammanlagda skördesänkningen i efterföljande grödor under en tioårsperiod i % av en årsskörd, för lagret >40 cm den permanenta årliga skördesänkningen i %.

<sup>2</sup>Vid beräkningen av denna körsträcka har effekterna av packningen i det övre alvlagret under tio och i det undre alvlagret under femton efterverkansår beaktats.

<sup>3</sup>Omräkningsfaktor är drygt 0,5.

<sup>4</sup>Omräkningsfaktor är drygt 1.

axelbelastningarna är, framifrån räknat, 2 ton, 6 ton och 3 ton. Med full last väger ekipaget 21 ton och axelbelastningarna är 2 ton, 8 ton och 11 ton. Traktorhjulen har ringtrycket 100 kPa och vagnshjulen 200 kPa.

Då vagnen körs tom får man endast små alvpackningseffekter. Traktorns bakaxel är då den enda axel som har en belastning över 4 ton, vilket antas vara undre gränsen för packning i alven. Ingen axel har en belastning över 6 ton, vilket krävs för packning i det undre lagret. Även matjorden packas emellertid, vilket inte redovisas här, och detta orsakar på kort sikt i regel betydligt större effekter än packningen i alven.

Även då vagnen körs med full last kan effekterna tyckas vara små. Alvpackningen blir emellertid betydligt större och når även ner i det undre lagret, där effekterna blir permanenta. Räknas effekterna samman för en längre efterverkansperiod blir därför effekterna betydande.

För att konkretisera beräkningarna anges i tabellen också den körsträcka som förorsakar en skördeförlost av 1 kr om det genomsnittliga skördevärdet är 5000 kr/ha. Därvid har skördesänkningarna under en femtonårig efterverkansperiod p.g.a. packningen i båda alvlagren summerats. Med den fullastade vagnen under de fuktigaste förhållandena blir förlusten 1 kr per 30 m körsträcka. Under sammanlagt en timmes körning på fält hinner man köra ca 6 km och vid full last orsakar alvpackningen då förluster på ca 200 kr. Är skördevärdena högre än de som förutsätts i tabellen eller om man räknar in efterverkningarna även längre fram i tiden blir förlusterna större än de redovisade.

#### *8.3.4. Sammanlagda effekter*

Här exemplifieras de sammanlagda effekterna av en körning som ger såväl kort- som långsiktiga packningsverkningar i matjorden och dessutom packning i alven. En jämförelse görs mellan ett skonsamt och ett mindre skonsamt sätt att sprida flytgödsel på våren. Spridningen görs före vårbrukets början och gödseln brukas ned endast genom att man harvar till normalt harvningsdjup. I båda fallen kör man med en 8 m<sup>3</sup> tunna med tomvikten 4 ton dragen av en 6 tons traktor.

I det ena fallet (skonsamt) har tunnan boggie. Traktorns fram- och bakaxlar resp. boggien har belastningarna 2 ton, 5 ton och 3 ton, när tunnan är tom, och 2 ton, 7 ton och 9 ton, när tunnan är full. Ringtrycket är 80 kPa i både traktorns och tunnans däck. Spridningsbredden är 12 m. Körningen görs när jorden torkat upp till fuktighetsklassen 3,5 och den är väl planerad, så att totala körsträckan blir 1,8 gånger spridningssträckan. I det andra fallet (mindre skonsamt) har tunnan enkel axel med belastningarna 3 ton och 9 ton vid tom resp. full tunna. Traktorns axlar har samma belastningar som ovan. Ringtrycket är 140 kPa i traktorn och 200 kPa i tunnan och spridningsbredden är 6 m. Körningen påbörjas så snart det går att köra och fuktighetsklassen är då 4,1. Körningen är mindre väl planerad och totala körsträckan är 4,0 gånger spridningssträckan.

I en lätt jord dominerar de ettåriga verkningarna. Ju högre jordens lerhalt är



Tabell 17. Beräknad skördesänkning samt ökade bearbetningskostnader orsakade av jordpackning i matjord och alv under flytgödselspridning på våren på fält med lerhalterna 10 %, 30 % och 50 %. Spridningen görs dels på ett skonsamt sätt dels på ett mindre skonsamt sätt

Typ av effekt	Skonsam spridning			Mindre skonsam spridn.		
	10 %	30 %	50 %	10 %	30 %	50 %
1. Verkningar i matjorden samma år (%) <sup>1</sup>	2,8	2,8	2,8	8,9	8,9	8,9
2. Efterverkningar i matjorden (%) <sup>2</sup>	0,2	0,6	1,0	1,5	4,6	7,7
3. Verkningar i lagret 25-40 cm (%) <sup>3</sup>	0,1	0,1	0,1	0,9	0,9	0,9
4. Verkningar i lagret >40 cm (%) <sup>4</sup>	-	-	-	0,3	0,3	0,3
Total skördeförlust (%; summa av 1-4)	3,1	3,5	3,9	11,6	14,7	17,8
Total skördeförlost (kr/ha)						
vid skördevärdet 5 000 kr/ha	155	175	195	580	735	890
vid skördevärdet 10 000 kr/ha	310	350	390	1160	1470	1780
Ökade bearbetningskostnader (kr/ha) <sup>5</sup>	20	40	60	50	90	130
Totala förluster (skördeförlost + ökade bearbetningskostnader, kr/ha)						
vid skördevärdet 5000 kr/ha	175	215	255	630	825	1020
vid skördevärdet 10.000 kr/ha	330	390	450	1210	1560	1910

<sup>1</sup>Denna effekt kan variera ganska mycket beroende på vårbrukets utförande.

<sup>2</sup>Sammanlagd förlust under fem år (% av en årsskörd).

<sup>3</sup>Sammanlagd förlust under en tioårsperiod (% av en årsskörd).

<sup>4</sup>Sammanlagd förlust under 15 år (% av en årsskörd).

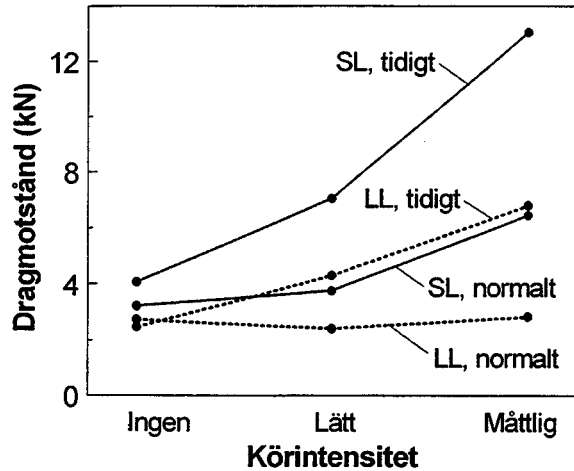
<sup>5</sup>Endast grov uppskattning (jfr kapitel 8.4)

desto större blir efterverkningarna och i en styv lera blir dessa lika stora som de ettåriga. Packningseffekterna i alven beror främst på om tunnan har boggie eller enkel axel. Under de mest ogynnsamma förhållandena (höga marktryck, enkel axel, liten spridningsbredd, mycket extrakörning, fuktiga förhållanden) blir förlusterna genom packningsskador större än spridningskostnaderna eller värdet av växtnäringen i den spridda gödseln. Med skonsam utrustning och varsamt förfarande kan skadorna minskas i hög grad. Den allra billigaste och effektivaste delåtgärden är att planera körningen väl, så att körsträckan på fält, särskilt med full tunna, blir så liten som möjligt.

#### 8.4. Dragkraftsbehov i packad jord

Packning av jorden gör att såväl behovet av bearbetning som dragkraftsbehovet vid de enskilda bearbetningarna ökar. Därmed ökar också bränsleförbrukningen och kostnaderna. Från en tysk undersökning rapporterade Petelkau (1986) att jord, som överfarits flera gånger av hjul med marktrycken 300 och 500 kPa, krävde mer än dubbelt så stor dragkraft som opackad jord för att luckras till samma djup.

Fig. 44. Dragmotstånd på hösten mot ett på 18 cm djup framfört gåsfotskär i jord som packats av traktor på våren. En överfart spår intill spår hade gjorts med traktorn dels tidigt, då jorden fortfarande var våt, dels vid normal vårbrukstid. Traktorn hade antingen enkla hjul (måttlig körintensitet) eller dubbelmontage (lätt körint.). Mätningarna gjordes dels på lättlera (LL) dels på styv lera (SL) (Efter Edling & Fergedal, 1972).



Undersökningar i det forna Sovjetunionen visade att när jordpackningen minskade genom att man övergick från högtrycks- till lågtrycksdäck, så minskade bränsleförbrukningen under fältarbetena med 7-60 % (Nikiforov m. fl., 1993).

I en svensk undersökning (Fig. 44) visade det sig att packning av två lerjordar med traktor tidigt på våren avsevärt ökade dragkraftsbehovet vid bearbetningen under efterföljande höst. Ett gåsfotskär drogs då fram på 18 cm djup under mätning av dragkraften. I försöksrutor, där man kört med traktor med enkla hjul på våt jord tidigt på våren, krävdes ca. tre gånger så stor dragkraft som i opackade jämförelserutor. Där man använt dubbelmontage eller kört på bättre upptorkad jord var dragkraftsökningen betydligt mindre. Där man kört med dubbelmontage i den bäst upptorkade jorden noterades ingen dragkraftsökning alls.

Ökat bearbetningsbehov och ökade kostnader för bearbetningarna är en viktig ekonomisk konsekvens av jordpackningen. Hittills har dock inga systematiska undersökningar av detta utförts. Det är därför önskvärt att sådana kommer till stånd, så att också de ökade bearbetningskostnaderna kan inkluderas i den ovan presenterade ekonomiska modellen över packningens konsekvenser. Därtill kommer att såväl det ökade bearbetningsbehovet som det ökade dragkraftsbehovet vid bearbetning leder till större energiförbrukning och större utsläpp av avgaser till atmosfären i form av CO<sub>2</sub> och NO<sub>x</sub>. Utöver att bearbetningskostnaderna ökas, så ökas därför också de negativa miljöeffekterna av odlingen genom ökade utsläpp av växthusgaser till atmosfären.

## Kapitel 9

# Nuläge och behov av belastningsgränser

### Sammanfattning

Alltsedan fältarbetena i svenskt jordbruk blev mekaniserade har matjorden utsatts för regelbundet återkommande packning. I detta lager förhindrar dock den årliga luckringen att packningsverkningarna ackumuleras över en viss gräns. Några permanenta packningsskador har därför inte kunnat påvisas. Sedan ganska länge tycks man nu vara inne i ett jänviktsläge, där matjordspackningen vanligen ger skördesänkningar på 5-10 %. Variationerna är emellertid stora både mellan år och gårdar. Den successiva ökningen av maskinstorlekarna har motverkats av bättre däcksutrustning, minskad spårtaethet p.g.a. ökade arbetsbredder och minskat antal arbetsoperationer. Packningen av matjorden är dock alltså så betydelsefull ur såväl ekonomisk som miljömässig synpunkt att den måste ägnas stor uppmärksamhet, och främst då av jordbrukarna själva.

Vad gäller packningen i alven är läget annorlunda. Med ökande axelbelastningar packas alven till allt större djup. Mätningar åren 1993-95 i ett område med sockerbets- och potatisodling visade, att alven på praktiskt brukade fält hade 40 % högre penetrationsmotstånd än intilliggande ytor, där tunga maskiner aldrig använts. Detta beräknades sänka skörden med 6 %. Av allt att döma ökar alvpackningen dessutom raskt på många håll.

För att alvpackningen skall hållas inom acceptabel nivå och jordarnas produktionsförmåga bevaras för framtiden, behöver man sätta upp gränser för belastningen av jordarna. Genom frågans långsiktighet är detta samhällets snarare än de enskilda jordbrukarnas angelägenhet. Man kan tänka sig rena axelbelastningsgränser eller gränser, där också marktrycket, markfuktigheten vid körningen och jordarnas hållfasthetsegenskaper beaktas. I några länder har man sökt etablera sådana gränser.

### 9.1. Läget i praktiken

#### 9.1.1. Packningen i matjorden

Mekanisering av det svenska jordbrukets fältarbeten påbörjades under 1900-talets första decennier och tog fart främst under 1940-talet. Sedan 1950-talet har fältarbetena på flertalet svenska gårdar varit helt mekaniserade. De första maskinerna var ganska lätta men efter hand har allt tyngre maskiner kommit till användning. För många arbeten, särskilt skörde- och transportarbeten, har detta medfört att antalet tonkm per ha också successivt ökat (Tabell 1). Vid jordbearbetning, sådd och liknande arbeten har tonkm-värdena för de enskilda arbetsoperationerna däremot endast ökat i mindre grad, eftersom arbetsbredderna ökat nästan i takt med traktorstorlekarna. I en del fall har dessutom antalet arbetsoperationer minskats. Samtidigt har hjulutrustningen på många traktorer och maskiner

förbättrats, så att marktrycken kunnat sänkas och packningseffekten per tonkm minskas. Maskinkapaciteten har i regel också ökat betydligt och man har därför något lättare att undvika körning när marken är våt.

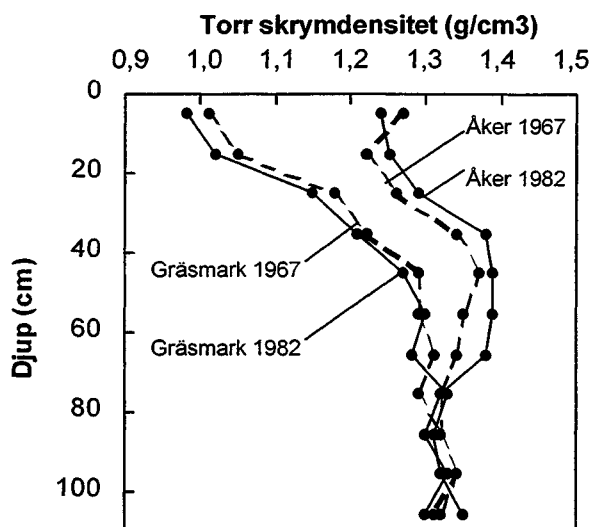
I kapitel 8.2 presenterades en modell för beräkning av packningens verkningar på grödornas avkastning. I denna räknas tonkm-värdena om för maskinernas marktryck och för markfuktigheten vid körningarna innan de används för att beräkna avkastningseffekterna. För såbäddsberedning och sådd får man numera ofta färre omräknade tonkm per ha än tidigare. För skörde- och transportarbeten har antalet omräknade tonkm per ha däremot vanligen ökat, ibland t.o.m. kraftigt. Summan torde bli att på gårdar, där man utnyttjar de möjligheter som finns att köra skonsamt (där man använder lågtrycksdäck, minimerar körsträckorna vid transporter, kombinerar arbeten o.s.v.) har påfrestningarna på matjorden sedan lång tid tillbaka endast ökat svagt eller inte alls. På en del gårdar har de med största sannolikhet t.o.m. minskat under senare år. Någon statistik eller några andra systematiska undersökningar, som kan användas som bevis för detta, finns dock inte. Genomsnittliga skördesänkningar p.g.a. felaktig packningsgrad i matjorden eller efterverkningar på matjordsstrukturen torde på flertalet svenska gårdar ligga mellan 5 och 10 %, men vid ogynnsamma kombinationer av jordart, klimat, odlingsinriktning och maskinutrustning kan de bli betydligt högre.

### *9.1.2. Packningen i alven*

För packningen i alven är utvecklingen helt annorlunda än för packningen i matjorden. I kapitlen 3.3 och 5.5 visades, att upprepade körningar med fordon med höga axelbelastningar ger ackumulativa packningsverkningar i alven. Detta tycks vara fallet upp till ett mycket stort antal överfarter. Åtminstone alvens övre del är därför numera mycket mera packad än tidigare. I östra Tyskland undersökte Leinweber & Menning (1992) packningstillståndet i alven på praktiskt brukade fält. De påvisade klara kvarstående packningseffekter, särskilt på vändtegarna. I Ukraina jämfördes alvens torra skrymdensitet på åkermark och på intilliggande naturlig gräsmark dels år 1967 dels år 1982 (Håkansson & Medvedev, 1995). Det visade sig att alven hade högre densitet på åkermarken än på den naturliga gräsmarken och att skillnaderna hade ökat från 1967 till 1982. (Fig. 45).

Flertalet svenska fält har nu utsatts för packning av traktorer och andra maskiner under ca femtio år. De först använda maskinerna hade emellertid så låga axelbelastningar (<5 ton) att när de kördes på markytan kan de inte ha packat alven särskilt mycket. Vid plöjning gick emellertid traktoreernas färhjul då liksom nu direkt på alven, och så länge övriga maskiner var förhållandevis lätta var detta säkerligen den körning, som svarade för huvuddelen av alvpackningen. Liksom i andra länder har emellertid axelbelastningarna stigit kontinuerligt. Belastningar ända upp till 20 ton förekommer nu i skandinaviskt jordbruk, särskilt på stora sockerbetsupptagare och transportfordon. Detta kan jämföras med att det i Sverige

Fig. 45. Torr skrymdensitet i markprofiler från naturlig gräs-  
mark och från intilliggande åker-  
mark i Ukraina 1967 och 1982.  
(Efter Håkansson & Medvedev,  
1995.)



sedan länge funnits en rekommendation att begränsa axelbelastningen till 6 ton för att undvika oacceptabla, permanenta packningsskador i alven (Håkansson & Danfors, 1981). I vissa andra delar av världen, exempelvis i U.S.A., förekommer ännu högre axelbelastningar. Detta är dock fallet främst i områden med torrare klimat än det skandinaviska.

#### 9.1.2.1. Penetrometermätningar i alven i Uppland och Halland

För att undersöka om dittills gjorda körningar med tunga maskiner och fordon i det praktiska jordbruket orsakat kvarstående packning i alven, gjordes penetrometermätningar på praktiskt brukade fält på 8 platser i Uppland år 1991 och på 17 platser i Halland åren 1993-95 (Håkansson m.fl., 1996). Hypotesen var att alven packats av de maskiner, som använts i jordbruksdriften under de föregående 40 à 50 åren, och att denna fortfarande "mindes" all tung körning, som gjorts under fuktiga förhållanden under hela denna tid. Penetrometermätningar var det enklaste sättet att fastställa om jordarna verkligen blivit packade.

Mätningarna gjordes till ett djup av 60 cm dels på åkermark dels på intilliggande jämförelseytor med samma slags jord, som aldrig överfarits av tunga maskiner. I flertalet fall utgjordes jämförelseytorna av trädgårdar, där fordonstrafik varit omöjlig sedan minst 30 år. I Halland gjordes mätningar dels på vändtegarna dels på fältens inre delar. Då penetrationsmotståndet inte enbart beror av packningstillståndet utan också av markfuktigheten, utfördes mätningarna under den tidiga våren, då fuktigheten var densamma på fälten som på jämförelseytorna (fältkapacitet).

På upplandsgårdarna hade man huvudsakligen odlat spannmål och kört relativt lite med tunga maskiner och transportfordon. I Halland hade man odlat sockerbeter och potatis och haft stor animalieproduktionen och därför kört mycket med

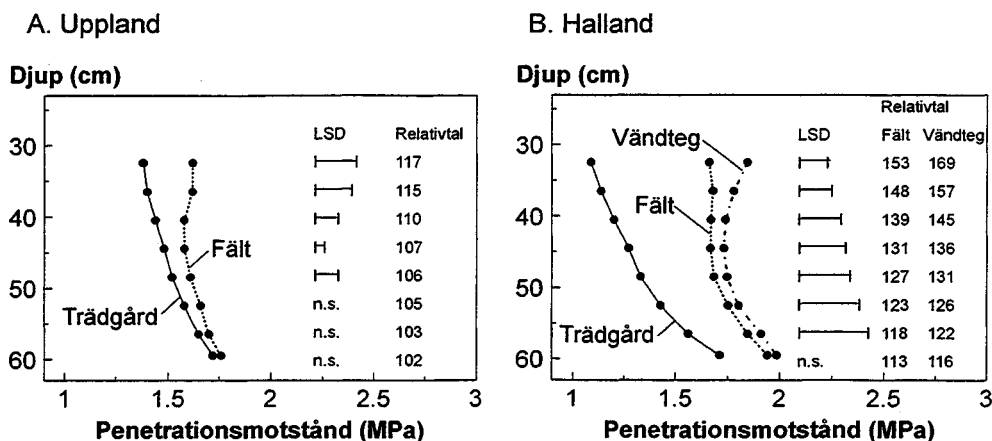


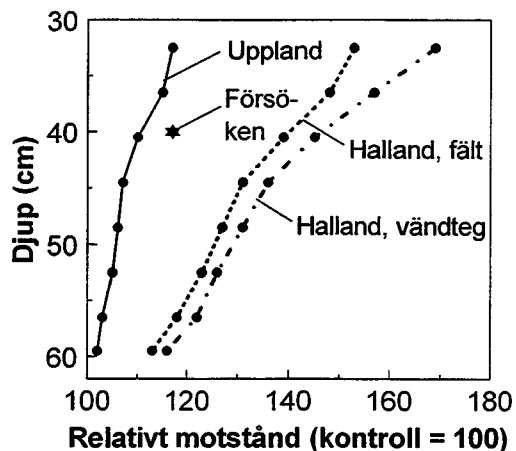
Fig. 46. Genomsnittligt penetrationsmotstånd i alven uppmätt med penetrometer på praktiskt brukade fält i Uppland och Halland och på intilliggande jämförelseytor som aldrig överfarits av tunga maskiner (i regel trädgårdar). Till höger i varje diagram anges det relativa motståndet på fälten och på vändtegarna (jämförelseytor = 100). Staplarna visar den minsta statistiskt signifikanta skillnaden (n.s. = ej signifikant). A. Resultat från 8 platser i Uppland år 1991 på jordar med en lerhalt i alven över 30 %. B. Resultat från 17 platser i Halland åren 1993-95 på jordar med lerhalt i alven mellan 2 och 45 %.

tunga bet- och potatisupptagare, transportvagnar och gödseltunnor. I Uppland låg alla mätplatserna på lerjordar, i Halland låg hälften på lerjordar och hälften på lättare jordar. I båda fallen ansågs mätplatserna representativa för sina respektive områden.

I bägge områdena var penetrationsmotståndet signifikant högre på fälten än på jämförelseytor (Fig. 46). I Halland erhöles nästan samma resultat på lerjordar och på lättare jordar och därför redovisas endast de genomsnittliga resultaten. Penetrationsmotståndet var högre på vändtegarna än på fältens inre delar men denna skillnad var statistiskt signifikant endast längst upp. Fig. 47 visar den relativa ökningen av penetrationsmotståndet både i Uppland och Halland. I fälten i Uppland var ökningen 17 % i det översta av de mätta lagren och 2 % i det nedersta, i Halland var motsvarande värden 53 % resp. 13 %.

På 40 cm djup var penetrationsmotståndet på de uppländska fälten ca 10 % högre än på jämförelseytor. I Halland var motsvarande värde 40 % på de inre delarna av fälten och 45 % på vändtegarna. Den 4 gånger större ökningen i Halland än i Uppland förklaras främst av att den sammanlagda körningen med maskiner och fordon med axelbelastningar på 5 ton och däröver fram till mättillfället uppskattningsvis varit nästan 4 gånger så omfattande. I båda områdena var ökningen av penetrationsmotståndet ungefär så stor som man kunde

Fig. 47. Relativvärden för penetrationsmotståndet i alven (obefarna jämförelseytor = 100) på fälten på 8 platser i Uppland 1991 och på fälten och vändtegar på 17 platser i Halland 1993-1995. Genomsnittlig ökning av penetrationsmotståndet på 40 cm djup i försöken med hög axelbelastning (Tabell 2) visas också.



förvänta, när man jämförde med de försöksresultat som presenterades i Tabell 2. Till någon del kan skillnaderna också bero på att klimatet är något fuktigare i Halland än i Uppland och att marken därför oftare är fuktig under fältarbetena samt på att tjälldjupet normalt är något mindre. Undersökningen är ett starkt stöd för att de resultat rörande alvpackningens omfattning som erhållits i försöken verkligen är tillämpbara i praktiken.

I undersökningen mättes penetrationsmotståndet tidigt på våren innan jordarna började torka upp, d.v.s. vid en tidpunkt då motståndet är lägre än vad det normalt är under vegetationsperioden. På fälten i båda områdena låg det i genomsnitt över det värde på 1,5 MPa, som i litteraturen anges som delvis begränsande för grödornas rotutveckling (Boone m.fl., 1994). Detta betyder att penetrationsmotståndet i allmänhet begränsar rotutvecklingen i alven mer eller mindre starkt under stora delar av vegetationsperioden i bägge områdena.

I försöken (se kapitel 5.5) orsakade fyra överfarter av fordon med en axelbelastning av 10 ton en bestående (troligen nästan permanent) ökning av penetrationsmotståndet på 40 cm djup med 17 % (Tabell 2) och en sänkning av avkastningen med 2,5 % (Fig. 34). Såväl ökningen av penetrationsmotståndet som sänkningen av avkastningen var ungefär proportionella mot körintensiteten (Håkansson & Reeder, 1994). Dessa resultat möjliggör en ungefärlig skattning av den genomsnittliga avkastningssänkningen p.g.a. alvpackning på de halländska och uppländska fälten.

På fälten i Halland hade penetrationsmotståndet på 40 cm djup ökat 2,4 gånger mer än i försöken (40 resp. 17 %). Antar man att avkastningssänkningen i Halland också är 2,4 gånger så stor som i försöken, så skulle denna vid mättillfället vara hela 6 %. Motsvarande siffra för Uppland är 1,5 %. Denna skattning är naturligtvis behäftad med viss osäkerhet (sänkningen kan vara både större och mindre) men den är den bästa som för närvarande kan göras. Då dessutom matjordspackningen i normala fall tycks svara för en avkastningssänkning om 5 à 10 % blir den

sammanlagda skördesänkningen i Halland av storleksordningen 15 %.

I områden av landet, där maskiner med höga axelbelastningar använts mindre ofta, är alvpackningseffekterna naturligtvis mindre. Hela den ovan beräknade avkastningssänkningen p.g.a. alvpackning är heller inte permanent. Troligen ebbar en del av packningsverkningarna i alvens översta del ut inom något decennium, om man helt slutar att belasta jorden. Av den beräknade avkastningssänkningen i Halland på 6 % vid tiden för undersökningen beräknades 4 % orsakas av packning i alvens översta del och följaktligen inte vara permanent. Den resterande delen, eller 2 %, kan däremot antas vara helt permanent. Fortsätter man att köra som idag, så kommer den icke permanenta delen att bibehållas minst på nuvarande nivå. Den permanenta delen kan däremot beräknas öka i en takt av 1 procentenhet på 15 år. Om maskinernas axelbelastning ökar ytterligare, så ökar den icke permanenta delen av avkastningssänkningen endast långsamt, medan den permanenta delen ökar i accelererad takt.

#### *9.1.2.2. Sammanfattande bedömning*

Mätningarna av penetrationsmotståndet på fälten i Uppland och Halland visar att körning med tunga maskiner i praktiken verkligen packar alven, så som försöksresultat och teoretiska beräkningar gett anledning befara. Detta betyder att många jordar i landet redan fått sin produktionsförmåga långsiktigt sänkt p.g.a. alvpackning. Med nuvarande maskinutrustning ökar av allt att döma både den temporära och den permanenta delen av alvpackningen tämligen snabbt, och om maskinernas axelbelastning ökar ytterligare, så ökar särskilt den permanenta delen ännu snabbare. Alvpackningen måste därför bedömas som ett allvarligt hot mot våra jordars långsiktiga produktionsförmåga.

När alvpackning genom tunga maskiner nått en viss omfattning, så kan dess verkningar mildras genom alvluckring men av allt att döma inte utplånas helt (faktaruta 7). Alvluckring kan därför endast sätta en övre gräns för alvpackningens negativa verkningar. Den är dessutom kostnadskrävande, har vanligen kortvarig verkan och gör ibland mer skada än nytta. Eftersom alvpackningen därtill troligen orsakar betydande miljömässiga problem, är det viktigt att söka förhindra att den ökar ytterligare.

## **9.2. Behov av belastningsgränser**

I detta avsnitt diskuteras behovet av gränser för den mekaniska belastningen av jordarna och de ansträngningar som hittills gjorts på olika håll i världen att etablera sådana. Enligt Håkansson & Medvedev (1995) kan syftena med belastningsgränser vara (1) att förbättra effektiviteten och resursutnyttjandet i växtodlingen på kort sikt, (2) att vidmakthålla jordarnas långsiktiga produktionsförmåga och (3) att minska växtodlingens negativa effekter på den yttre miljön.

Det ligger normalt i de enskilda jordbrukarnas eget intresse att använda ett produktionssystem i växtodlingen som är så effektivt och resurssnålt som möjligt.



Att uppnå syfte (1) kan därför lämnas till jordbrukarna själva utan inblandning av samhället. Till sin hjälp behöver de emellertid ha tillgång till metoder och maskiner som gör detta möjligt. Att uppnå syftena (2) och (3) kan däremot ses som hela samhällets intresse och ansvar.

### *9.2.1. Effektivitet och resurshushållning i växtodlingen på kort sikt*

På kort sikt är det matjordspackningen som främst påverkar effektivitet och resurshushållning i odlingen. Denna påverkar inte bara grödornas avkastning, den påverkar också hur effektivt gödselmedel och andra insatsmedel kan utnyttjas, vilket behov man har att bearbeta jorden samt vilken energi som krävs för bearbetningarna. Den ökar därför kostnaderna och resursförbrukningen i växtproduktionen.

I försöken har packning av matjorden inte medfört efterverkningar på grödornas avkastning under längre tid än 5 år. Enligt den ovan formulerade principen bör packningsproblemen i matjorden därför i första hand hanteras av jordbrukarna själva. I kapitel 7 visades att det finns många metoder att minimera packningen eller dess skadliga verkningar och jordbrukarna bör använda alla de metoder som är ekonomiskt fördelaktiga. Matjordspackningen ökar emellertid också erosionen och flera andra miljöeffekter av växtodlingen. Man kan heller inte utesluta att den har hittills okända långsiktiga verkningar. Därför måste också samhället intressera sig för packningsproblemen i matjorden (kapitel 9.2.3).

### *9.2.2. Jordarnas långsiktiga produktionsförmåga*

När det gäller jordarnas långsiktiga produktionsförmåga är främst packningen i alven av intresse, medan packningen i matjorden är av mer indirekt betydelse, exempelvis genom att öka ytvattenavrinningen och jorderosionen. I ett land som Sverige, där jorderosionen är måttlig men där fältarbetena ofta utförs när marken är fuktig, kan alvpackningen genom körning med tunga maskiner anses vara det största fysikaliska hotet mot jordarnas långsiktiga produktionsförmåga. Därför är det nödvändigt att sätta gränser för den mekaniska belastningen av alven, åtminstone när jorden är fuktig. Eftersom effekterna sträcker sig långt utöver den tid, då nuvarande jordbrukare är verksamma, ligger detta främst inom samhällets ansvarsområde.

Gränserna bör i princip sättas lokalt med hänsyn till de enskilda jordarnas hållfasthet. Detta medför emellertid många problem, bl.a. därför att det kan kräva omfattande och tidsödande karteringar av jordarnas mekaniska egenskaper och med nuvarande utveckling av maskinstorlekarna är tiden knapp. Provisoriska gränser gemensamma för större regioner är därför nödvändiga. Ett ytterligare skäl för detta är att redan jordarna inom varje enskild gård ofta täcker in en betydande del av variationen inom en stor region.

### 9.2.3. Effekter på den yttre miljön

På vad sätt och hur mycket packningen inverkar på växtodlingens miljöeffekter varierar starkt från plats till plats beroende på naturliga förutsättningar och produktionssystem. Därför kan samhället inte ställa upp några generella belastningsgränser, som syftar till att begränsa odlingens miljöeffekter. I stället bör man ställa upp gränser för själva miljöstörningarna, exempelvis för kväveläckage, erosion och frigörelse av växthusgaser, och överlåta åt de enskilda jordbrukarna att vidta sådana åtgärder att man kan hålla sig inom gränserna. Kunskaperna om packningens inverkan på miljöstörningarna är emellertid fortfarande dåliga. Man kan dock anta att effekterna ofta är betydande och därför bör dessa underkastas omfattande forskning, för vilken hela samhället bör ta ansvaret.

### 9.2.4. Vad har gjorts hittills?

I det forna Sovjetunionen gjordes i slutet av 1980-talet ett försök att minska jordpackningen genom att etablera gränser för belastningen av jordarna. Då antogs en standard för maximala mekaniska belastningar på jordarna (Tabell 18) avsedd att användas vid nytillverkning av jordbruksmaskiner (Rusanov, 1994). Denna hade föregåtts av ett samordnat program för mätningar och fältförsök i olika delar av Sovjetunionen och i några andra östeuropeiska länder. Övre gränsen för ett hjuls eller bands marktryck sattes till 80-210 kPa och för det vertikala trycktillskottet på 50 cm djup till 25-50 kPa beroende på jordart, fuktighetstillstånd och årstid. I sådana fall då trycktillskottet på 50 cm djup inte skall överskrida den lägsta gränsen, 25 kPa, måste gränsen för axelbelastningen ibland sättas så lågt som 2,5 ton, om maskinerna inte utrustas med mycket extrema lågtrycksdäck (Grečenko, 1989; Nikiforov m.fl., 1993).

Medvedev & Cybulko (1995) föreslog gränsvärden för Ukraina på basis av

Tabell 18. Sovjetisk standard för begränsning av den mekaniska belastningen av jordarna. Gränser är satta dels för hjulens marktryck dels för det vertikala trycktillskottet på 50 cm djup vid de markförhållanden, under vilka en maskin är avsedd att användas (Efter Rusanov, 1994)

Markens vatten- innehåll (% av (fältkapaciteten)	Marktryck (kPa)		Vertikalt trycktillskott på 50 cm djup (kPa)	
	Vår	Sommar	Vår	Sommar
>90	80	100	25	30
70-90	100	120	25	30
60-70	120	140	30	35
50-60	150	180	35	45
<50	180	210	35	50

delvis andra kriterier än dem som låg bakom den sovjetiska standarden. Bl.a. syftade man till att ingen som helst packning skulle få ske på djup >30 cm. Man föreslog olika marktrycksgränser beroende på jordens fuktighet. För den fuktigaste jorden satte man marktrycksgränsen så lågt som 30 kPa och ansåg sig då inte behöva föreslå någon axelbelastningsgräns.

På basis av omfattande försök i f.d. Östtyskland rekommenderade Petelkau (1986, 1992) att man begränsar belastningen per hjul till 1.5-2 ton för att undvika oacceptabel alvpackning. Han rekommenderade också att marktrycket begränsas till 50-200 kPa beroende på jordart och fuktighet för att undvika för stark matjordspackning.

I Sverige rekommenderade Håkansson & Danfors (1981) en begränsning av axelbelastningen till 6 ton på enkel axel och 8-10 ton på boggie för att förhindra permanenta packningsskador på djup större än 40 cm. De undersökningar av läget i praktiken som presenterades i kapitel 9.1.2.1 visar att dessa gränser knappast var för lågt satta, snarare tvärtom.

I princip skulle det vara bäst att som i den sovjetiska standarden sätta gränser för det vertikala trycktillskottet på olika djup i alven och att välja dessa med hänsyn dels till de aktuella jordarnas bärförmåga dels till de följder det får om denna överskrids. För detta finns emellertid ännu inte tillräckligt detaljerade kunskaper varken om alvens bärförmåga eller om alvpackningens konsekvenser på enskilda jordar. Det finns dock tillräckliga kunskaper för att fastslå att belastningsgränser måste etableras snarast, eftersom maskinerna på många håll nått sådan storlek att åtgärder är akuta. Helst bör gränserna utarbetas i internationellt samarbete, eftersom acceptansen då underlättas.

Då lokalt anpassade gränsvärden kan utarbetas först efter fortsatta noggranna studier, måste man tills vidare nöja sig med provisoriska och mera schablonartade gränser. Begränsning av axelbelastningen synes därvid vara det mest realistiska. Då begränsning av axelbelastningen påverkar grundkonstruktionen av tyngre maskiner och fordon, har det stor ekonomisk betydelse var gränsen sätts. För svenskt vidkommande bör man hålla fast vid de tidigare rekommenderade gränserna på 6 ton på enkel axel och 10 ton på boggie. Gränsvärdet kan emellertid modifieras något beroende på marktrycket och markens fuktighet (kapitel 7.3.5). Längre fram blir det förhoppningsvis möjligt att på grundval av lokala undersökningar utarbeta permanenta gränser, som är anpassade till klimatet och till de enskilda jordarnas bärförmåga. På lång sikt kan man hoppas på nya maskinsystem för jordbrukets fältarbeten, vilka kombinerar hög kapacitet med låg belastning av alven.



## Referenser

- Alakukku, L., 1997. Long-term soil compaction due to high axle load traffic. Agricultural Research Centre of Finland, Jokioinen, 130 s., (Doktorsavhandling).
- Andersson, S. & Håkansson, I., 1966. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XVI. Strukturodynamiken i matjorden. En fältstudie. Grundförbättring 19:191-228.
- Andersson, S. & Wiklert, P., 1970. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XX. Grundförbättring 23:3-76
- Arvidsson, J., 1997a. Soil compaction in agriculture - from soil stress to plant stress. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Agraria 41, 150 s. (Doktorsavhandling).
- Arvidsson, J. (Redaktör), 1997b. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1996. SLU, Uppsala, Rapporter från Jordbearbetningsavdelningen, Nr. 91, s. 40-41.
- Arvidsson, J., 1997c. Tidig sådd - ett system för reducerad bearbetning vid vårsådd. Slutrapport för fältförsök 1992-1996. SLU, Uppsala, Rapporter från Jordbearbetningsavdelningen, Nr. 92, 45 s.
- Arvidsson, J., 1998. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1997. SLU, Uppsala, Rapporter från Jordbearbetningsavdelningen, Nr. 93, s. 37.
- Arvidsson, J. & Håkansson, I. 1991. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. Soil Tillage Res. 20, 319-332.
- Arvidsson, J. & Håkansson, I. 1994. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. Soil Tillage Res. 39:175-197
- Arvidsson, J., Gunnarsson, S., Hammarström, L., Håkansson, I., Rydberg, T. & Stenberg, M., 1992. 1991 års jordbearbetningsförsök. SLU, Uppsala, Rapporter från Jordbearbetningsavdelningen, Nr. 81, 58 s.
- Bondarev, A.G., Medvedev, V.V. & Rusanov, V.A., 1990. Soil compaction due to agricultural machines: the state of the problem and ways to solve it. Problems of Soil Science, Soviet Pedologists to the XIVth Int. Congr. Of Soil Sci. Moscow, Nauka, 23-29.
- Boone, F., Vermeulen, G.D. & Kroesbergen, B., 1994. The effect of mechanical impedance and soil aeration as affected by surface loading on the growth of peas. Soil Tillage Res. 32:237-251.
- Boström, U., 1986. The effect of soil compaction on earthworms (*Lumbricidae*) in a heavy clay soil. Swedish J. agric. Res. 16:137-141.
- Comia, R., Stenberg, M., Nelson, P., Rydberg, T. & Håkansson, I., 1994. Soil and crop responses to different tillage systems. Soil Tillage Res. 29:335-355.
- Danfors, B., 1974. Packning i alven. Jordbrukstekniska Institutet, Uppsala, Specialmeddelande S 24, 91 s.
- Danfors, B., 1994. Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. Soil Tillage Res. 29:135-144.
- Edling, P. & Fergedal, L., 1972. Modellförsök med jordpackning. SLU, Uppsala. Rapporter från Jordbearbetningsavdelningen, Nr. 31, 71 s.
- Eriksson, J., 1976. Influence of extremely heavy traffic on clay soil. Grundförbättring 27:33-51.
- Eriksson, J., Håkansson, I. & Danfors, B., 1974. Jordpackning - markstruktur - gröda. Jordbrukstekniska Institutet, Uppsala, Meddelande 354, 82 s.
- Etana, A., 1995. Compaction effects of mechanical stress on some Swedish arable soils. Swedish Univ. Agric. Sci., Dept. Soil Sci., Reports and Dissertations 24, 111 s. (Doktorsavhandling.)

- Etana, A., Håkansson, I., Zagal, E. & Bucas, S., 1999. Effects of tillage depth on organic carbon content and physical properties in five Swedish soils. *Soil Tillage Res.* 52:129-139.
- Grath, T. 1996. Effects of agricultural machinery traffic on pea growth and penetration resistance in the subsoil. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Agraria* 8, 145 sid. (Doktorsavhandling.)
- Grečenko, A., 1989. Some engineering aspects of preventing excessive soil compaction. 4<sup>th</sup> European Conf. of Int. Soc. for Terrain-Vehicle Systems, IMAG, Wageningen, The Netherlands, 62-68.
- Gunjal, K., Lavoie, G. & Raghavan, G.S.V., 1987. Economics of soil compaction due to machinery traffic and implications for machinery selection. *Canadian J. Agric. Economics* 35:591-603.
- Gupta, S.C. & Raper, R.L., 1994. Prediction of soil compaction under vehicles. I: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Red.), *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam, 71-90.
- Hansen, S., & Bakken, L.R., 1993. N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> concentrations in soil air influenced by organic and inorganic fertilizers and soil compaction. *Norwegian J. Agric. Sci.* 7:1-10.
- Hansen, S., Maehlum, J.E. & Bakken, L.R., 1993. N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic. *Soil Biol. Biochem.* 25:621-630.
- Horton, R., Ankeny, M.D. & Allmaras, R.R., 1994. Effects of compaction on soil hydraulic properties. I: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Red.), *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam, 141-165.
- Håkansson, I., 1966. Försök med olika packningsgrader i matjorden och alvens översta del. *Grundförbättring* 19:281-332.
- Håkansson, I., 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Res.* 16:105-120.
- Håkansson, I. & Danfors, B., 1981. Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. *Int. Soc. for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS, Hanover, NH, USA, Proc. of 7<sup>th</sup> Int. Conf.*, 16-20 Aug. 1981, Calgary, Alb. Canada, 239-253.
- Håkansson, I. & Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res.* 53:71-85.
- Håkansson, I. & Medvedev, V.W., 1995. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. *Soil Tillage Res.* 35:85-97.
- Håkansson, I. & Reeder, R.C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load - extent, persistence and crop response. *Soil Tillage Res.* 29, 277-304.
- Håkansson, I., Henriksson, L. & Gustafsson, L., 1985. Experiments on reduced compaction of heavy clay soils and sandy soils in Sweden. *Proc. Int. Conf. on Soil Dynamics*, 17-19 June, Auburn Univ., Auburn, AL, USA, 995-1009.
- Håkansson, I., Voorhees, W.B. & Riley, H., 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Tillage Res.* 11:239-282.
- Håkansson, I., McAfee, M & Gunnarsson, S., 1990. Verkan av körning med traktor och vagn vid vallskörd. Resultat från 24 försöksplatser. SLU, Uppsala, Rapport från Jordbearbetningsavdelningen, Nr. 78, 41 s.
- Håkansson, I., Grath, T. & Olsen, H.J. 1996. Influence of machinery traffic in Swedish farm fields on penetration resistance in the subsoil. *Swedish J. agric. Res.* 26:181-187.
- Jakobsen, B.F. & Greacen, E.L., 1985. Compaction of sandy forest soils by forwarder operations. *Soil Tillage Res.* 5:55-70.

- Kuipers, H. & van de Zande, J.C., 1994. Quantification of traffic systems in crop production. I: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Red.), *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam, 417-445.
- Lebert, M., 1992. Mechanical strength properties of dry restored loess soils for agricultural use in western German brown coal mines. *Proc. of Int. Conf. on Soil Compaction and Soil Management*, 8-12 June, Estonian Res. Inst. of Agriculture and Land Improvement, Tallinn, 95-104.
- Leinweber, P. & Menning, P., 1992. Character krumennaher Verdichtungs-zonen in Ackerböden auf lehmigen Moränestandorten in Mecklenburg. *Z. Kulturtech. Landentwicl.* 33:100-107.
- Lindstrom, M.J. & Voorhees, W.B., 1994. Responses of temperate crops in North America to soil compaction. I: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Red.), *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam, 265-286.
- Lindström, J., 1990. Methods for measurement of soil aeration. Swedish Univ. Agric. Sci., Dept. Soil Sci., Reports and Dissertations 5, 161 s. (Doktorsavhandling.)
- Lipiec, J. & Stepniewski, W., 1993. Effects of soil compaction on uptake and losses of nutrients, with emphasis on nitrogen. *Proc. of ISTRO Workshop "Soil Compaction and the Environment"*, 25 Aug. 1993, Melitopol, Ukraine, 15-20.
- Ljungars, A., 1977. Olika faktorerers betydelse för traktorernas jordpackningsverkan. *Mätningar 1974-1976. SLU, Uppsala. Rapporter från Jordbearbetningsavdelningen*, Nr. 52, 43 s.
- McAfee Graham, M., 1989. The effects of agricultural practices on soil aeration. Swedish Univ. Agric. Sci., Dept. Soil Sci., Reports and Dissertations 1, 126 s. (Doktorsavhandling.)
- Medvedev, V.V. & Cybulko, W.G., 1995. Soil criteria for assessing the maximum permissible ground pressure of agricultural vehicles on Chernozem soils. *Soil Tillage Res.* 36:153-164.
- Medvedev, V.V., Sloboduk, P.I. & Paschenko, V.F., 1993. The organization of machine-tractor units moving and its effect on the soil compaction. *Proc. Int. Conf. Protection of Soil Environment by Avoidance of Compaction and Proper Soil Tillage*, 23-27 Aug., Melitopol Farm Mechanization Institute, Melitopol, Ukraine, Vol 1:137-138.
- Mosier, A., Schimel, D., Valentine, D., Bronson, K. & Parton, W., 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature* 350:330-332.
- Nikiforov, A.N., Rousanov, V.A., Bondarev, A.G. & Medvedev, V.V., 1993. Efficiency of application of standards regulating permissible pressure on soil by field technics. *Proc. of ISTRO Workshop "Soil Compaction and the Environment"*, 25 Aug. 1993, Melitopol, Ukraine, 41-46.
- Oskoui, K.E. & Voorhees, W.B., 1991. Economic consequences of soil compaction. *Transactions of the ASAE* 34:2317-2323.
- Parsons, S.D., Griffith, D.R. & Doster, D.H., 1984. Equipment wheel spacing availability and adaptatios for ridge-planted corn and soybeans. *A.S.A.E. Paper* 84-1014. St. Joseph, MI, U.S.A.
- Petelkau, H., 1984. Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenertrag sowie Massnahmen zu ihrer Minderung. *Tag.,Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR* 227:25-34.
- Petelkau, H., 1986. Grenzparameter für die Bodenbelastung beim Einsatz von Traktoren und Landmaschinen aus der Sicht der Bodenfruchtbarkeit. *Tag.,Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR* 250:25-36.

- Petelkau, H., 1992. Soil protection against mechanical overloading by technological measures and field dimensioning. Proc. of Int. Conf. on Soil Compaction and Soil Management, 8-12 June, Estonian Res. Inst. of Agriculture and Land Improvement, Tallinn, s. 58-62.
- Petelkau, H., Gätke, C.R., Dannowski, M., Seidel, K. & Augustin, J., 1988. Bodenphysikalische Grundlagen für die Steuerung der Grundbodenbearbeitung. Tag.,Ber. "Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit und der Erträge durch wissenschaftlichen Fortschritt", Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit, Müncheberg, Deutschland, 362-378.
- Rusanov, V.A., 1994. USSR standards for agricultural mobile machinery: permissible influences on soils and methods to estimate contact pressure and stress at a depth of 0.5 m. Soil Tillage Res. 29:211-214.
- Rydberg, T., 1992. Ploughless tillage in Sweden. Results and experiences from 15 years of field trials. Soil Tillage Res. 22:253-264.
- Schulte-Karring, H. & Haubold-Rosar, M., 1993. Subsoiling and deep fertilizing with new technique as a measure of soil conservation in agriculture, viticulture and forestry. Soil Technology 6:225-237.
- Soane, B.D., 1985. Traction and transport systems as related to cropping systems. Proc. Int. Conf. on Soil Dynamics, 17-19 June, Auburn Univ., Auburn, AL, USA, 863-935.
- Stepniewski, W., Gliński, J. & Ball, B.C., 1994. Effects of compaction on soil aeration properties. I: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Red.), Soil Compaction in Crop Production, Elsevier, Amsterdam, 167-189.
- Söhne, W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agricultural Engineering, May 1958, 276-281, 290.
- Taylor, H.M., Roberson, G.M. & Parker Jr., J.J., 1966. Soil strength - root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. Soil Sci. 102:18-22.
- Tijink, F.G.J., Dool, H. & Vermeulen, G.D., 1993. Towards management of soil compaction; technical and economical feasibility of low ground pressure. Proc. of ISTRO Workshop "Soil Compaction and the Environment", 25 Aug. 1993, Melitopol, Ukraine, 35-43..
- Trautner, A. & Arvidsson, J., 2000a. Mätning av marktryck under bandtraktor med gummi-band. I Arvidsson, J. (red), Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1999. SLU, Uppsala, Rapporter från Jordbearbetningsavdelningen, Nr. 98, s. 37-38.
- Trautner, A. & Arvidsson, J., 2000b. Subsoil compaction caused by machinery traffic at different soil water contents. Proc. of 15<sup>th</sup> Int. Conf. of ISTRO, Fort Worth, TX, USA. (In press.)
- Wiklert, P., 1961. Om sambandet mellan markstruktur, rotutveckling och upptorkningsförlopp. Grundförbättring 14, 221-239.
- Voorhees, W.B., & Lindstrom, M.J., 1984. Long-term effect of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:152-156.
- Voorhees, W.B., Young, R.A. & Lyles, L., 1979. Wheel traffic considerations in erosion research. Trans. A.S.A.E., 22:786-790.
- Young, R.A. & Voorhees, W.B., 1982. Soil erosion and runoff from planting to canopy development as influenced by tractor wheel-traffic. Transactions of the ASAE 25:708-712.



## Sakregister

- Aggregatstruktur 27, 28, 37, 64, 87  
Anaeroba processer (se Syretillgång)  
Antal överfarter 10, 23-24, 27, 31-33, 35, 69-70, 95-96, 108  
Alvluckring 40, 87, 112  
Avkastningseffekter av packning  
  ettåriga effekter i matjorden 52-61, 91, 95-96, 100-101, 104-105  
  efterverkningar i matjorden 61-65, 87, 91, 97-98, 101-103, 104-105, 108  
  i oplöjd jord 65-69  
  i alven 69-71, 99-100, 103-105  
  effekter av körning i vall 72-73, 100  
Axelbelastning  
  effekter på tryckfördelning och packningsdjup 18-20, 33-37, 44, 51-52, 71  
  gränsvärden 84-85, 109, 114-115  
  reducerat värde 13, 99  
Bandfordon 20-21, 87, 90, 92  
Belastningsgränser 84, 112-115  
Biologisk aktivitet i marken 48, 78-80  
Boggie 20, 104, 115  
Breda däck (se Lågtrycksdäck)  
Controlled traffic 88-89  
Daggmaskar 37, 78-79  
Denitrifikation 64, 79  
Diffusionskoefficient 45  
Djupbearbetning (se Alvluckring)  
Djupförändringar p.g.a. packning  
  i alven 35-37  
  i matjorden 27-30, 42, 65  
Dragkraftsbehov 105-106  
Dubbelmontage 8-10, 20, 30, 32, 43, 67-68, 84, 85, 86, 91, 101, 106  
Dränering 43-44, 82, 88  
  Däck 9, 13, 15-19, 30-33, 63, 72-73, 77-78, 84-86, 101-104, 106, 108, 114  
Efterverkningar (se Avkastningseffekter)  
Enkelkornstruktur 28  
Erosion 75-76, 89, 113-114  
Fastliggande spårssystem 88-89  
Fast substans i marken 28, 42  
Fosfor (se Växtnäring)  
Framtida maskinsystem 89-92  
Frostskador, effekter av packning 48  
Fyrhjulsdraft 84  
Fårhjulet på plöjningstraktorn 85, 99, 108  
Fältvägar 88  
Förlös traktor 90, 92  
Förkonsolideringstryck 27, 85  
Gantry 90  
Gasutbyte i marken 43-46, 79  
Genomsläpplighet, luft 45, 79  
Genomsläpplighet, vatten 43-44, 75  
Grova porer, kontinuitet och stabilitet 41, 44, 46, 66-67, 87  
Grova porer, påverkan av packning 35-36, 41, 43, 52, 87  
Infiltration av vatten 43-44, 75-76, 89  
Jordartsklassifikation 26  
Jordarnas långsiktiga produktionsförmåga 51, 99, 112-113  
Jordartens betydelse  
  för belastningsgränser 114-115  
  för packningsbenägenhet 25, 29, 32-33  
  för packningseffekter i grödan 52-53, 55, 64, 67, 86-87, 97-98, 101-105  
  för packningens varaktighet 37-38, 62,  
Jordpackning, definition 24  
Kalium (se Växtnäring)  
Kalkning 83  
Kapillär ledningsförmåga 48, 59, 60  
Koldioxidhalt i markluften 45  
Koldioxidproduktion (se Växthusgaser)  
Kompaktdensitet 28  
Kompressionsindex 25

- Koncentrationsfaktor 18-19
- Kontakt rot-jord 46, 48, 59, 60
- Konsolidering 24
- Korrektionsfaktor f. marktryck och fuktighet  
(se Omräkningsfaktor)
- Krympning/svällning 56, 67
- Kvävefixering 80
- Kväveupptagning (se Växtnäring)
- Kväveutlakning (se Utlakning)
- Körintensitet 7-15, 38, 61-64, 70, 83, 87
- Körning i växande gröda (se Vall)
- Körskador på växterna 52, 72-73
- Körtidpunkt 82, 88-89, 102-103
- Lerhaltens betydelse (se Jordartens betydelse)
- Luckring (effekter av stark luckring) 42, 48, 59-60, 76, 96, 100-101
- Luftfylld porvolym, kritiskt värde 45-46, 58-59
- Lustgas (se Växthusgaser)
- Lågtrycksdäck 18-19, 63, 77-78, 84-85, 102, 104-106, 108, 114
- Markrörelser (se Djupförändringar)
- Markstruktur, definition 28
- Marktryck  
betydelse för  
avkastningen 63-64, 67-68, 84, 86, 91, 97, 99, 101-105  
dragkraften 105-106  
packningstillståndet, 11, 30-33  
gränsvärden 112-115  
tryck i hjuls anliggningsyta 15-17  
tryckfördelning, trycktillskott 16-21, 37  
tryck under band 20-21
- Maskinkapacitet 83, 89-90, 108, 115
- Maskinstorlekar, utveckling 22
- Materialitet 28, 42
- Matjordsdjup, förändringar under året (se Djupförändringar)
- Metan (se Växthusgaser)
- Mineralisering av växtnäringsämnen 48, 61, 80, 86
- Modeller för beräkning av packningseffekter 93-100
- Mätram för skrymdensitet m.m. 56
- Normalspänning 16
- Nuläge vad packningen beträffar 107-112
- Omräkningsfaktor f. tonkm-värden 9, 13, 97-99, 102-103
- Omräknade tonkm-värden, 13, 97-99, 101-103, 108
- Packning och luckring, definition 23-24
- Packningsbenägenhet 32
- Packningsgrad, definition, mätning 56
- Packningsgrad efter olika körningar eller bearbetningar 30-33, 84, 87, 94-96, 101
- Packningsgradsoptimum, inverkan av markfuktigheten 55, 57-60  
grödan 54-55, 58, 60  
kvävegödslingen 57-58  
mangantillståndet 57-58  
sorten 55
- Packningssituation i praktiken 107-112
- Penetrationsmotstånd, kritiska värden 44, 46-48, 58-59
- Penetrationsmotstånd, inverkan av packningsgraden 58-59
- Penetrationsmotstånd i alven 34, 70, 109-112
- Penetrometer 49
- Permanent packning i alven 38-39, 70, 84-85, 108-112
- Pionjärväxter 83
- Planläggning av körningarna 88
- Plöjning, luckringseffekter 27-29, 87
- Plöjning, tidpunkter 86
- Plöjningsfri odling (se Reducerad jordbearbetning)
- Plöjningstraktorns fårhjul 85, 99, 108
- Porositet, definition 28

- Porstorleksfördelning, effekter av packning 41-43  
 Portal 28, 42  
 Porvolym 28, 41-42  
 Reducerad jordbearbetning 65-68, 87  
 Reducerade tonkm-värden 13, 99, 103  
*Rhizobium*-bakterier 80  
 Ringtryck 15-17, 20, 29, 31-33, 63, 73, 81, 84-85, 104  
 Rotsjukdomar 48, 60, 79  
 Rottillväxt och rotdjup 40, 44-47, 68, 70, 71, 77, 82, 83, 111  
 Skjuvhållfasthet 16, 34  
 Skjuvspänning 16, 18  
 Skrymdensitet, definition 28  
 Skrymdensitet, optimal 52-53  
 Slirning 16, 18, 27, 32, 72-73, 98  
 Sockerbetskörd, exempel på körsador 36, 44, 101-103, 108, 109  
 Sovjetisk standard för belastning av jorden 114  
 Specifik volym 28, 42  
 Spårbildning 7, 98  
 Spårfördelning 10-12  
 Spårytans storlek 8-9  
 Spårssystem, fastliggande 88-89  
 Spänning 16  
 Standardpackning 31, 53, 56  
 Strukturstabilitet 28, 37, 39, 64, 66-68  
 Svällning/krympning 56, 67  
 Syretillgång i marken 44-47, 57-59, 64, 78-79  
 Såbäddens kvalitet 64-65, 89  
 Tidig sådd 77-78, 84, 86, 91  
 Tidpunkt för körning (se Körtidpunkter)  
 Tjäle 37-39, 61-62, 69  
 Tonkm-värden 9, 12-14, 38, 61-63, 65, 70, 72, 97-99, 101-103, 107-108  
 Tryckfördelning (se Marktryck)  
 Tryck i ett hjuls anliggningsyta (se Marktryck)  
 Trycktillskott (se Marktryck)  
 Utlakning av växtnäring 76-78, 86, 89, 114  
 Vall, körsador 9, 10, 72-73, 82, 88, 100  
 Varaktighet av packning i alven 34, 37-40, 69-71, 99, 110-114  
 Varaktighet av packning i matjorden, 37-38, 61-69, 87  
 Vattenbehov och vattenförbrukning för grödorna 71, 77, 82, 83  
 Vattenhalt, betydelse för packningen, 18-19, 24-27, 32-33, 63-64, 88, 97-98, 102-105, 114  
 Vattenhållande förmåga i jorden 41-42  
 Vingborr 49  
 Vinschning av redskapen 43-44, 78-79, 89-91  
 Volymvikt (se Skrymdensitet)  
 Värmeledningsförmåga 48,  
 Växthusgaser 79, 106, 114  
 Växtnäringsupptagning, packningens inverkan 59-60, 70, 77-78  
 Ytvatten 44, 75-76, 89, 113  
 Ångplog 89-90  
 Återpackningsbehov 8, 30-33, 52-61, 84, 86-87, 95-96, 100-101  
 Ältning 27  
 Ödometer 56  
 Överfarter, antal (se Antal överfarter)  
 Överfartsantal, betydelse för packningen 24, 27, 31-33, 35-36, 70, 108, 111