



SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET
UPPSALA

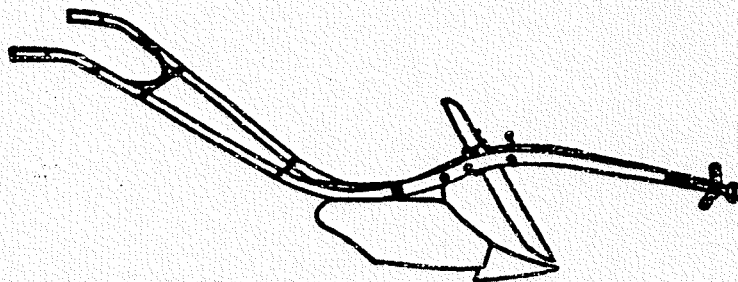
INSTITUTIONEN FÖR MARKVETENSKAP

RAPPORTER FRÅN _____ JORDBEARBETNINGS-AVDELNINGEN

Swedish University of Agricultural Sciences,
S-750 07 Uppsala

Department of Soil Sciences

Reports from the Division of Soil Management



Nr 82

1992

Johan Arvidsson, Inge Håkansson

EN MODELL FÖR ATT BERÄKNA JORD-
PACKNINGENS EFFEKTER PÅ GRÖDOR-
NAS AVKASTNING

*An empirical model for estimating the crop
yield losses caused by machinery induced soil
compaction*

ISSN 0348-0976

ISRN SLU-JB-R--82--SE

RAPPORTER från JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

- | Nr | År | | Nr | År | |
|----|------|---|----|------|---|
| 1 | 1968 | Inge Håkansson: Fysikalisk och kemisk beskrivning av markprofiler från 8 platser i Uppland och Västergötland. 128 s. | 35 | 1973 | Lennart Henriksson: Redskap för såbäddsbereidning. Undersökningsmetoder och inledande studier. 35 s. <i>Implements for seedbed preparation. Methods of investigation and preliminary studies.</i> |
| 2 | 1968 | Inge Håkansson: Några synpunkter på forskning och försöksverksamhet i jordbearbetning. 6 s. | 36 | 1973 | Inge Håkansson, József von Polgár: Försök åren 1969 och 1970 med en maskin för kombinerad såbäddsbereidning och sådd (Svenska Sockerfabriks AB:s värbruksmaskin). 26 s. <i>Experiments in the years 1969 and 1970 with a machine for combined seedbed preparation and sowing.</i> |
| 3 | 1968 | Nils M. Nilsson, Lennart Henriksson: Försök med harvning till vårsådd 1941-1959. 29 s. <i>Field trials with harrowing to spring-sown cereals 1941-1959.</i> | 37 | 1974 | Lennart Engström: Intervjuundersökning om extremt tidig sådd våren 1973. 33 s. <i>A sampling study into extremely early spring sowing in Sweden in 1973.</i> |
| 4 | 1968 | Åke Huhtapalo, Reijo Heinonen: Inledande försök med gödsel radmyllning kombinerat med sådd 1964-1966. 37 s. | 38 | 1974 | Lennart Henriksson: Studier av några jordbearbetningsredskaps arbetssätt och arbetsresultat. 144 s. <i>Studies of the mode of working and the working results of some soil tillage implements.</i> |
| 5 | 1968 | Lennart Henriksson: Orienterande försök med bearbetning till höstvet. 7 s. | 39 | 1975 | Tomas Rydberg: Plöjningsfri odling i Sverige. En intervjuundersökning 1974. 21 s. |
| 6 | 1968 | Lennart Henriksson: Försök med olika såtider. 7 s. | 40 | 1975 | Ulf Olsson: Redskap för såbäddsbereidning, arbetssätt och arbetsresultat. 55 s. <i>Implements for seedbed preparation; studies of the mode of working and the working results.</i> |
| 7 | 1968 | Reijo Heinonen: Berättelse över studieresa till Sovjet den 11-26 juli 1967. 13 s. | 41 | 1975 | Inge Håkansson: Rapport över studieresa till USA hösten 1974. 15 s. |
| 8 | 1968 | Inge Håkansson: Markfysikaliska studier i ett växtföljdsförsök på Ås den 15-16 juli 1966. 13 s. | 42 | 1976 | Inge Håkansson: Elva försök med alvluckring och djupplöjning i Syd- och Västsvet 1964-1975. 35 s. <i>Eleven Swedish field experiments with subsoiling and deep ploughing 1964-1975.</i> |
| 9 | 1968 | Bo Thehte: Luftpermeabilitetsmätning som markfysikalisk undersökningsmetod. 41 s. | 43 | 1976 | Peter Edling: Redskap och intensitet vid värbruk till potatis. Resultat av 11 försök i Norrland 1965-1969. 10 s. <i>Eleven experiments in northern Sweden with spring tillage for potatoes.</i> |
| 10 | 1968 | Reijo Heinonen, Åke Huhtapalo: Besvarade och obesvarade frågor om radmyllning av kvävegödsel. 13 s. | 44 | 1976 | Göran Kritz: Såbäddens utformning på vårsådda fält III. Stickprovundersökning 1969-72. Primärdata för 300 provplatser. 76 s. <i>Seed bed preparation and properties of the seed bed in spring sown fields in Sweden III. Sampling investigation 1969-72. Primary results from 300 investigated places.</i> |
| 11 | 1968 | Lennart Fergedal: Försök med jordpackning vid olika tidpunkter på våren. År 1967. 9 s. | 45 | 1976 | PROCEEDINGS of the 7th Conference of the International Soil Tillage Research Organization, ISTRO. |
| 12 | 1968 | Nils M. Nilsson, Lennart Henriksson: Alvluckringsförsök 1937-1963. 32 s. | 46 | 1976 | Inge Håkansson, József von Polgár: Modellförsök med såbäddens funktion. I. Såbädden som skydd mot avdunstning. 52 s. <i>Model experiments into the function of the seedbed. I. The seedbed as a protective layer against drought.</i> |
| 13 | 1968 | Reijo Heinonen: Tidig vårsådd. Växtfysiologiska och ekologiska synpunkter på aktuella tendenser i såbäddsbereidning och sådd av stråså. 19 s. | 47 | 1976 | Lars Gunnar Nilsson: Texturanalys och jordartsklassifikation. Rapport från ett NJF-symposium i Uppsala 1976-03-09. 26 s. |
| 14 | 1968 | Erik Jakobsson: Plöjningsförsök med olika tiltbredder och vändskiveformer. 10 s. | 48 | 1976 | Inge Håkansson: Olika gröddors känslighet för packningsgraden i matjorden. Två försök med vallväxter 1971-74. 17 s. <i>The sensitivity of different crops to the degree of compactness in the plough layer. Two field experiments with forage crops 1971-74.</i> |
| 15 | 1968 | Lennart Henriksson: Försök med grund plöjning. 9 s. | 49 | 1976 | Göran Kritz: Såbäddens utformning på vårsådda fält IV. Stickprovundersökning 1969-72. En översiktlig studie av några viktiga faktorer. 33 s. <i>Seed bed preparation and properties of the seed bed in spring sown fields in Sweden IV. Sampling investigation 1969-72. A general survey of some important factors.</i> |
| 16 | 1968 | Stig Ledin: Olika halmedbrukningsmetoders verkan på kvickrot och på några fröogräs. 21 s. | 50 | 1977 | Såbäddsbereidning och sådd. Uppsatser presenterade vid Lantbrukshögskolans försöksledarmöte 1977. |
| 17 | 1969 | Inge Håkansson, Börje Gillberg: Lufttrycket i traktordäcken under fältarbeten. En stickprovundersökning hösten 1968. 32 s. <i>Investigation into the inflation pressure of the tires of Swedish tractors engaged in field work.</i> | 51 | 1977 | Lennart Henriksson: Stubbearbetningsredskapens arbetsresultat med hänsyn till mark- och halmförhållandena. 32 s. <i>The results given by implements for stubble cleaning with regard to different soil- and straw conditions.</i> |
| 18 | 1969 | Göte Bertilsson: Studier över tryckets markpåverkan. 67 s. | 52 | 1977 | Arne Ljungars: Olika faktorerens betydelse för traktorernas jordpackningsverkan. Mätningar 1974-1976. 43 s. <i>Importance of different factors on soil compaction by tractors. Measurements in 1974-1976. 43 p.</i> |
| 19 | 1969 | Peter Edling, Nils M. Nilsson, Inge Håkansson: Sju skånska försök med alvluckring och djupplöjning 1964-68. 26 s. <i>Seven experiments with subsoiling and deep ploughing in Southwestern Sweden 1964-68.</i> | 53 | 1977 | Inge Håkansson & József von Polgár: Modellförsök med såbäddens funktion. II. Försök med skiktade och oskiktade såbäddar. 22 s. <i>Model experiments into the function of the seedbed. II. Experiments with stratified and unstratified seedbeds. 22 p.</i> |
| 20 | 1969 | Bengt Reimeröson, Gunnar Falk: Försök på Persbo gård 1968 med minskad jordpackning. 8 s. <i>A field experiment with reduced soil compaction on a clay soil.</i> | 54 | 1978 | Ulf Olsson: Harvens konstruktion och harvningens utförande - inverkan på bearbetningsresultatet. 28 s. <i>Influence of harrow construction and harrowing on the tillage result. 29 p.</i> |
| 21 | 1970 | Lennart Henriksson: Olika redskapstyper för stubbearbetning. Jämförelser av arbetssätt och arbetsresultat. 19 s. <i>Different types of implements for stubblecultivation. A study of working methods and working results.</i> | 55 | 1978 | Olle Wallbom & Kjell Wretler: Förekomsten av några viktiga växtskadegörare vid plöjningsfri odling. 29 s. <i>Occurrence of some important plant diseases on ploughless cereal cropping. 29 p.</i> |
| 22 | 1970 | Inge Håkansson, Lennart Fergedal: Försök med jordpackningens ackumulativa efterverkningar. Preliminär redogörelse. 21 s. <i>Experiments with the accumulative after-effects of soil compaction. Preliminary report.</i> | | | |
| 23 | 1971 | Göran Kritz, Inge Håkansson: Såbäddens utformning på vårsådda fält. Stickprovundersökning 1969-70. 43 s. <i>Investigation into seedbed preparation and properties of the seedbed on spring sown fields in Sweden, 1969-1970.</i> | | | |
| 24 | 1971 | Lennart Henriksson: Tilljämning av plogtiltan på hösten. Försök med höstharvning och tillsatsredskap till plogen. 68 s. | | | |
| 25 | 1971 | Ann Pettersson: Nya redskap för gödselplacering och sådd. 50 s. | | | |
| 26 | 1971 | Lennart Fergedal: Jordpackning med traktor vid olika tider för vårsådd. 140 s. | | | |
| 27 | 1971 | Göran Kritz: Jordbearbetningsforskning i Europa. Rapport från en studieresa. 16 s. | | | |
| 28 | 1972 | Helmut Frese: Zur Frage spezialisierter oder interdisziplinärer Forschung am Boden. 15 s. | | | |
| 29 | 1972 | Inge Håkansson, Sven Alvelid: Två försök i Kalmar län med halmedplöjning för att minska vinderosionen. 4 s. | | | |
| 30 | 1972 | Ann Pettersson, Sten Wikström: Inledande undersökningar om radmyllning till potatis. 50 s. | | | |
| 31 | 1972 | Peter Edling, Lennart Fergedal: Modellförsök med jordpackning 1968-69. 71 s. | | | |
| 32 | 1973 | Åke Huhtapalo, Ann Wikström, Sten Wikström: Försök med kombisåmaskiner 1971-72. 46 s. | | | |
| 33 | 1973 | Inge Håkansson: Tung körning vid skörd av slättervall. Tre försök på Rübäcksdalen. 1969-72. 20 s. <i>Effect of heavy machinery when harvesting ley crops. Three field experiments in northern Sweden 1969-72.</i> | | | |
| 34 | 1973 | Göran Kritz: Såbäddens utformning på vårsådda fält. Stickprovundersökning 1969-72. Maskinanvändningen på provplatserna. 76 s. | | | |

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för jordbearbetning

Rapporter från jordbearbetnings-
avdelningen. Nr 82, 1992
ISSN 0348-0976
ISRN SLU-JB-R--82--SE

Johan Arvidsson, Inge Håkansson

**EN MODELL FÖR ATT BERÄKNA JORDPACKNINGENS
EFFEKTER PÅ GRÖDORNAS AVKASTNING**

*AN EMPIRICAL MODEL FOR ESTIMATING THE CROP YIELD LOSSES
CAUSED BY MACHINERY INDUCED SOIL COMPACTION*

Vi vet mer om himlakropparnas rörelser än om jorden under våra fötter

Leonardo da Vinci, 1452-1519

EN MODELL FÖR ATT BERÄKNA JORDPACKNINGENS EFFEKTER PÅ GRÖDORNAS AVKASTNING

SUMMARY

An empirical model for estimating the crop yield losses caused by machinery induced soil compaction

An empirical model for estimating the crop yield losses caused by machinery induced soil compaction, and the value of different counter-measures, is presented. It is based on results of field trials carried out in Scandinavia, and predicts the effects of compaction when using a tillage system that includes mouldboard ploughing. The model is computerized and is aimed for use in advisory service at farm level. It predicts four categories of compaction effects:

1. Effects of recompaction after ploughing. It is assumed that a moderate recompaction of the plough layer is required to obtain an optimal "degree of compactness" for plant growth. The degree of compactness and its effect on the yield is estimated using a calculated wheel track distribution in the field.
2. Effects of plough layer compaction persisting after ploughing. The yield losses are estimated using the traffic intensity in Mg km ha^{-1} (i.e. product of the weight of machinery and the distance driven), the soil moisture content, the tyre inflation pressure and the clay content. Effects may persist up to five years.
3. Effects of subsoil compaction. The calculations are similar to those under point 2, but only vehicles with high axle load are considered and the effects are assumed to be more persistent.
4. Effects of traffic in ley crops. As for point 1, the wheel track distribution is calculated and yield losses are estimated with regard to several factors, such as weight of machinery and soil moisture content.

The model is described in English in greater detail in the following paper:

Arvidsson, J., Håkansson, I., 1991. A model for estimating the crop yield losses caused by soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 20, 319-332.

Innehållsförteckning

INTRODUKTION	3
Modellens bakgrund och syfte	
Grunddrag i modellen	
Beräkningsunderlag	
EFFEKTER AV ÅTERPACKNING EFTER PLÖJNING	4
Bakgrund	
Modellberäkningar	6
STRUKTURSKADOR I MATJORDEN SOM FINNS KVAR EFTER PLÖJNING	9
Bakgrund	
Modellberäkningar	10
BERÄKNINGAR AVSEENDE SKADOR AV PACKNING I ALVEN	11
Bakgrund	
Modellberäkningar	12
BERÄKNINGAR AVSEENDE SKADOR AV KÖRNING I VALL	13
Bakgrund	
Modellberäkningar	14
DISKUSSION	16
EXEMPEL	18
SAMMANFATTNING	22
REFERENSER	23

INTRODUKTION

Vid avdelningen för jordbearbetning, SLU, har utarbetats en modell för att beräkna skördesänkningar orsakade av jordpackning. Modellen har presenterats tidigare, både i Sverige och internationellt (Arvidsson & Håkansson, 1989, 1990, 1991). Denna rapport beskriver modellens uppbyggnad och teoretiska bakgrund. Dessutom ges några exempel på beräkningar som har gjorts med hjälp av modellen.

Modellens bakgrund och syfte

Den modell som beskrivs här bygger i första hand på resultat från de fältförsök avseende jordpackning som under årens lopp utförts vid avdelningen för jordbearbetning. Avsikten har varit, att så långt det är möjligt, överföra försöksresultaten till en sådan form att man kan beräkna packningens ekonomiska konsekvenser på ett enskilt jordbruksföretag. En jordbrukare ska på så sätt t.ex. kunna bedöma om det är lönsamt att investera i andra maskinsystem eller annan däcksutrustning. För att kunna utföra beräkningarna på ett smidigt sätt har samtidigt med modellen utvecklats ett dataprogram, avsett för rådgivning på gårdsnivå. Dataprogrammet finns tillgängligt för enskilda användare och kan beställas från jordbearbetningsavdelningen. Modellen kan också fungera som ett diskussionsunderlag och som ett pedagogiskt hjälpmedel.

Grunddrag i modellen

Den skördeförlust packningen orsakar beräknas som en addition av olika delkomponenters inverkan på skörden. Modellen innehåller fyra sådana delar, vilka kommer att behandlas i var sitt kapitel i denna rapport:

1. Effekter på årets gröda av återpackning i matjorden efter plöjning.
2. Strukturskador i matjorden som finns kvar efter det att fältet plöjts.
3. Strukturskador av packning i alven.
4. Effekter av körning i växande gröda, främst i vall.

Beräkningsunderlag

Det underlag som används för modellens beräkningar är följande:

- Basuppgifter om areal, gröda, skördevärde och lerhalt.
- Uppgifter om enskilda arbetsmoment; arbetsbredd, omfattning av tomkörning, vikt på maskiner, marktryck och däcksbredd samt fuktighetsförhållanden vid körning. Markfuktigheten klassas enligt en skala 1-5, där 1 betyder mycket torrt och 5 betyder mycket vått.

Resultatet presenteras i första hand som den skördeförlust som orsakas av packningen. Uppgifter fås också bl.a. om antal överfarter på olika delar av fältet och kör mängder vid olika fältarbeten.

EFFEKTER AV ÅTERPACKNING EFTER PLÖJNING

En gröda växer sämre i starkt packad jord. Det har också visat sig att jorden efter plöjning normalt är för lucker för att ge maximal skörd, och därför kräver en måttlig återpackning. Den första delen av modellen behandlar hur återpackning efter plöjning påverkar årets gröda. De arbetsoperationer som kommer i fråga är alltså i första hand körning vid såbäddsberedning och sådd, ibland också t.ex. stallgödselspridning i samband med sådd.

Bakgrund

Begreppet packningsgrad

Det är mycket svårt att ge ett direkt mått på markens struktur och om den skadats av packning. Markstruktur brukar ofta karakteriseras med hjälp av t.ex. genomsläpplighet för luft och vatten, porstorleksfördelning, torr skrymdensitet, aggregatstabilitet eller penetrationsmotstånd. Det är dock svårt att med dessa metoder göra en direkt jämförelse mellan olika jordar. En viss densitet hos jorden, t.ex. $1,4 \text{ g/cm}^3$, kan på en mullrik lera betyda att den är kraftigt packad, medan en sandjord med denna densitet är ganska lucker.

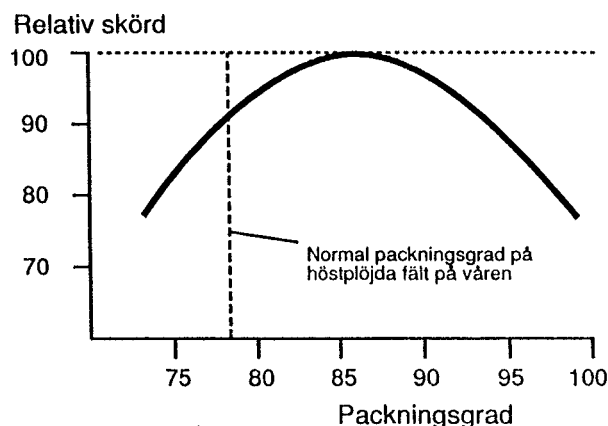
En metod för att mera direkt jämföra packningstillstånd hos olika jordar har utarbetats vid avdelningen för jordbearbetning. Denna metod innebär att torra skrymdensiteten bestäms för en jord i fält. Ett prov av jorden utsätts sedan för en kraftig packning i en press, 200 kPa (2 kp/cm^2) under ca en vecka. Densiteten i ursprungstillståndet dividerat med densiteten hos den hårt packade jorden benämns packningsgrad, och uttrycks i procent (Håkansson, 1989). En packningsgrad på 100 innebär alltså att jorden i fält är lika packad som referenstillståndet.

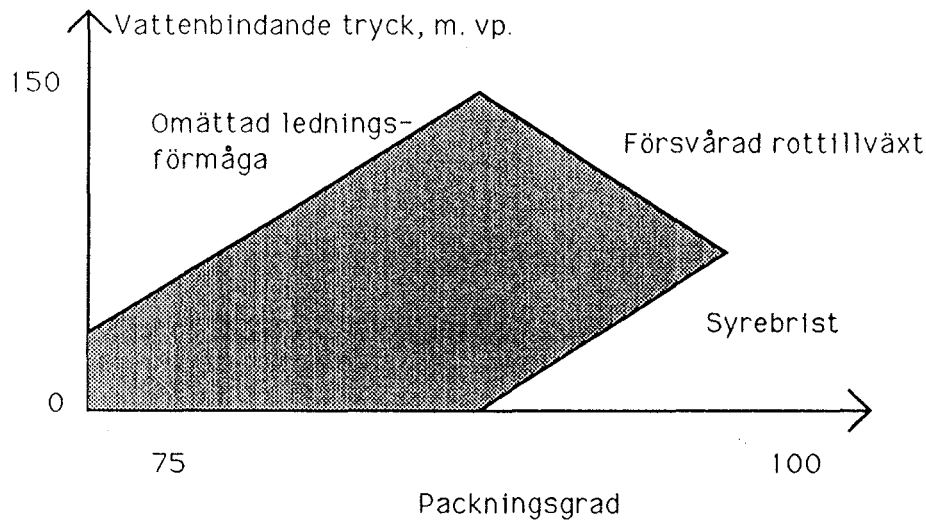
Packningsgradens inverkan på skörden

Ett stort antal fältförsök har utförts där skörden relaterats till packningsgraden i matjorden. Dessa försök har utförts på plöjda fält. Det har sedan varit möjligt att uppskatta optimal packningsgrad för t.ex. korn (figur 1).

Den optimala packningsgraden varierar beroende på väderleken, och är högst under torra år, medan det under regniga år inte finns behov av någon återpackning. Optimum skiljer sig också mellan olika grödor. Korn, sockerbetor och vete hade störst packningsbehov av de grödor som provades i försöken (optimum ungefär vid packningsgrad 87), medan potatis växte bättre ju luckrare jorden var. Havre, råg, ärtor och oljeväxter intog en mellanställning (optimum ca 84).

Figur 1. Principiell bild över packningsgradens inverkan på skörden (Håkansson, 1989).





Figur 2. Schematisk bild över de viktigaste skördebegränsande faktorerna vid varierande packningsgrad och vattenbindande tryck. Det skuggade området ger goda betingelser för tillväxt.

Växternas reaktion på packningsgraden har varit närmast oberoende av jordart i de försök som gjorts på mineraljordar. På mulljordar finns ännu inte tillräckligt stort försöksunderlag för att ange något generellt optimum för packningsgraden.

Stark packning av jorden ger skördesänkning, kanske främst genom en försämrad rotutveckling och risk för syrebrist. Man kan dock fråga sig varför även en låg packningsgrad kan ge en skördesänkning. En trolig förklaring är att en hög andel grova porer gör att den omättade ledningsförmågan för vatten blir låg. Därmed försämras också transporten av näringsämnen (det är t.ex. ofta möjligt att se att grödan är grönare på en packad vändteg än på resten av fältet). Anslutningen mellan rötter och jord kan också bli sämre i en lucker jord. En principiell bild över packningsgradens betydelse vid torra och våta förhållanden ges i figur 2.

Körningens inverkan på packningsgraden

Under 70-talet gjordes också en försöksserie för att belysa hur olika faktorer vid körning med traktor inverkar på packningsgraden (Ljungars, 1977). De faktorer som studerades var jordart, markfuktighet, antal överfarter, vikt, lufttryck, hjulutrustning, dragkraftsuttag och hastighet.

Det visade sig att markens fuktighet, antalet överfarter samt hjulutrustningen (enkel- eller dubbelmontage) hade störst betydelse. Ekipagets vikt och lufttrycket i hjulen hade måttlig betydelse, medan dragkraftsuttaget och hastigheten hade en mycket liten inverkan på markens packningsgrad. Körningens inverkan på packningsgraden var i dessa försök i stort sett oberoende av jordarten, förutom en ren sandjord som visade sig packas lättare än övriga jordar.

Modellberäkningar

Del 1 och del 4 i modellen, d.v.s. effekterna av återpackning och skador av körning i vall, kräver en beräkning av körspårens fördelning på fältet. Beräkningen av spår fördelningen och av enskilda axlars inverkan, som beskrivs i följande två avsnitt, tillämpas lika i del 1 och 4.

Beräkning av antalet överfarter på fältet

Ekvationer för att beräkna spår fördelningen har haft följande förutsättningar:

- A. Fältet delas upp i en "huvudteg" och en "vändteg". På huvudtegen antas att maskinernas arbetsbredd utnyttjas maximalt och att inga vändningar görs. På vändtegen antas maskinerna köras dubbelt så mycket som på huvudtegen. Det är också möjligt att beräkna körningen på en "kant", som är ett mellanting mellan huvud- och vändteg.
- B. På huvudtegen antas följande:
 1. Spår från en och samma körning korsar aldrig varandra.
 2. Spår från olika körningar antas vara slumpmässiga i förhållande till varandra.

Sistnämnda villkor kan antas vara uppfyllt om harvning utförs längs olika ledder, och om maskinernas arbetsbredder (t.ex. harv och såmaskin) inte är multipler av varandra.

Däcksbredd i förhållande till arbetsbredd bestämmer hur stor andel av fältytan som överfars av hjul. För varje arbetsmoment beräknas andel av fältytan med olika antal överfarter.

Ex. Antag att fältet överfarits med en traktor, vars fram- och bakhjul täcker 10 resp. 30 % av arbetsbredden. Den andel av fältet som överfarits 0 gånger är då 70%, andelen som överfarits två gånger är 10%, och andelen som överfarits en gång är $100-70-10=20\%$.

För varje körning skapas alltså en uppdelning i olika antal överfarter. Dessa multipliceras sedan med varandra för att få sammanlagda antalet överfarter. På så sätt är det möjligt att beräkna uppdelningen i olika antal överfarter för ett fält. Ett visst antal överfarters andel av den totala fältytan kan benämnas S och ges index S_0, S_1, S_2 o.s.v.

Beräkning av enskilda axlars inverkan

För att bestämma packningsgradens fördelning på fältet räcker det dock inte att känna till fördelningen av antalet överfarter. Eftersom vissa hjul packar så mycket mera än andra måste man inom en delyta med ett visst antal överfarter känna till hur stora andelar som överfarits av olika hjulpar. En fullständig uppdelning i kombinationer av olika hjulpars andelar skulle dock leda till ett mycket stort antal delytor. Därför baseras beräkningarna på de hjul som orsakar den största packningen. Datorprogrammet skiljer ut de fyra hjulpar som packar mest, och beräkningarna görs hjulpar för hjulpar. Dessa benämns fortsättningsvis a, b, c, d, där a är det hjulpar som givit störst och d det som givit minst packning av de fyra. Beräkningsgången för hjulpar a blir då denna:

Det enskilda hjulparets andel av totala spårytan benämns t_a :

$$t_a = \text{spåryta för hjulpar a} / \text{total spåryta} \quad (\text{Ekv. 1})$$

Det antages att det för varje enskild körning inte sker någon överlappning av spår. Andelen inom ett visst antal överfarter som varit överfart en gång av hjulpar a kan benämnas τ_a och beräknas utifrån den yta som ej befarits av hjulparet:

$$\tau_a = \prod_i^{z-1} [(1-\tau_a - ((1-\tau_a)^i)/(x-1))] \quad (\text{Ekv. 2})$$

z=antalet överfarter

x=totala antalet axlar

Ovanstående ekvation används f.n. i programmet och kan exemplifieras på följande sätt: antag att 6 av varandra oberoende hjulpar har andelarna 0,5, 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,1 resp 0,1 av totala spårytan. Hur stor är sannolikheten att hjulparet med andelen 0,5 ej körts på en yta som varit överfart 4 ggr? $0,5 \cdot 0,4 \cdot 0,3 \cdot 0,2 = 0,012$.

Om antalet överfarter är z kan ovanstående ytas andel av den totala fältytan benämnas u_{az} och beräknas:

$$u_{az} = \tau_a \cdot S_z \quad (\text{Ekv. 3})$$

Beräkningarna har hittills gällt hjulpar a. Nästa steg blir att beräkna andel av fältytan överfart av hjulpar b, d.v.s. det hjulpar som gett näst störst packning.

Beräkningarna sker i princip på samma sätt för b som för a, skillnaden är att beräkningen måste avse den del av en yta som varit överfart av b men inte av a. τ_b beräknas på samma sätt som τ_a och andelen av den totala fältytan kan approximeras med

$$u_{bz} = S_z \cdot \tau_b \cdot (1 - \tau_a) \quad (\text{Ekv. 4})$$

Ett problem vid beräkningen av en spår fördelning är att fram- och bakhjul ej rör sig oberoende av varandra, vilket är en förutsättning för att ekvationerna 2 och 4 ska vara sanna. De ger dock en ganska god approximation, felet blir störst vid få överfarter.

Beräkning av packningsgrad

En regressions ekvation för körningens inverkan på packningsgraden beräknades, grundad på resultaten i den försöksserie som redovisats tidigare (Ljungars, 1977). För en överfart fick ekvationen följande utseende (parametrarna har justerats för att ge ett intercept nära normal packningsgrad på våren):

$$\begin{aligned} \text{Packningsgrad} = & 74,3 + 17,4 \cdot \text{fuktighet} - 7,82 \cdot \text{fuktighet}^2 + 0,0020 \cdot \text{axelbelastning(kg)} + \\ & + 4,80 \cdot \log(\text{ringtryck(kPa)}) - 0,055 \cdot \text{däcksbredd(cm)} \quad R^2 = 0,45 \end{aligned} \quad (\text{Ekv. 5})$$

Summan av termerna efter interceptet används för att uppskatta packning orsakad av ett enskilt hjulpar. Denna summa kallas packningsverkan och benämns p. Genomsnittlig packningsverkan för samtliga hjulpar benämns P.

Packningsverkan för detta hjulpar beräknas nu inom delytorna med olika antal överfarter. Detta förutsätter dock, att man kan beräkna den packning som orskas av flera hjul med olika packningsverkan. Därvid görs antagandet att antalet överfarter kan uttryckas som en addition av packningsverkan för samtliga hjul, multiplicerat med det verkliga antalet överfarter och dividerat med packningsverkan för det aktuella hjulparet. Denna addition kan göras med hjälp av den genomsnittliga packningsverkan som nämnts tidigare och betecknats P. Detta "teoretiska" antal överfarter betecknas \bar{o} och bestäms då som

$$\bar{o} = 1 + P \cdot (\text{verkligt antal överfarter} - 1) / p \quad (\text{Ekv. 6})$$

Verkan av olika antal överfarter har också beräknats med hjälp av regressionsanalys. Packningsgraden kan sålunda bestämmas med följande formel:

$$\text{packningsgrad} = 78 + p \cdot (0,09 + 7,47 \cdot \bar{o} - 2,09 \cdot \bar{o}^2 + 0,27 \cdot \bar{o}^3 - 0,012 \cdot \bar{o}^4) \quad (\text{Ekv. 7})$$

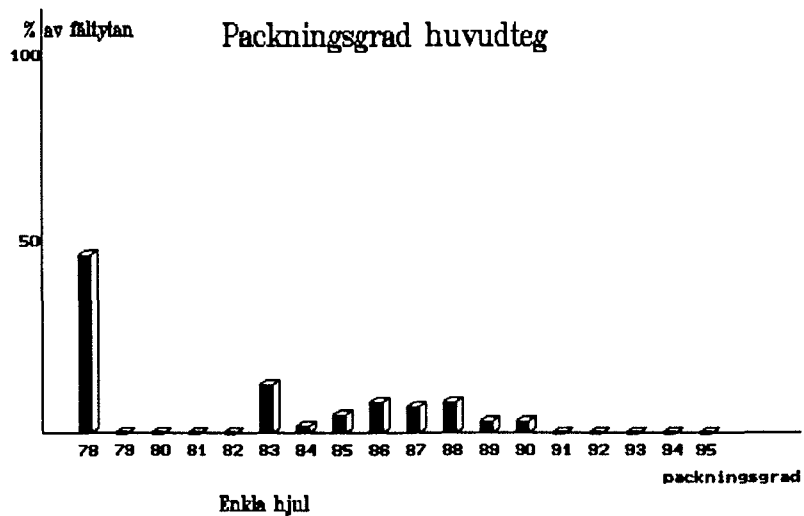
Sammanfattning av beräkningsgången

Beräkningsgången kan sammanfattas enligt följande:

1. Fältet delas in i delytor beroende på hur många gånger fältets delar överfarits av hjul.
2. Delytorna delas upp ytterligare beroende på inverkan av enskilda axlar inom ett visst antal överfarter.
3. Packningsgraden för varje enskild delyta beräknas.

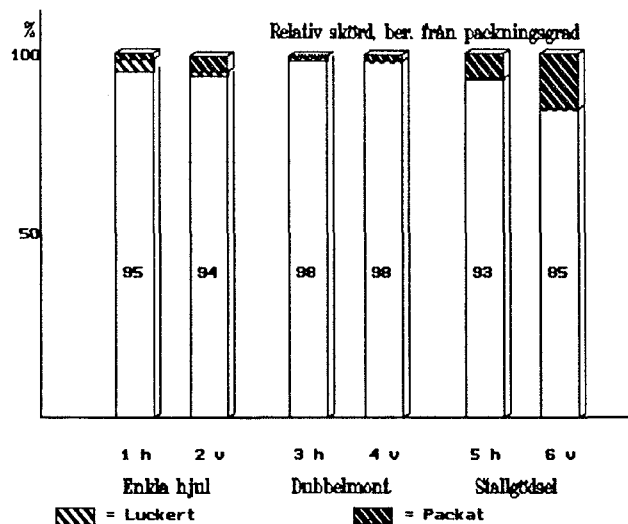
I datorprogrammet presenteras resultatet av denna beräkning grafiskt, i form av en fördelning av packningsgraden på fältet, uppdelat på huvudteg och vändteg (figur 3). Relativ skörd för olika alternativ jämfört med skörden vid optimal packningsgrad redovisas också grafiskt (figur 4).

Figur 3. Exempel på fördelning av packningsgrad på ett fält. Alternativet avser ett vårbruk utfört med traktorer med enkla hjul.



Figur 4. Relativ skörd jämfört med skörden vid optimal packningsgrad för tre olika maskinkombinationer under ett vårbruk. Med olika rasteringar visas hur stor del av förlusten som beror på att jorden varit för lucker eller för packad.

h=huvudteg, v=vändteg.



STRUKTURSKADOR I MATJORDEN SOM FINNS KVAR EFTER PLÖJNING

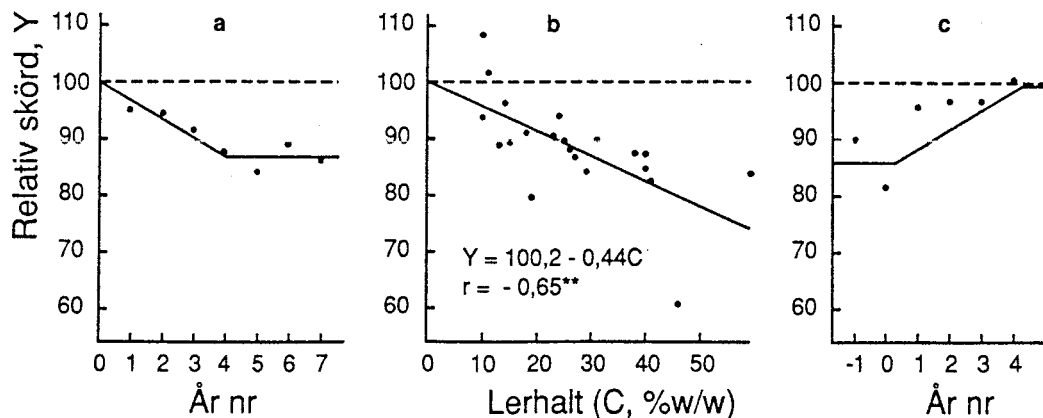
Bakgrund

Del 2 av modellen behandlar skador i matjorden som finns kvar när jorden plöjts. Vid avdelningen för jordbearbetning har under årens lopp utförts ett stort antal försök, där jorden packats varje höst före plöjning. En sammanfattning av resultaten från dessa försök visas i figur 5. Skörden har sjunkit under de första åren och därefter antagit ett jämviktsläge. När packningen upphört har strukturskadorna försvunnit efter några år, och skörden blivit densamma som i opackad jord. Skördesänkningen har ökat med ökad lerhalt. Som ett mått på mängden körning kan man använda antal tonkm, d.v.s. en maskins vikt multiplicerad med körsträckan på fältet. I de försök som redovisas i figur 5 har packningen motsvarat en kör mängd på ca 350 tonkm/ha. Som jämförelse kan nämnas att den totala kör mängden vid spannmålsodling uppgår till ca 150 tonkm/ha under ett år.

F.n. utförs en liknande serie där ringtrycket varieras och körningar utförs vid olika markfuktighet. Resultat från 2 försöksplatser sammanfattas i tabell 1.

Tabell 1. Relativ skörd efter körning med traktor och vagn strax före plöjning. Försöken är utförda på lerjordar 1985-1990 (9 skördeår).

Körintensitet	Körförhållanden	
	Normala	Våta
Ingen körning	100	
100 tonkm/ha, normalt ringtryck	98	92
300 tonkm/ha, normalt ringtryck	93	87
300 tonkm/ha, högt ringtryck	90	-



Figur 5. Resultat av fleråriga fältförsök med årlig packning av matjorden före plöjning. Diagrammen visar avkastningen i packade rutor i procent av skörden i opackade rutor. a) Avkastning de sju första åren efter försökens start för en grupp av 15 försök. b) Avkastning avsatt som funktion av lerhalt. Varje ring motsvarar en försöksplats. c) Genomsnittlig skörd åren efter den årliga packningens avslutande (Håkansson, 1987).

Vari består då dessa skador? En mycket viktig faktor är att packningen försämrar möjligheterna att göra en bra såbädd. Det beror på att aggregaten pressas samman, så att hårda, svårkrossade kokor uppstår. Detta ökar avdunstningen i såbädden. Ju högre lerhalt jorden har, desto lägre blir mängden växttillgängligt vatten i såbotten (Kritz, 1983). Detta är en av förklaringarna till att skadorna stigit med ökande lerhalt. Då aggregatens naturliga gränssytor skadas minskar också genomsläppligheten för vatten under regniga år, och risken för syrebrist ökar. Möjligheterna till god rotutveckling både inne i och mellan aggregaten försämras. Eftersom denna typ av skador är kopplade till aggregatstruktur är det naturligt att skadorna ökar med lerhalten. På jordar med enkelkornstruktur har packningsskador i matjorden försvunnit i samband med plöjning.

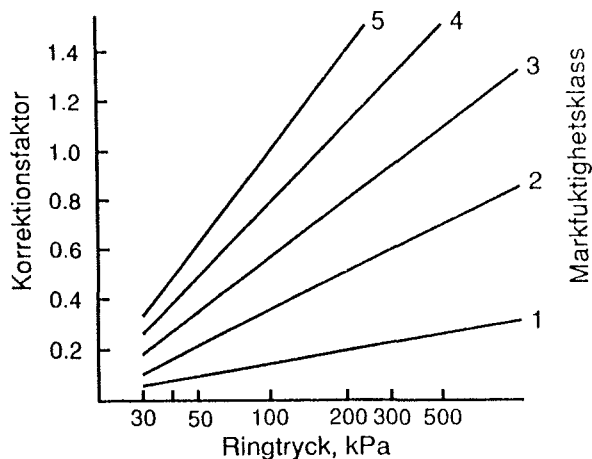
Modellberäkningar

Beräkningen av de skador som finns kvar efter plöjning är betydligt enklare än beräkningen av körningens ettåriga effekter. Som grund används antalet tonkm (maskinernas vikt multiplicerad med körsträckan på fältet) per hektar. Antalet tonkm korrigeras med hänsyn till marktrycket och fuktigheten vid körningen till "omräknade tonkm" (figur 6). Omräkningen görs med följande antaganden som grund:

1. Skördeförlusten är proportionell mot markfuktighetsklassen.
2. Skördeförlusten är proportionell mot logaritmen på marktrycket.
3. Markfuktighetsklass och marktryck i försöken har varit 3,7 resp. 200 kPa vilket ger omräkningsfaktorn 1.

Skördeförlusten antas sedan vara proportionell mot antalet "omräknade tonkm".

Figur 6. Beräkning av omräkningsfaktor för att korrigera antalet tonkm efter markfuktighet och ringtryck.



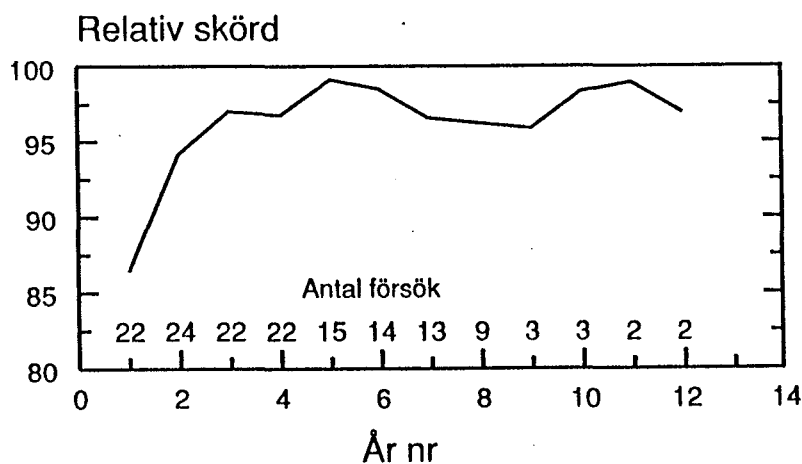
Skador av packning på en lerjord varar i flera år (figur 5). I modellen beräknas sammanlagda skördeförlusten under dessa år i % av en årsskörd. Formeln för att beräkna denna skördeförlust har följande utseende:

$$\text{Skördeförlust (\%)} = \text{omräknade tonkm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 0,00154 \cdot \text{lerhalt} \quad (\text{Ekv. 8})$$

BERÄKNINGAR AVSEENDE SKADOR AV PACKNING I ALVEN

Bakgrund

Till grund för denna del av modellen ligger en försöksserie med körning med lastade dumprar, körda spår intill spår fyra ggr på våt mark. Körningen motsvarade ca 1100 tonkm per hektar och utfördes vid försökets start. Resultaten från dessa försök redovisas i figur 7. Skördeförlusten var mycket stark under de första åren, och planade därefter ut. Det är naturligtvis svårt att skilja skördeförlusten orsakad av packningsskador i alven från den av packningsskador i matjorden. Man kan dock förutsätta att matjordsskadorna ebbar ut under en femårsperiod (se figur 5), varför de skador som därefter finns kvar kan antas bero på alvpackning. Genom att bestämma jordens densitet och hållfasthet tio år efter körningen var det också möjligt att konstatera att alven hade fått bestående skador. (Tabell 2). Inga klara skillnader mellan olika jordarters reaktion på alvpackning gick att utläsa av försöken.



Figur 7. Avkastning i försök med körning med 10 tons axelbelastning. Körning utfördes vid försökens start. Avkastningen i ej packat kontroll=100.

Tabell 2. Resultat från försök med körning med hög axelbelastning, körningen utförd 1976. Hållfasthetsmätningar utfördes med vingborr (Efter Etana & Håkansson, 1992).

Försöksled	Torr skrymdensitet, g/cm ³ , 1978		Hållfasthet, relativtal			
	30-45 cm	45-60 cm	1978	1982	1984	1988
Utan körning	1,47	1,42	100	100	100	100
Med körning	1,53	1,44	117	118	115	116

Modellberäkningar

Beräkningarna för skador i alven liknar i mycket dem för efterverkan i matjorden. Skördesänkningen antas vara proportionell mot antalet tonkm korrigerade för marktryck och fuktighet vid körning. Korrektionsfaktorn är inte densamma som vid packning av matjorden, det antages att fuktighetsklassen måste vara högre än 2 för att marken ska skadas. När det gäller alvpackningen, till skillnad mot packningen av matjorden, antas skördesänkningens storlek vara oberoende av jordarten.

Alven delas vidare upp i två skikt. I skiktet 25-40 cm antas skadorna finnas kvar under en tioårsperiod. Skördeförlusten för samtliga år läggs samman och anges i % av en årsskörd på samma sätt som för matjordspackningen. Vid beräkningen av antalet tonkm reduceras axelbelastningen med 4 ton, utom för plöjningstraktorns färhjul, där ingen reduktion görs. Förlusten beräknas enligt:

$$\text{Skördeförlust (\%)} = \text{omräknade tonkm} / 40 \quad (\text{Ekv. 9})$$

Djupare ned än 40 cm antas skadorna bli bestående, den permanenta skördesänkningen anges i promille. Vid beräkningen av antalet tonkm reduceras axelbelastningen med 6 ton, utom för plöjningstraktorns färhjul, där antalet tonkm reduceras med 3 ton. Formeln för att beräkna avkastningsförlusten har följande utseende:

$$\text{Skördesänkning (promille/år)} = \text{omräknade tonkm} / 40 \quad (\text{Ekv. 10})$$

BERÄKNINGAR AVSEENDE SKADOR AV KÖRNING I VALL

Bakgrund

I slutet av 60-talet inleddes en försöksserie för att bedöma skador av körning i vall. Serien innehöll tre försök i Röbbäcksdalen och mycket kraftiga skördesänkningar erhöles i de led där körning utfördes (Håkansson, 1973). Skadorna ackumulerades dessutom under vallens liggtid.

De olika leden var:

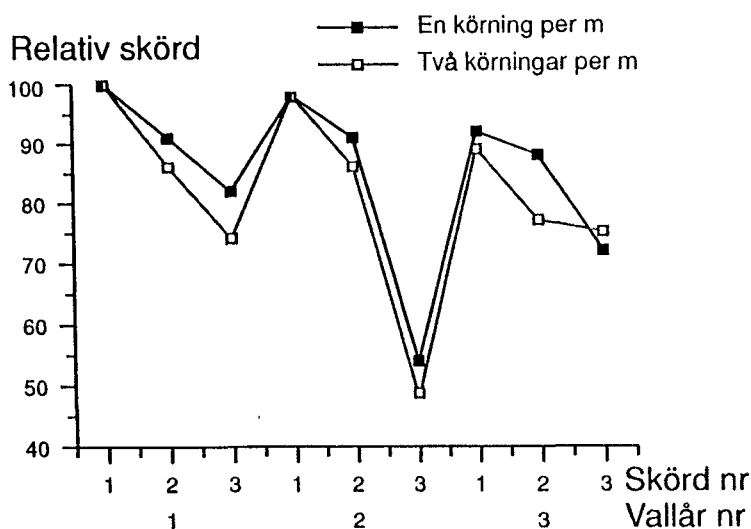
A=ingen körning

B=körning med traktor och vagn vid varje skörd, totalvikt ca 8 ton, ett kördrag/m

C=som B, men två kördrag/m

Dessa försök följdes upp med en serie av 21 försök utlagda i hela Sverige (Håkansson et al, 1990). Resultaten från dessa redovisas i figur 9. I procent av avkastningen var skadorna större vid andra- än förstaskörd och allra störst vid tredjeskörden. Olyckligt nog sammanföll serien med torråren under mitten på 70-talet. Skördesänkningarna blev därför inte så stora, och det är i många fall svårt att dra slutsatser om t.ex. körskadorna kvarstått från det ena året till det andra. Det finns dock en tydlig trend att skadorna blev större och mera bestående i norra än i södra Sverige. Några tydliga jordartsskillnader framkom inte i dessa försök. Den avgörande faktorn för skördesänkningen i vallen var inte packning av jorden, utan de mekaniska skador på växterna som körningen orsakat. Samma iakttagelse har gjorts i försök utförda i andra länder.

Under 80-talet utfördes försök med skador av körning i vall vid institutionen för växtodling, SLU. Försöken innehöll bland annat led med olika antal överfarter och med olika ringtryck. Skadorna steg med ökat antal överfarter och ökad vikt, däremot är det svårt att uttala sig om ringtryckets inverkan på skörden.



Figur 9. Avkastning efter körning i vall. Genomsnitt för 24 försök, körning utfördes i samband med varje skörd. 100=skörd i opackat led.

Modellberäkningar

Med hjälp av resultaten i ovannämnda försöksserier har det varit möjligt att ta fram följande regressionskvation för en överfart:

$$\text{Rel.skörd} = 112,5 - 2,86 \cdot \text{fuktighet} - 8,54 \cdot \text{skördnr} - 0,48 \cdot \text{latitud} \cdot \text{vallår} \quad R^2=0,50 \quad (\text{Ekv. 11})$$

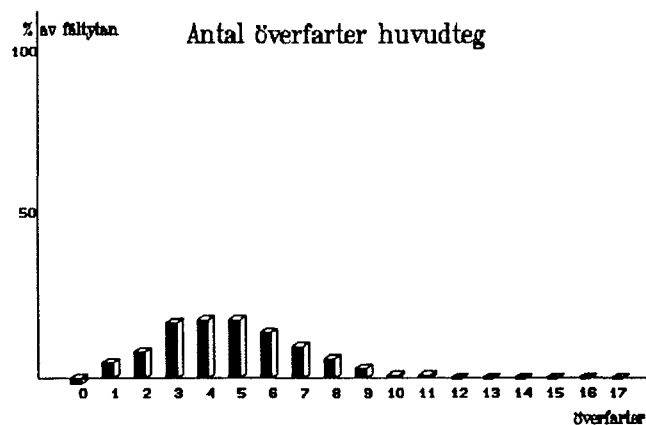
Fuktighet klassas i en skala 1-5 och avser fuktighet i markens ytlager. Skördnr avser skörd 1, 2 eller 3. Latitud avser breddgrad i förhållande till Sveriges sydspets (i Röbbäcksdalen ca 10).

Exempel på variabler som inte blev signifikanta är lerhalt, ekipagets vikt samt markfuktighet under markens ytlager. Att fuktigheten i ytan har större betydelse än fuktigheten djupare ner i marken indikerar att det är mekaniska skador på växterna snarare än jordpackning som ger skördesänkningar.

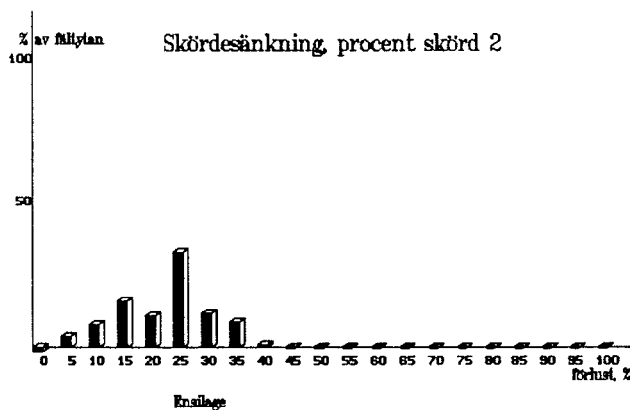
Regressionskvationen utgör grunden för modellens beräkningar. Spårfördelning beräknas på samma sätt som i del 1, vilket beskrivs i avsnittet Beräkning av körspårfördelning och enskilda axlars inverkan.

Som utgångspunkt vid beräkningen av körskadorna används ekvation 11. Dessutom används kvoten mellan axelbelastning och däcksbredd. Ökad vikt medför med säkerhet större skador på marken, även om denna faktor ej blev signifikant vid regressionsanalysen (ekv. 11). Breda däck gör troligtvis att skadorna per ytenhet blir mindre än vid användning av smala däck, men gör att en större andel av ytan blir överfaren. För närvarande vet vi inte om och när det är gynnsamt att använda bredare däck, och avsikten har varit att göra beräkningarna neutrala för ändringar i däcksbredd.

Fig 10. Exempel på fördelning av antalet överfarter på ett fält vid skörd av hö.



Figur 11. Exempel på fördelning av skördeförlustens storlek på ett fält vid andraskörden av ensilage.



På samma sätt som vid beräkningen av packningsgrad skapas ett slags index för hur stor skada som görs vid körning med ett visst hjulpar. Motsvarigheten till packningsverkan kan vi kalla vallskadeverkan. Den benämns V och uppskattas, baserat på ekvation 11, enligt:

$$V = (\text{vikt}(\text{kg})/3000) \cdot 40/\text{däcksbredd}(\text{cm}) \cdot (2,86 \cdot \text{fukt} + 8,54 \cdot \text{skördnr} + 0,48 \cdot \text{lat} \cdot \text{vallår} - 12,5)$$

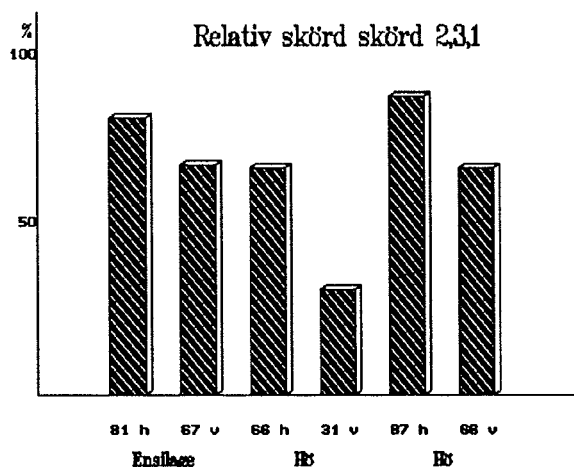
(Ekv. 12)

Sammanvägning av olika axlars inverkan sker på det sätt som beskrivits tidigare i avsnittet Beräkning av packningsgrad. Genomsnittlig vallskadeverkan för samtliga axlar benämns v. Ekvation 6 används på samma sätt, termerna P och p byts ut mot V och v. Skördeförlust i procent för en delyta beräknas med följande formel:

$$\text{Förlust}(\%) = V \cdot (0,94 + 17,23 \cdot v - 2,03 \cdot v^2 + 0,089 \cdot v^3) / 16,2$$

(Ekv. 12)

I dataprogrammet sker en grafisk redovisning av resultatet. Det sker i form av fördelningen av antalet överfarter och skördesänkning på fältet, samt relativ skörd för fältets huvudteg och vändteg. (Figur 10, 11 och 12).



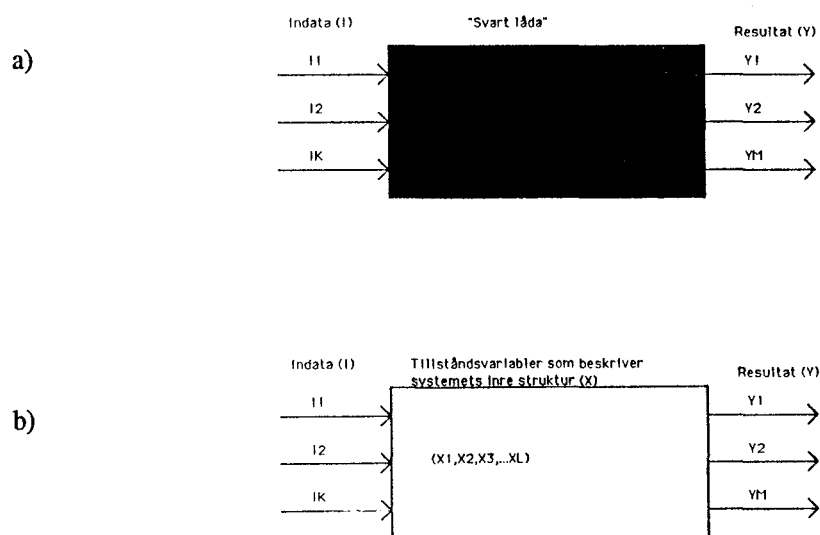
Figur 12. Relativ skörd (ingen körning=100), efter tre vallskördar under ett år. h=huvudteg, v=vändteg. Körningen vid förstaskörden påverkar andraskördens storlek. Digrammet redovisar därför den beräknade skörden, på huvudteg och vändteg, vid andra- och tredjeskörd samt nästa års förstaskörd.

DISKUSSION

Det är utomordentligt svårt att skapa en fullständig modell för hur körning och odlingsåtgärder påverkar markstrukturen och därmed skörden. Den modell som beskrivs i denna skrift är empirisk. Den bygger på försöksresultat, vi vet hur marken behandlats och vad detta fått för utslag i skörd. I systemanalytiska termer betraktar vi med detta synsätt marken, eller systemet, som en svart låda. (Figur 13 a). Mera tilltalande vore naturligtvis att använda sig av en mekanistisk modell. Med utgångspunkt från jordens egenskaper skulle en sådan modell beräkna hur ett visst pålagt tryck vid en viss vattenhalt skulle förändra porvolym, markens mättade och omättade ledningsförmåga, penetrationsmotstånd för rötter, aggregatstorleksfördelning, luftinnehåll o.s.v. och utifrån dessa parametrar uppskatta förändringar i skördens storlek (figur 13 b). Tyvärr får vi konstatera att forskningen inte hunnit tillräckligt långt för att skapa en sådan modell. Som avslutning vill vi ge exempel på förtjänster och brister hos den modell som beskrivs i denna uppsats.

Vilka är då modellens förtjänster? Först och främst är den ett sätt att sammanfatta de fältförsök och erfarenheter kring jordpackning som gjorts i Sverige, på ett sådant sätt att resultaten blir praktiskt användbara. Modellen har naturligtvis begränsningar men den är den bästa metod vi har idag för att kvantifiera de kostnader som orsakas av packning. Sverige är unikt på så sätt att vi är kanske det enda land i världen som har genomfört tillräckligt många fältförsök för att göra det möjligt att skapa en sådan modell.

För en enskild lantbrukare är det naturligtvis betydligt mera användbart att få en beräkning av vad packningen kostar på hans egen gård än resultat från enstaka fältförsök. Det gör möjligt att t.ex. bedöma investeringsutrymme i bättre däck eller andra maskiner, jämföra körningens omfattning vid odling av olika grödor, jämföra olika körmönster eller uppskatta betydelsen av att bygga fler infarter till ett fält.



Figur 13. a) Ett system som betraktas som en "svart låda". Systemets inre struktur är ej känd, och resultatet uppskattas från indata. b) Ett system med en inre struktur. Resultatet skattas från indatas påverkan på de variabler som beskriver systemet. Efter Gustafsson et. al., 1982.

Modellen kan också fungera som ett diskussionsunderlag. När beräkningarna utförs tillsammans med en jordbrukare uppstår självklart en mängd frågor. En förutsättning för att kunna använda modellen och dataprogrammet på ett bra sätt är att ha goda grundläggande kunskaper när det gäller jordpackning och markstruktur.

Givetvis har modellen också begränsningar och brister. Den är, så att säga, i händerna på de försöksresultat som ligger till grund för den. Vissa parametrar (t.ex. markfuktighetens betydelse vid packning av alven) är inte alls eller dåligt undersökta. I sådana fall måste man göra antaganden om parametrarnas betydelse, eller utelämnas den helt. I modellen har t.ex. antaganden gjorts om marktryckets betydelse för strukturskador som finns kvar efter plöjning, medan marktryckets betydelse vid körning i vall utelämnats.

Vissa parametrar är svåra att ange kvantitativt. Detta gäller framförallt markfuktigheten, som ges en ganska godtycklig skattning. Det är dock oerhört svårt att exakt ange markfuktigheten på ett sätt som är relevant när det gäller markens packningskänslighet. Ett mått som vikts- eller volymsprocent vatten kan enkelt anges exakt. Det skulle dock sedan behöva skrivas om i en form där det uttrycker en viss jords känslighet för tryckpåkänningar. Även om detta vore möjligt, skulle beräkningarna kräva så omfattande indata att modellen skulle bli svår att använda på gårdsnivå. Det vore dock önskvärt att komplettera modellen med mera allmänna uppgifter om vattenhalten i marken under vegetationsperioden. Vattenhalten kunde då anges som ett genomsnitt för ett antal år för några typjordar på olika platser i landet.

Den kanske allvarligaste begränsningen i modellen är, att den är svår att tillämpa i andra odlingssystem än där försöken utförts. Försök med ettåriga grödor har i samtliga fall utförts i odlingssystem med plöjning. Det är därför svårt att använda resultaten för att bedöma skördesänkningar i t.ex. plöjningsfri odling eller en efterföljande vall. Det är också svårt att bedöma hur strukturskador vid körning i vall påverkar efterföljande grödor. Modellen räcker heller inte till för att bedöma effekten av att gå över från odling med till odling utan plöjning. Vissa utdata, t.ex. antal överfarter eller antal tonkm, kan dock alltid beräknas och användas för jämförelser.

EXEMPEL

Nedan följer exempel på tillämpningar av modellens olika delar. Beräkningarna är gjorda med hjälp av det dataprogram som utarbetats parallellt med modellen. Programmet kan användas på IBM-kompatibla datorer och kan rekvideras från avdelningen för jordbearbetning.

Exempel 1. Jämförelse mellan efterverkansskador i matjorden vid odling av spannmål respektive sockerbeter.

Förutsättningar: Marken innehåller 20% ler. Vikter och arbetsbredder för enskilda arbetsmoment vid sockerbetsodling anges i tabell 3. Samma maskiner används för spannmålsodling, men bandsprutning och radhackning utgår, och betupptagaren ersätts naturligtvis av en tröska. Spannmålsfälten antas harvas 3 ggr och sprutas 1 gång. Motsvarande siffror vid sockerbetsodlingen är 4 resp. 5 ggr. Resultatet anges i tabell 4.

Tabell 3. Vikter och arbetsbredder för redskap vid sockerbetsodling. Uppgifterna är hämtade från ett praktiskt exempel i Malmöhus län. Uppgifterna utgör underlag för den beräkning som presenteras i tabell 4.

Arbetsmoment	Redskap	Vikt (kg)	Arbetsbredd (m)
Plöjning	Traktor	6000	1,4
Spridning av handelsgödsel	Traktor	4500	12
	Spridare (halv beh.)	3700	
Harvning	Traktor	6000	6,5
Sådd	Traktor	4500	4,5
	Såmaskin	500	
Bredsprutning	Traktor	4500	12
	Spruta	900	
Bandsprutning	Traktor	4500	9
	Spruta	600	
Radrensning	Traktor	4500	4,5
Upptagning	Traktor	6000	1
	Upptagare (halv tank)	8000	

Tabell 4. Exempel på antal omräknade tonkm och skördeförlost, i % av en årsskörd, vid spannmåls- och sockerbetsodling. Förlusten avser efterverkan i matjorden.

Arbetsmoment	Spannmålsodling		Sockerbetor	
	Tonkm	Förlust, % av en årsskörd	Tonkm	Förlust, % av en årsskörd
Harvning	29,0	0,9	38,0	1,2
Sådd	12,0	0,4	12,0	0,4
Handelsgödselspridning	7,2	0,2	7,2	0,2
Sprutning (1 resp 5ggr)	3,9	0,1	25,0	0,8
Hackning	-	-	16,3	0,5
Stubbearbetning	14,5	0,4	14,5	0,4
Plöjning	35,0	1,1	35,0	1,1
Skörd/Upptagning	14,5	0,4	175,4	5,4
Totalt	110,4	3,4	323,4	10,0

Exempel 2. Markfuktighetens, ringtryckets och lerhaltens betydelse för strukturskador i matjorden.

Markfuktighet, ringtryck och lerhalt har stor betydelse för packningsskadorna i matjorden. I tabell 5 visas förlust orsakad av sockerbetsupptagningen i exempel 1, när denna tänks bli utförd under olika förhållanden.

Tabell 5. Förlust, i % av en årsskörd, orsakad av sockerbetsupptagning utförd under olika förhållanden. Förlusten avser efterverkan i matjorden.

	20 % ler		50 % ler	
	100 kPa	200 kPa	100 kPa	200 kPa
Markfuktighet				
Normal	3,9	5,4	9,7	13,2
Fuktig	5,2	7,6	12,8	17,7

Exempel 3. Ettåriga effekter av packning. Jämförelse mellan olika maskiner under ett vårbruk.

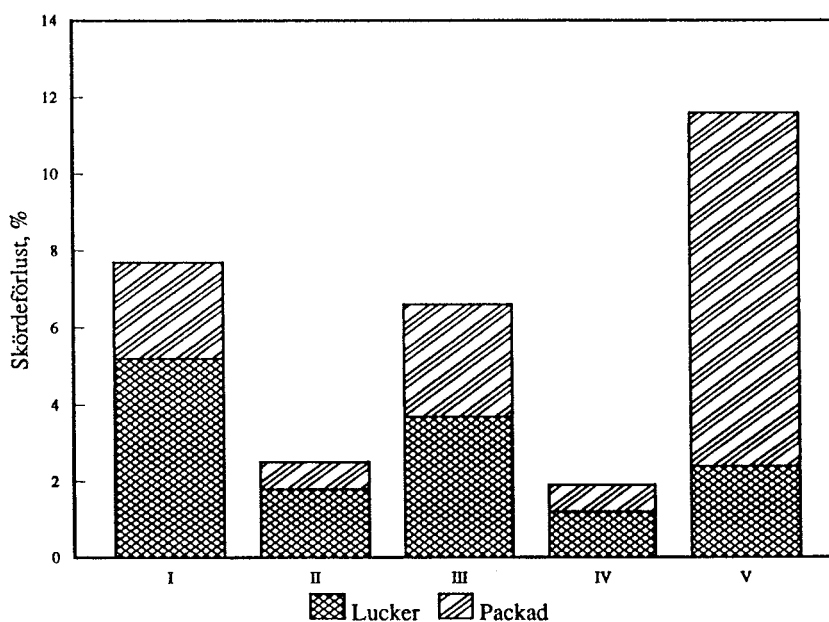
Återpackningen efter plöjning, främst i samband med vårbruk inverkar på grödan samma år. I detta exempel jämförs 5 olika typer av maskinsystem och däcksutrustning i samband med såbäddsberedningen.

- I Harvsåddekipage, enkla hjul.
- II Som I, men med en extra harvning och dubbelmontage.
- III Tre harvningar och sådd, enkla hjul.
- IV Som III, men med dubbelmontage.
- V Som III, plus en stallgödselspridning.

Traktorvikter: i harvsåddekipaget 6,1 ton, vid separata harvningar 5 ton, vid sådd och stallgödselspridning 4 ton. Stallgödselspridaren väger 7 ton med halvt lass.

Arbetsbredder: såmaskin 3 m, harv 5 m, stallgödselspridare 5 m.

Resultat: Effekten av denna körning på årets skörd redovisas grafiskt i figur 14. System 1 och 3 har gett skördesänkning både beroende på utebliven återpackning och att jorden packats för starkt. System II och IV har gett nära optimal återpackning, medan V orsakat hög skördeförlust genom alltför stark packning.



Figur 14. Skördeförlust, jämfört med optimal återpackning av matjorden, med 5 olika maskinsystem (beskrivna i texten). Skördeförlusten kan bero både på att jorden blivit för packad och för lucker.

Exempel 4. Jämförelse av olika maskinsystem vid förstaskörd av vall.

Körskadorna vid förstaskörd av vall påverkar andraskördens storlek. I detta exempel jämförs tre maskinsystem, ett för höskörd, ett för ensilageskörd och ett där stallgödsel sprids efter ensilageskörden. De viktigaste förutsättningarna anges i tabell 6.

Resultatet presenteras i tabell 7. Höskörden har givit 12% skördesänkning jämfört med ingen körning, ensilageskörden ytterligare 5% medan ensilageskörd och stallgödelspridning givit 25% skördesänkning.

Tabell 6. Arbetsbredd och vikter för redskap vid förstaskörd av vall. Uppgifterna utgör underlag för den beräkning som presenteras i tabell 7.

		Hö	Ensilage	Ens. + stallgödsel
Slåtter	Arbetsbredd, m	2	2	2
	Vikt traktor, kg	4000	4000	4000
Vändning	Arbetsbredd, m	4	-	-
	Vikt traktor, kg	4000	-	-
Uppsamling	Arbetsbredd, m	4	2	2
	Vikt traktor, kg	4000	6000	6000
	Vikt vagn, kg (genomsnitt)	3000	6000	6000
Stallgödsel- spridning	Arbetsbredd, m			5
	Vikt traktor, kg			6000
	Vikt spridare, kg (genomsnitt)			7000

Tabell 7. Relativ skörd vid andraskörden(100=skörd från vall utan körspår) vid tre olika maskinsystem till förstaskörden.

	Höskörd	Ensilage	Ensilage+stallgödsel
Relativ skörd	88	83	75

SAMMANFATTNING

Vid avdelningen för jordbearbetning har utarbetats en empirisk modell för att beräkna skördesänkningar orsakade av jordpackning, och värdet av olika motåtgärder. Modellen är baserad på resultat i fältförsök, huvudsakligen utförda i Sverige, och beräkningarna gäller i första hand odlingsystem med årlig plöjning. Modellen är datoriserad och avsedd för rådgivning på gårdsnivå, och beräkningarna avser fyra typer av packningsskador:

1. Effekter av återpackning efter plöjning. Det antas att en viss återpackning (rätt "packningsgrad") krävs efter plöjning för att ge maximal skörd. På basis av körspårens fördelning, maskinernas vikt, marktryck och fuktighet vid körtillfället beräknas packningsgraden för olika delytor. Packningsgradens fördelning ligger i sin tur till grund för en beräkning av skörden.
2. Strukturskador i matjorden som finns kvar efter plöjning. Beräkning av skördeförlusten baseras på körintensiteten i antal tonkm (maskinernas vikt gånger körsträckan på fältet), lerhalten, marktrycket och markfuktigheten vid körtillfället. Effekterna kan kvarstå i fem år, och den totala förlusten anges i procent av en årsskörd.
3. Skador av packning i alven. Beräkningarna liknar de för del 2, men bara maskiner med hög axelbelastning beaktas och skadorna antas bli mera bestående. Förlusten antas vara oberoende av jordarten.
4. Effekter av körning i vall. Beräkningarna liknar de för del 1. Förlusten skattas från körspårens fördelning på fältet, med hänsyn bl.a. till vallens ålder och fuktigheten vid körtillfället.

REFERENSER

- Arvidsson, J., Håkansson, I., 1989. En beräkningsmodell för skador av jordpackning. SLU, Alnarp, medd. från södra jordbruksförsöksdistriktet, nr 34.
- Arvidsson, J. och Håkansson, I., 1990. En beräkningsmodell för skador av jordpackning. Norges landbrukshögskole, Aktuelt fra statens fagtjeneste for landbruket, nr 7, s. 29-34.
- Arvidsson, J., Håkansson, I., 1991. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. Soil and Tillage Research, 20, 319-332.
- Etana, A., Håkansson, I., 1992. Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. Soil and Tillage Research, accepted.
- Håkansson, I., McAfee, M., Gunnarsson, S., 1990. Verkan av körning med traktor och vagn vid vallskörd. SLU, Uppsala, rapporter från jordbearbetningsavd. nr 78.
- Gustafsson, L., Lanshammar, H., Sandblad, B., 1982. System och modell. Studentlitteratur, Lund.
- Håkansson, I., 1987. Hur långvariga är jordpackningens efterverkningar? SLU, Uppsala, Fakta/markväxter nr 14.
- Håkansson, I., 1989. Packning av matjordslagret. Vilken packningsgrad är bäst? SLU, Uppsala, Fakta/markväxter nr 1.
- Kritz, G., 1983. Såbäddar för vårstråsäd. En stickprovsundersökning. SLU, Uppsala, rapporter från jordbearbetningsavd. nr 65.
- Ljungars, A., 1977. Olika faktorerers betydelse för traktorernas jordpackningsverkan. SLU, Uppsala, rapporter från jordbearbetningsavd. nr 52.

RAPPORTER FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

Nr År

- 56 1978 Åke Huhtapalo: Kombisådd av kväve och fosfor till vårsåd. 27 s.
Combi-drilling of nitrogen and phosphorus with spring cereals. 27 p.
- 57 1979 Inge Håkansson: Försök med jordpackning vid hög axelbelastning. Markundersökningar 1-2 år efter försökens anläggande. 15 s.
Experiments with soil compaction at high axle load. Soil investigations 1-2 years after the experimental compaction. 15 p.
- 58 1979 Inge Håkansson & József von Polgár: Modellförsök med såbäddens funktion. III. Försök med syrebrist i såbädden. 17 s.
Model experiments into the function of the seedbed. III. Experiments with oxygen deficiency in the seedbed. 17 p.
- 59 1980 Tomas Rydberg: Storparcellförsök med plöjningsfri odling, 1976-78. 21 s.
Big-plot experiments with ploughless farming, 1976-78. 21 p.
- 60 1980 Working group on soil compaction by vehicles with high axle load. Report of meeting in Uppsala 1980. 56 p.
- 61 1981 Behovet av forskning och försök inom mark-teknikområdet. En inventering utförd av samarbetskommittén för mark-teknik vid Sveriges Lantbruksuniversitetets Lantbruksvetenskapliga fakultet. Sekreterare: Lennart Henriksson. 46 s.
- 62 1981 Skördevariationerna i växtodlingen - orsaker och motåtgärder. Seminarium anordnat av Samarbetskommittén för Mark-Teknik på Ultuna 1981-04-09. 64 s.
- 63 1981 Nils M. Nilsson: Plöjningsdjup och tiltbredder vid höstplöjning. 30 s.
Ploughing depths and widths of furrow slice in autumns ploughing. 30 p.
- 64 1982 Jan Cederlund: Kombinerad bearbetning och sådd (harvsådd). Examensarbete. 54 s.
- 65 1983 Göran Kritz: Såbäddar för vårstråsåd. En stickprovsundersökning. 187 s.
Physical conditions in cereal seedbeds. A sampling investigation in Swedish spring-sown fields. 187 p.
- 66 1983 N.M. Nilsson: Höst- eller vårplöjning till vårsådd på kapillära jordar. Resultat från 12 fältförsök åren 1971-75. 57 s.
Autumn- or spring ploughing before spring sowing on capillary soils. Results from 12 field trials during 1971-1975. 57 p.
- 67 1984 Berth Mårtensson: Harvsådd - Preliminära försöksresultat 1979-83. 20 s.
Once-over sowing - Preliminary results of trials 1979-1983. 20 p.
- 68 1984 Mats Edh: BANDSÅDD - en studie av olika billar för bandsådd. Examensarbete. 44 s.

- 69 1984 József von Polgár: Vältning efter vårsådd. 16 s.
Rolling after spring sowing. 16 p.
- 70 1986 Tomas Rydberg: Markfysikaliska och markkemiska effekter av plöjningsfri odling i Sverige. 35 s.
Effects of ploughless tillage on soil physical and soil chemical properties in Sweden. 35 p.
- 71 1986 Jordpackning: Skördepåverkan - Motåtgärder - Ekonomi. Rapport från NJF-seminarium i Sigtuna 28-30 oktober 1986. 187 s.
Soil compaction: Effects - Counter-measures - Economy. 187 p.
- 72 1986 Bo Thunholm: Termiska egenskaper i åkermark skattade på grundval av den årliga temperaturvariationen. 18 s.
Thermal properties of the subsoil estimated from annual temperature variations. 18 p.
- 73 1987 Lennart Henriksson: Försök med olika harvar 1977-1985. 32 s.
Field trials with different harrows 1977-1985. 32 p.
- 74 1987 Tomas Rydberg & Torbjörn Öckerman: Plöjningsfri odling - Dess inverkan på rotutveckling och evaporation. 52 s.
The effects of ploughless tillage on root development and evaporation. 52 p.
- 75 1987 Hans Svensson: Jordpackningens inverkan på sockerbetans rotutveckling och skördens storlek. 31 s.
Effects of soil compaction on root development and yield of sugarbeets. 31 p.
- 76 1987 Tomas Rydberg: Studier i plöjningsfri odling i Sverige 1975-1986. 53 s.
Studies in ploughless tillage in Sweden 1975-1986. 53 p.
- 77 1988 Reduceret jordbearbejdning. Rapport från NJF-seminarium i Horsens, Danmark 9-11 februari 1988. 240 s.
Reduced cultivation. 240 p.
- 78 1990 Inge Håkansson, Mary McAfee, Sixten Gunnarsson: Verkan av körning med traktor och vagn vid vallskörd. Resultat från 24 försöksplatser. 41 s.
Effects of traffic during harvest on yield of grass leys. Results from field trials on 24 Swedish sites. 41 p.
- 79 1990 Krister Nilsson: Packningsskador vid konservärtskörd - ekonomiska konsekvenser och åtgärder för att minska packningen. 16s.
Estimation of the economic consequences of soil compaction when harvesting canning peas. 16 p.
- 80 1990 Tomas Rydberg, Mary McAfee, Börje Gillberg. Djupplöjning på lätta mineraljordar. 50 s.
Effects of subsoiling on crop yields on light mineral soils. 50 p.
- 81 1992 Johan Arvidsson, Sixten Gunnarsson, Lena Hammarström, Inge Håkansson, Tomas Rydberg, Maria Stenberg: 1991 års jordbearbet-

Johan Arvidsson, Inge Håkansson: En modell för att beräkna jordpackningens effekter på grödornas avkastning. 23 s.

An empirical model for estimating the crop yield losses caused by machinery induced soil compaction. 23 p.
