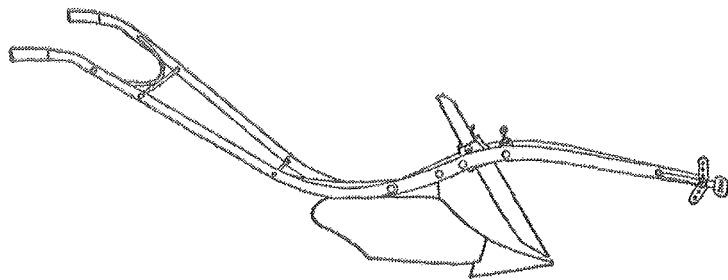




Institutionen för
Markvetenskap
Uppsala

MEDDELANDEN FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

Swedish University of Agricultural Sciences,
S-750 07 Uppsala
Department of Soil Sciences,
Bulletins from the Division of Soil Management



Nr 46

2004

Johan Arvidsson, Thomas Keller

**Teknik för att motverka jordpackning,
speciellt i alven**

*Technical methods to restrict soil compaction,
especially in the subsoil*

ISSN

1102-6995

ISRN

SLU-JB-M--46--SE

Förord

Denna rapport utgör slutrapport för ett projekt finansierat av Stiftelsen Lantbruksforskning (SLF): Teknik för att motverka jordpackning, speciellt i alven. Framförallt följande tekniker har studerats:

1. Låga ringtryck.
2. Band jämfört med hjul.
3. Dubbelmontage jämfört med enkla hjul.
4. Boggiehjul jämfört med enkla hjul.
5. Plöjning i fåran istället för on-land.

Projektet har bedrivits i ett stort antal delexperiment. Denna slutrapport innehåller en presentation av experimenten var för sig, så som de publicerats i avdelningen för jordbearbetnings årsrapport. En sammanfattning av samtliga resultat ges bl.a. i Fakta Jordbruk nr 3, 2003, SLU, Uppsala.

Innehållsförteckning

Packning av tunga betupptagare – effekt av sänkt ringtryck	3
Packning av tunga betupptagare – effekt av ringtryck och hjullast på tryckutbredning i marken	7
Marktryck under dubbelmontage jämfört med enkelmontage	10
Marktryck under en treaxlad kalkspridare – trycksamspel i marken under tandemaxlar	12
Markpackning under band- och hjultraktor vid ”on land” plöjning	14
Packning vid ”on-land” plöjning - jämförelse mellan bandtraktor och hjultraktor	19
Packning vid plöjning - jämförelse mellan konventionell plöjning och ”on land” plöjning	24
Mätningar av tryck och deformation i marken vid betupptagning	27
Mätning av tryck i matjorden med olika hjullaster och ringtryck	33

Packning av tunga betupptagare – effekt av sänkt ringtryck

Under hösten 2000 gjordes mätningar av tryck och packning på olika djup i marken för en sexradig betupptagare med utrustning för att reglera ringtryck. Vid en last på 8300 kg var både tryck och packning signifikant lägre på 30 cm djup för 90 jämfört med 220 kPa ringtryck. På större djup var skillnaden liten.

Under hösten 2000 gjordes ett test av verkan av sänkt ringtryck på packning i alven. Testet gjordes med en sexradig betupptagare i Önnestad utanför Kristianstad. Jordarten var mellanlera och körning utfördes vid en vattenhalt nära fältkapacitet, dock utan någon extrem spårbildning (5-10 cm djupa spår). Betupptagaren hade reglerbar ringtrycksutrustning för framhjulen, som var utrustade med Trelleborg TWIN 850/60-38. Körning gjordes med två hjullaster: 8320 och 12120 kg, och två ringtryck per last: 90 resp 220 kPa (0,9 resp 2,2 kp/cm²) och 140 resp. 220 kPa för den högre lasten. Rekommenderat ringtryck för detta däck vid lasten 8700 kg och hastigheten 10 km/h är 200 kPa. Avsikten med testen var att studera om sänkt ringtryck överhuvudtaget är en möjlig metod för att minska packning i alven. Som lågt ringtryck valde vi därför ett så lågt ringtryck som möjligt där däcket fortfarande arbetade normalt. Det höga ringtrycket valdes efter vad som är normalt att använda för att klara hög belastning och körning på väg.

Mätningar av tryck och markrörelse gjordes för vänster framhjul på 30, 50 och 70 cm djup. Fyra mätningar per ringtryck gjordes vid den lägre lasten, två per ringtryck vid den högre. Dessutom mättes understödsytan på hårt underlag.

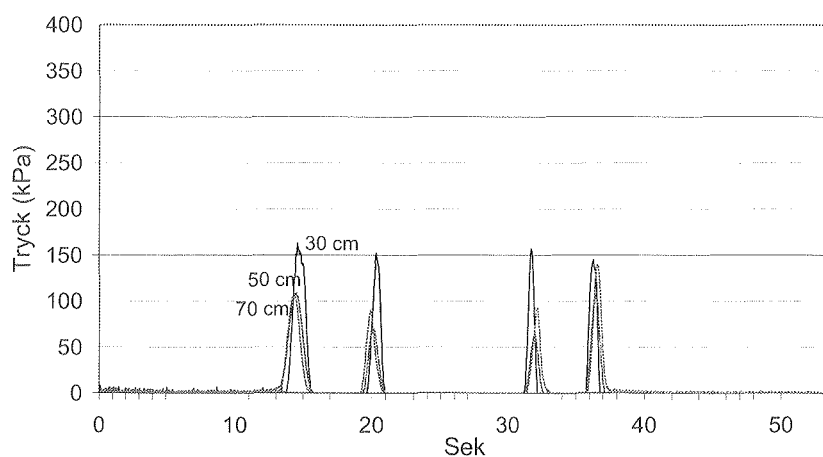
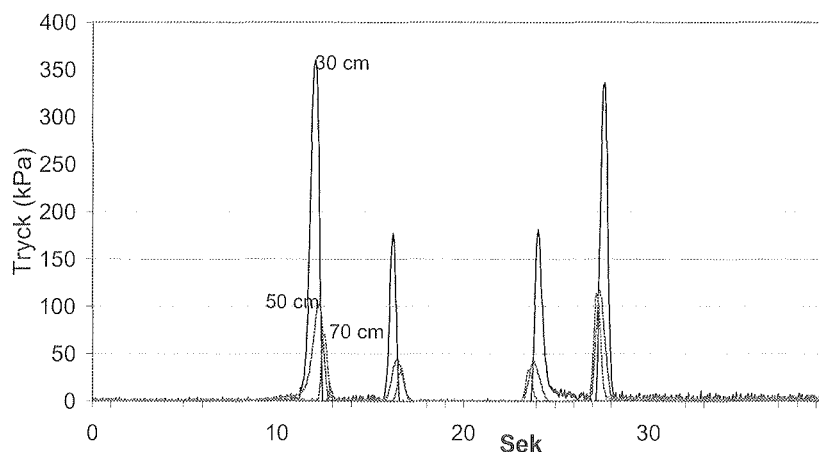
Resultat

Understödsyta för de olika lasterna och ringtrycken redovisas i tabell 1. Det beräknade genomsnittliga marktrycket ligger mycket nära ringtrycket för de lägre ringtrycken, 90 och 140 kPa. Vid det högre ringtrycket ligger det beräknade genomsnittliga trycket under ringtrycket. Det är värt att notera den stora effekten av ringtrycket på däckets understödsyta, som är nästan dubbelt så stor vid 90 jämfört med 220 kPa vid hjullasten 8320 kg. Vid det lägre ringtrycket är understödsytan nästan en kvadratmeter!

Ett exempel på mätningar av tryck ges i figur 1. Figuren visar trycket vid körning fram och tillbaka med upptagaren. Den första och sista toppen motsvarar därför upptagarens framhjul, mätningarna i mitten trycket för upptagarens bakhjul, vars ringtryck ej varierades mellan körningarna. Av figuren framgår att trycket på 30 cm djup var betydligt högre vid det högre ringtrycket. Ett genomsnitt för samtliga mätningar vid lasten 8320 kg visas i figur 2. På 30 cm djup uppmättes betydligt lägre tryck vid 90 jämfört med 220 kPa ringtryck, något lägre på 50 cm och ingen skillnad mellan ringtrycken på 70 cm djup.

Tabell 1. Uppmätt understödsyta och beräknat genomsnittligt marktryck för olika hjullaster och ringtryck

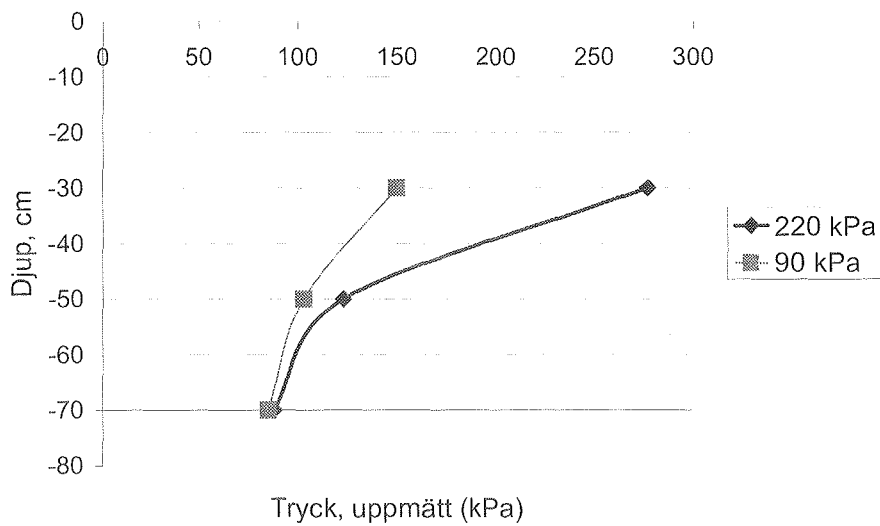
Last	Ringtryck (kPa)	Understödsyta	Beräknat marktryck (kPa)
8300	90	0,89	91
8300	220	0,49	166
12120	140	0,88	135
12120	220	0,64	185



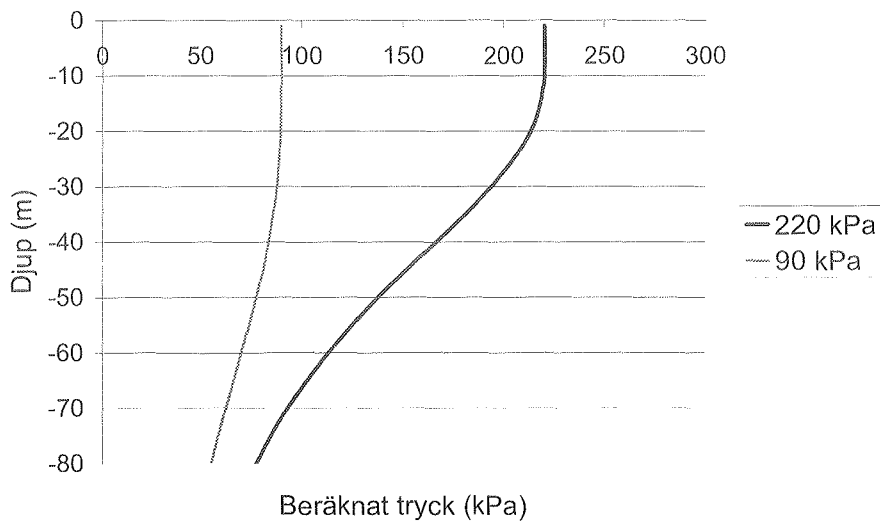
Figur 1. Mätning av tryck i marken vid körning fram och tillbaka med sexradig upptagare. Första och sista toppen svarar mot upptagarens framhjul med en hjullast på 8320 kg, topparna två och tre mot upptagarens bakhjul. Överst: 220 kPa ringtryck i framhjulen. Underst 90 kPa ringtryck.

I figur 3 redovisas också ett beräknat tryck för en hjullast på 8320 kg, och ett jämnt fördelat marktryck på 220 respektive 90 kPa, med utgångspunkt från Söhnes ekvationer för tryckfördelning i mark. Det uppmätta trycket var högre än det beräknade, speciellt på 30 cm. En möjlig förklaring till detta kan vara att trycket är ojämnt fördelat under däck och punktvis betydligt högre än ringtrycket. Detta stämmer också med att det beräknade och uppmätta trycket stämmer bättre överens på större djup, där inverkan av

ringtrycket är mindre. Det är också möjligt att de lastceller som används mäter ett högre tryck än jorden utsätts för, t.ex. beroende på skillnad i elasticitet mellan lastcellen och jorden. På 70 cm djup mättes ingen skillnad i tryck för de olika ringtrycken. Detta stämmer med teorin såtillvida att hjullasten har större betydelse än ringtrycket ju djupare man kommer i alven. För det beräknade trycket finns dock fortfarande en skillnad mellan olika marktryck på 70 cm djup.



Figur 2. Uppmätt tryck vid körning med olika ringtryck, hjullast 8320 kg.



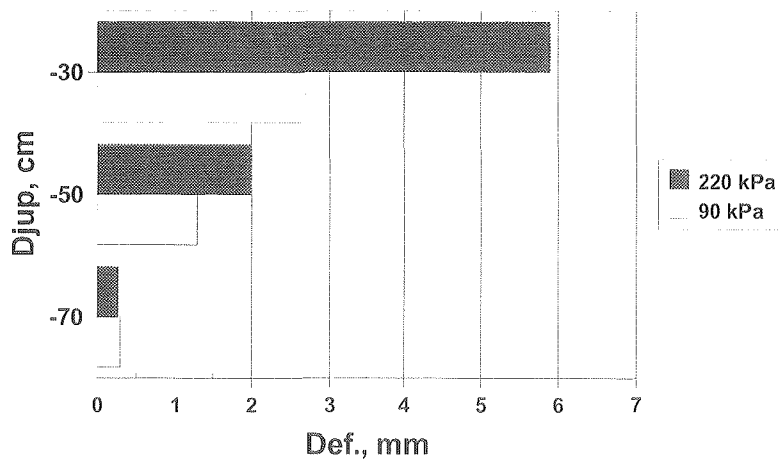
Figur 3. Beräknat tryck vid körning med olika ringtryck, hjullast 8320 kg.

I figur 4 redovisas deformationen på 30, 50 och 70 cm djup för olika ringtryck med 8320 kg hjullast. Trenden är densamma som för trycket i marken: skillnaden är stor (och statistiskt signifikant) på 30 cm djup, mindre på 50 cm djup medan det på 70 cm djup inte uppmättes någon skillnad mellan ringtrycken. I tabell 2 redovisas resultat från samtliga mätningar, både med 8320 och 12

120 kg hjullast. Vid den högre hjullasten uppmättes större tryck djupare ned i marken, vilket kunde förväntas. Skillnaden i deformation var dock liten mellan den högre och den lägre lasten. Det ska dock poängteras att det gjordes fler mätningar gjordes för hjullasten 8320 kg, och att resultaten för denna last är betydligt säkrare än för den högre lasten.

Sammanfattningsvis medförde en sänkning av ringtrycket en mycket stor förändring av däckets understödsyta, vilket resulterade i betydligt lägre tryck och deformation på 30 cm djup. På 70 cm djup uppmättes inte

någon skillnad mellan ringtrycken. Resultaten är mycket intressanta, och det är önskvärt med fortsatt forskning kring sänkta ringtryck som en metod för att minska packning i alven.



Figur 4. Vertikal deformation på 30, 50 och 70 cm djup vid körning med olika ringtryck och en last på 8320 kg.

Tabell 2. Mätning av tryck och deformation (vertikal rörelse) för olika ringtryck och hjullaster. Värden som ej följs av samma bokstäver är signifikant skilda ($P < 0,05$)

Last	Ringtryck (kPa)	Tryck (kPa)			Rörelse (mm)		
		30 cm	50 cm	70 cm	30 cm	50 cm	70 cm
8320	220	277a	123	88	5,9a	2,0	0,3
8320	90	150b	103	85	2,7b	1,3	0,3
12120	220	296	203	132	4,9	1,0	0,4
12120	140	260	140	121	4,3	2,7	0,4
	Högt	282	150	103	5,6a	1,8	0,32
	Lågt	177	116	97	3,2b	1,6	0,34
8320		214	113	86	4,3	1,6	0,28
12120		278	172	126	4,4	1,8	0,4

Packning av tunga betupptagare – effekt av ringtryck och hjullast på tryckutbredning i marken

Under vårvintern 2002 gjordes mätningar av marktryck och markrörelse på olika djup i marken för en sexradig betupptagare med utrustning för att reglera ringtryck. Vid en hjullast på 8,6 ton (framhjul) var trycket på 30 cm djup lägre vid lägre ringtryck. På större djup fanns inga signifikanta skillnader. Trycket under bakhjulet (3,3 ton) var mycket lägre än trycket under framhjulet på alla djup.

Under vårvintern 2002 gjordes ett försök där effekterna av ringtryck och hjullast på tryck i marken studerades. Försöket genomfördes på Rosenhälls Gård i Billeberga (Skåne) på en mellanlera under ganska blöta förhållanden med en sexradig betupptagare, märke Riecam. Betupptagaren hade en hjullast på 8,6 ton vänster fram och 3,3 ton vänster bak. Däcksutrustningen var Michelin 1050/50R32, som kördes med tre olika ringtryck i framdäcken: 100, 150 och 250 kPa. Ringtrycket i bakdäcket var 150 kPa.

Mätningarna av vertikala tryck och markrörelser gjordes på 30, 50 och 70 cm djup. Fyra mätningar gjordes per ringtryck och hjullast. Det gjordes ytterligare tryckmätningar i matjorden på 10 cm djup, för att få tryckfördelningen direkt under hjulen med hög upplösning både i körriktningen och på tvären.

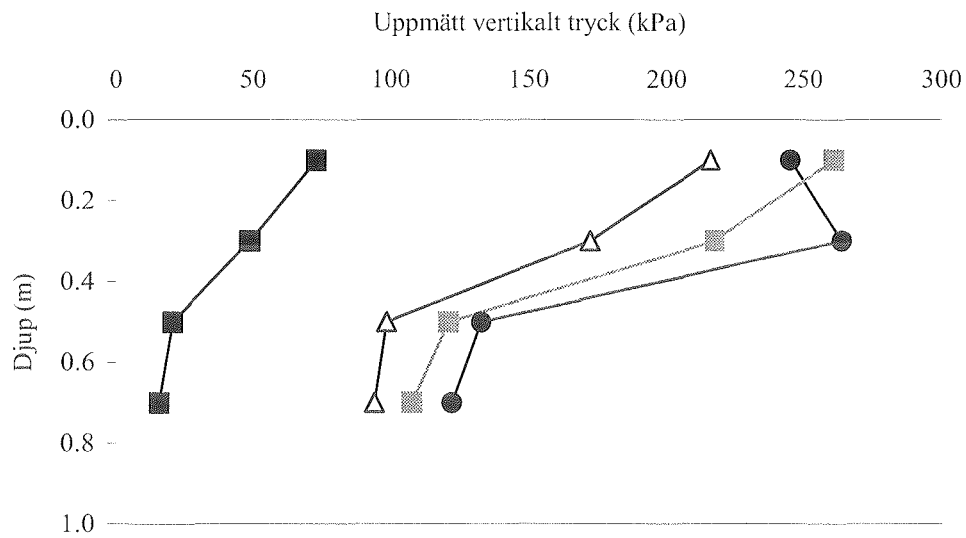
Tryck under de olika hjulen och vid de olika ringtrycken simulerades även med en enkel modell som använder *Soehnes* ansats för att beräkna tryck under en last med en viss anläggningsyta. Anläggningsyta och tryckfördelningen i anläggningsytan approximerades på tre olika sätt: (i) tryckmätningar på 10 cm djup användes som modellens indata; en cirkulär anläggningsyta med (ii) en jämn tryckfördelning och ett tryck lika med ringtrycket och (iii) med en konformig tryckfördelning med ett maximalt tryck på 2-3 gånger ringtrycket i mitten av anläggningsytan.

Resultat och diskussion

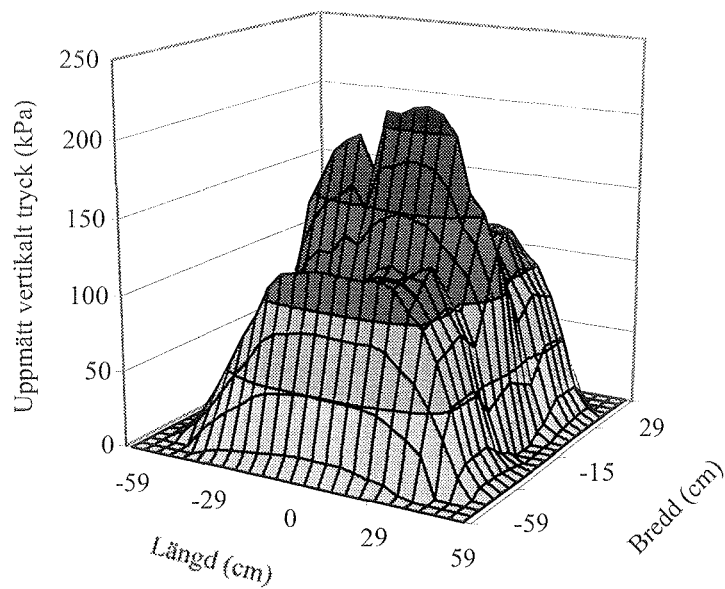
Ringtrycket hade en signifikant effekt på trycket på 30 cm djup (figur 5). Marktrycket

var mindre vid mindre ringtryck. Även den vertikala markrörelsen på 30 cm djup var större vid det största ringtrycket jämfört med lägre ringtryck. Marktrycket på 30 cm var till och med en aning högre än ringtrycket.

Detta beror på att trycket i kontaktytan, dvs direkt under ett däck, är ojämnt fördelat, vilket gör att det maximala trycket kan vara flera gånger högre än ringtrycket, beroende på däck, ringtryck, hjullast och fältförhållanden. Trycket mitt under däck vid 250 kPa ringtryck var till och med lägre än vid 150 kPa ringtryck, vilket kan bero på olika tryckfördelningar vid olika ringtryck. Tryckfördelning under det vänstra framdäcket vid ett ringtryck på 100 kPa visas i figur 6. Trots ett ringtryck på 100 kPa var det maximalt uppmätta trycket omkring 216 kPa. Trycket i matjorden avtog mycket svagt med djupet. Först på 30 till 50 cm djup skedde en kraftig minskning av trycket. På större djup fanns inga signifikanta skillnader i tryck. Ringtrycket och därmed trycket i kontaktytan påverkar trycket i matjorden, men även i de översta alvsikketen. På större djup beror dock trycket framför allt på hjullasten. Dessa resultat stämmer bra överens med en tidigare undersökning som gjordes vid avdelningen. Trycket på 70 cm djup var kring 100 kPa, vilket är relativt högt på detta djup. Det höga trycket berodde på den höga hjullasten. Trycket under bakhjulet var på alla djup mycket lägre än trycket under framhjulet (figur 5), vilket beror på den lägre hjullasten. Även i matjorden var det inte bara ringtrycket som bestämde marktrycket, utan också hjullasten tycks ha betydelse. Hjullastens betydelse för trycket i matjorden ska undersökas i framtiden.



Figur 5. Medelvärde av uppmätt tryck under betupptagarens vänstra framhjul men en hjullast på 8,6 ton och ett ringtryck på 250 kPa (svarta cirklar), 150 kPa (gråa rutor) samt 100 kPa (vita trianglar), och under betupptagarens vänstra bakhjul med en hjullast på 3,3 ton och ett ringtryck på 150 kPa (svarta rutor).



Figur 6. Uppmätt fördelning av det vertikala trycket under det vänstra framhjulet (8,6 ton) med ett ringtryck på 100 kPa.

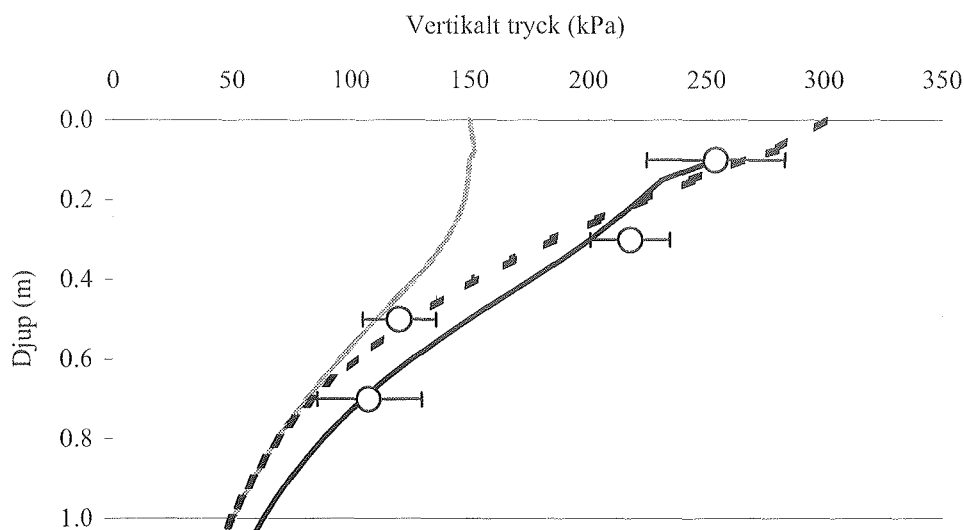
Figur 7 visar den beräknade tryckutbredningen under det vänstra framhjulet vid ett ringtryck på 150 kPa jämfört med det uppmätta trycket. När den uppmätta tryckfördelningen på 10 cm djup användes som indata var överensstämmelsen mellan mätningar och beräkningar tillfredsställande. Det syns dock att modellen inte tar hänsyn till olika jordlager och inte heller till deformationer i marken, vilket kan förklara små skillnaderna som finns mellan simulerade och uppmätta värden. När en cirkulär anläggningsyta med en jämn tryckfördelning antas blir dock det beräknade trycket betydligt för lågt ända ner till ungefär 50 cm djup. En konformig tryckfördelning som approximation visade sig i det fallet vara lämplig och kan också rättfärdigas med hänsyn till den uppmätta tryckfördelningen (figur 6). Beräkningarna med modellen tydliggör att tryckfördelningen i anläggningsytan påverkar trycket inte bara i

matjorden, utan också i de översta alvskikten. Tryckfördelningen i anläggningsytan för ett visst däck är påverkad av både ringtrycket och hjullasten. Beräkningarna med den lägre hjullasten leder till samma slutsats.

Sammanfattningsvis kan konstateras att - för ett visst däck - ringtrycket påverkar trycket i matjorden och de översta alvskikten. Risken för alvpackning kan dock bara effektivt minskas genom att köra med låga hjullaster.

Tack

Vi tackar Sten Segerslätt och medarbetare på Rosenhälls Gård (Billeberga) för deras stora intresse och hjälp under mätningarna.



Figur 7. Uppmätt vertikalt marktryck (medel och SEM) under vänstra framhjulet med en hjullast på 8,6 ton (vita cirklar) och beräknat vertikalt tryck efter *Soehne*, med tryckmätningar på 10 cm djup som indata (svart linje); en cirkulär kontaktyta med en jämn tryckfördelning med ett tryck lika med ringtrycket (grå linje), och med en konformig tryckfördelning med ett maximalt tryck i mitten av anläggningsytan på 300 kPa (svart punkterad linje) som indata.

Marktryck under dubbelmontage jämfört med enkelmontage

Under hösten 2001 utfördes mätningar av marktryck och markrörelse på olika djup i marken med både dubbelmontage och enkelmontage. Last per enskilt hjul var runt 2,5 ton både för dubbelmontaget och enkelmontaget.

Tryck och packning i matjorden, liksom i alven, var lika stora under dubbelmontaget som under enkelmontaget. Den praktiska betydelsen av detta är att hjullasten bestämmer trycket i marken, inte axelbelastningen.

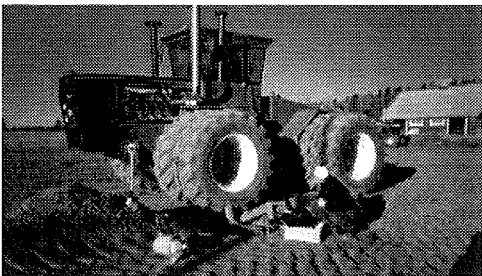
Under hösten 2001 utfördes ett försök där tryckutbredning i marken under ett dubbelmontage studerades. Försöket genomfördes på Staby Säteri i Örsundsbro (Uppland), och var utlagt som en jämförelse mellan dubbelmontage och enkelmontage.

En John Deere 4640 med enkelmontage användes, se figur 8. Traktorn vägde 5,0 ton på bakaxeln, d.v.s. 2,5 ton per hjul. Framaxelsbelastningen var 2,1 ton. Bakdäckens dimension var 710/70 R38 med ett ringtryck på 60 kPa.



Figur 8. John Deere 4640.

Traktorn med dubbelmontage var en Steiger, modell "hembyggd" (figur 9). Axelbelastningen var 6,1 ton bak och 8,7 ton fram. Varje framhjul bar alltså 2,2 ton. Traktorn hade åtta 710/70 R38 däck som kördes med ett ringtryck på 60 kPa i alla däck.



Figur 9. Steiger med dubbelmontage.

Däcksutrustningen och hjullasten på framaxeln på Steigern var alltså ungefär desamma som däcksutrustningen och hjullasten på bakaxeln på John Deeren. Avståndet mellan det inre och yttre hjulet (kant till kant) var 10 cm på dubbelmontaget. Försöket utfördes på fuktig mark men med liten spårbildning.

Mätningarna av vertikala tryck och markrörelser gjordes på 15, 30 och 50 cm djup. Mätningarna gjordes på fyra ställen under dubbelmontaget: mitt under det inre hjulet, mitt mellan hjulen, mitt under det yttre hjulet och under kanten av det yttre hjulet. Under enkelmontaget mättes både mitt under hjulet och under hjulets kant.

Resultat och diskussion

Figur 10 visar tryckfördelningen under dubbelmontaget och enkelmontaget. Trycket interpolerades från medelvärden av fyra mätningar på de ställen och djupen beskrivna ovanför.

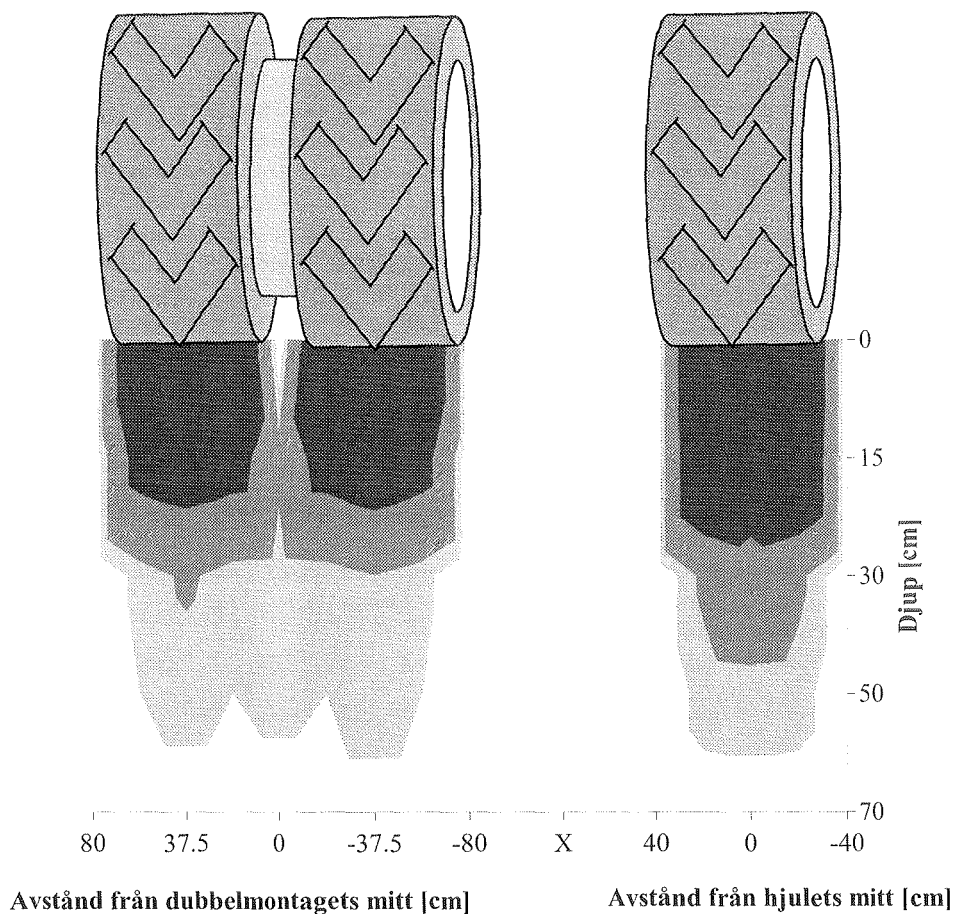
Under dubbelmontaget var trycket på 15 och 30 cm djup betydligt lägre mitt mellan hjulen jämfört med under mitten av både det inre och yttre hjulet. På 30 cm djup var trycket mitt under hjulen lika högt som under hjulens kant. Först på 50 cm djup var trycket ungefär lika stort mitt mellan hjulen och mitt under hjulen, men det uppmättes bara ringa tryck (runt 30 kPa) på dessa djup.

Trycket under enkelmontaget skilde sig inte från trycket under dubbelmontagets inre och yttre hjul. Trycket under enkelmontaget var till och med en aning högre på 15 och 30 cm djup, vilket troligen beror på den lite högre hjullasten på 2,5 ton jämfört med 2,2 ton på dubbelmontaget.

Experimentet visade att ett dubbelmontage verkade som två enskilda hjul vad gäller tryck i marken. Trycksamspelet i marken från båda hjulen var väldigt litet, trots att mellanrummet mellan hjulen bara var 10 cm.

Hjullasten, ihop med däckparametrarna – och inte axellasten – är den kritiska faktorn som bestämmer trycket i marken.

Tack till Stefan Karlsson och hans familj på Staby Säteri för deras hjälp, samarbete och gästvänlighet.



Figur 10. Tryckfördelning under dubbelmontaget (vänster) och enkelt hjul (höger). Interpolation från medelvärde av fyra mätningar. Ljusgrått 20-40 kPa, mörkgrått 40-100 kPa, svart 100-200 kPa.

Marktryck under en treaxlad kalkspridare – trycksamspel i marken under tandemaxlar

Under våren 2002 gjordes mätningar av marktryck och markrörelse på olika djup i marken för en treaxlad kalkspridare. Trycket var betydligt lägre mitt emellan axlarna jämfört med direkt under mitten av en enskild axel, även på 70 cm djup, trots att axlarna satt tätt efter varandra. Detta innebär att tandem och boggieaxlar verkar som enskilda axlar vad gäller tryck i marken.

Under våren 2002 gjordes ett försök där trycksamspelet i marken under tandemaxlar studerades. Försöket genomfördes utanför Strängnäs på en styv lera under fuktiga förhållanden med en treaxlad kalkspridare (figur 11). Kalkspridarens totalvikt var 19,2 ton. Varje axel vägde således 6,4 ton. Spridaren var utrustad med 700/50-26,5 Trelleborg Twin däck med ett ringtryck på 160 kPa. Axelavståndet var 1,45 m. Mätningarna av vertikala tryck och markrörelser gjordes på 30, 50 och 70 cm djup. Tre körningar gjordes på fältet (upprepningar).

Resultat och diskussion

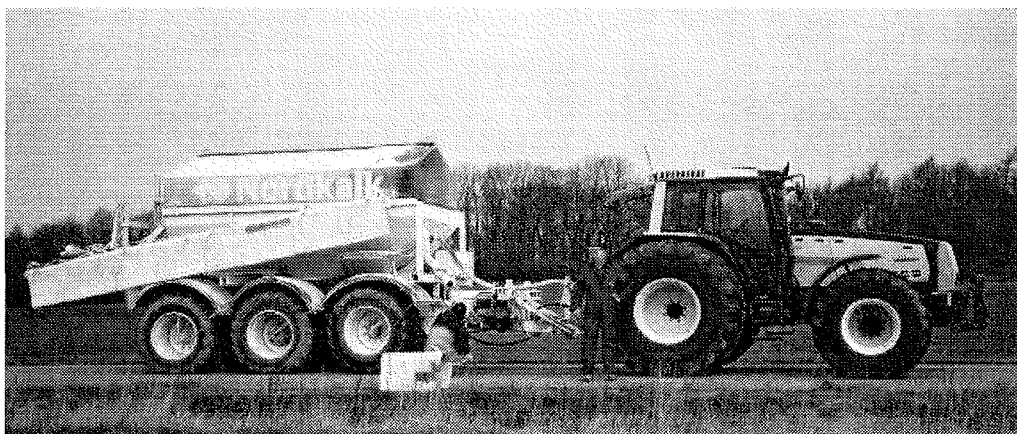
Trycket var betydligt lägre mitt emellan axlarna jämfört med direkt under mitten av en enskild axel, även på 70 cm djup, se figur 12. Trycksamspelet i marken från de tre axlarna var alltså litet, trots att axlarna satt tätt efter

varandra med ett axelavstånd på 1,45 m vid en däcksdiameter på 1,35 m.

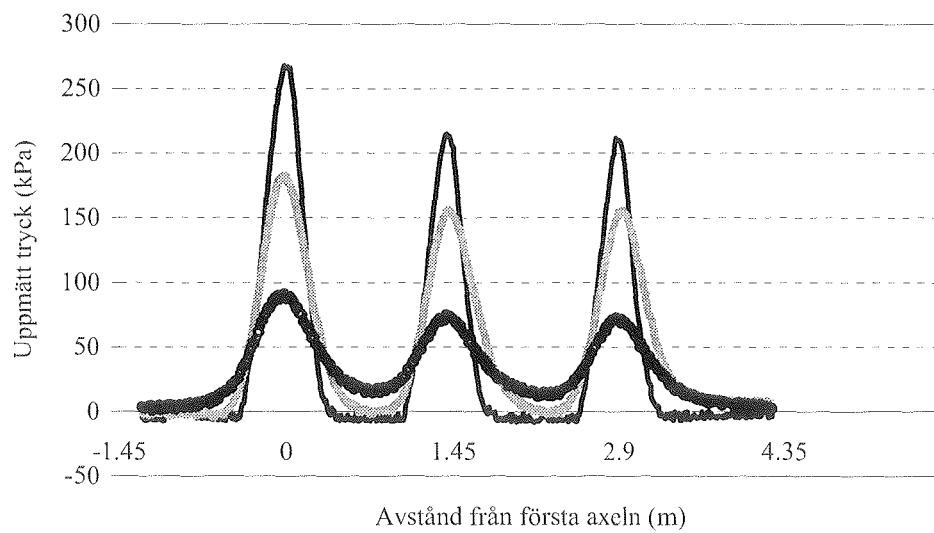
Experimentet visade att tandem- eller boggieaxlar verkar som enskilda axlar vad gäller tryck i marken.

Resultaten visar att hjullasten huvudsakligen bestämmer trycket i alven. Detta har stor praktisk betydelse. Genom att fördela maskinens totalvikt på flera axlar kan hjullasten minskas. En reducering av hjullasten innebär också att ringtrycket kan sänkas, vilket ytterligare minskar risken för markpackning i matjorden och de översta alvskikten.

Vi tackar Ove Sjöberg på Ullhälls Gård i Strängnäs och Mats Persson, ägare till den treaxlade kalkspridaren och hans medarbetare för deras stora hjälp under mätningarna.



Figur 11. Treaxlad kalkspridare.



Figur 12. Uppmätt tryck på 30 cm (svart linje), 50 cm (grå linje) och 70 cm djup (svart punkterad linje) under den treaxlade kalkspridaren med en axelbelastning på 6,4 ton.

Markpackning under band- och hjultraktor vid "on land" plöjning

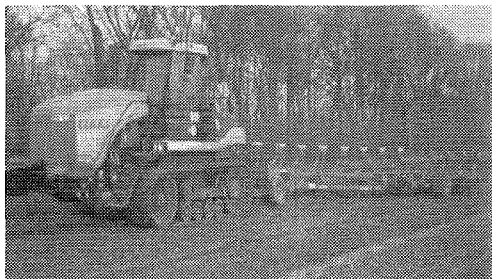
I slutet av november gjordes mätningar av marktryck och markrörelse i matjorden och i alven under en bandtraktor (18,5 ton) och under en hjultraktor (19,5 ton) vid "on land" plöjning med 9-, respektive 12-skärig plog.

Mätningarna visade generellt låga marktryck och rörelser i alven under båda fordonen, lägst under bandtraktorn, dock ej signifikant. Markens vattengenomsläpplighet efter körning med hjultraktor var lägre än efter körning med bandtraktorn.

Med "standardinställning" vid plöjning uppmättes höga marktryck under bakre delen av banden. Genom att justera bandtraktorns dragpunkt var det möjligt att få en relativt jämn tryckfördelning under banden och därmed låga maximala tryck.

Under sen höst gjordes mätningar för att jämföra tryckfördelning under en bandtraktor och under en hjultraktor vid "on land" plöjning. Mätningarna genomfördes på Vallö Gods på Själland, några mil söder om Köpenhamn i Danmark. Jordarten var en lättlera, och vattenhalten var under försökstidpunkten omkring 20 procent i hela profilen ner till en meters djup.

Bandtraktorn var en CLAAS Challenger 2, 65E, totalvikt på 18,5 ton.



Kontaktarean var två gånger 2,1 m², som resulterade i ett nominellt anläggningstryck på 45 kPa.

Hjultraktorn var en John Deere 9400, 425 hk, totalvikt på 19,5 ton.



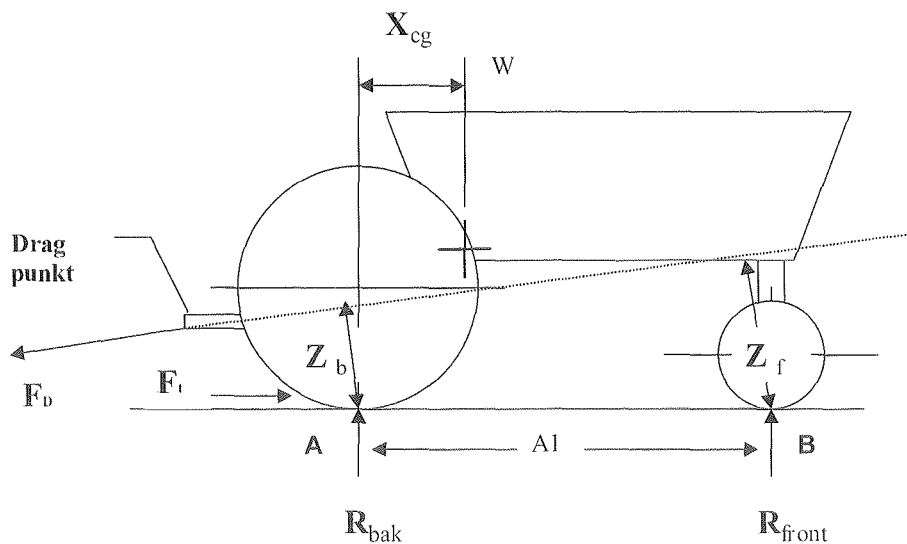
På asfalt och utan plog var kontaktarean fyra gånger 0,9 m², vilket resulterade i ett nominellt anläggningstryck på 60 kPa på framhjulen och 50 kPa på bakhjulen. Ringtrycket var 80 kPa i framhjulen och 70 kPa i bakhjulen.

Båda fordonen plöjde "on land" med en 9-, respektive 12-skärig plog.

Vertikala marktrycket och markrörelsen under fordonen uppmätts i fält. Från en grävd grop borrades 1,4 m långa mätsonder horisontellt in i marken på 30, 50, samt 70 cm djup. Jordstrukturen kring mättutrustningen blev därvid lämnad ostörd. Sonderna installerades precis under mittlinjen av bandet respektive hjulet.

Vid försöket togs jordprover ut på 10, 30, 50, samt 70 cm djup för att bestämma förkonsolideringstryck i laboratoriet. Förkonsolideringstrycket är ett mått på markens hållfasthet. Bara ringa packning förväntas när marktrycket är mindre än förkonsolideringstrycket, medan relativt stor packning kan förväntas när marktrycket överstiger förkonsolideringstrycket.

Efter körningarna togs ytterligare jordprover ut för att bestämma markens skrymdensitet och vattenledningsförmåga, mätt som mättad vattengenomsläpplighet. Jordprov togs ut omedelbart under plogbotten på 30 cm djup under mittlinjen av både bandtraktorns och hjultraktorns spår samt i den ostörda marken.



Figur 13. Krafter som verkar på en traktor. A1: avstånd mellan fram- och bakhjul, Z_f : avstånd från draglinjen till punkt B, Z_b : avstånd från draglinjen till punkt A, X_{cg} : avstånd mellan mittlinjen av bakaxel och traktorns tyngdpunkt, W : traktorns tyngdkraft, R_{bak} : hjullast i punkt A under bakhjul, R_{front} : hjullast i punkt B under framhjul, F_D : dragkraft, och F_T : drivkraft.

Teori om viktöverföring vid plöjning

En traktor som drar en plog genom jorden har en annan viktfordelning än en traktor utan plog. Också dragpunktens position har stor betydelse. Figur 13 illustrerar de olika krafterna vid t.ex. plöjning. Friktionskrafterna försummas för enkelhetens skull.

Hjullaster på hjulen är givna vid:

$$R_{front} = \frac{W X_{cg} - F_d Z_b}{A1} \quad (\text{Ekvation 1})$$

$$R_{bak} = \frac{(A1 - X_{cg})W + F_d Z_f}{A1} \quad (\text{Ekvation 2})$$

Om t.ex. traktorns tyngdpunkt (allt annat oförändrat) förskjuts framåt mot framaxeln genom att sätta på extra frontvikt, ökar både X_{cg} och traktorns tyngdkraft W . Enligt ekvation 1 ökar därmed hjullasten på framhjulen (R_{front}). Observera att hjullasten på bakhjulen (R_{bak}) kan minska eller öka (ekvation 2), beroende på förändringar i X_{cg} och W .

Om dragpunkten sänks, reduceras avstånden Z_b och Z_f mellan draglinjen och punkt A

respektive B. Hjullasten på framhjulen (R_{front}) ökar därmed (ekvation 1), medan hjullasten på bakhjulen (R_{bak}) minskar (ekvation 2). Om däremot dragpunkten höjs, ökar Z_b och Z_f . Enligt ekvationerna 1 och 2 minskar därmed hjullasten på fronthjulen (R_{front}), samtidigt som hjullasten på bakhjulen (R_{bak}) ökar.

Om traktorn inte drar något redskap blir F_D lika med noll, och tryckfördelningen är given enbart av tyngdpunktens placering.

Förundersökning av tryckfördelningen under band- och hjultraktor

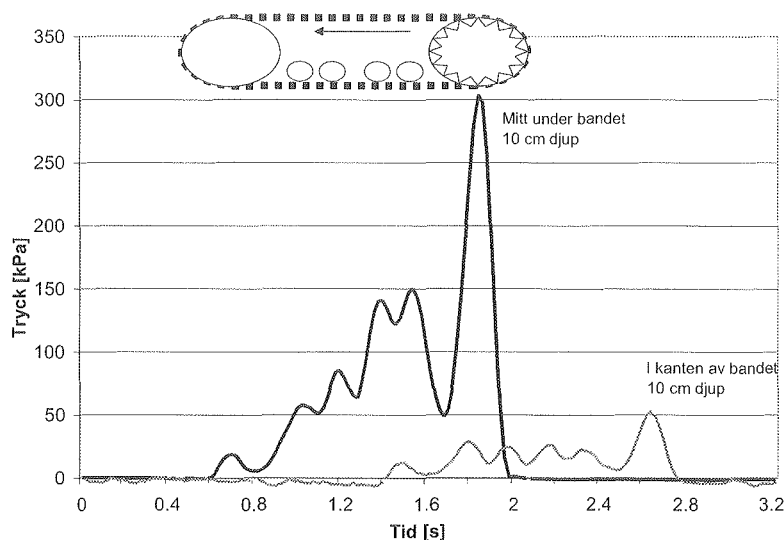
Innan den egentliga jämförelsen gjordes utfördes en specialstudie för att mäta var trycket var störst under hjultraktorns dubbelmonterade hjul: mitt under det inre hjulet, mellan de två hjulen, och mitt under det yttre hjulet. Resultaten är sammanfattade i tabell 3.

Tabell 3. Tryckmätningar på tre djup (30, 50 och 70 cm) och tre ställen (under inre hjulet, mitt under dubbel-montagen och under det yttre hjulet).

Djup [m]	Tryck [kPa]		
	inre hjul	mitten	yttre hjul
0.3	110	53	140
0.5	40	35	40
0.7	20	20	18

De visar att trycket skiljer sig bara på 30 cm djup, och är då högst under det yttre hjulet. Mätningarna gjordes därför under det yttre hjulet.

Mätningar under en bandtraktor som gjordes under våren 2000 (Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1999) visade, att det är viktigt att ha en jämn viktfordelning under bandfordon för att undvika höga marktryck. Därför gjordes en undersökning av trycket under bandtraktorn. Figur 14 visar

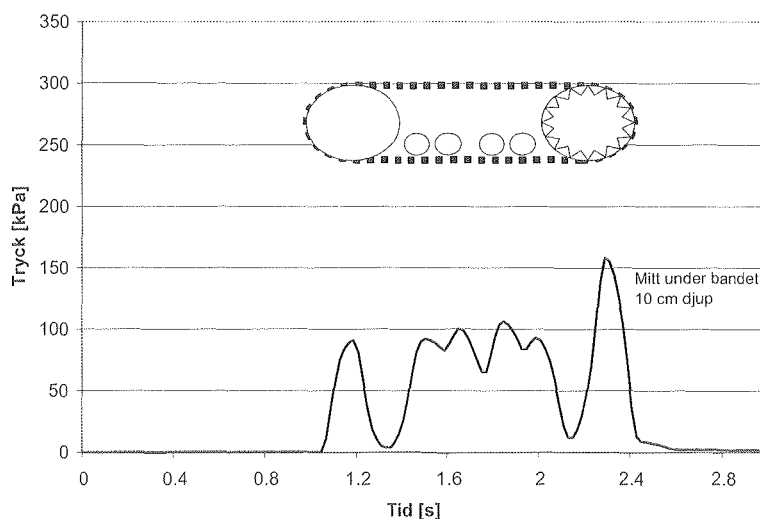


Figur 14. Mätning av trycket på 10 cm djup under bandtraktor (totalvikt 18,5 ton) som plöjer med en 9-skärig plog.

marktrycket på 10 cm djup under bandtraktorn vid plöjning när den används med "standardinställning". Som man ser var viktfordelningen under traktorn ojämn, och trycket på 10 cm djup under den bakre delen av banden översteg 300 kPa, vilket är mycket över det nominella marktrycket. Det syns tydligt att mest vikt ligger på bakre delen av traktorn, och att främsta delen grovt taget "hänger" i luften. Detta betyder, att bara en del av hela bandet verkade som anläggningsyta, och att kontaktrycket därmed ökade. Också i sidled var trycket ojämnt fördelat, i kanten av bandet översteg trycket inte 50 kPa.

Den ojämn lastfördelningen i längdriktningen kan bero på två faktorer när fordon, plog och dragkraft antas som konstanter: att traktorns tyngdpunkt är placerad för långt mot bakaxeln, eller att redskapets dragpunkt är för högt (ekvationer 1 och 2).

Justering av tyngdpunkten kan göras antingen genom att sätta extra frontvikt på traktorn, eller med att ta bort vikt från den bakre delen av traktorn, t.ex. genom att sätta på ett hjul på plogen så att den blir bogserad.



Figur 15. Mätning av trycket på 10 cm djup under en Caterpillar bandtraktor (totalvikt 18,5 ton) som plöjer med en 9-skärig plog. Dragpunkten är här 23 cm lägre än i figur 14.

Vid detta tillfälle sänkte vi dock dragpunkten 23 cm, vilket gav en betydligt bättre viktfordelning av traktorn vid plöjning, se figur 15.

Resultat

I tabell 4 redovisas det maximala marktrycket, den vertikala markrörelsen samt förkonsolideringstrycket på 30, 50 och 70 cm djup. Det högsta trycket (95 kPa) uppmättes under hjultraktorns bakhjul på 30 cm djup, och under framhjulen var trycket på samma djup 60 kPa. Vi ser här effekten av att viktfordelningen förändras vid plöjning. Det

nominella marktrycket var 60 kPa på framhjulen och 50 kPa på bakhjulen, men dragkraften gjorde att marktrycket på bakhjulen ökade, samtidigt som marktrycket på framhjulen minskade (se ekvationer 1 och 2).

Trycket under banden på 30 cm djup var 28 kPa, vilket är förvånande lågt. På 50 och 70 cm djup var trycket lågt för både hjul- och bandtraktor. På alla djup var trycket lägre än markens förkonsolideringstryck. Detta betyder att packningen var liten för både bandtraktorn och hjultraktor, vilket också kan ses av rörelsemätningarna.

Tabell 4. Maximala trycket och deformationen under fram- och bakhjul och under bandet, samt förkonsolideringstrycket på 30, 50 och 70 cm djup. Medel av tre mätningar.

Djup [m]	Förkons. tryck [kPa]	Hjultraktor			Bandtraktor	
		Tryck [kPa]	Tryck [kPa]	Rörelse [mm]	Tryck [kPa]	Rörelse [mm]
0.3	100	60	95	-1.2	28	-0.9
0.5	110	21	30	-0.3	23	-0.3
0.7	130	12	13	-0.1	12	-0.1

Tabell 5. Mättad vattengenomsläpplighet och skrymdensitet efter körningar.

	Hjultraktor	Bandtraktor	Opackat
Skrymdensitet [g cm ⁻³]	1.65	1.57	1.66
Vattenledningsförmåga [mm t ⁻¹]	1.77	60.48	17.64

Resultat från mätningarna av vattengenomsläppligheten visas i tabell 5. Vattengenomsläpplighet där det kördes med hjultraktorn var lägre än där det kördes med bandtraktorn och för den ostörda marken, skillnaderna var dock ej signifikanta. Inga signifikanta skillnader i skrymdensitet uppmättes. Vattengenomsläppligheten är en parameter som varierar kraftigt i naturen även inom små områden. Fastän det är intressant att leden där bandtraktorn körde visade hög vattenledningsförmåga, kan detta bero på naturlig variation. Flera undersökningar behövs här för att dra några slutsatser.

Diskussion

Mätningar av marktryck och markrörelse i matjorden och i alven under en bandtraktor (18,5 ton) och under en hjultraktor (19,5 ton) vid "on land" plöjning med 9-, respektive 12-skärig plog, visade låga marktryck i alven under båda fordonen, lägst under bandtraktorn, dock inte signifikant. Markens vattengenomsläpplighet efter körning med hjultraktor var mindre än efter körning med bandtraktorn, dock ej signifikant.

Ur packningssynpunkt är en jämn viktfördelning mycket önskvärd. Enligt både teori och praktik kan en jämn viktfördelning uppnås genom att sätta på extra vikter, eller att

justera dragpunkten. Om det är praktiskt möjligt är den sista åtgärden alltid att föredra eftersom det är önskvärdt att hålla fordonets totalvikt så låg som möjligt.

Bandtraktorn är känslig för viktöverföring under jordbearbetning. Fel justering kan ge mycket höga marktryck. Omvänt visade mätningarna att den med rätt justering ger mycket låga marktryck. Eftersom olika typer av jordbearbetning ger olika behov av dragkraft är det nödvändigt att justera bandtraktorn specifikt för varje typ av jordbearbetning för att undvika höga marktryck och därav resulterande markpackning. Dragkraften varierar dessutom något med bland annat jordens textur, vattenhalt, packningsgrad, föregående gröda, bearbetningsdjup, vikt och typ av redskap, fordonets hastighet, m.m. En praktisk lösning på problemen skulle kunna vara att installera en mätsond i banden så att föraren i kabinen kontinuerligt kan kontrollera om tryckfördelningen under banden är jämn.

Tack till Bregentved Gods, Vallö Gods och Krenkerup Gods för deras stora hjälp, utan den hade det inte varit möjligt att genomföra dessa mätningar.

Packning vid "on-land" plöjning - jämförelse mellan bandtraktor och hjultraktor

Under hösten 2001 gjordes mätningar av marktryck och markrörelse på olika djup i marken vid "on land" plöjning med både bandtraktor och hjultraktor. Dessutom togs cylindrar ut i matjorden för att mäta makroporositet och mättad vattengenomsläpplighet. Trycket och packningen var lägre under bandtraktorn, fastän den vägde nästan dubbelt så mycket.

Under hösten 2001 gjordes ett försök där effekterna av plöjning på packningen både i matjorden och i alven studerades. Försöket genomfördes på Krenkerup Gods på Lolland (Danmark), och var utlagt som en jämförelse mellan bandtraktor och hjultraktor vid "on land" plöjning.

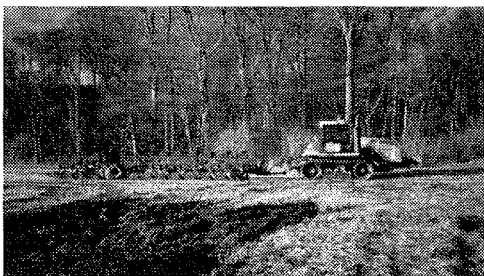
Hjultraktorn var en Fendt 920 som drog en 7-skärig plog, se figur 16.



Figur 16. Fendt 920 med 7-skärig plog.

Traktorns statiska totalvikt var 9,7 ton, uppdelad i 5,7 ton på framaxeln och 4 ton på backaxeln, och den körde med ett ringtryck på 100 kPa både i bakdäcken och i framdäcken.

Bandtraktorn var en CLAAS Challenger 65-E (figur 37) med en totalvikt på 18,5 ton.



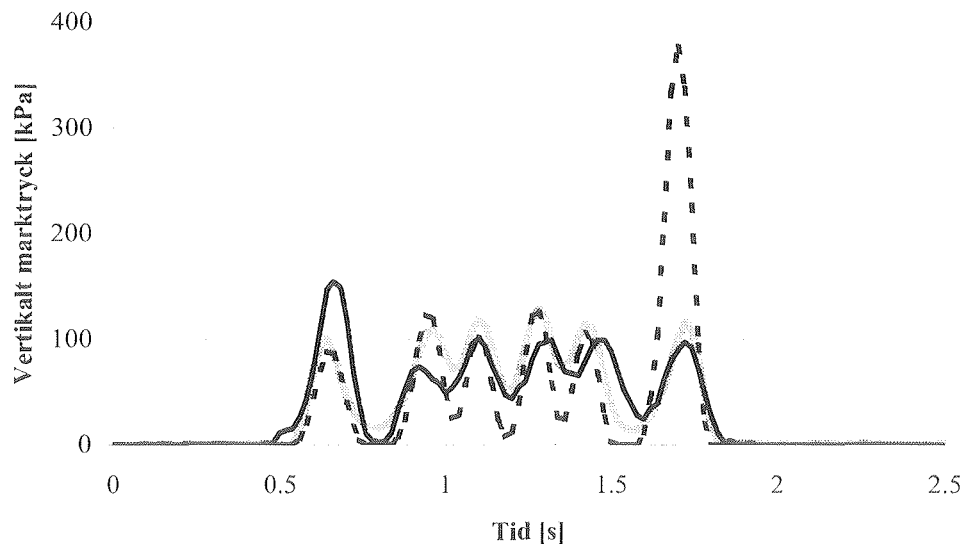
Figur 17. CLAAS Challenger 65-E med 12-skärig plog

Anläggningsytan var två gånger 2,1 m² som resulterade i ett nominellt kontaktryck på 45 kPa. Bandtraktorn drog en 12-skärig plog. Mätningarna av vertikala tryck och markrörelser gjordes på 15, 30 och 50 cm djup från den oplöjda markytan. Det gjordes ytterligare tryckmätningar i matjorden på 10 cm djup, för att få tryckfördelningen direkt under bandet respektive hjulet med hög upplösning både i körriktningen och på tvären.

Resultat och diskussion

Tryckfördelning under bandtraktor och hjultraktor i matjorden

Trycket under bandtraktorn var mycket ojämnt fördelat när det kördes med standardinställning av plog och trepunktslift (figur 18), dvs som bandtraktorn hade använts under höstplöjningen. Den ojämna tryckfördelningen under bandet beror på en dålig anpassning av plogens dragpunkt i förhållande till de aktuella fältförhållanden och plöjningsdjupet. I detta exempel var trycket mycket högt under det sista hjulet, vilket betydde att dragpunkten var för hög. Genom att sänka dragpunkten med hela 15 cm kunde en jämn tryckfördelning uppnås. Var däremot dragpunkten för låg (eller om det sattes på för mycket frontvikt), blev bandtraktorn framtung. Dragpunktens effekt på tryckfördelningen under bandet visas i figur 18.



Figur 18. Dragpunktens effekt på tryckfördelning mitt under bandet. Tryckmätningar på 10 cm djup med optimalt dragpunkts-läge (grå linje), med standardintällning med för hög dragpunkt (streckad svart linje), och med för låg dragpunkt (svart linje). Observera att det genomsnittliga marktrycket är 65 kPa för alla tre linjer.

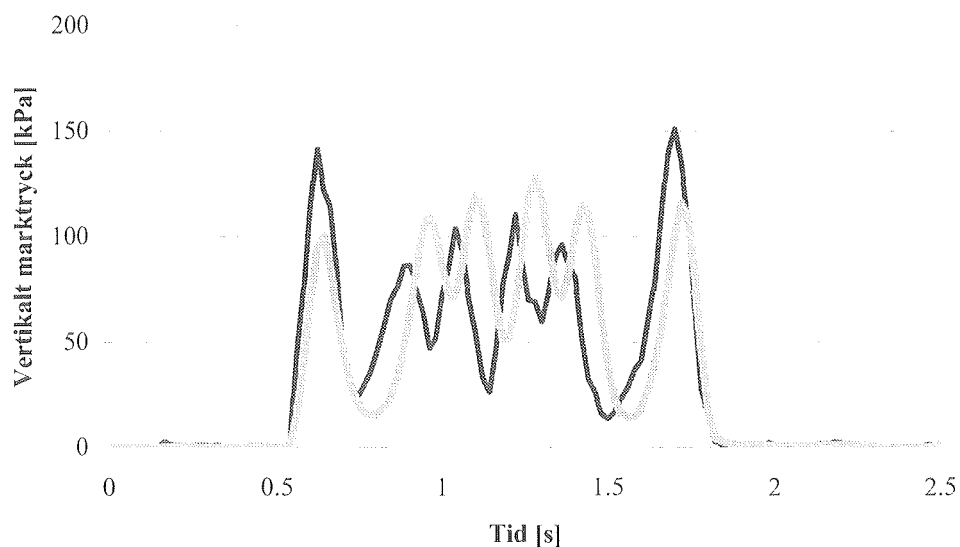
En viktig faktor för att få en jämn tryckfördelning är också att ha rätt tryck på stödrullarna, vilket kan justeras hydrauliskt. För lågt tryck på stödrullarna innebär högre tryck på fram- och bakhjulet. I figur 19 visas att en jämnare tryckfördelning fås genom att öka trycket på stödrullarna. Trycket på stödrullarna får dock inte vara för högt heller. Figur 20 visar att trycket under bandet är ojämnt på tvären. Trycket var högst under bandets mitt och betydligt lägre under bandets kant. Varje stödrulle och de två stora hjulen syns tydligt, eftersom bandet är mjukt i längsriktningen.

Figur 21 visar trycket under hjultraktorns fram- och bakdäck. Lägst tryck uppmättes under däckens mitt, medan trycket var högst mitt mellan däckens mitt och kant. Det maximala trycket var drygt 150 kPa, alltså 50 procent högre än ringtrycket, som var 100 kPa.

Tryck och deformation på olika djup

Det vertikala trycket på de olika djupen visas i figur 22. Trycket på 15 och 30 cm djup var betydligt högre under hjultraktorn än under bandtraktorn. På 50 cm djup skilde sig trycket inte längre under de olika fordonen. Trycket i matjorden minskade bara marginellt med djupet, dvs att trycket var nästan detsamma på 15 och på 30 cm djup. I alven skedde en kraftig tryckminskning mellan 30 cm och 50 cm djup, och trycket på 50 cm djup var bara lite drygt 20 kPa.

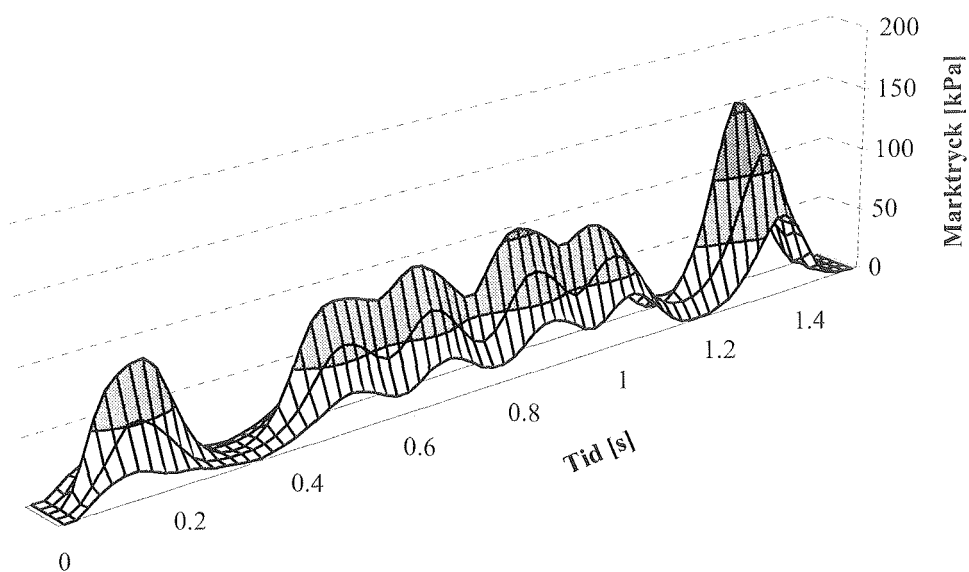
Mätningarna av de vertikala markrörelserna visade samma mönster som tryckmätningarna (figur 23). Det högre trycket under hjultraktorn resulterade alltså också i större deformationer. Också här var skillnaderna störst på 15 cm djup, medan deformationen på 50 cm djup var lika under både bandtraktorn och hjultraktorn.



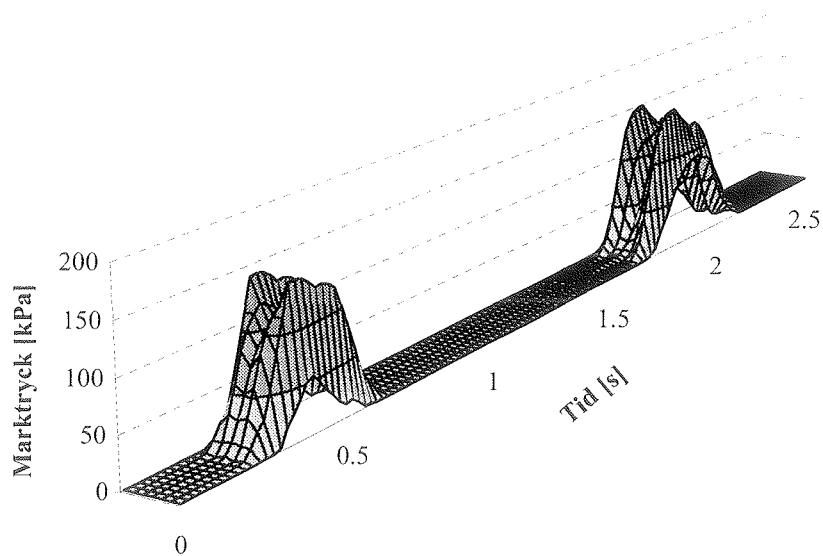
Figur 19. Mätning av trycket mitt under bandet på 10 cm djup med för lågt tryck på stödrullarna (svart linje) och med optimalt tryck på stödrullarna (grå linje). Det genomsnittliga marktrycket är 65 kPa för båda linjer.

Trycket liksom deformationen under bandtraktorn var alltså mindre på 15 och 30 cm djup jämfört med hjultraktorn på grund av det lägre kontaktrycket, fastän bandtraktorn vägde nästan dubbelt så mycket som

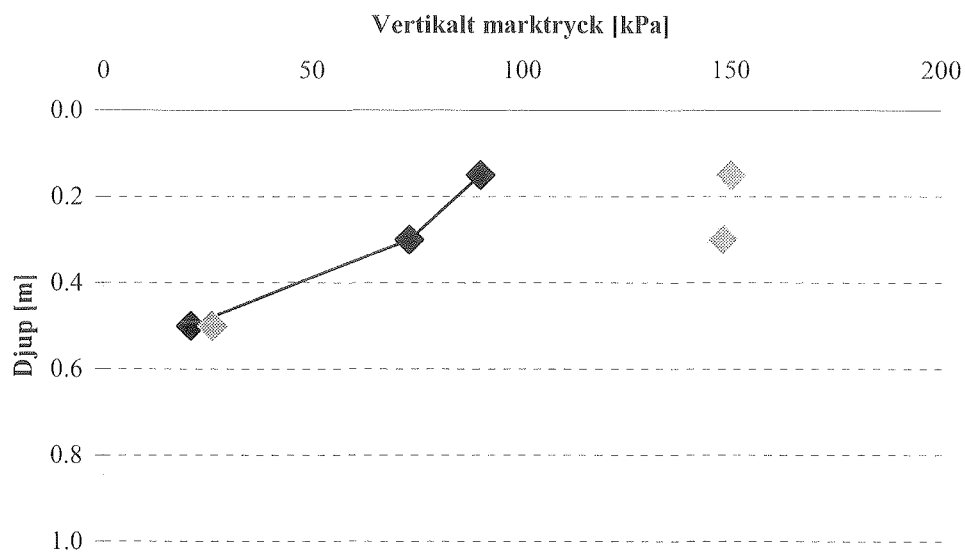
hjultraktorn. Djupare nere i alven var trycket dock detsamma för bandtraktorn och hjultraktorn.



Figur 20. Exempel på uppmätt vertikalt marktryck under bandet på 10 cm djup. Y-axeln: avståndet från bandets mitt.



Figur 21. Uppmätt vertikalt marktryck under hjultraktorns framhjul (första toppen) och bakhjul (sista toppen) på 10 cm djup. Medelvärde av fyra mätningar. Y-axeln: avståndet från hjulens mitt.

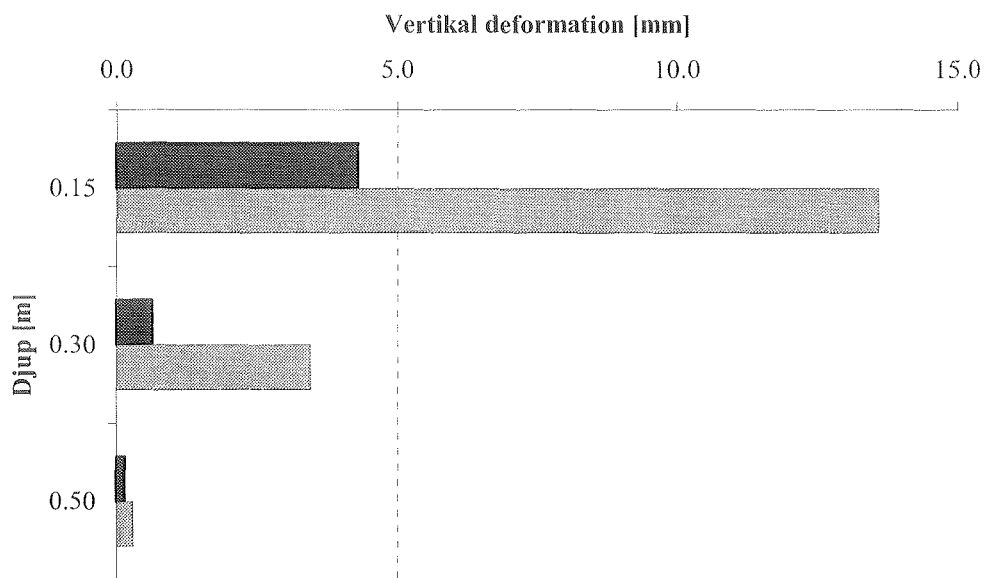


Figur 22. Uppmätt tryck vid "on-land"-plöjning med bandtraktor (svart linje) och hjultraktor (grå linje). Medelvärde av 8 mätningar.

Sammanfattningsvis kan konstateras att en bandtraktor under vissa förhållanden kan minska risken för packning, men bara om den är väl balanserad. Att få en jämn lastfördelning på en bandtraktor är mycket svårt, eftersom den viktigaste faktorn – dragkraften – starkt påverkas av jordart, markförhållande och plöjningsdjup. Att dragkraften påverkar lastfördelning gäller i princip också för en hjultraktor, men till skillnad från det stela bandet är däcken mjuka så att anläggningsytan ökar med en större last.

En ojämn lastfördelning på en hjultraktor har alltså inte lika stora konsekvenser som den har på en bandtraktor.

Vi tackar Rupert Gorm Reventlow-Grinling, Søren Jespersen, Hugo Jørgensen och Kurt Rasmussen på Krenkerup Gods för deras hjälp, samarbete och gästvänlighet.



Figur 23. Uppmätt deformation vid “on-land”-plöjning med bandtraktor (svarta staplar) och hjultraktor (gråa staplar). Medelvärde av 8 mätningar.

Packning vid plöjning - jämförelse mellan konventionell plöjning och "on land" plöjning

Under sen höst gjordes mätningar av tryck och packning på olika djup i marken vid både konventionell plöjning och "on land" plöjning.

Trycket och packningen var mycket lägre vid "on land" plöjning i både plogsula och alv.

Under senhösten gjordes ett försök där effekterna av olika plöjnings varianter på packningen i alven studerades. Försöket genomfördes på Krenkerup Gods på Lolland (Danmark), och var utlagt som en jämförelse mellan konventionell plöjning och "on land" plöjning.

Traktorn var en Fendt 920 som drog en 7-skärig plog.



Samma traktor och plog kunde användas vid både konventionell och "on land" plöjning. Traktorns totalvikt var 9,7 ton, uppdelad i 5,7 ton på frontaxeln och 4 ton på backaxeln, och den körde med ett ringtryck på 140 kPa i bakdäcken och 120 kPa i framdäcken.

Det gjordes ytterligare mätningar med en bandtraktor, som plöjde "on land". Den traktorn var en CLAAS Challenger med en totalvikt på 18,5 ton.



Anläggningsytan var två gånger 2,1 m² som resulterade i ett nominellt kontaktryck på 45 kPa. Bandtraktorn drog en 12-skärig plog.

Jordarten var en lättlera, och mätningarna gjordes vid mycket torra förhållanden. Vattenhalten var bara omkring 10 procent i alven.

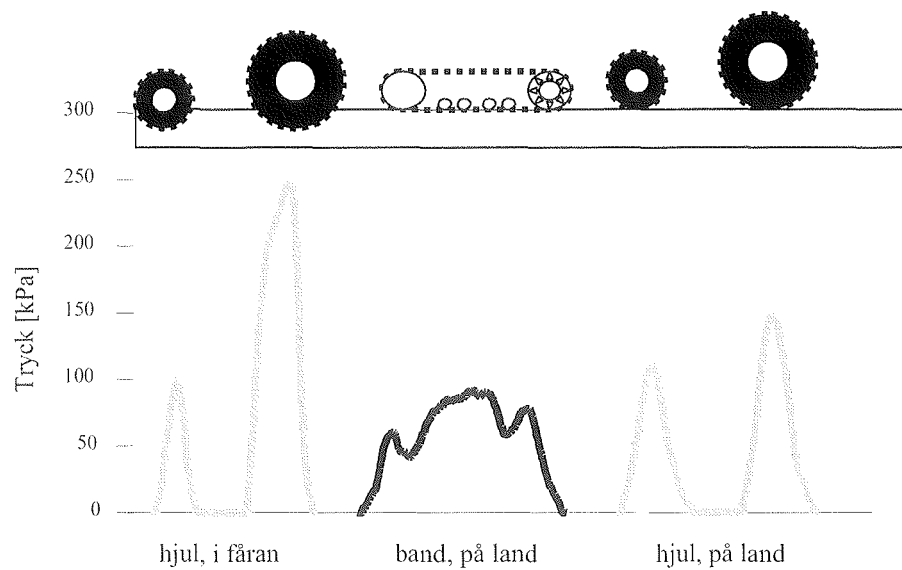
Mätningarna av vertikala tryck och markrörelser gjordes på 30 och 50 cm djup från den oplöjda markytan. Vid "on land" plöjning mättes även på 15 cm djup, medan ytterligare mätningar gjordes på 70 cm djup vid konventionell plöjning.

Observera att mätsonden på 30 cm djup låg omedelbart under plogdjupet, dvs bara några få centimeter under körspåret vid konventionell plöjning. Fårans djup var 25 cm.

Vid försöket togs cylindrar ut på olika djup för att bestämma förkonsolideringstrycket, som är ett mått på markens hållfasthet.

Resultat och diskussion

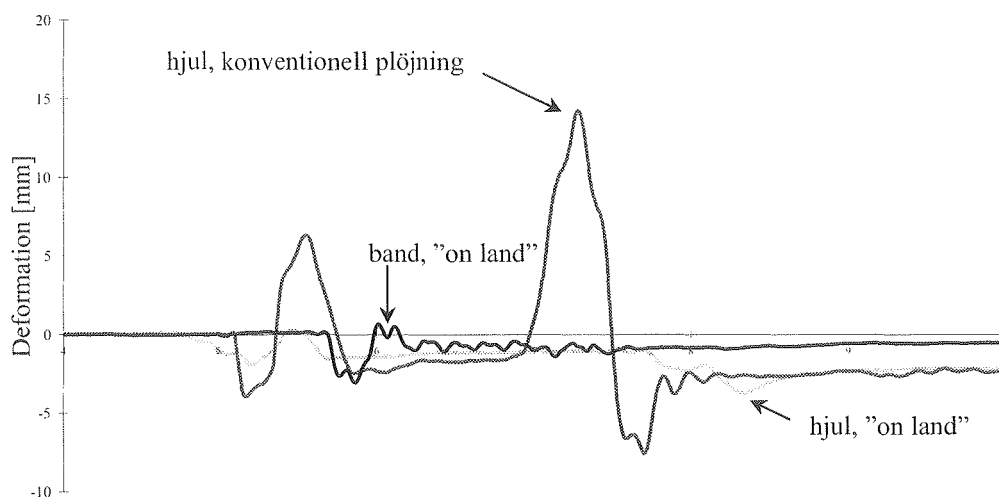
Ett exempel från mätningarna av det vertikala trycket vid de olika plöjnings varianterna ges i figur 24. Den första toppen i figuren motsvarar traktorns framhjul, den andra toppen traktorns bakhjul. Trycket under bakhjulet var större än under framhjulet, både vid konventionell plöjning och "on land" plöjning. Tryckfördelningen under band(traktorn) var ganska jämn. De uppmätta markrörelserna vid samma överfarter redovisas i figur 25. Kvarstående deformation eller packning kan avläsas vid slutet av mätningen.



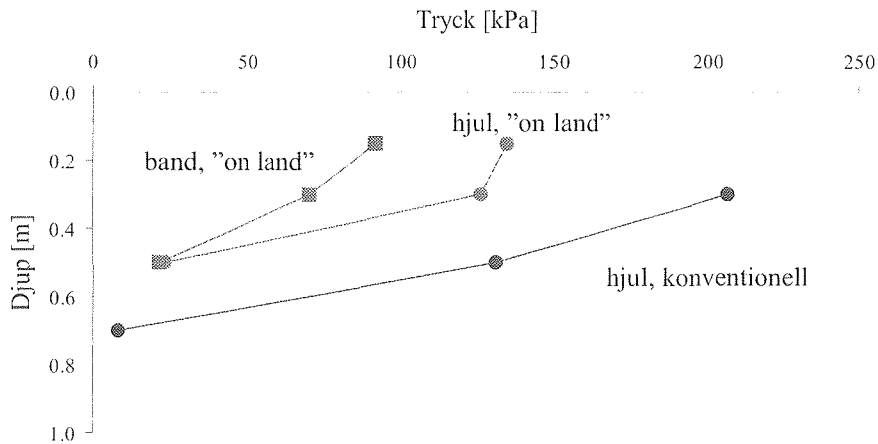
Figur 24. Mätning av trycket på 30 cm djup vid plöjning.

Det vertikala trycket på de olika djupen och för de olika plöjnings varianterna visas i figur 26. Det syns tydligt att trycket på 30 samt på 50 cm djup var mycket högre när det plöjdes konventionellt och traktorn körde i plogfåran än när det plöjdes "on land" och traktorn körde på den oplöjda markytan. Det högre trycket vid konventionell plöjning resulterade

också i större packning på 30 cm djup, som redovisas i figur 27. På 50 cm djup fanns inga skillnader i packning, eftersom förkonsolideringstrycket på det djupet var mycket högt, till och med högre än trycket under hjultraktorn som plöjde konventionellt.



Figur 25. Mätning av vertikal markrörelse på 30 cm djup vid plöjning.



Figur 26. Uppmätt tryck vid plöjning. Medelvärde av tre mätningar.

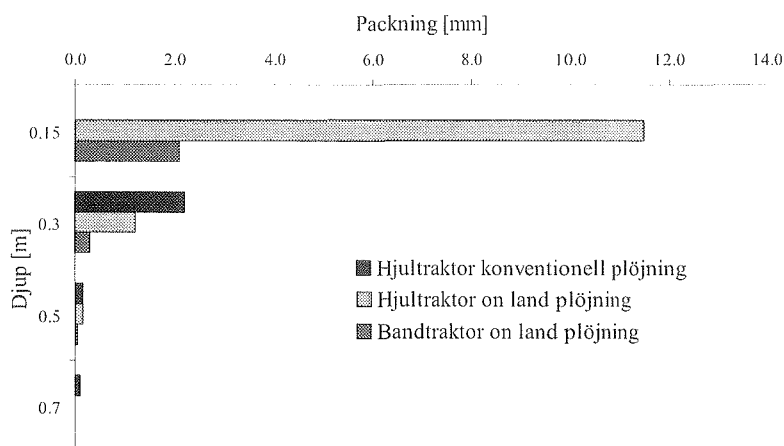
Markrörelserna i matjorden (15 cm djup) vid "on land" plöjning var mycket större än i alven. Förklaringen till detta är att de uppmätta trycken översteg matjordens hållfasthet, och det resulterade i packningsskador. I alven däremot var situationen tvärtom, alvens hållfasthet var högre än de uppmätta trycken, och skadorna förblev marginella.

Trycket liksom packningen under bandtraktorn var mindre på 15 och 30 cm djup jämfört med hjultraktorn på grund av det lägre kontaktrycket, fastän bandtraktorn vägde

nästan dubbelt så mycket som hjultraktorn. Djupare nere i alven var trycket dock detsamma för bandtraktorn och hjultraktorn som plöjde "on land".

Sammanfattningsvis kan konstateras att "on land" plöjning minskar risken för alvpackning betydligt.

Tack till Krenkerup Gods för ett bra samarbete.



Figur 27. Uppmätt deformation vid plöjning. Medelvärde av tre mätningar.

Mätningar av tryck och deformation i marken vid betupptagning

Under hösten 2002 och 2003 gjordes mätningar av tryck och rörelse på olika djup i marken vid sockerbetskörden med självgående, sexradiga betupptagare på Krenkerup Gods i Danmark. Resultaten från försöken visade att det idag används så stora och tunga maskiner vid sockerbetskörden att det verkar nästan omöjligt att undvika markpackning även med bra utrustade fordon (breda lågtrycksdäck eller band). En tung betupptagare med stor bettank som är bra konstruerad och välutrustad med däck respektive band ökar däremot inte risken för markpackning jämfört med en mindre självgående betupptagare.

Material och metoder

Under hösten 2002 och 2003 gjordes försök där markens vertikala rörelse och vertikala spänning (kallas härefter i denna artikel för tryck) vid betupptagning studerades. Försöken gjordes på Krenkerup Gods på Lolland. Jorden var en mellanlera båda åren, och vattenhalten vid försöken låg kring fältkapacitet.

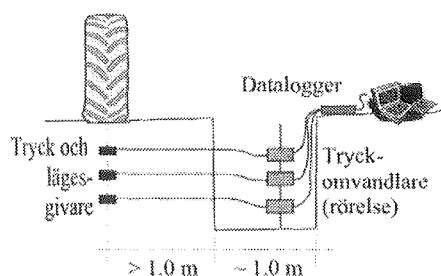
År 2002 jämfördes två olika betupptagningssystem: ett system där man har en 6-radig upptagare med 15 m³ bettank där man är tvungen att hela tiden följa upptagaren med två stycken följevagnar som tar betorna till vändtegen eller till ett närbeläget betupplag, och ett system där man har en tung 6-radig betupptagare med 40 m³ bettank som klarar av att köra långa drag på fältet och ta med sig betorna själv till vändtegen där de lastas av direkt på marken. På detta sätt slipper man att i stor utsträckning vara beroende av följevagnar som ständigt trafikerar fältet.

I försöket år 2003 studerades tryck och rörelse i marken under en tung 6-radig betupptagare med 30 m³ tank som går på band på framaxeln och en 6-radig upptagare med 15 m³ bettank. Maskinegenskaperna från båda åren är sammanfattade i tabell 6.

För att mäta packningen används en metod där man mäter markens vertikala rörelse och vertikala spänning i marken vid överfart med ett fordon (Arvidsson och Andersson, 1997). Mätmetoden visas schematiskt i figur 28. Varje sensor mäter samtidigt den vertikala rörelsen och det vertikala trycket. Tre sensorer var installerade på tre olika djup för varje

körning. Vid varje försök gjordes tre eller fyra körningar med samma maskin vid olika gropar (upprepningar).

I försöken på Krenkerup Gods gjordes mätningarna av vertikala tryck och markrörelser på 30, 50 och 70 cm djup. Mätningarna gjordes så att betupptagaren var i full drift, dvs att den tog upp betor medan den körde över sonderna. Upptagaren var då i stort sett fullastad, så att mätningarna gjordes vid den största tänkbara lasten. Det gjordes ytterligare tryckmätningar på 10 cm djup (år 2002) respektive på 30 cm djup (år 2003) för att få tryckfördelningen direkt under hjulen respektive bandet med hög upplösning både i körriktningen och på tvären.



Figur 28. Principskiss över mätning av tryck och rörelse i marken. En mätkropp installeras horisontellt från en grävd grop. Markens rörelse i vertikalled och trycket i marken vid överfart med ett hjul registreras med en datalogger.

Tabell 6. Maskinegenskaper för fullastade fordon i försöken på Krenkerup Gods år 2002 och 2003

Maskin	Hjullast (ton)	Totallast (ton)	Däck- dimension	Ringtryck (kPa)
År 2002				
<i>System 1 (Betupptagare samt följevagnar)</i>				
Upptagarens framhjul ¹⁾	9.9		650/85 R38	180
Upptagarens bakhjul ¹⁾	5.1		750/45-30.5	160
Totalvikt betupptagare ¹⁾		27.2		
Tre-axlad följevagn	4.6		24 R20.5	150
Totalvikt följevagn		27.6		
<i>System 2 (Betupptagare med 40m³ bettank)</i>				
Upptagarens 1:a hjul	12.0		800/65 R32	220
Upptagarens 2:a hjul	10.0		73x44-32	240
Upptagarens 3:a hjul	8.4		66x43-25	190
Totalvikt betupptagare		60.8		
År 2003				
<i>Betupptagare med 30 m³ bettank</i>				
Upptagare fram ²⁾	16.6		2,6 m ² /band	
Upptagarens bakhjul ²⁾	10.3		900/60 R32	190
Totalvikt betupptagare ²⁾		53.7		
<i>Betupptagare med 15 m³ bettank</i>				
Upptagarens framhjul ¹⁾	10.1		650/85 R38	180
Upptagarens bakhjul ¹⁾	4.5		750/45-30.5	160
Totalvikt betupptagare ¹⁾		26.5		

¹⁾Vikt på betupptagaren är ojämnt fördelad mellan höger och vänster sida; mätningar gjordes på den tyngre belastade sidan

²⁾Betupptagaren gick på band fram och på ett dubbelmontage bak

Resultat

Tryckfördelning i matjorden

I figurer 29 och 30 visas två exempel på tryckfördelning både i körriktningen och tvärs körriktningen. Figur 31 visar en mätning under fram- och bakhjulet av en 6-radig betupptagare med 15 m³ bettank. Figur 30 visar en mätning under en 6-radig betupptagare med 30 m³ bettank som går på band fram och hjul bak. Tydligt syns det att tryckfördelningen under ett däck inte är uniform och att det maximala trycket är högre än ringtrycket. Tryckfördelningen under ett band är också ojämn; lokalt högre tryck kan

tydligt urskiljas under de två bärrullarna och främre och bakre bärhjulet (figur 30).

Tryck och deformation i alven

Kvarstående rörelse efter fordonet hade passerat mätsonden ("packning") på 30 (översta sonden i alven) och 70 cm (lägsta sonden i alven) redovisas i figurer 31 och 32.

Observera att betupptagaren med 40 m³ bettank (år 2002) inte kunde inkluderas i någon statistik beräkning. Värdena ska därför betraktas med viss försiktighet men visar trots allt tendenser. Störst tryck och störst kvarstående rörelse (figur 31) uppmättes under den tunga betupptagaren. Deformationen från följevagnen var relativt

liten och begränsad till de allra översta alvskikten, så att system 1 (betupptagare med 15 m³ bettank följd av en följevagn i samma spår) resulterade i mindre skada än system 2 (tung betupptagare med 40 m³ bettank) trots mycket intensiv trafik på fälten i system 1.

I försöket år 2003 uppmättes det högsta trycket under framhjulet av betupptagaren med 15 m³ bettank. Kvarstående rörelse (figur 32) på 30 cm djup var signifikant högre ($P < 0,05$) under denna betupptagare än under den större betupptagaren med 30 m³ bettank, trots att den större betupptagaren var ungefär dubbelt så tung. Den lägre deformationen förklaras med en mycket större anläggningsyta genom att man använder breda band istället för hjul. På större djup fanns dock inga signifikanta skillnader i deformation mellan fordonen.

Diskussion

Försöket år 2002 var upplagt på att jämföra två olika system, där man antingen kör med en mindre betupptagare och transporterar betorna med vagnar till vändtegen, eller där man kör

med en stor betupptagare med stor bettank som har förmågan att köra långa drag och avlasta betorna på vändtegen. Mätningarna visade att transporttrafiken med följevagnar inte var så farlig som den kanske ser ut (mycket och djupa spår på fältet), med avseende på risken för markpackning i alven. Markpackning skedde framför allt ifrån betupptagarna. Den stora betupptagaren vägde mer än dubbelt så mycket som den mindre betupptagaren. Den hade dock bara två hjul mer, som medför att hjullasten blir högre jämfört med den mindre betupptagaren. Detta, i samband med en inte optimerad konstruktion (lasten är inte optimalt fördelad på de sex hjulen) och förhållandevis små däck förklarar att både trycket och deformationen var betydligt högre under detta fordon. Ett system utan följevagnar kan dessutom bara utnyttjas optimalt när fältlängden är anpassad till bettankens volym. Är inte detta fallet, måste betupptagaren antingen lasta av när den inte är helt full, eller köra till vändtegen när den är full mitt ifrån ett drag.

Uppmätt tryck

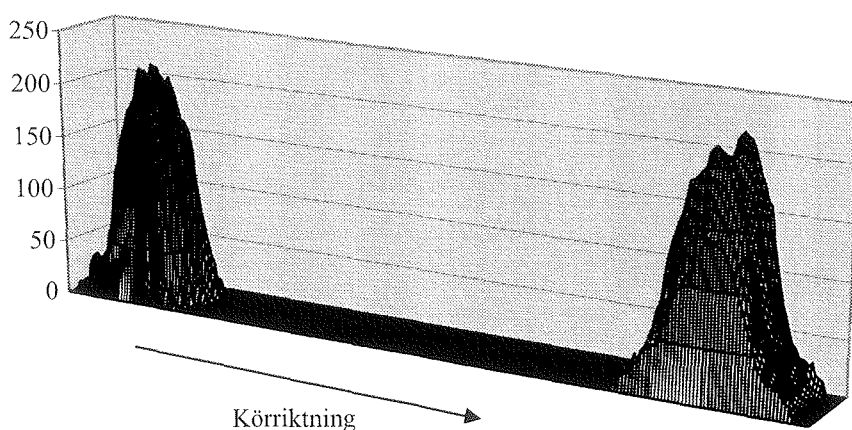


Fig. 29. Uppmätt fördelning av det vertikala trycket på 0,3 m djup under den fullastade betupptagaren med 15 m² bettank. Framhjulet med ett ringtryck på 180 kPa (höger) och bakhjulet med ett ringtryck på 160 kPa (vänster).

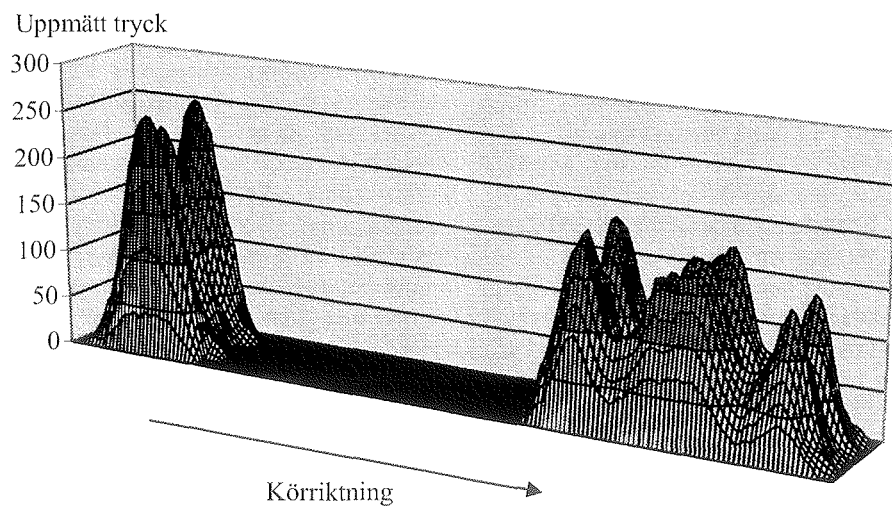


Fig. 30. Uppmätt fördelning av det vertikala trycket på 0.3 m djup under den fullastade betupptagaren med 30 m³ bettank. Bandet (höger) och bakhjulet (teoretiskt genomsnittligt anläggningstryck 65 kPa) med ett ringtryck på 190 kPa (vänster).

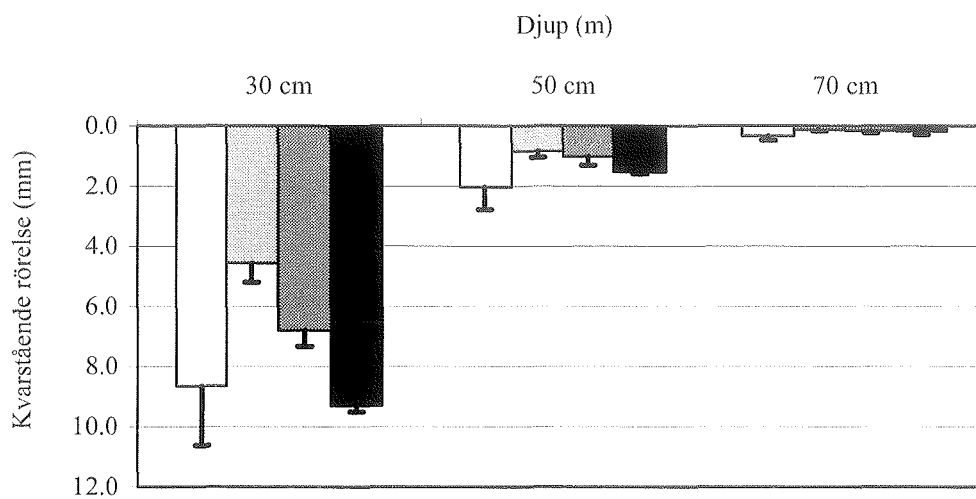


Fig. 31. Kvarstående rörelse under den stora betupptagaren med 40 m³ bettank (vita staplar), betupptagaren med 15 m³ bettank (ljusgrå staplar), den mindre betupptagaren samt en passage med traktor och följevagn i samma spår (mörkgrå staplar) och den mindre betupptagaren samt tre överfarter med traktor och följevagn i samma spår (svarta staplar).

Resultaten från år 2003 visar tydligt att tryck i marken och markpackning inte är en funktion av fordonets totalvikt. Den stora betupptagaren med 30 m³ bettank som väger dubbelt så mycket som den mindre betupptagaren med 15 m³ bettank skadar marken inte mera. Förklaringen till detta är att den stora betupptagaren är mycket bättre konstruerad med två stora välfungerande band (anläggningsyta per band 2,6 m²) fram och ett dubbelmontage med stora däck back. Trots detta ska inte glömmas att kvarstående rörelse uppmättes även på 70 cm djup.

En jämförelse mellan den stora betupptagaren som testades år 2002 och den stora betupptagaren som testades år 2003 kan tillåtas eftersom båda i sig jämfördes mot samma mindre betupptagare i de enstaka försöken. Resultaten ska dock tolkas med viss försiktighet, eftersom jorden och fuktighetsförhållanden skilde sig lite mellan de två åren. Det kan dock konstateras att betupptagaren med 30 m³ bettank (år 2003) var bättre konstruerad och fördelade den stora lasten mycket bättre än betupptagaren med 40 m³ bettank (år 2002).

Vid SLU:s avdelning för jordbearbetning har tidigare gjorts två studier med 6-radiga betupptagare i Sverige för att undersöka hur ringtrycket påverkar tryckutbredningen i marken vid en viss hjullast. Resultaten visade att ringtrycket inte bara påverkar trycket i matjorden, utan också trycket i de översta alvskikten. De visade också att tryckfördelningen under ett däck var mycket ojämn, och det maximala trycket var mycket högre än ringtrycket. Detta stämmer bra överens med mätningar som visas i figur 30. Tryckfördelningen under ett däck borde vara jämnast när däcket körs vid det rekommenderade ringtrycket vid given last. Detta ska beaktas när låga ringtryck används; ett för lågt ringtryck kan innebära att tryckfördelningen blir mycket ofördelaktig med högt maximalt tryck.

Risken för alvpackning kan bara effektivt minskas genom att köra med låga hjullaster och däck med lågt ringtryck och en tryckfördelning som är så jämn som möjlig, alternativt ha välfungerande band. Kravet på

låga ringtryck begränsar också hjullasten, eftersom det inte finns stora däck som klarar höga hjullaster vid låga ringtryck. Band kan vara ett bra alternativ till däck, men det krävs att lastfördelningen är jämn över hela bandet.

Slutsatser

1. Tryck i marken och jordpackning är varken en funktion av fordonets totalvikt eller en funktion av axelbelastningen.
2. Om en tung betupptagare med stor bettank är bra konstruerad och välutrustad med däck/band, och bara om detta är fallet, ökar inte risken för markpackning jämfört med en betupptagare med mindre kapacitet.
3. I samband med sockerbetsskörden används idag så stora och tunga maskiner att det verkar vara nästan omöjligt att undvika markpackning även med bra utrustade fordon (breda lågtrycksdäck eller band).
4. Risken för markpackning under sockerbetsskörden skulle kunna minskas genom att använda fordon med betydligt lägre hjullaster samt förbättrade däcksutrustning eller genom att använda band, men även här bör lasten inte vara så stor som den är i dagsläget (eller bandets yta bör ökas).

Tack

Vi tackar Gorm Reventlow-Grinling, Sören Jespersen, Hugo Jörgensen och Kurt Rasmussen på Krenkerup Gods för deras stora interesse och hjälp under mätningarna och för gästvänligheten. Stort tack också till Holger Lücke från Grimme Landmaschinenfabrik GmbH i Damme (D). Ett stort tack också till Urban Svantesson och Matts Ola Anselmsson som hjälpte mycket med fältmätningarna.

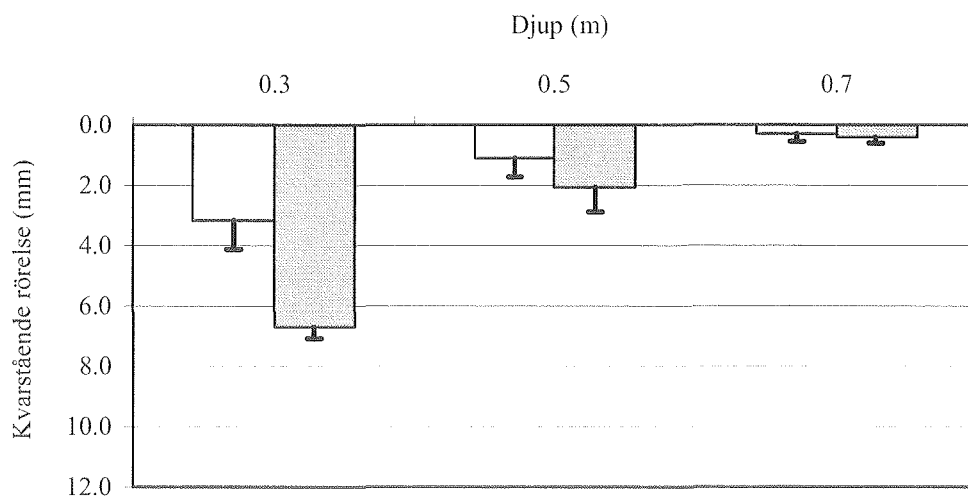


Fig. 32. Kvarstående rörelse under den stora betupptagaren med 30 m³ bettank (vita staplar) och betupptagaren med 15 m³ bettank (ljusgråa staplar).

Mätning av tryck i matjorden med olika hjullaster och ringtryck

Stämmer det att trycket i matjorden i första hand bestäms av ringtrycket? I denna undersökning mättes trycket i matjorden (på 10 cm djup) för olika hjullaster, däck och ringtryck. Maximalt uppmätt tryck var nära kopplat till ringtrycket men var oftast högre än detta. För två däck som användes med olika hjullaster men samma ringtryck uppmättes högre tryck för den större hjullasten.

En gammal tumregel säger att trycket i matjorden bestäms av ringtrycket, och i alven av axellasten. Under senare år har det vid avdelningen gjorts ett stort antal mätningar av tryck och deformation i alven. Syftet med det experiment som presenteras här var att istället studera tryckfördelning i matjorden. Stämmer det att ringtrycket bestämmer trycket i matjorden eller har också hjullasten betydelse?

Mätningarna gjordes på en mellanlera under fuktiga förhållanden den 28 november 2002. Körningar gjordes med två stycken traktorer, en MF 6290 med en totalvikt på 8990 kg, och en MF 4245 med en totalvikt på 5110 kg. Tanken var att använda hjullaster på de olika traktorerna som rekommenderades vid körning med ringtrycket 100 kPa och i hastigheter upp

till 30 km/h. För MF 6290 löstes detta genom att ett redskap hängdes efter traktorn. För MF 4245 ställdes frontlastaren i ett givet läge. För framhjulet på MF 6290 var inte hjullasten tillräckligt hög för att motsvara rekommenderad hjullast vid 100 kPa och farter upp till 30 km/h. Mätningarna togs ändå med för att åskådliggöra effekterna vid körning med markant lägre hjullast än rekommenderat, vid det givna ringtrycket.

Förutom att köra däcken vid rekommenderat ringtryck, för de aktuella hjullasterna, så kördes även däcken vid 30 % lägre och 50 % högre ringtryck än de rekommenderade. De, enligt tillverkarna, rekommenderade hjullasterna vid dessa ringtryck anges i tabell 7 tillsammans med hjullaster och däckdimensioner som användes för de båda traktorerna.

Tabell 7. Däcksdimensioner, fabrikat och hjullaster för de båda traktorerna.

MF 6290: Total vikt: 8910 kg

		Dimension	Fabrikat	
	Fram:	540/65 R 28	Michelin	
	Bak:	650/65 R 38	Michelin	
	Hjullast	<u>Rekommenderad hjullast vid 30 km/h</u>		
		70 kPa	100 kPa	150 kPa
Fram:	1055 kg	1870	2280 kg	2980
Bak:	3400 kg	2905	3550 kg	4625

MF 4245: Total vikt: 5110 kg

		Dimension	Fabrikat	
	Fram:	11.2 R 28	Good Year	
	Bak:	13.6 R 38	Good Year	
	Hjullast	<u>Rekommenderad hjullast vid 30 km/h</u>		
		70 kPa	100 kPa	150 kPa
Fram:	1080 kg	950	1100 kg	1320
Bak:	1475 kg	1338	1500 kg	1900

Tryckfördelning och maxtryck i matjorden.

De fem lastcellerna grävdes ned i matjorden på 10 cm djup med ett inbördes avstånd på 9 cm. Detta innebar att den totala mätbredden blev 36 cm. Detta mått var anpassat för att täcka halva bredden av det bredaste däcket, nämligen den stora traktorns bakhjul. Traktoreorna kördes så att mitten av däcket gick mitt över den yttersta sensorn, trycket antogs sedan vara symmetriskt kring däcksmitten. Då den lilla traktorn har betydligt smalare däck kom antalet mätpunkter som hamnade rakt under däcket att bli betydligt färre, med följden att tryckfördelningen under dessa däck blev bestämd med lägre upplösning. Värdena för uppmätta maxtrycket beräknades som ett medelvärde ur fyra upprepningar per däck.

Genomsnittstryck i understödsytan och under ribborna.

De olika däckens understödsytor bestämdes, vid olika ringtryck, då de stod på ett hårt underlag. Däcken kördes upp på en pappskiva och med sprayfärg gick det att måla runt däcket så att de nabbar som var i kontakt med underlaget framträdde. Utifrån denna avbildning ritades en tänkt understödsyta upp motsvarande det område som låg innanför de nabbar som avbildats. Med utgångspunkt ifrån hjullasterna och de uppritade understödsytorna kunde ett genomsnittligt tryck räknas ut för ytan. Efter att även anläggningsytan för enbart ribborna räknats ut kunde det genomsnittliga trycket under dessa beräknas. Värdena för beräknat genomsnittligt tryck i understödsytan samt

under ribborna är beräknade utifrån en upprepning.

Resultat

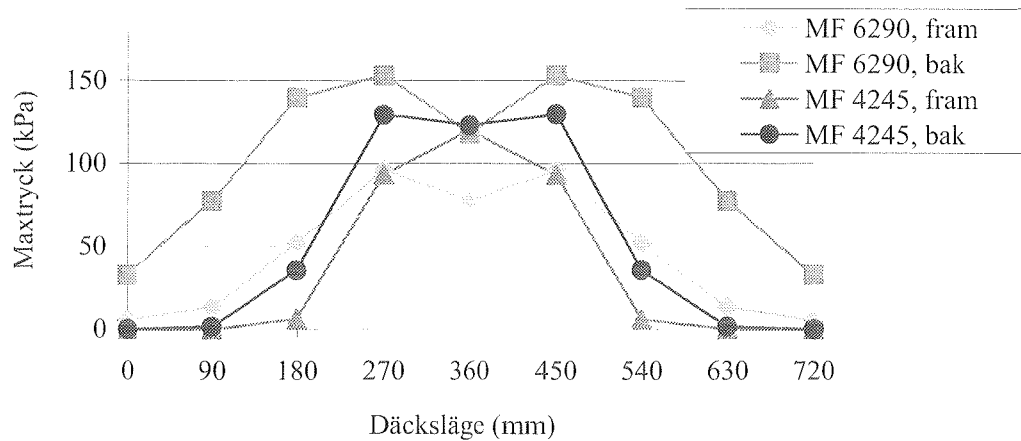
I tabell 8 redovisas det uppmätta maxtrycket i matjorden, det beräknade genomsnittliga trycket i understödsytan samt det beräknade genomsnittliga trycket under ribborna. Den statistiska analysen visade att det fanns signifikanta skillnader i det uppmätta maxtrycket mellan däcken, oberoende av ringtrycket. Den stora traktorns bakhjul gav upphov till det högsta trycket av de fyra olika däcken. Inte oväntat så uppmättes ett högre tryck i matjorden då däcken kördes med högre ringtryck.

Det beräknade genomsnittliga trycket i understödsytan, under de fyra däcken, blev genomgående lägre än ringtrycket vid körning med 150 kPa ringtryck. Vid körning med 70 kPa ringtryck blev det beräknade trycket i understödsytan genomgående högre än ringtrycket under samtliga däck.

Beräknat genomsnittligt tryck under ribborna blev som högst under den lilla traktorns framhjul, hela 716 kPa vid körning med 150 kPa ringtryck. I figur 33 redovisas resultatet av körningarna med de fyra olika däcken då de kördes med rekommenderat ringtryck, 100 kPa, vid respektive hjullast. Det som visas är uppmätta maxtrycket under däckens hela bredd. Genomgående var det så att en högre hjullast gav upphov till ett större tryck, på 10 cm djup, även då ringtrycket var det samma i de olika däcken.

Tabell 8. Sammanställning över uppmätt maxtryck på 10 cm djup, beräknat genomsnittligt tryck i hela understödsytan och genomsnittligt tryck under ribborna för de fyra hjulen då de körts med tre olika ringtryck. Bokstäverna efter mätvärden anger signifikansnivån. Mätvärden som efterföljs av en gemensam bokstav är inte signifikant skilda ($P < 0,05$).

	Ringtryck (kPa)	Maxtryck (kPa)	Beräknat tryck (genomsnitt) i understödsytan. (kPa)	Beräknat tryck (genomsnitt) under ribborna. (kPa)
<i>MF 6290</i>				
Fram	150	122	117	405
Fram	100	103	92	363
Fram	70	87	82	322
Bak	150	214	142	521
Bak	100	156	112	412
Bak	70	129	92	349
<i>MF 4245</i>				
Fram	150	139	125	716
Fram	100	123	114	585
Fram	70	99	105	474
Bak	150	161	102	582
Bak	100	139	94	509
Bak	70	102	81	431
<i>MF 6290</i>				
Fram		104c		
Bak		166a		
<i>MF 4245</i>				
Fram		120bc		
Bak		134b		
<i>Alla däck</i>				
	150 kPa	159a		
	100 kPa	130b		
	70 kPa	104c		

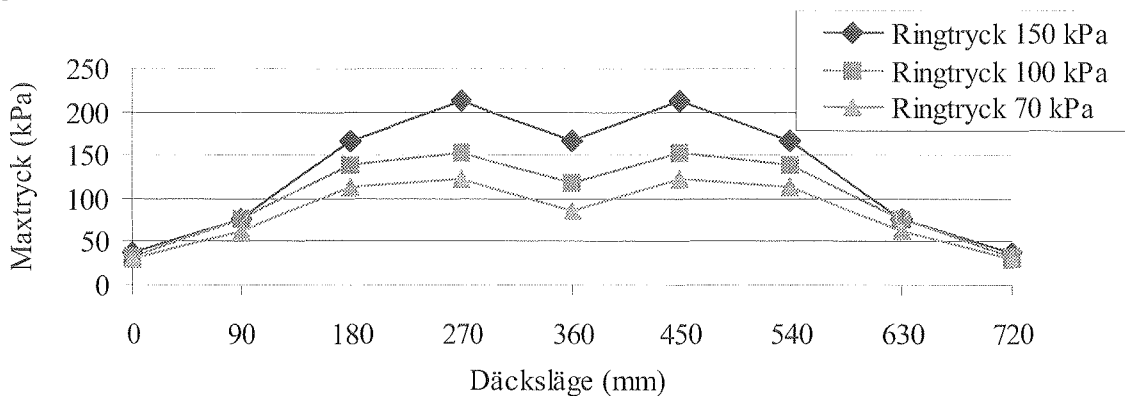


Figur 33. Tryckfördelning under de olika traktorernas fram- och bakhjul. Figuren visar de uppmätta maxtrycken under däcken som ett medelvärde av tre upprepningar. Ringtrycket är för samtliga däck 100 kPa.

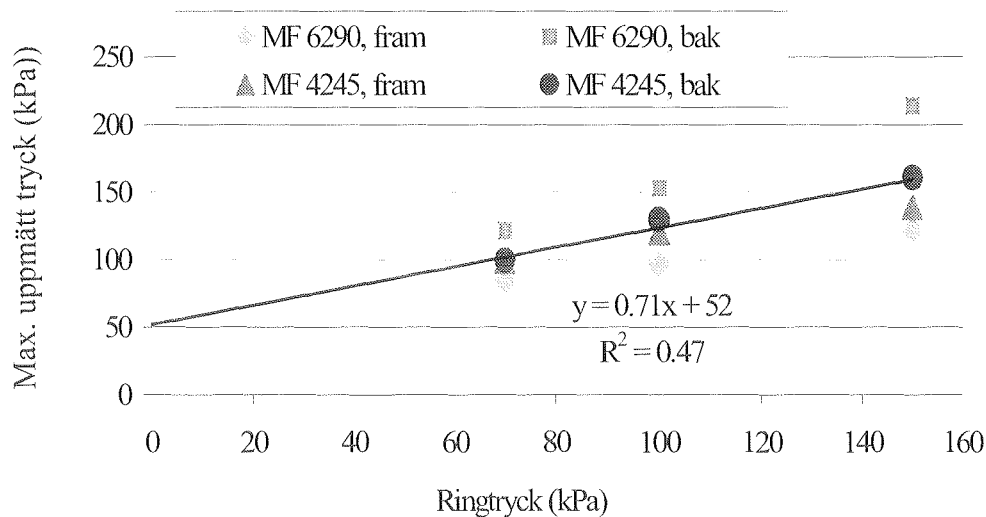
Då ringtrycket höjdes med 50 % från det rekommenderade ökade den maximala tryckpåkänningen i matjorden för samtliga hjul. Då ringtrycket höjdes med 50 % i den stora traktorns bakdäck kom det maximala uppmätta trycket i matjorden att höjas med 40 %. Likaså sänktes den maximala tryckpåkänningen i matjorden, för samtliga däck, då ringtrycket sänktes med 30 % från det rekommenderade. För den stora traktorns bakhjul gällde att, då ringtrycket sänktes med 30 % kom det maximala uppmätta trycket i matjorden att sänkas med 20 %. Vidare kan man utläsa att det högsta maxtrycket under däcket inte verkar uppkomma mitt under däcket, inte ens då

däcket körs med det högsta ringtrycket. Istället uppmättes det högsta trycket mellan däckets mitt och dess kant. Detta åskådliggörs i figur 34.

I figur 35 ses maximalt uppmätta trycket i matjorden som funktion av ringtrycket. En regression gjordes för respektive däck. Resultatet därav blev att en högre hjullast gav en högre lutningskoefficient för linjen. Även gjordes en regression med alla mätvärden för de olika däcken. Liksom i tabell 34 framgår det här att man riskerar att underskatta maximala tryckpåkänningen i matjorden utifrån ringtrycket, då det handlar om ringtryck lägre än ca 150 kPa.



Figur 34. Tryckfördelning under bakhjulet på MF 6290 då den körts med 150, 100 och 70 kPa ringtryck.



Figur 35. Förhållandet mellan maximalt uppmätt tryck på 10 cm djup och ringtryck i däck.

Slutsatser

Det uppmätta trycket på 10 cm djup var nära kopplat till ringtrycket. Det maximala uppmätta trycket var dock i regel betydligt högre än ringtrycket, speciellt vid låga ringtryck. Lutningskoefficienten då det uppmätta trycket sätts som funktion av ringtrycket var 0,71, d.v.s. en förändring av ringtrycket (i kPa) ger inte lika stor förändring av marktrycket. När däckan användes vid det rekommenderade ringtrycket 100 kPa uppmättes det största marktrycket under den största hjullasten, vilket pekar på att också hjullasten

påverkar trycket i matjorden. Då tryckfördelningen är relativt ojämn finns det anledning till fortsatt forskning kring samband mellan hjullast, ringtryck, däckstyp och det tryck marken verkligen utsätts för.

Resultaten finns utförligare presenterade i ett examensarbete: Inverkan av hjullast och ringtryck på tryck och deformation i jordprofilen, främst i matjorden, av Matts Ola Anselmsson. Meddelanden från jordbearbetningsavdelningen nr 44, 2003.

