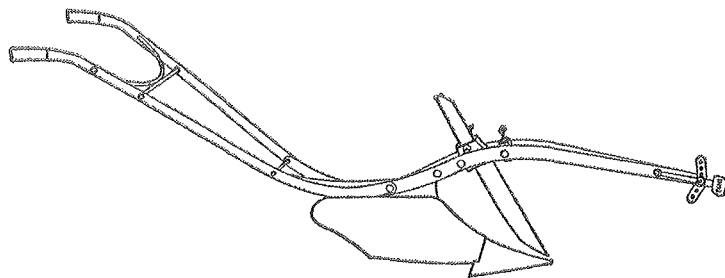




Institutionen för
Markvetenskap
Uppsala

MEDDELANDEN FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

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



Nr 41

2002

Elisabeth Bölenius

**Packning av jordbruksmark - inverkan
av dubbelmontage, banddrift och
dragkraftsuttag**

*Soil compaction of arable land – effect of dual wheels,
tracks and traction*

ISSN 1102-6995

ISRN SLU-JB-M--41--SE

ABSTRACT

Compaction is a big problem in agriculture today since it has negative effects on both yield and environment. The change in the environment caused by compaction will mean decreased quality of atmosphere, surface- and ground water and soil resources. It is therefore very important to know how different agricultural practices and technical solutions of machinery affect the soil and its functions in order to be able to decrease the negative effects from farming.

Three field experiments were carried out during the autumn 2001. Vertical soil displacement and vertical soil stress was measured at 15, 30 and 50 cm depth in three different tractor comparisons; wheel- and tracked tractor, singel and dual wheel and pulling and non pulling tractor. For the pull and the track experiments macroporosity, saturated hydraulic conductivity and bulk density were also measured. Calculations of the vertical soil stress were also made. For the single- dual wheel experiment a John Deere 4640 with singel wheel and a wheel load of 2500 kg and a Steiger with dual wheels and a wheel load of 2200 kg were used. Both tractors had 60 kPa tyre inflation pressure. The John Deere was also used, together with a cultivator, for the pull experiment. These two experiments were carried out at Staby Säteri, Uppland. The experiment with a tracked vehicle was carried out at Krenkerup Gods, Lolland, Danmark with a rubber tracked tractor weighing 18,5 tons and a wheel tractor weighing 9,7 tons. The tracked tractor was balanced before comparing it to the wheeled tractor to get the weight distribution as even as possible.

Vertical soil stress and vertical soil displacement right under the wheels of the single and dual wheels did not differ significantly. The soil stress was lowest between the dual wheel at 15 cm depth but it was evenly distributed under the wheels at 50 cm depth. No significant differences were found between a non pulling and a pulling tractor regarding vertical soil stress and soil displacement. There was however a tendency that the saturated hydraulic conductivity was lowest after the pass of a pulling tractor. It is possible that a higher pull would have affected the soil more. The soil stress was higher at 15 and 30 cm depth for the wheeled compared to the tracked tractor. There were no significant differences in soil displacement, saturated hydraulic conductivity and bulk density but there was a tendency that the bulk density was higher for the tracked than for the wheeled tractor.

The most important conclusions were: (1) The two tyres in a dual wheel arrangement acted as two separate wheels which makes it more relevant to talk about wheel load than axle load regarding the risk for subsoil compaction. This is a very important result because the recommendation today is to avoid an axle load over 6 tons. (2) Even for a well balanced tracked tractor the maximum soil stress will be considerably higher than the theoretically calculated. In spite of these problems and a higher total weight, a tracked tractor can have a smaller impact on the soil than a wheeled tractor. (3) The model calculations correlated well with the measured values in the subsoil but not in the topsoil. A better approximation for the ground pressure than the tyre inflation pressure is however needed since the ground pressure often was as much as twice as high as the tyre inflation pressure.

SAMMANFATTNING

Markpackning är ett stort problem i växtodling genom sin påverkan på skörd och miljö. Den miljömässiga förändringen orsakad av markpackning kommer troligen att försämra kvaliteten på atmosfär, yt- och grundvatten och markresurser. Det är därför mycket viktigt att veta hur olika insatser och maskintekniska lösningar påverkar marken för att kunna minska växtodlingens negativa påverkan på omgivningen.

Tre försök utfördes under hösten 2001 för att jämföra packningseffekter av dubbel- och enkelmontage, dragande och icke dragande traktor samt band- och hjultraktor. Försöket med dubbel- och enkelmontage utfördes med en John Deere 4640 utrustad med enkelmontage med en hjullast bak på 2500 kg och en Steiger utrustad med dubbelmontage med en hjullast fram på 2200 kg. Båda traktorerna hade ringtrycket 60 kPa. För dragförsöket användes samma John Deere som ovan samt en kultivator med gåsfötter. Dessa två försök utfördes på Staby Säteri i Uppland. På Krenkerup Gods på Lolland i Danmark utfördes försöket med band- och hjultraktor, med totalvikter på 18,5 respektive 9,7 ton. Vertikal markrörelse och marktryck mättes i samtliga fall på 15, 30 och 50 cm djup mitt under hjulen eller bandet. På enkel- och dubbelmontagen mättes detta även under kanten av hjulen och för dubbelmontaget även mitt mellan hjulen. Makroporositet, skrymdensitet och mättad vattengenomsläpplighet mättes i försöken med dragande-icke dragande traktor samt band- och hjultraktor. Beräkningar av den vertikala normalspänningen gjordes även med hjälp av en datormodell.

Marktryck och -rörelse mitt under hjulen på enkel- och dubbelmontaget skilde sig inte signifikant åt på något djup. Trycket var dock lägst mitt mellan dubbelmontaget på 15 cm djup, medan det var jämnt fördelat på 50 cm djup. Inga signifikanta skillnader fanns heller mellan dragande och icke dragande traktor avseende marktryck och -rörelse. Vad gäller mättad vattengenomsläpplighet fanns det tendenser till att dragande gav lägst, icke dragande näst lägst och kontrollen högst genomsläpplighet. Ett högre dragkraftsuttag skulle möjligen gett större påverkan på marken och dess funktioner. Innan jämförelsen mellan band- och hjultraktorn balanserades bandtraktorn genom ändring av dragpunkt och frontvikter för att få en så jämn tyngdfördelning som möjligt. Hjultraktorn gav sedan upphov till signifikant högre tryck på 15 och 30 cm djup. Deformationen var dock lika för båda, med tendens på 15 cm till mindre deformation efter bandtraktorn. Det fanns inga signifikanta skillnader i markens fysikaliska egenskaper mellan traktorerna, men båda skilde sig signifikant från kontrollen. En tendens till att bandtraktorn gett upphov till högre skrymdensitet än hjultraktorn fanns dock.

De viktigaste slutsatserna var: (1) Hjulen i dubbelmontaget verkade som enskilda hjul vilket gör det mer relevant att tala om hjulbelastning än om axelbelastning avseende risken för packning i alven. Detta är ett mycket viktigt resultat då nu gällande rekommendation är att begränsa axelbelastningen till 6 ton. (2) Även efter balansering av en bandtraktor kommer trycket vara avsevärt högre än det teoretiskt genomsnittliga på grund av ojämn tyngdfördelning på bandet. Trots dessa problem och en högre totalvikt kan en bandtraktor ge mindre påverkan på marken än en hjultraktor. (3) De modellberäkningar som gjorts stämde inte överens med de mätningar som gjorts i fält i matjorden men längre ner stämde de. En bättre approximation för marktrycket än ringtrycket behövs dock då det uppmätta marktrycket var avsevärt högre än ringtrycket.

INLEDNING

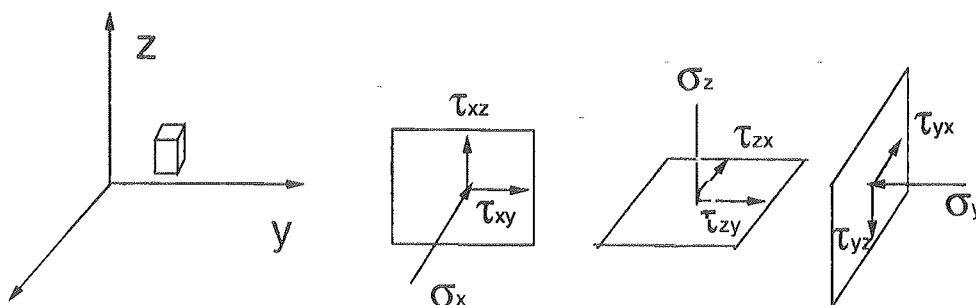
Bakgrund

Packning definieras som en ökning av markens torra skrymdensitet. När däremot markens volym inte minskar men dess form förändras kallas det för skjuvning. Markpackning har börjat bli ett allt större problem i växtodling genom dess påverkan på skördenivåerna och miljön. Skjuvningens effekter är inte lika undersökta men anses av många kunna vara mycket negativa. För att minimera växtodlingens negativa påverkan på omgivningen och öka dess produktivitet är det viktigt att veta hur olika insatser och maskintekniska lösningar påverkar marken och dess funktioner. I detta arbete studeras olika tekniska lösningar för att minska jordpackning.

Tryck (spänning) och tryckutbredning i mark under hjul och band.

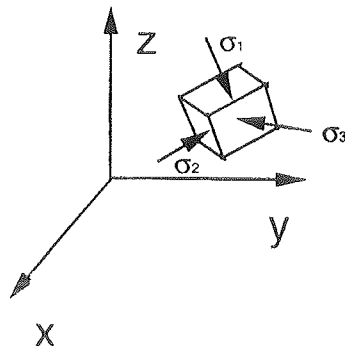
Hur en jord kommer att påverkas av en tyngd som den belastas av, t.ex. vid en traktorpassage, beror till stor del på hur trycket från denna tyngd breder ut sig i marken. Hur trycket breder ut sig kommer bl.a. bero av markens egenskaper och hur tyngden läggs på. Ofta pratas det om tryck i samband med markpackning. Den korrekta benämningen är dock spänning då det handlar om en kraft per ytenhet som har en riktning. Jag kommer att använda mig av båda benämningarna i detta examensarbete.

De spänningar som påverkar marken vinkelrätt mot ett plan i marken kallas normalspänningar och de spänningar som verkar parallellt med planet kallas skjuvspänningar (Koolen och Kuipers 1983). Varje punkt i ett material är påverkat av flera olika spänningar. Spänningstillståndet kan beskrivas av tre normalspänningar och sex skjuvspänningar.



Figur 1. Spänningstillståndet i en punkt beskrivet av tre normalspänningar, σ , och sex skjuvspänningar, τ (Koolen and Kuipers 1983).

Dock finns det för varje punkt ett visst plan där skjuvspänningarna är noll och spänningstillståndet kan beskrivas av tre normalspänningar, så kallade huvudspänningar. Dessa tre spänningar brukar betecknas största (major), intermediära (intermediate) och minsta (minor) huvudspänningen (Koolen och Kuipers 1983).



Figur 2. Spänningstillståndet i en punkt beskrivet av största, σ_1 , intermediära, σ_2 och minsta, σ_3 , huvudspänningen (Koolen och Kuipers 1983).

Markpackningen i jordbrukssammanhang anses i första hand bestämmas av den största huvudspänningen (Koolen och Kuipers, 1983). Den största huvudspänningen påverkas däremot av skjuvspänningar från andra koordinatsystem vilka kan öka storleken av den största huvudspänningen (Olsen, 1988b). Skjuvspänningar uppstår alltid vid påläggning av en belastning på marken. Skjuvspänningarna ökar vid slirning av ett traktorhjul/-band och även vid mycket moderat slirning när traktordäck flyter ut p.g.a. belastning (Koolen och Kuipers, 1983).

Trycket (spänningen) som ett hjul eller ett band utövar på markytan brukar kallas för marktrycket. Det som oftast menas då är det genomsnittliga trycket i anläggningensytan. För ett hjul brukar det sägas att marktrycket är lika med ringtrycket, men det kan variera mycket (Håkansson, 2000). Trycktillskottet i matjorden kommer i stort sett vara lika med marktrycket medan även den totala belastningen kommer ha stor betydelse längre ner i marken (Håkansson, 2000).

Tryckutbredningen i marken har stor betydelse för hur och var marken kommer att påverkas. Tryckutbredningen å sin sida är mycket beroende av olika markvariabler så som vattenhalt och matjordens luckringsgrad. Sedan länge har det ansetts att en hård (torr) jord ger en större tryckutbredning åt sidorna och en lös (blöt) jord mer neråt. En lös jord kommer att tillåta att jorden kan röra sig åt sidorna när t.ex. ett hjul passerar (d.v.s. spårbildning) och trycket kommer sprida sig mer neråt än i en hård jord där jorden inte kan röra sig lika mycket och trycket sprider sig både neråt och åt sidorna (Söhne, 1958). Detta förutsätter dock att en hård jord håller ihop åt sidorna och inte har vertikala sprickor då trycket i sådana fall skulle utbreda sig rakt neråt och inte alls åt sidorna.

Flera modeller för att beräkna tryckutbredning i mark baseras på en formel om tryckutbredning i ett medium som ursprungligen kommer från Boussinesq (1885) och vidareutvecklades av Fröhlich (1934) och sedermera Söhne (1958). Boussinesq (1885) gjorde flera antaganden, förenklingar, för att kunna utveckla denna teori. Bl.a. antas att mediet är viktlost, helt elastiskt, homogent, semiindefinit och följer Hookes lag (Jumikis, 1984). Hooks lag bygger på att det råder proportionalitet mellan tryck och deformation.

Om en kraft, Q , läggs på i en punkt på ytan av en semiinfinitt medium, d.v.s. marken i detta fall, kan den vertikala normalspänningen i en punkt beräknas med formel 1:

$$\sigma_z = (3Q/2\pi r^2) \cos^3 \theta \quad (1)$$

där

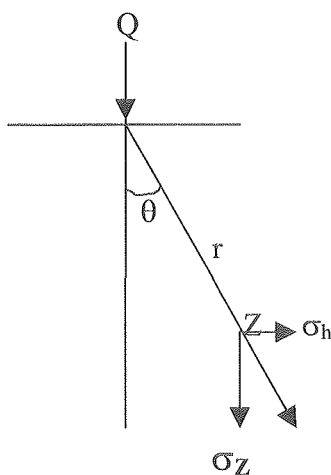
σ_z = vertikala spänningen i punkten Z (Pa)

σ_h = horisontella spänningen i punkten Z (Pa)

Q = punktlast (N)

r = avstånd mellan Q och Z (m)

θ = vinkel mot en vertikal linje under Q



Figur 3. Vertikal spänning under en punktlast i ett semiinfinitt medium efter Boussinesq (1885).

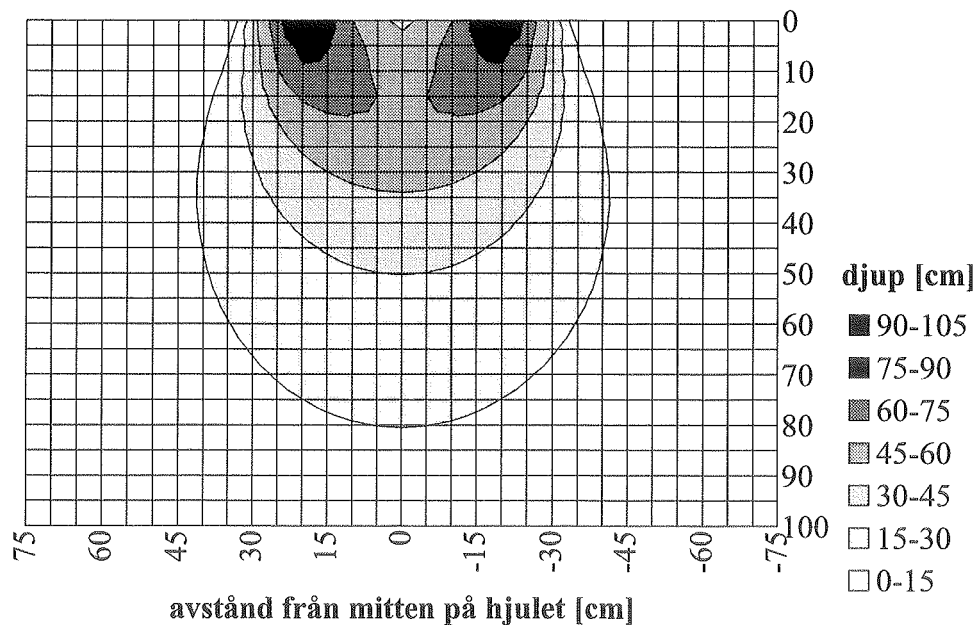
Fröhlich utvecklade denna teori genom att införa en koncentrationsfaktor (ν), se formel 2, för att ta hänsyn till jordens oelastiska beteende. Faktorn sätts till 3, 4, 5 eller 6 beroende på jordens egenskaper.

$$\sigma_z = (\nu Q/2\pi r^2) \cos^\nu \theta \quad (2)$$

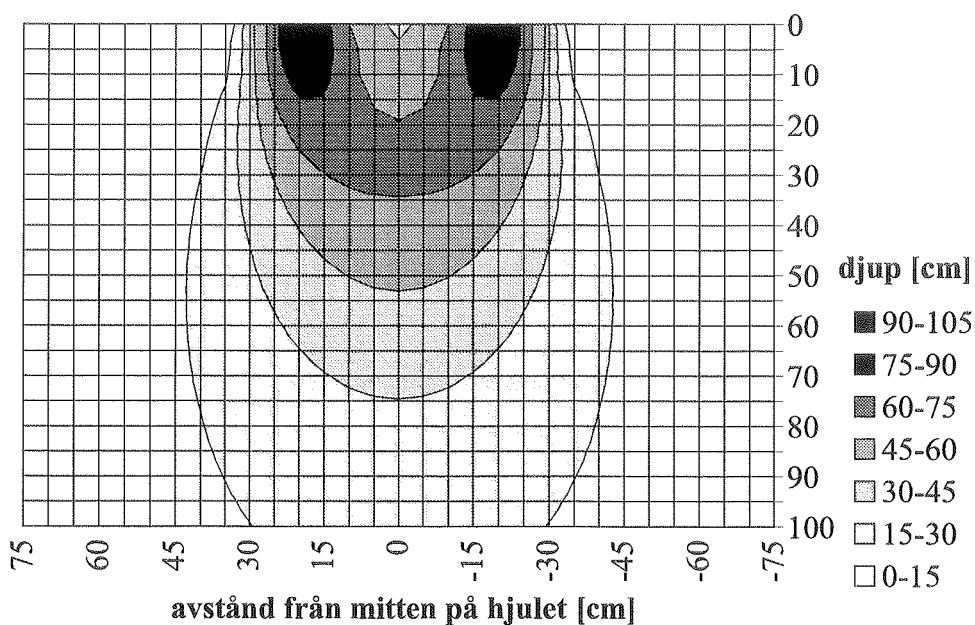
där ν = koncentrationsfaktorn

En koncentrationsfaktor på 3 beskriver en situation med helt elastiskt medium eftersom då $\nu=3$ blir formel 1 och formel 2 lika. Vilken koncentrationsfaktor som ska väljas till vilken jord får avgöras med hjälp av mätningar och erfarenheter. Vanligtvis anses t.ex. en fuktig jord ha koncentrationsfaktorn 5 medan en torr jord har en faktor på 3 (Koolen och Kuipers 1983). Beräkningar med en hög koncentrationsfaktor kommer att göra att trycket sprider sig mera neråt och en låg faktor gör att trycket sprider sig mer åt sidorna enligt formel (2).

Figur 4 och figur 5 visar beräkningar gjorda på tryckutbredning i mark med olika koncentrationsfaktorer, 3 och 6. Med en koncentrationsfaktor på 3 har trycket avtagit snabbare och inte spridit sig lika långt ner.



Figur 4. Beräkningar gjorda med formel 2 på tryckets utbredning i mark under traktor (hjullast 2500 kg, ringtryck 60 kPa), koncentrationsfaktor 3. Trycket redovisas i kPa.



Figur 5. Beräkningar gjorda med formel 2 på tryckets utbredning i mark under traktor (hjullast 2500 kg, ringtryck 60 kPa), koncentrationsfaktor 6. Trycket redovisas i kPa.

Understödsytan för ett hjul eller band är ju dock inte punktformad vilket gör att beräkningar på punktlaster inte är tillfredsställande. Det totala trycket i en punkt under t.ex. ett hjul går dock att beräkna om understödsytan delas upp i delytor, alla med punktlaster, som sedan läggs ihop (Söhne, 1958). En sådan summation har använts för beräkning av trycket i figur 4 och figur 5.

En annan vanlig metod att beräkna tryckutbredning i mark är med finit elementmodeller, FEM. Jorden delas då upp i ett antal finita element där trycket beräknas för vart och ett av dessa element. Denna metod kan ta hänsyn till jordens deformation men är mycket beräkningsintensiv och flera av inparametrarna är svåra att bestämma. Sådana modeller används inte i detta arbete och beskrivs därför inte ytterligare.

Hållfasthet

En jord kan bete sig elastiskt eller plastiskt. En helt elastisk jord deformeras när den utsätts för tryck men den återfår sin ursprungliga form om trycket tas bort. En jord med plastiskt beteende kommer däremot att vara deformerad även efter det att trycket tas bort. Om en jord kommer att packas beror till största delen på dess hållfasthet vilken beror på flera faktorer. Antal partiklar per volymsenhet kommer att påverka hållfastheten då det kommer att finnas fler kontaktytor för tryck att sprida ut sig på med fler partiklar. Distributionen av partiklar spelar också roll. Om partiklarna är mycket ojämnt fördelade kommer trycket koncentreras till de mer tätt packade områdena. De löst packade områdena kommer då att försvaga jorden eftersom de ger litet stöd. Vattenpotentialen har betydelse då den kommer påverka hur partiklarna dras till varandra eller pressas från varandra. Hur vattnet är fördelat i en jordvolym kommer påverka hur stort detta sug som drar partiklarna till varandra är. Mellan jordpartiklar finns även bindningar av annat slag, t.ex. kemiska. Det finns dessutom krafter som repellerar partiklarna, t.ex. elektriska krafter. Fördelningen av dessa bindningar kommer också att påverka markens hållfasthet, lite på samma sätt som fördelningen av partiklar och vatten (Koolen och Kuipers 1983). I en lös, luckrad jord som utsätts för tryck kommer dessa parametrar förändras och så även jordens hållfasthet.

Ett sätt att få ett mått på jordens hållfasthet är att bestämma dess förkonsolideringstryck vilket antas motsvara det högsta tryck som en jord tidigare blivit påverkad av. Detta tryck anses vara ett mått på hur högt tryck en jord kan utsättas för utan att packas ytterligare. Med andra ord kommer jorden bete sig elastiskt då den utsätts för tryck upp till förkonsolideringstrycket och plastiskt för tryck högre än förkonsolideringstrycket.

Ett annat mått på markens hållfasthet är dess skjuvhållfasthet. Det är ett mått på hur stor skjuvspänning jorden tål vid olika normalspänningar. Skjuvhållfastheten består av två komponenter, intern friktionsvinkel och kohesion. Den interna friktionsvinkeln beror på friktionen mellan jordpartiklarna, vilken kommer att öka vid ökad normalspänning. Sandjordar har normalt en hög intern friktionsvinkel men låg kohesion. Kohesionen beror dels på vattens förmåga att binda partiklar vid uttorkning och dels på bindningar mellan partiklarna. Kohesionen är vanligen hög hos lerjordar.

Packningens och skjuvningens påverkan på marken, dess egenskaper och dess funktion

Ren packning definieras strikt som en ökning av jordens torra skrymdensitet, när jorden behåller sin form men volymen minskar. Skjuvning är däremot när jorden behåller sin volym men inte sin form (Olsen, 1988). I vardagligt språk, som med tryck och spänning, sägs det dock ofta packning om kombinationen av packning och skjuvning. Vid maskindrift på jordbruksmark inträffar oftast kombinationen av packning och

skjuvning, d.v.s jorden ändrar både volym och form. Det är när jorden skjuvas samtidigt som den är utsatt för en normalspänning som den största packningen kommer inträffa (Koolen och Kuipers 1983). En slirning mellan 15 och 25 % kommer att ge maximal packning, lägre slirning påverkar inte så mycket och högre slirning leder till att jorden slungas åt sidorna vid körning (Raghavan et al, 1977). O'Sullivan et al (1999) visade att en skjuvningsdeformation (ett mått på hur mycket vinklarna i ett rektangulärt föremål förändras när föremålet utsätts för en kraft) på 0,35 grovt sett hade samma effekt på markegenskaperna som en fördubbling av normalspänningen i ett intervall mellan 30-100 kPa vad avser volymförändring av jordprover. Detta resultat ger en viss indikation på hur viktig slirning kan vara i packningsfrågor. Skjuvning påverkar dock endast jorden till ett grunt djup. Detta gör att skjuvningen sannolikt endast kommer att påverka packningen i matjorden. Hur djupt marken påverkas är beroende av markens hållfasthet och av hur pass stor tyngd den utsätts för (Olsen, 1988).

Något som till viss del kan återställa en packad jord är frysning och upptining. Under svenska förhållanden där det kan vara flera frostcykler under en vinter kan detta till viss del återställa det översta jordlagret. Under 30 cm är det oftast inte mer än en cykel per år men om plöjning tillämpas kommer jorden ovanför plöjningsdjup att ha varit i de översta 8 cm någon gång efter fem år (Arvidsson och Håkansson, 1996).

Porositet, makroporositet och porkontinuitet

Markens porsystem är mycket viktigt för markens funktion. Det ska leda både vatten och luft vilket är högst relevant för bl.a. grödor och mikroorganismer. Vid trafik av maskiner på jordbruksmark minskar ofta den totala porositeten, stora porer pressas samman till små, vilket kan påverka grödor på olika sätt (Brown et al, 1992). Stora porer pressas lättare samman än små porer då de har färre partikel-partikel-kontakter som kan erbjuda mekaniskt motsånd mot tryck (Brown et al, 1992).

Makroporer kan uppstå av naturliga sprickor i jorden på grund av torkning eller frysning eller vara bioporer skapade av växter eller djur. Typiska bioporer är rotkanaler eller hål av daggmaskar (Dexter, 2001). Makroporer definieras i detta arbete som porer med en storlek över 30 μm .

Att det i första hand är makroporsystemet som drabbas av markpackning är olyckligt då kulturväxternas rötter snabbt skall utveckla ett fungerande rotsystem vilket kräver ett makroporsystem av sprickor, maskhål och rotkanaler. Ett försämrat makroporsystem leder alltså till en försämrad rotmiljö (Eriksson, 1982). Det mekaniska motståndet ökar, ledningsförmåga och infiltrationshastighet kan minska och diffusionshastigheten för syre och andra gaser kan minska (Brown et al, 1992). Plöjning återställer dock till stor del makroporositeten i matjordslagret (Arvidsson och Håkansson, 1996) men det hjälper föga under den pågående växtsäsongen.

Servadio et al (2001) visade att det fanns en signifikant korrelation mellan utdragna, elipsformade porer och mättad hydraulisk konduktivitet. Denna korrelation fanns även med makroporositet. Eftersom de utdragna, elipsformade, porerna representerade den högsta andelen av den totala makroporositeten bekräftar detta att hydraulisk konduktivitet är direkt korrelerad med utdragna, kontinuerliga porer.

Skjuvningens effekt på porsystemet är inte lika undersökt. Ren skjuvning innebär ju ingen minskning i den totala porositeten men kan påverka kontinuiteten och storleksfördelningen av porer. O'Sullivan et al (1999) fick även vid försök med laborationsmässig skjuvning av jordprover en minskning av den luftfyllda porositeten samt minskning av luftpermeabiliteten och markens diffusionskoefficient. Slirning av maskiner som innebär skjuvning i marken kommer att försämra porsystemets form och funktion genom en parallellförflyttning av partiklar, se figur 6, (Horn, 2001) men mätningar i fält av detta är inte lätta att hitta.

Vattengenomsläpplighet

Hur mycket den mättade hydrauliska konduktiviteten minskar på grund av strukturdegradering är mycket större än förändringarna hos andra parametrar så som skrymdensitet och total porositet. Därför är mättad hydraulisk konduktivitet ett bra mått för att uppskatta strukturell degradering på grund av antropogen påverkan (Wang et al, 1985). Markpackning minskar den mättade hydrauliska konduktiviteten och kan öka den omättade hydrauliska konduktiviteten. Detta medför att när marken är blöt kan infiltrationen bli fördröjd, kapillariteten öka och det översta jordlagret kan ha en högre vattenpotential i en packad jord än i en lucker jord (Brussaard och Faassen, 1994). Den hydrauliska konduktiviteten förändras vilket påverkar infiltration, evaporation, kapillärt flöde och nedåtgående flöde av vatten. Att packning av en lucker jord kommer att minska den mättade hydrauliska konduktiviteten beror på att porstorleksfördelningen och porkontinuiteten förändras. I vissa jordar kommer en mycket liten deformation orsaka en avsevärt minskad mättad hydraulisk konduktivitet (Dawidowski och Koolen 1987).

Då det är de kontinuerliga porerna som har störst betydelse för vattengenomsläppligheten i jorden (Servadio et al, 2001) och skjuvning av jorden innebär en parallellförflyttning av jordpartiklar, se figur 6, som stör porkontinuiteten (Horn, 2001) är det lätt att tänka sig att skjuvning påverkar markens vattengenomsläpplighet negativt.



Figur 6. Parallellförflyttning av partiklar runt por på grund av skjuvning (Horn, 2001).

Upprepad direktsådd har i undersökningar av Schjønning och Rasmussen (2000) visats ge färre kontinuerliga porer än plöjning vilket bör resultera i en lägre vattengenomsläpplighet. Markfysikaliska undersökningar i försök med plöjningsfri odling av Rydberg (1987) visade dock att den mättade vattengenomsläppligheten förbättrades i matjordens bottenlager och i alvens översta del.

Påverkan av packning och skjuvning på växtodling och miljö

Packning av åkermark ger lägre skördar, inte bara det år den packas utan även flera år efteråt (Arvidsson och Håkansson, 1996; Rusanov, 1991). Effekten på skördarna kom sig troligen av grövre, torrare såbädd, sämre groning, högre aggregatstyrka och minskat näringsupptag (Arvidsson och Håkansson 1996).

En sänkt skörd kan i vissa fall kompenseras med ökad mängd insatsmedel för att öka skörden igen. Ökad mängd gödsel, bekämpningsmedel och utsäde är inte bara energi-krävande och ökar kostnaderna utan ökar även risken för läckage, avrinning och avgång till luft. Ett lika allvarligt problem, om inte allvarligare, är den direkta effekt som packningen får på dessa parametrar. Vissa effekter i jorden kommer troligtvis att vara kumulativa och långverkande och kan komma att allvarligt försämra miljön (van Ouwerkerk och Soane, 1995). Då packning minskar antalet och kontinuiteten av makroporer kommer ytavrinning att öka men risken för läckage kan minska (Brussaard och Faassen, 1994). Minskningen i makroporer minskar rotutvecklingen vilket kan leda till sämre utnyttjande av vatten och näring och leda till ökad användning av gödsel och även bevattningsvatten. Detta kan göra att läckaget endast minskar i förhållande till hur mycket som lagts på och inte i absoluta tal. Packning kan också leda till ökad avrinning till ytvatten av sediment, pesticider och näringsämnen, t.ex. fosfor (Soane och van Ouwerkerk, 1995) på grund av minskad vatteninfiltration (Servadio et al, 2001). En märkbart försämrad mättad hydraulisk konduktivitet kan även leda till stående vatten och att marken är mättad längre tid under året vilket ytterligare försämrar grödans förhållanden (Soane och van Ouwerkerk, 1995).

Den miljömässiga försämringen orsakad av markpackning kommer troligen innebära sämre kvalite på atmosfär, ytvatten, grundvatten och markresurser generellt (Soane och van Ouwerkerk, 1995).

Band- och hjultraktor

Bandtraktorer är inte så vanliga i svenskt jordbruk. De kan dock ha vissa fördelar, speciellt vad gäller högre dragkraftseffektivitet och lägre marktryck i förhållande till vikt jämfört med en hjultraktor. En gummibandtraktor har potential att kunna antingen dra mer vid samma vikt som en hjultraktor eller kunna väga mindre och ändå dra lika mycket som en tyngre hjultraktor (Okello et al, 1994). Bashford och Kocher (1999) gjorde undersökningar som jämförde gummibandtraktorer med olika bandbredd och hjultraktorer och fann att den maximala drageffektiviteten var högre för bandtraktorerna än för hjultraktorerna. Drageffektiviteten beror på slirning, dragbarhet hos traktorn (d.v.s. hur tungt den kan dra jämfört med dess vikt) samt kraftförluster i bandrespektive hjulenheten (Okello et al, 1994). Ju lösare jord, desto större blev skillnaderna till bandtraktorernas fördel. Skillnaden mellan ett smalare och ett bredare band var minimala (Bashford och Kocher, 1999). Okello et al (1994) fann dock att bandtraktorn hade lägre drageffektivitet än hjultraktorn, trots högre dragbarhet, troligen på grund av allför stora kraftförluster i bandenheten.

Påverkan på markfysikaliska egenskaper

Jämförelser mellan bandtraktorer och hjultraktorer med avseende på deras påverkan på markfysikaliska egenskaper har inte visat på några stora skillnader. Brown et al (1992) jämförde bandtraktor med hjultraktor med avseende på skrymdensitet, mättad

hydraulisk konduktivitet, luftfylld porositet och porstorleksfördelning. Gummibandtraktorn och hjultraktorn skilde sig inte åt för någon parameter, däremot hade de alltid en signifikant effekt jämfört med kontrollen. När det gällde porstorleksfördelningen hade de signifikant lägre mängd stora porer, över 30 μm . Överfart med traktorerna gav även högre skrymdensitet, lägre luftfylld porositet och lägre mättad hydraulisk konduktivitet i matjorden. I en annan undersökning av Servadio et al (2001) gav gummibandtraktorn lägre makroporositet efter en överfart medan hjultraktorn gav det endast efter fyra överfarter i jämförelse med kontrollen. Det var minskningen av de utdragna, elipsformade, porerna som stod för minskningen av den totala porositeten. Även den mättade hydrauliska konduktiviteten minskade i matjordslagret efter överfart av traktorerna, dock utan inbördes skillnader.

Syfte

Detta examensarbets syfte var att undersöka betydelsen av olika traktortekniska faktorer inverkan på marktryck, markpackning och på markens funktion. De faktorer som jämfördes var dubbelmontage och enkelmontage, dragande och icke dragande traktor samt band- och hjultraktor. Dessa olika faktorer studerades i tre delexperiment. De parametrar som mättes som mått på marktryck, markpackning och markens funktion var vertikal markrörelse och vertikal normalspänning på olika djup, makroporositet, skrymdensitet och mättad vattengenomsläpplighet.

Dubbelmontage-enkelmontage

Syftet med detta delexperiment var att se om de två hjulen i ett dubbelmontage verkar som två skilda hjul eller om de samverkar avseende trycket i jordprofilen. Om de båda hjulen inte samverkar avseende trycket i marken skulle det vara mer relevant att tala om hjullaster istället för axellaster rörande frågor om rekommendationer för att minska markpackning. Trycket mättes på olika ställen under hjulen för att se var trycket var högst.

Dragande-icke dragande

Genom att undersöka en traktor som drar respektive inte drar, var syftet att kunna se hur dragkraftsuttag och slirning påverkar packning och skjuvning av jorden och i slutändan markens funktion.

Bandtraktor-hjultraktor

Syftet med att undersöka en hjultraktor och en bandtraktor med avseende på vertikal markrörelse och tryck, makroporositet och mättad genomsläpplighet var att se om det fanns någon skillnad mellan band och hjul vad gäller packningspåverkan och markens funktion.

MATERIAL OCH METOD

Tre experiment utfördes under hösten 2001. Det var en jämförelse mellan en dragande traktor och en icke dragande traktor, en traktor med dubbelmontage och en med enkelmontage och slutligen en jämförelse mellan en bandtraktor och en hjultraktor.

Försöksplatser

De tre försöken utfördes på två olika försöksplatser. På Staby säteri, Uppland, utfördes försöken med dubbelmontage-enkelmontage och dragande-icke dragande traktor. Försöket med bandtraktor och hjultraktor utfördes på Krenkerup gods, Lolland, Danmark.

Staby Säteri

Försöken utfördes på ett fält med plöjningsfritt bruknings sätt. Ingen tydlig trafiksula fanns. Marken hade bearbetats till tre-fyra centimeters djup med en kultivator med gåsfötter.

Texturanalys

Texturanalys utfördes för sju nivåer med pipettmetoden, se tabell 1.

Tabell 1. Kornstorleksfördelning på Staby säteri

Djup (cm)	Kornstorleksfördelning (g/kg)				
	Ler	Mjåla	Mo	Sand	Mull
0-20	516	239	153	36	21
20-30	568	279	94	18	3
30-40	599	309	58	4	0
40-50	636	280	55	3	0
50-60	610	275	84	5	0
60-70	622	280	69	2	0

Vattenhalt

Jordprover för bestämning av vattenhalt togs den 16 november. Vattenhalten bestämdes sedan gravimetriskt för sju nivåer, se tabell 2.

Tabell 2. Vattenhalten på Staby säteri den 16 november

Djup (cm)	Vattenhalt (%, vikt/vikt)
0-10	35
10-20	28
20-30	27
30-40	27
40-50	27
50-60	27
60-70	27

Mätningarna utfördes under ganska blöta förhållanden med lätt frost ett par centimeter i ytan.

Förkonsolideringstryck

Förkonsolideringstrycket bestämdes med hjälp av mätningar gjorda med en ödometer. Tryck lades på i 10 steg (10, 25, 50, 75, 100, 150, 300, 400, 600 och 800 kPa) med 30 sekunder per steg. För varje steg mättes deformationen av jordproverna. Från en kurva med logtryck-deformation lästes förkonsolideringstrycket av enligt Casagrande (1936). Förkonsolideringstrycket mättes för fem djup med fem prov per djup, se tabell 3.

Tabell 3. Förkonsolideringstryck på Staby säteri den 16 november

Djup (cm)	Förkonsolideringstryck (kPa)
5	21
15	130
30	184
50	171
70	191

Krenkerup gods

Mätningarna utfördes på ett fält med konventionellt bruknings sätt som var helt obearbetat efter skörd av stråsäd.

Texturanalys

Texturanalys utfördes för sju nivåer med pipettmetoden, se tabell 4.

Tabell 4. Kornstorleksfördelning på Krenkerup gods

Djup (cm)	Kornstorleksfördelning (g/kg)				
	Ler	Mjäla	Mo	Sand	Mull
0-20	123	144	460	242	19
20-30	111	141	439	277	22
30-40	116	148	470	238	16
40-50	110	149	456	263	11
50-60	115	157	430	279	6
60-70	166	161	439	219	0

Vattenhalt

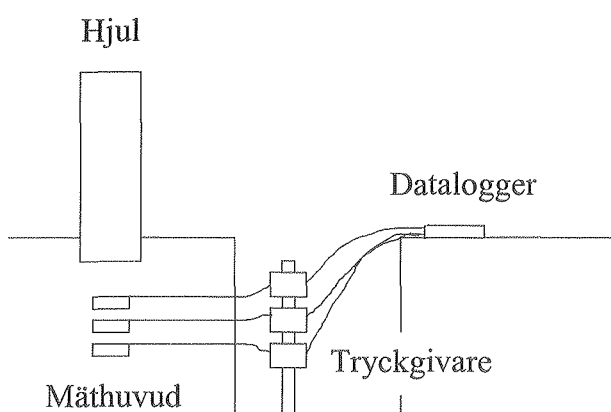
Vattenhaltsprover togs ut den 29 november. Vattenhalten mättes sedan gravimetriskt för åtta nivåer, se tabell 5. Vattenhalten var högre i matjorden än i resten av profilen.

Tabell 5. Vattenhalter på Krenkerup gods den 29 november

Djup (cm)	Vattenhalt (% (%, vikt/vikt)
0-10	21
10-20	20
20-30	16
30-40	17
40-50	17
50-60	16
60-70	17
70-80	18

Mätutrustning för vertikal markrörelse och tryck

De vertikala markrörelserna mättes enligt Arvidsson och Andersson (1997). Metoden baseras på den fysikaliska principen att trycket från en vätskepelare är proportionell mot dess höjd. En cylinder med silikonolja placerad i en plexiglasbehållare installerades vågrätt in i jorden genom ett hål som borrats från en grop, se figur 7. Behållaren satt monterad på ett 1050 mm långt aluminiumrör. Pelaren med silikonolja var sammankopplad med en tryckgivare med en slang. Om jorden rörde sig vid överfart av maskiner ändrades höjden av vätskepelaren och detta registrerades som en tryckförändring hos tryckgivaren. Tryckgivaren hade ett mätområde från -1 till $+1$ kPa vilket motsvarade en vertikal rörelse på ± 102 mm med en noggrannhet på $0,1$ mm. Signalerna från tryckgivaren togs emot av en datalogger.



Figur 7. Mätutrustning för mätning av vertikal markrörelse och tryck.

På samma plexiglasbehållare som vätskepelaren satt i, fanns en lastcell för mätning av den vertikala spänningen monterad i en aluminiumplatta. Den var kopplad till samma datalogger som rörelsemätaren.

Groparna som användes för installation av mätutrustningen var ca 1,5 m långa, 1 m breda och 1 m djupa. Väggarna på långsidan av groparna stabiliserades. Tre hål borrades på vardera långsidan på 15, 30 och 50 cm djup. Väggarna hos hålen stabiliserades med hjälp av stålrör med samma diameter som hålen. Hålen stansades ut längst in för att ha samma form som mät huvudet och ge bra kontakt mellan jord och mät huvud. Mät huvudet ($70 \times 35 \times 35$ mm) med vätskepelaren och lastcellen infördes i hålet med hjälp av det 1050 mm långa aluminiumröret.

För alla tre delexperiment fanns två olika behandlingar och båda utfördes på båda sidorna av gropen växelvis, med den ena behandlingen först på ena sidan och den andra på andra sidan. När efterredskap användes fick ekipagen stannas precis när traktorns bakhjul passerat över mätutrustningen.

Utförande av försök med dubbelmontage och enkelmontage

Mätningarna utfördes med två traktorer. En John Deere 4640 utrustad med enkelmontage med en axelbelastning bak på 5000 kg och en totalvikt på 7,1 ton och en Steiger

utrustad med dubbelmontage med en axelbelastning fram på 8700 kg och en totalvikt på 14,8 ton användes. Hjullasterna för John Deeren bak, respektive Steigern fram, blev då 2500 kg respektive 2200 kg. På båda traktorerna användes radialdäck med dimensionen 710/70 R 38 och ringtrycket 60 kPa.

Vertikal markrörelse och tryck mättes under John Deeren och Steigern med ovanstående mätutrustning på 15, 30 och 50 cm djup. Båda traktorerna kördes utan redskap. Det utfördes sex olika mätningar med de båda traktorerna vilka alla utfördes med samma installation av mätutrustningen. Traktorerna kördes så att olika delar av traktorn kom mitt över mätutrustningen vid de olika mätningarna och på så vis kunde tryck och deformation mätas på flera ställen under traktorerna. Ytan luckrades upp inför varje körning. Mätningar på enkelmontage skedde under hjulens ytterkant och mitt under hjulen. På dubbelmontaget gjordes mätningar under ytterhjulens ytterkant, mitt under de dubbelmonterade hjulen och mitt mellan de dubbelmonterade hjulen. Vertikal markrörelse och tryck mättes med fyra upprepningar, d.v.s. fyra olika installationer. Beräkningar av tryckutbredning i marken under ett dubbelmontage gjordes med hjälp av en modell som baseras på Söhnes ekvationer, se ovan, för att jämföra med de resultat av tryck som uppmättes.

Utförande av försök med dragande och icke dragande traktor

Experimentet utfördes med samma John Deere som i ovanstående försök, med och utan kultivator med gåsfötter. Vertikal markrörelse och -tryck mättes med tidigare nämnda mätutrustning. Mätningarna utfördes mitt under hjulen med fyra upprepningar. Vid varje upprepning utfördes både mätningar på dragande och icke dragande traktor med samma installation av mätutrustningen. Ytan luckrades upp inför varje körning. Marktrycket mättes på 15, 30 och 50 cm djup och markrörelsen på 15 och 30 cm djup.

För att kunna bestämma makroporositet, mättad genomsläpplighet och skrymdensitet togs även cylindrar ($\varnothing 72$ mm, $h=50$ mm) med jord ut för senare laborationsmätningar. Dessa togs ut i spåren efter traktorns bakhjul, dels när den dragit och dels när den inte dragit. För kontroll togs även jord från obehandlad jord ut. Cylindrarna togs ut 4-8 cm under ostörd markyta. För varje upprepning togs sex cylindrar och det var fyra upprepningar per behandling.

Utförande av försök med bandtraktor och hjultraktor

Mätningarna utfördes med en hjultraktor och en gummibandtraktor. Hjultraktorn var en Fendt 920 som drog en 7-skärig plog. Axelbelastningarna när den stod still var 5,7 ton på framaxeln och 4 ton på bakaxeln, alltså en totalvikt på 9,7 ton. Ringtrycket var 100 kPa både fram och bak. Bandtraktorn var en CLAAS Challenger 65-E som drog en 12-skärig plog. Traktorns vikt var 18,5 ton och anläggningsytan $2,1 \text{ m}^2$ per band, vilket gav ett nominellt marktryck på 45 kPa.

För att få en så jämn viktfördelning som möjligt på bandtraktorn var det viktigt att hitta rätt inställning på plog och traktor. Viktfördelningen påverkas av dragkraftsuttaget och detta påverkas av en rad faktorer så som jordart, plöjningdjup och vattenhalt. Den rätta inställningen av plog och traktor kommer alltså att variera mycket

beroende på omkringliggande orsaker. För att kunna balansera bandtraktorn mättes trycket under banden med hög upplösning både längs med och tvärs körriktningen. Detta gjordes med hjälp av 5 lastceller som placerades 10 cm under markytan. Lastcellerna placerades i två rader tvärs körriktningen med 50 cm mellan raderna, tre lastceller i ena raden, med 17,5 cm mellan lastcellerna, och två i den andra, med 10 cm mellan lastcellerna. Genom att variera placeringen av traktorn i förhållande till lastcellerna vid olika överfarter kunde trycket under bandet mätas med hög upplösning. Genom att ändra på trycket i tryckrullarna på bandet, anpassa frontvikterna på traktorn och dragpunktens höjd över markytan kunde bandtraktorn balanseras för de rådande förhållandena.

Mätningarna av vertikal markrörelse och -spänning utfördes mitt under däcken respektive bandet med åtta upprepningar. Den vertikala markrörelsen mättes och den vertikala markspänningen mättes på 15, 30 och 50 cm djup. Båda traktorerna plöjde "on land". Även här togs cylindrar med jord ut i spåren efter hjultraktorn och bandtraktorn och även från orörd jord. Cylindrarna togs ut på 10 cm djup relativt ostörd markyta med sex cylindrar per upprepning och fyra upprepningar per behandling.

Laborationsmätningar

De cylindrar som provtogs vid körning i försöken med bandtraktor – hjultraktor och dragande – icke dragande traktor användes för mätning av makroporositet, mättad hydraulisk konduktivitet och skrymdensitet.

Makroporositet

Först mättades proverna, sedan mättes makroporositeten med ett vattenavförande tryck på 1 m vilket motsvarar porer av en storlek av 30 μm . Det vattenavförande trycket sattes till 1 m för att motsvara markens fältkapacitet då dränering vanligtvis ligger på 1 m djup.

Mättad hydraulisk konduktivitet

Den mättade hydrauliska konduktiviteten mättes enligt Andersson (1955). Vid beräkningar av den mättade vattengenomsläppligheten har medianen av logaritmerade värden använts. De uppmätta värdena på mättad genomsläpplighet logaritmerades för att få dem normalfördelade. Sedan togs medianen av de logaritmerade värdena för att de extremvärden som uppstod av nollvärden från mätningarna inte skulle få så stort inflytande.

Skrymdensitet

Skrymdensiteten mättes genom att jordproverna torkades i 105°C i tre dygn varefter proverna vägdes.

Datormodell

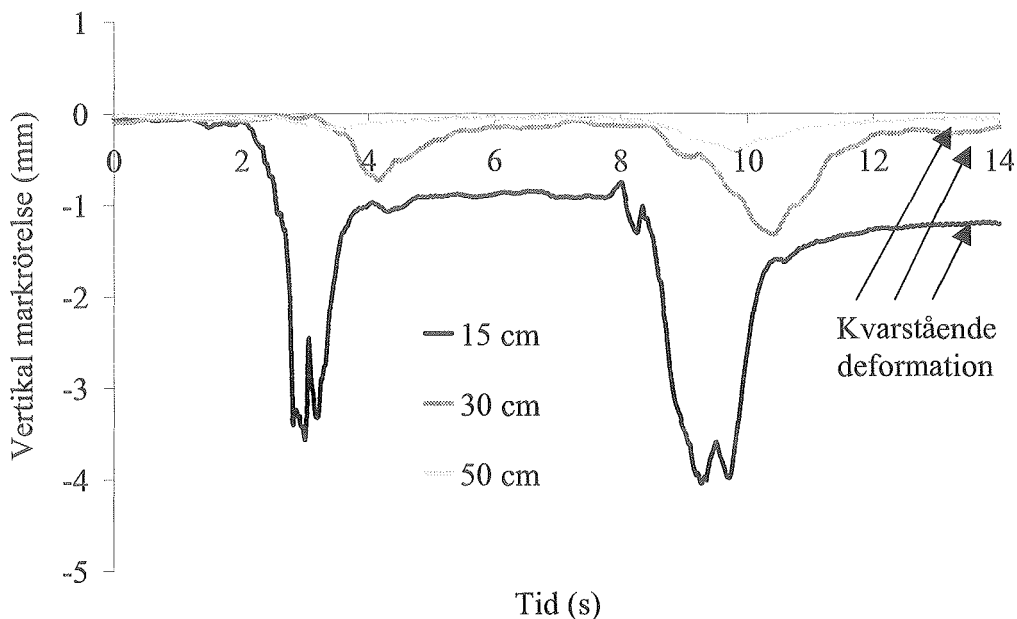
Den datormodell som användes för att beräkna tryckutbredning i mark under ett dubbelmontage utgår från ekvationer som baseras på Boussinesqs arbeten (1885) som senare utvecklades av Fröhlich (1934) och Söhne (1958). Då lasten kan delas upp i många, små punktlaster kan viktfördelningen över anläggningsytan varieras.

RESULTAT

Dubbelmontage-enkelmontage

Vertikalt marktryck och markrörelse

Figur 8 visar ett exempel på en mätning av vertikal markrörelse och kvarstående vertikal deformation under kanten av hjulen på traktor med enkelmontage. Att kurvorna är förskjutna något i förhållande till varandra beror på att mät huvudena inte satt rakt under varandra. Som synes rör sig marken mycket under hjulen vid överfart av traktorn men rörelsen i marken är till viss del elastisk och den kvarstående deformationen är avsevärt mindre än den maximala vertikala deformationen under överfarten.



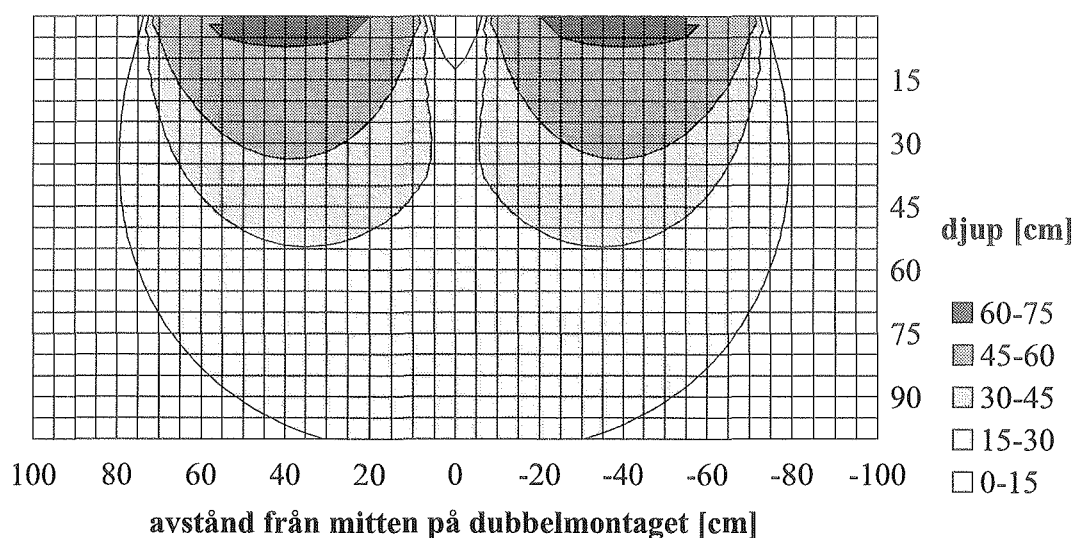
Figur 8. Exempel på mätning av vertikal markrörelse och kvarstående vertikal deformation. Denna mätning var under ytterkanten på hjulen på traktor utrustad med enkelmontage. Första "dippen" i kurvorna orsakades av framhjulet och andra av bakhjulet.

I tabell 6 redovisas att trycket under kanten inte skilde sig signifikant, $P > 0,05$, från trycket mitt under hjulen, varken för enkelmontaget eller för dubbelmontaget. Det fanns heller ingen skillnad mellan de båda hjulen i dubbelmontaget. På ingen nivå är heller trycket under dubbelmontaget högre än under enkelmontaget. Den enda signifikanta skillnad som uppmättes var att trycket under enkelmontaget var högre än trycket mitt mellan hjulen på dubbelmontaget på 15 cm.

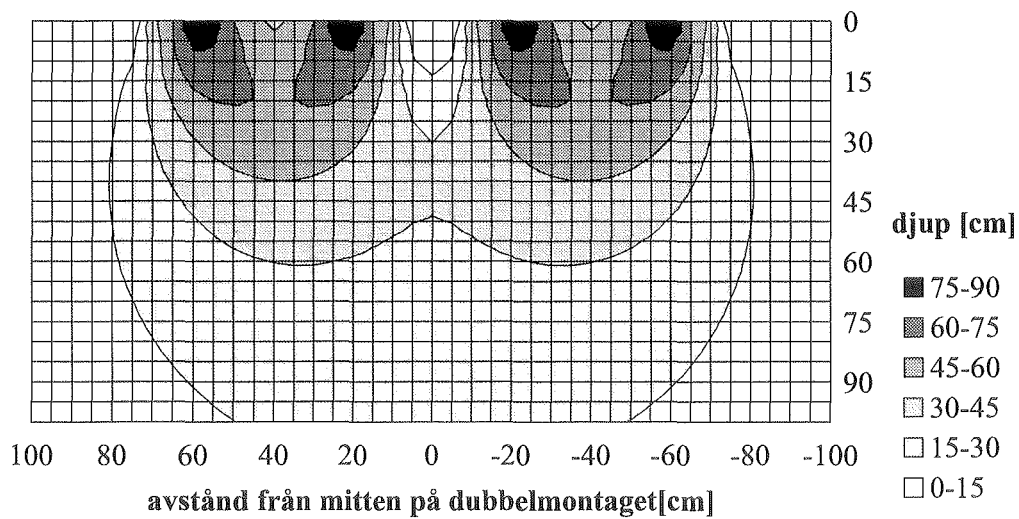
Tabell 6. Det maximala vertikala marktrycket under bakhjul på enkelmontage och framhjul på dubbelmontage. Värden från samma djup som följs av olika bokstäver är signifikant skilda ($P < 0,05$)

djup (cm)	Vertikalt marktryck (kPa)					
	Enkelmontage		Dubbelmontage			
	Mitt under hjul	Ytter-kanten av hjul	Mitt under innerhjul	Mitt mellan hjul	Mitt under ytterhjul	Ytter-kanten av ytterhjul
15	153a	225a	147ab	50b	141ab	131ab
30	76	52	59	32	56	35
50	31	29	31	26	27	20

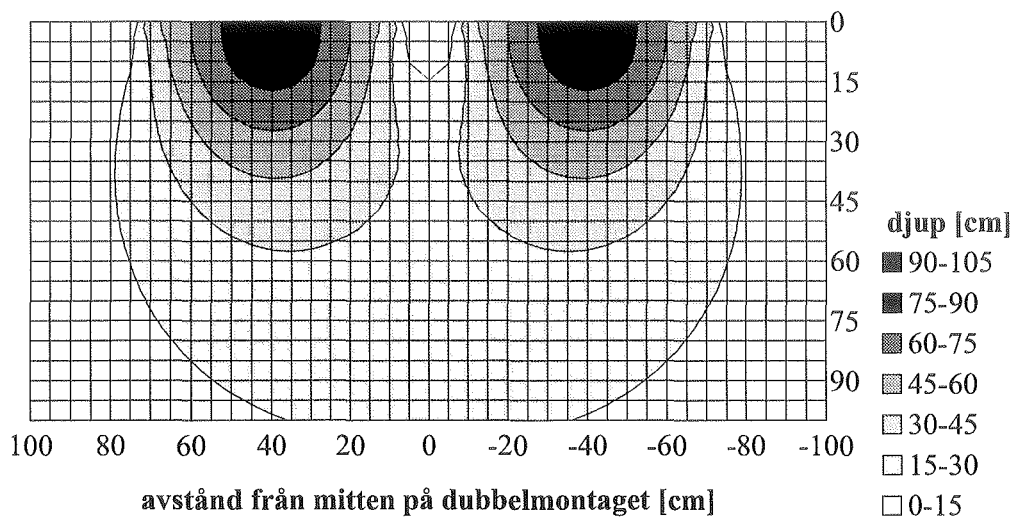
Figur 9, figur 10 och figur 11 visar beräkningar på tryckutbredningen i marken under dubbelmontaget. Koncentrationsfaktorn sattes till 4 då det antogs motsvara förhållandena då marktrycket mättes i fält. I figur 9 antas belastningen av traktorn vara jämnt fördelad över hela bredden på hjulet. I figur 10 antas belastningen vara något högre på kanterna av hjulet och i figur 11 antas belastningen vara något högre under mitten av hjulet.



Figur 9. Beräknat tryck, i kPa, under traktor med dubbelmontage. Koncentrationsfaktorn är satt till 4. Viktfördelningen antas vara jämn över hela hjulbredden.



Figur 10. Beräknat tryck, i kPa, under traktor med dubbelmontage. Koncentrationsfaktorn är satt till 4. Viktfördelningen antas vara ojämn med mer belastning på kanterna av hjulen.



Figur 11. Beräknat tryck, i kPa, under traktor med dubbelmontage. Koncentrationsfaktorn är satt till 4. Viktfördelningen antas vara ojämn med mer belastning på mitten av hjulen.

Det blev liten kvarstående vertikal deformation under de båda traktorerna på alla tre djup, se tabell 7. På 15 cm djup rörde sig marken uppåt mellan de två dubbelmonte-
rade hjulen vilket gav signifikant skillnad mot övriga mätningar på 15 cm, utom mitt
under det enkla hjulet.

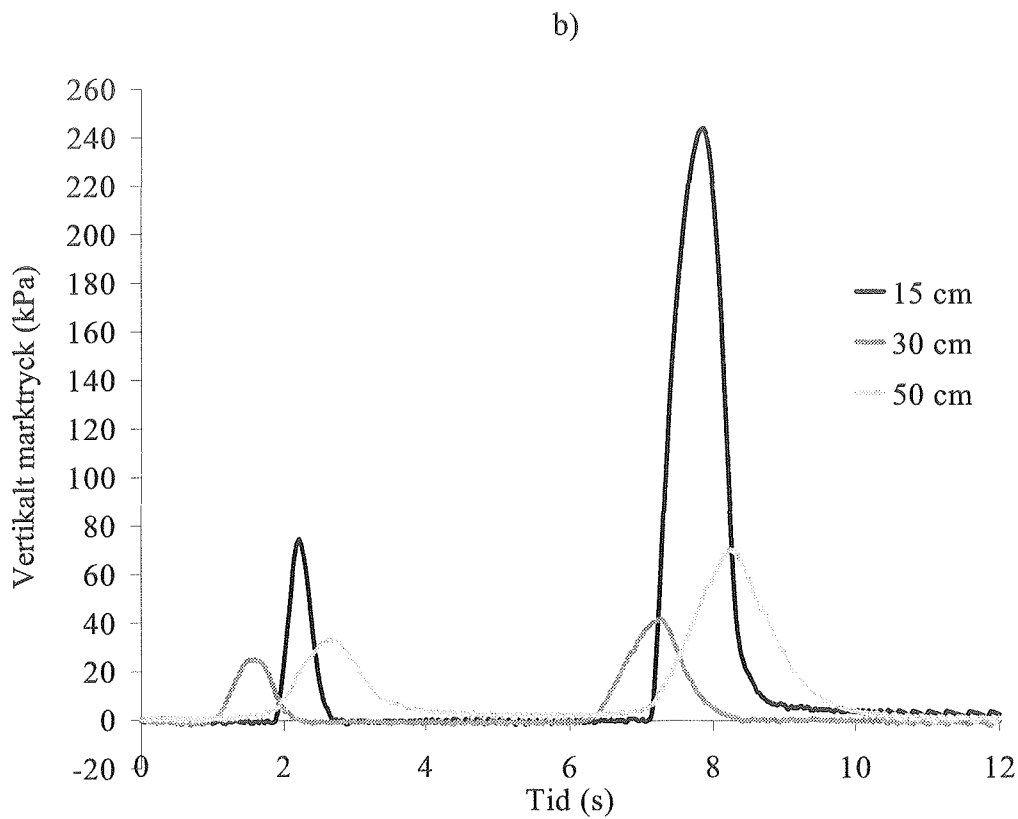
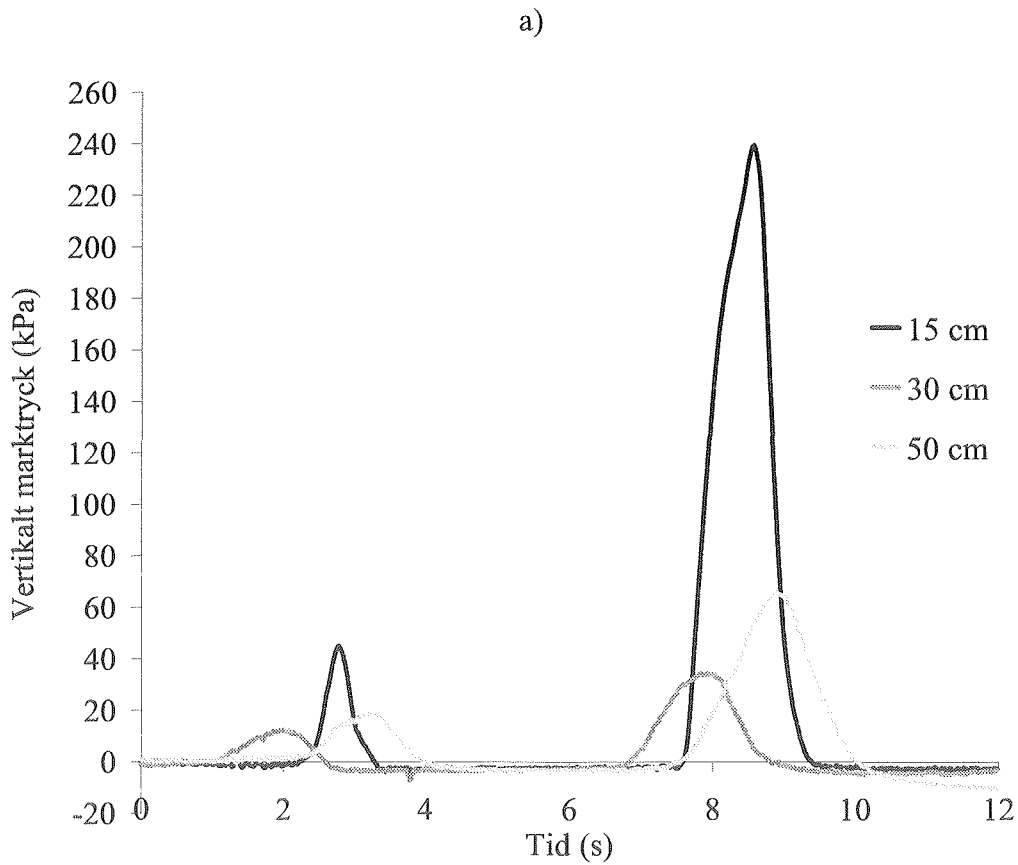
Tabell 7. Den kvarstående vertikala deformationen i mm på 15, 30 och 50 cm djup.
Värden från samma djup som följs av olika bokstäver är signifikant skilda ($P < 0,05$)

djup (cm)	Kvarstående vertikal deformation (mm)					
	Enkelmontage		Dubbelmontage			
	Mitt under hjul	Ytter- kanten av hjul	Mitt under innerhjul	Mitt mellan hjul	Mitt under ytterhjul	Ytter- kanten av ytterhjul
15	-0,5ab	-1,2b	-0,7b	0,4a	-0,7b	-0,8b
30	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2
50	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1

Dragande-icke dragande

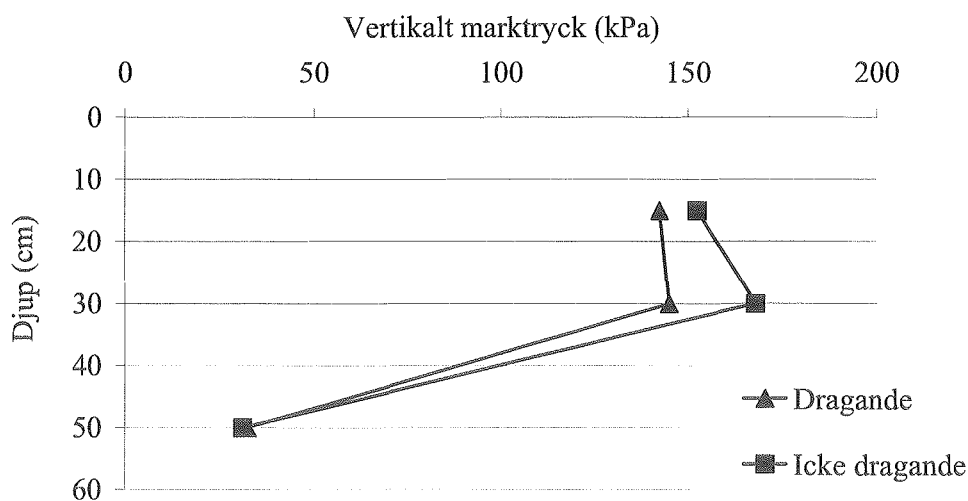
Vertikalt marktryck och markrörelse

Exempel på mätningar av vertikalt marktryck under en dragande och en icke dragande traktor visas i figur 12 a och b. Formerna på kurvorna från en dragande och en icke dragande traktor skiljer sig inte så mycket åt. Basen på topparna hos den dragande traktorn är något bredare än hos den icke dragande traktorn på grund av lägre hastighet.



Figur 12. Vertikalt marktryck under traktor. Första toppen är trycket under framhjulet och andra toppen trycket under bakhjulet. a) Dragande traktor b) Icke dragande traktor.

Mätningarna av vertikalt marktryck på 15 och 30 cm djup skedde endast med två upprepningar där mätvärdena uppvisade stor variation. Inga signifikanta skillnader uppmättes på något djup, $P > 0,05$.



Figur 13. Vertikalt marktryck under bakhjulet på dragande och icke dragande traktor på 15, 30 och 50 cm djup. Medelvärden av två mätningar. Inga signifikanta skillnader uppmättes.

Den kvarstående vertikala deformationen under dragande och icke dragande traktor uppvisade inte heller några signifikanta skillnader, se tabell 8. Liksom under dubbelmontaget och enkelmontaget var dock deformationen väldigt liten.

Tabell 8. Kvarstående vertikal deformation i mm på 15 och 30 cm djup under dragande och icke dragande traktor. Inga signifikanta skillnader uppmättes

djup [cm]	Kvarstående deformation (mm)	
	Dragande	Icke dragande
15	-1,1	-0,9
30	-0,2	-0,2

Mättad vattengenomsläpplighet, makroporositet och skrymdensitet

Inga signifikanta skillnader ($P > 0,05$) fanns mellan kontroll och de två behandlingarna, eller mellan de två behandlingarna, se tabell 9. Vad gäller den mättade vattengenomsläppligheten kan det anas tendenser att dragande gav lägst värde, icke dragande näst lägst och att kontrollen gav högst värde.

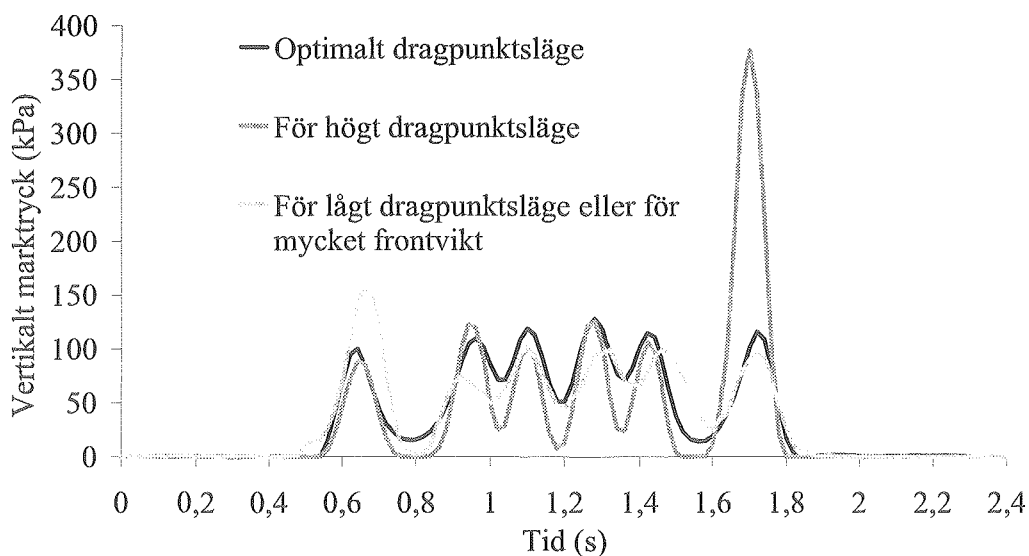
Tabell 9. Medianvärde av mättad vattengenomsläpplighet i cm/h och medelvärde för makroporositet i m^3/m^3 och skrymdensitet i g/cm^3 . Inga signifikanta skillnader uppmättes

	Mättad vattengenomsläpplighet median (cm/h)	Makroporositet (m^3/m^3)	Skrymdensitet (g/cm^3)
Kontroll	5,56	0,075	1,235
Dragande	0,36	0,069	1,234
Icke dragande	2,54	0,067	1,265

Bandtraktor-hjultraktor

Balansering av bandtraktor

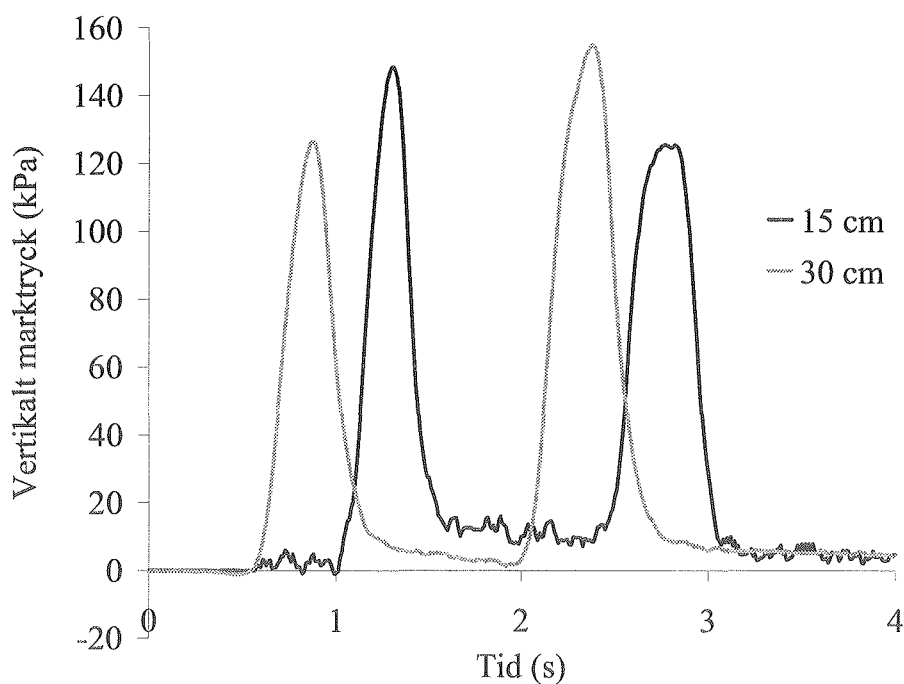
Figur 14 visar ett exempel på två mätningar av vertikalt marktryck gjorda vid balansering av bandtraktorn. Vid obalanserad traktor var maxtrycket nästan 400 kPa och trycket var mycket ojämnt fördelat över de sex hjulen. När traktorn balanserats genom att dragpunktens läge över markytan sänkts var maxtrycket cirka 120 kPa och trycket var mycket jämnare fördelat över de sex hjulen.



Figur 14. Exempel på mätningar av vertikalt marktryck gjorda för att balansera bandtraktor. Första toppen på kurvorna motsvarar trycket under främsta rullen, de fyra mittopparna trycket under de fyra stödrullarna och den sista toppen trycket under drivhjulet på bandet.

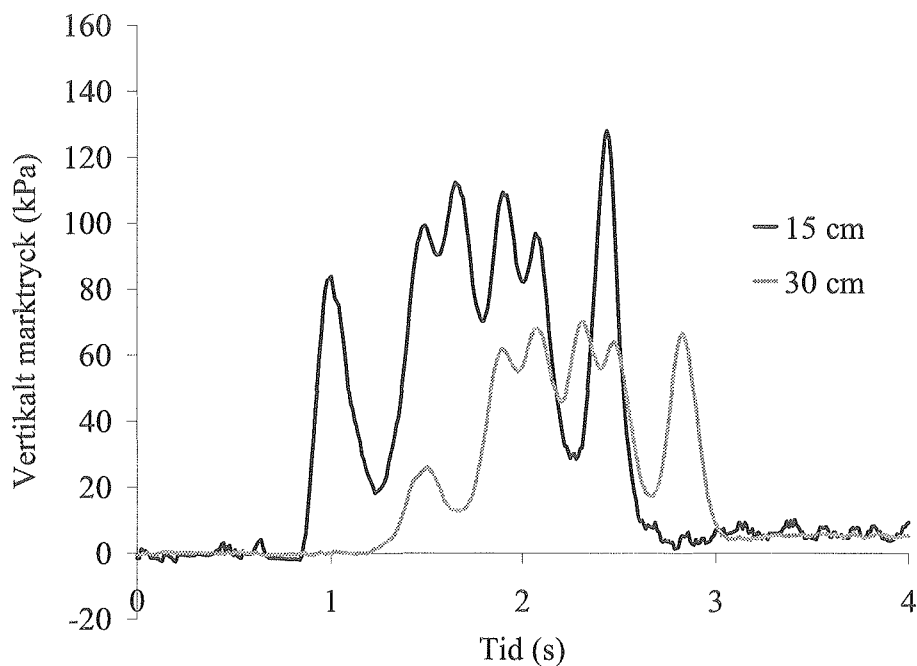
Vertikalt marktryck och markrörelse

Figur 15 visar en mätning av vertikalt marktryck under hjultraktorn på 15 och 30 cm djup. Mätningar utfördes också på 50 cm djup. Anledningen till att topparna är något förskjutna i sidled i förhållande till varandra är att mät huvudena inte är installerade helt vertikalt under varandra. Vid denna mätning var trycket under framhjulet högre än under bakhjulet på 15 cm. I fortsättningen redovisas dock alltid trycket under bakhjulet på hjultraktorn som jämförelse med bandtraktorn.



Figur 15. Vertikalt marktryck under hjultraktor. De första topparna är trycket under framhjulet och de sista topparna under bakhjulet.

Figur 16 visar en mätning av det vertikala marktrycket under bandtraktorn på 15 och 30 cm djup. Mätningar utfördes även på 50 cm djup. Den första toppen på de två kurvorna är den främre, stora rullen. De fyra följande topparna är de fyra stödrullarna och den sista toppen är drivrullen i bandet. De sex topparna på respektive nivå är ganska jämna i figur 16 vilket visar att tyngden var relativt jämnt fördelad mellan rullarna.



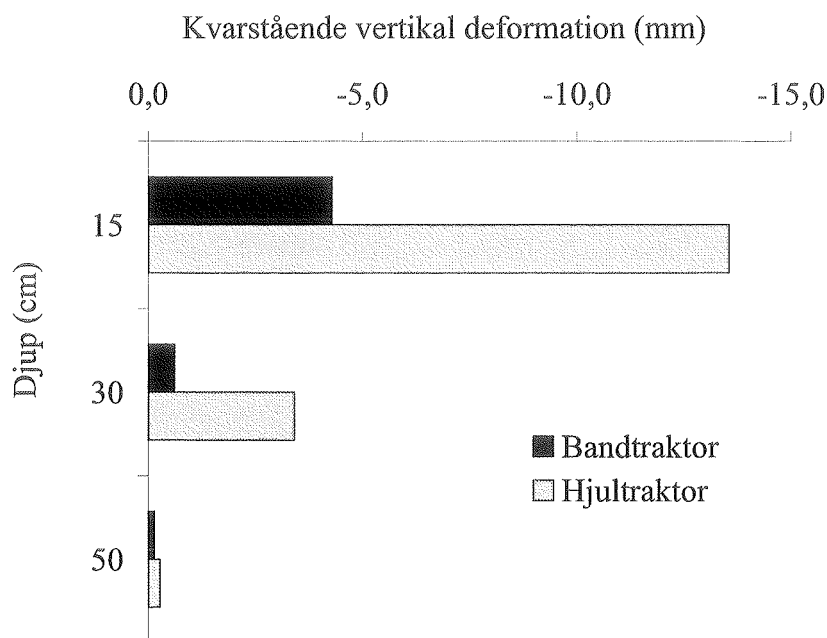
Figur 16. Vertikalt marktryck under bandtraktor. Första toppen på kurvorna motsvarar trycket under främsta rullen, de fyra mitttopparna trycket under de fyra stödrullarna och den sista toppen trycket under drivhjulet på bandet.

Det vertikala marktrycket under traktorerna blev överlag högre för hjultraktorn än för bandtraktorn, se tabell 10. Signifikanta skillnader, $P < 0,05$, uppmättes på 15 och 30 cm djup. Skillnaderna avtar mot djupet och på 50 cm skiljer sig band- och hjultraktorn inte signifikant åt.

Tabell 10. Vertikalt marktryck i kPa under bandtraktor och hjultraktor på 15, 30 och 50 cm djup. Värden från samma djup som följs av olika bokstäver är signifikant skilda ($P < 0,05$)

djup (cm)	Vertikalt marktryck (kPa)	
	Band	Hjul
15	90a	145b
30	73a	150b
50	21	26

Resultaten av mätningarna av den vertikala markrörelsen visas i figur 17. Det är den kvarstående vertikala deformationen vid slutet av mätningarna som redovisas. Det finns en tendens ($P = 0,08$) till att deformationen på 15 cm skiljer sig åt mellan de två traktorerna. På övriga djup var skillnaderna ej signifikanta ($P > 0,05$).



Figur 17. Kvarstående vertikal deformation i mm under bandtraktor och hjultraktor på 15, 30 och 50 cm djup. Inga signifikanta skillnader uppmättes.

Mättad vattengenomsläpplighet, makroporositet och skrymdensitet

Inga signifikanta skillnader ($P > 0,05$) fanns mellan de båda traktorerna, se tabell 11. En viss tendens till att hjultraktorn har gett upphov till högre skrymdensitet än bandtraktorn finns dock. Däremot skiljer sig de båda traktorerna signifikant mot kontrollen och har alltså påverkat marken negativt med lägre mättad vattengenomsläpplighet, mindre mängd makroporer och en högre skrymdensitet som följd.

Tabell 11. Medianvärde för mättad vattengenomsläpplighet i cm/h och medelvärden för makroporositet i m^3/m^3 och skrymdensitet i g/cm^3 . Värden som följs av olika bokstäver är signifikant skilda ($P < 0,05$)

	Mättad vatten- genomsläpplighet median (cm/h)	Makroporositet (m^3/m^3)	Skrymdensitet (g/cm^3)
Kontroll	13,41a	0,180a	1,267a
Band	0,29b	0,064b	1,470b
Hjul	0,17b	0,067b	1,532b

DISKUSSION

Dubbelmontage-enkelmontage

Ett mycket intressant resultat är att hjulen på dubbelmontaget verkade som enskilda hjul trots att de satt relativt tätt, ca 10 cm mellan. Samverkan av hjulen på dubbelmontaget på djupet var litet och ledde inte till högre tryck än under enkelmontaget. Trycket under det inre hjulet bestämdes främst av trycktillskottet från det hjulet och inte av trycktillskott från båda hjulen och vice versa. För att trycktillskottet från det yttre hjulet skulle påverka trycket under det inre hjulet i någon högre grad skulle tryckutbredningen i mark behöva ske mer i sidled.

Att tryckbilden ser olika ut under däckerna på enkelmontaget jämfört med dubbelmontaget kan bero på att däckerna på dubbelmontaget var mer slitna. Detta kan ha gjort att enkelmontaget fick mer effekt av nabbarna än dubbelmontaget. För att helt kunna jämföra trycket under dubbelmontaget och enkelmontaget hade mätningar av trycket på sidan av enkelmontaget motsvarande mätningarna av trycket mellan de båda hjulen på dubbelmontaget varit önskvärda.

Mätningarna på dubbelmontage-enkelmontage och dragande-icke dragande traktor utfördes på ett fält där bruknings sättet varit plöjningsfritt i flera år. Detta bruknings sätt har troligen lämnat jorden mer stabil, och även mer packad, än om den varit konventionellt brukad. Schjønning och Rasmussen (2000) visade att direktsådd resulterar i en tätare struktur med högre hållfasthet jämfört med plöjning. Mätningarna av rörelse i marken tyder också på att ingen alvpackning inträffade trots att mätningarna utfördes vid en vattenhalt kring fältkapacitet, då jorden kan antas vara mycket packningskänslig.

Små deformationer uppmättes på alla tre djupen, se tabell 7. Den enda signifikanta skillnaden var på 15 cm djup mellan hjulen på dubbelmontaget jämfört med övriga mätningar på 15 cm. Mellan hjulen hade marken rört sig något uppåt. Detta tyder på en samverkan av de två hjulens påverkan på marken som resulterade i en uppåtgående rörelse. Marktrycket som uppmättes, se tabell 6, stämmer väl överens med mätningarna av deformation. Den enda signifikanta skillnaden var mellan enkelmontaget och mellan hjulen på dubbelmontaget på 15 cm. Trycket mellan hjulen på dubbelmontaget var ibland till och med noll kPa.

De modellberäkningar som gjorts stämmer till viss del överens med de mätningar som gjorts i fält, se figur 9, figur 10, figur 11 och tabell 6. Beräkningarna underskattar trycket nära markytan jämfört med mätta värden men längre ner stämmer de väl överens. Att trycket i matjorden underskattas av modellen beror på att där sätts marktrycket till samma som ringtrycket. Denna grova approximation stämmer inte alls då de uppmätta maxtrycken i matjorden är avsevärt högre än ringtrycket. Om det verkliga marktrycket skulle sättas som indata i modellen är det möjligt att trycket på djupet skulle bli alltför stort jämfört med mätta värden, i alla fall på trettio centimeter där trycket i anläggningsytan fortfarande spelar en stor roll för trycket i marken. Detta visar på den stora osäkerhet som trots allt finns i att beräkna tryck utifrån Söhnes formler. Hur exakta beräkningarna måste vara får dock bedömas utifrån vad de ska

användas till. Ett problem med modellen är att den ej tar hänsyn till deformation av marken. Att beräkningarna stämde väl i detta fall kan bero på att det rörde sig om mycket små deformationer. För att kunna dra några större slutsatser om modellens användbarhet bör mätningar under fler förhållanden utföras, inklusive mätningar av tryck vid stora deformationer. Det krävs även en högre upplösning av mätvärden i vertikal- och horisontalplanet för att kunna uttala sig om modellens säkerhet i hela vertikalkplanet i stället för i enstaka punkter som fallet är nu. En väl fungerande modell skulle vara mycket användbar. Modellberäkningar kan dock aldrig helt ersätta fältmätningar.

Dragande-icke dragande

Deformationen var liten även i denna undersökning, se tabell 8, vilket kan vara en anledning till att inga skillnader uppmättes mellan dragande och icke dragande traktor. Ingen skillnad fanns heller vad gäller trycket i marken, se figur 13. Det höga trycket på 30 cm, eller låga på 15, kan bero på den stora variationen mellan mätningarna och att fler upprepningar hade behövts för att få säkrare resultat. Att det inte fanns några skillnader mellan behandlingarna kan bero på att dragkraftsuttaget var för litet. Ett kraftigare dragkraftsuttag skulle möjligen ha påverkat både tryck och deformation.

En annan möjlighet är naturligtvis att skjuvning inte påverkar marken så mycket. Det anses av många vara ett allvarligt problem vilket också stärks av teoretiska resonemang (Koolen och Kuipers, 1983; Olsen, 1988b; Horn, 2001). Det är dock mycket svårt att hitta fältundersökningar som visar hur skjuvning påverkar marken och dess funktioner. Det är också svårt att separera effekter av skjuvning och packning samt att veta hur stor skjuvning som sker i fält. Ett sätt att kunna mäta på effekter av skjuvning är att göra det under laboratorieförhållanden vilket t.ex. O'Sullivan et al (1999) gjort. Där hade skjuvningen en negativ inverkan på porositet och genomsläpplighet. Det visades även att skjuvning kunde jämföras med en normalspänning i fråga om packningseffekter. Något som vore mycket intressant att undersöka för att bättre kunna bestämma skjuvning i fält är markens horisontella rörelser så väl som vertikala.

Vad gäller den mättade vattengenomsläppligheten fanns vissa tendenser att den var lägst efter dragande traktor, näst lägst efter icke dragande traktor och högst för kontrollen. För makroporositet och skrymdensitet fanns inga skillnader. Förutsättningarna vid provtagningen var inte idealiska med mycket halmrester vilket kan ha påverkat resultaten för alla tre parametrarna.

Bandtraktor-hjultraktor

Figur 16 visar trycket under bandtraktorn vid ett tillfälle. För att få ett så lågt vertikalt marktryck som möjligt skall de sex topparna vara jämna. Det finns en tendens till att trycket jämnas ut under bandet i längsriktningen på djupet. Det verkar dock inte som om de olika rullarna samverkade ner till 50 cm vilket stämmer med mätningarna under dubbelmontaget.

Den obalanserade bandtraktorn som visas i figur 14 hade ett maximalt marktryck på nästan 400 kPa på 10 cm vilket är avsevärt högre än det genomsnittliga maximala trycket på 90 kPa på 15 cm djup. Balansering av en bandtraktor är inte lätt eftersom dragkraftsbehovet varierar med bearbetningsdjup, jordart, vattenhalt m.m. Detta gör det mycket svårt att ha en bandtraktor rätt balanserad över hela fältet då dragkraftsuttaget starkt påverkar balansen hos traktorn. Även om bandtraktorn är rätt balanserad kommer trycket under den dock vara avsevärt högre än det teoretiskt genomsnittliga trycket på grund av ojämn tyngdfördelning i sid- och längsled. Den idealiska konstruktionen av ett band skulle fördela trycket jämnt under hela bandet. Bandet måste dock vara flexibelt i längsled vilket gör att detta är svårt att uppnå. Däremot hindrar inget att bandet är stelt i sidled vilket inte är fallet med ett gummiband. Marsili et al (1998) jämförde en traktor med stålband, vilket är stelt i sidled, med en gummibandstraktor bl.a. avseende makroporositet och hydraulisk konduktivitet och fick lägst värden för båda egenskaperna efter överfart av gummibandstraktorn. Detta kan bero på en jämnare tyngdfördelningen hos stålbandstraktorn.

En annan nackdel med bandtraktorer är att de under våta förhållanden kan ha mycket hög slirning. Detta kan bl.a. bero på dålig rensningsförmåga. En bandtraktor ger även större skador vid vändningar då det ena bandet inte driver framåt utan bara vrids kring en axel vilket kan leda till avsevärda skador på markytan.

En hjultraktors stora fördel är att däckets kan flyta ut vid ökad belastning vilket ökar anläggningsytan och gör så att trycket i matjorden inte ökar i samma utsträckning som belastningen. Ett band däremot har inte denna möjlighet. Packningen från en bandtraktor förvärras troligen också av att trycket återkommer upprepade gånger och att bandet skapar mer vibrationer i marken än ett hjul gör (Håkansson 2000). Ett väl anpassat lufttryck hos en hjultraktor kan minska dessa vibrationer så väl i traktorn som på marken.

Stor variation och få mätvärden kan ha orsakat att resultaten inte blev signifikanta vad gäller deformationen. Det finns dock tendenser till att deformationen skilde sig åt på 15 och 30 cm, se figur 17 vilket stämmer med de uppmätta skillnaderna i tryck, se tabell 10. Hjultraktorn hade ett ringtryck på 100 kPa och bandtraktorn ett teoretiskt nominellt marktryck på 45 kPa. Detta gör att hjultraktorn borde gett upphov till ett högre tryck högt upp i jordprofilen vilket även skedde trots bandtraktorns dubbla vikt. Att skillnaden inte håller i sig till 50 cm beror troligen på en belastning på en av rullarna som motsvarar en mycket hög hjulbelastning vilket gör att trycket hållt i sig längre ner jämfört med hjultraktorn.

Vad gäller mättad vattengenomsläpplighet, makroporositet och skrymdensitet skilde sig de två traktorerna inte från varandra men däremot från kontrollen, se tabell 11. Kontrollen hade högst genomsläpplighet, mest makroporer och lägst skrymdensitet. Det finns viss tendens till att bandtraktorn gett upphov till lägre skrymdensitet än hjultraktorn vilket stämmer med bandtraktorns lägre tryck i matjorden. Varför inte bandtraktorn hade högre makroporositet och mättad vattengenomsläpplighet än hjultraktorn trots lägre tryck i matjorden och tendens till mindre deformation är svårt att svara på. Mätningarna tyder dock på att en välbalanserad bandtraktor kan vara skonsammare mot marken än en hjultraktor, trots en högre vikt.

SLUTSATSER

Mätningarna pekar på att de båda hjulen i ett dubbelmontage verkar som enskilda hjul, d.v.s. trycket från de båda samverkar inte i så stor utsträckning att trycket under dem blir högre än under ett enkelmontage med samma hjullast. Detta gör att det är mer relevant att tala om hjulbelastning än axelbelastning avseende risken för packning i alven.

Beräkningar av trycket i marken med hjälp av Söhnes teorier för tryckutbredning i mark stämde rätt väl med uppmätta värden i alven, men ej i matjorden. En bättre approximation för marktrycket än ringtrycket behövs då det uppmätta marktrycket var betydligt högre än ringtrycket, ofta dubbelt så högt. Fler mätningar under fler förhållanden och med högre upplösning behövs för att säkert kunna uttala sig om modellens användbarhet.

Jämförelser mellan dragande och icke dragande traktor visade inte på några skillnader vad gäller vertikalt marktryck, kvarstående vertikal deformation, mättad vattengenomsläpplighet, makroporositet eller skrymdensitet.

En välbalanserad bandtraktor kan ge mindre påverkan på marken än en hjultraktor trots högre totalvikt.

Det maximala marktrycket under en bandtraktor är alltid avsevärt högre under en felbalanserad än under en välbalanserad bandtraktor. Oavsett om en bandtraktor är välbalanserad eller ej kommer det maximala marktrycket under den att vara betydligt högre än det genomsnittliga marktrycket.

REFERENSER

Andersson, S. 1955. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord, VIII, En experimentell metod. Grundförbättring 8: 35-44.

Arvidsson, J., Håkansson, I. 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil Tillage Res.* 39; 175-197

Arvidsson, J., Andersson, S. 1997. Determination of soil displacement by measuring the pressure of a column of liquid. *Proceedings of the 14th ISTRO Conference*, Puławy, Polen: 47-50.

Bashford, L.L., Kocher, M.F. 1999. Belts vs tires, belts vs belts, tires vs tires. *Applied Engineering in Agriculture.* 15 (3); 175-181

Boussinesq, J. 1885. *Application des potentiels a l'etude de equilibre et du mouvement des solides elastique.* Gauthier Villais, Paris.

Brown, H.J., Cruse, R.M., Erbach, D.C., Melvin, S.W. 1992. Tractive device effects on soil physical properties, *Soil Tillage Res.* 22; 41-53.

Brussaard, L., Faassen H.G. 1994. Effects of Compaction on Soil biota and biological processes. In: B.D. Soane, C. van Ouwerkerk (editors), *Soil compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam.

Casagrande, A. 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: *Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Eng. Proc. Of ICSMFE.* Cambridge, MA, 22-26 June 1936, vol 3. Cambridge, MA, pp. 60-64. n, Elsevier, Amsterdam, 45-70.

Dawidowski, J.B., Koolen, A.J. 1987. Changes of Soil Water Suction, conductivity and dry strength during deformation of wet undisturbed samples, *Soil Tillage Res.* 9; 169-180.

Dexter, A., R. 2001. Soil structure:the key to soil function. *International Conference, Sustainable soil management for environmental protection soil physical aspects, Key Notes*, Florence, Italy; 78-91.

Eriksson, J. 1982. Markpackning och rotmiljö. Avdelningen för lantbrukets hydroteknik, rapport 126, Inst f. markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet.

Fröhlich, O.K. 1934. *Druckverteilung im Baugrunde.* Springer, Wien, Austria. 178 s.

Horn, R. 2001. Soil mechanical properties and processes in structured unsaturated soils under various landuse and management systems. *International Conference, Sustainable soil management for environmental protection soil physical aspects, Key Notes*, Florence, Italy; 65-78.

Horton, R., Ankeny, M.D., Allmaras, R.R. 1994. Effects of compaction on soil hydraulic properties. In: B.D. Soane, C. van Ouwerkerk (editors), Soil compaction in Crop Production, Elsevier, Amsterdam.

Håkansson, I., 2000. Packning av åkermark vid maskindrift, omfattning-effekter-motåtgärder. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen nr 99, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet.

Jumikis, A.R., 1984. Soil Mechanics, kap 20, Stress distribution in soil. Robert E. Krieger Publishing Company, Inc. Malabar, Florida.

Koolen, A.J., Kuipers, H. 1983. Agricultural soil mechanics. Springer, New York, NY, U.S.A., 241 s.

Marsili, A., Servadio, P., Pagliai, M., Vignozzi, N. 1998. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors. Soil Till Res. 49, 185-199.

Okello, J.A., Dwyer, M.J., Cottrell, F.B. 1994. The tractive performance of rubber tracks and a tractor driving wheel tyre as influenced by design parameters. J. agric. Engng Res. 59 (1); 33-43.

Olsen, H.J. 1988a. Effect of shear stress on soil compaction, Inst för lantbruksteknik, rapport 124, Sveriges lantbruksuniversitet.

Olsen, H.J. 1988b. Soil behaviour below a shearing element. Proceedings of the 11th ISTRO conference, Edinburgh, Scotland; 305-310.

O'Sullivan, M.F., Robertson, E.A.G., Henshall, J.K. 1999. Shear effects on gas transport in soil. Soil Tillage Res. 50. 73-83.

van Ouwerkerk, C., Soane, B.D. 1995. ISTRO Workshop on "The effects of soil compaction on Physical, chemical and biological factors in the environment" 25 august 1993, Melitopol, Ukraine. Soil Tillage Res. 35, 1-2; 1-4.

Raghavan, G.S.V., McKyes, E., Chassé, M. 1977. Effect of Wheel slip on soil compaction. J. agric. Engng, Res. 22; 79-83.

Rusanov, V.A., 1991. Effects of wheel and track traffic on the soil and on crop growth and yield. Soil Tillage Res., 19; 131-143.

Rydberg, T. 1987. Studier i plöjningsfri odling i Sverige 1975-1986. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen, nr 76, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet.

Schjønning, P., Rasmussen, K.J. 2000. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. Soil Tillage Res. 57; 69-82.

Servadio, P., Marsili, A., Pagliai, M., Pellegrini, S., Vignozzi N. 2001. Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. *Soil Tillage Res.* 61; 143-155.

Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil Tillage Res.* 35, 1-2; 5-22.

Söhne, W. 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires, *Agric. Eng.* 39: 276-281, 290.

Wang, C., McKeague J.A., Switzer-Howse K.D. 1985. Saturated hydraulic conductivity as an indicator of structural degradation in clayey soils of Ottawa area, Canada. *Soil Tillage Res.* 5; 19-31.

