

Tryckfördelning i matjorden för olika däck som funktion av däcksegenskaper och belastning (Slutrapport)

Förord

Denna rapport utgör slutredovisning från det av Stiftelsen Lantbruksforskning finansierade projekt ” Tryckfördelning i matjorden för olika däck som funktion av däcksegenskaper och belastning” (projektnummer V0533079). Projektet är en förstudie med syfte att studera hur lantbruksdäckens egenskaper och belastning påverkar tryck i marken.

Uppsala, februari 2007
Thomas Keller

Bakgrund

Konsekvenser av markpackning leder till såväl agronomiska problem (försämrade rot- och plantutveckling, minskad skörd) som miljöproblem (erosion, översvämningar och läckage av näringsämnen). I den under hösten 2006 publicerade rapporten ”Thematic Strategy for Soil Protection” av den Europeiska Kommissionen utnämns markpackning som ett av de största hoten mot markens långsiktiga bördighet inom den Europeiska Unionen.

Eftersom metoder för att åtgärda markpackning oftast misslyckas (e.g. Spoor & Godwin, 1978) och dessutom är mycket dyra måste markpackning undvikas. Om en jord packas eller ej beror å ena sidan på markens hållfasthet, och å andra sidan på trycket som jorden utsetts för. Ett sätt att undvika markpackning är därför att begränsa den tillåtna belastningen. Fokus kring belastningsgränser för att undvika markpackning, både internationellt såväl i Sverige, har varit kring hjul- och axelbelastning (e.g. Håkansson *et al.*, 1987). Tryck och tryckets fördelning i matjorden (som påverkas av däckets egenskaper och belastningen) och dess effekt på tryckutbredning har däremot inte alls undersökts i samma utsträckning.

Däckets anliggningsyta (kontaktytan mellan däck och mark) samt storleken och fördelningen av trycket i gränsytan däck-mark bildar tillsammans det övre randvillkoret i markmekaniska modeller för simulering av tryck och deformation i marken. För att kunna förutsäga inverkan av en viss lantbruksmaskin på markens struktur är det därför viktigt att ha kunskap om hur anliggningsytan och tryckfördelningen påverkas av däckets egenskaper och belastning.

Syftet med detta projekt var att undersöka effekten av däckets egenskaper och belastning på tryckfördelning i gränsytan däck-mark samt dess påverkan på tryckutbredning genom marken. Huvudmålet med projektet var att genomföra en litteraturstudie samt att sammanställa befintlig data från mätningar utförda vid SLU:s avdelning för jordbearbetning under de senaste åren.

Metoder för mätning av anliggningsyta och tryckfördelning under lantbruksdäck

Anliggningsyta

Två olika sätt för att mäta anliggningsytan i fält har använts i olika studier. Flera forskare, däribland Dexter *et al.* (1988) och Diserens (2002), har uppmätt kontaktarean mellan däck och

mark (anliggningsytan) på följande vis. Ett pulver, t.ex. talkpuder, appliceras runt däckets. Efter att fordonet har körts bort en bit syns anliggningsytan begränsad av pulvret. Anliggningsytan bestäms sedan till exempel genom att fotografera den och beräkna dess yta med hjälp av digital bildbehandling. Denna metod förutsätter att däckets står still när mätningen görs.

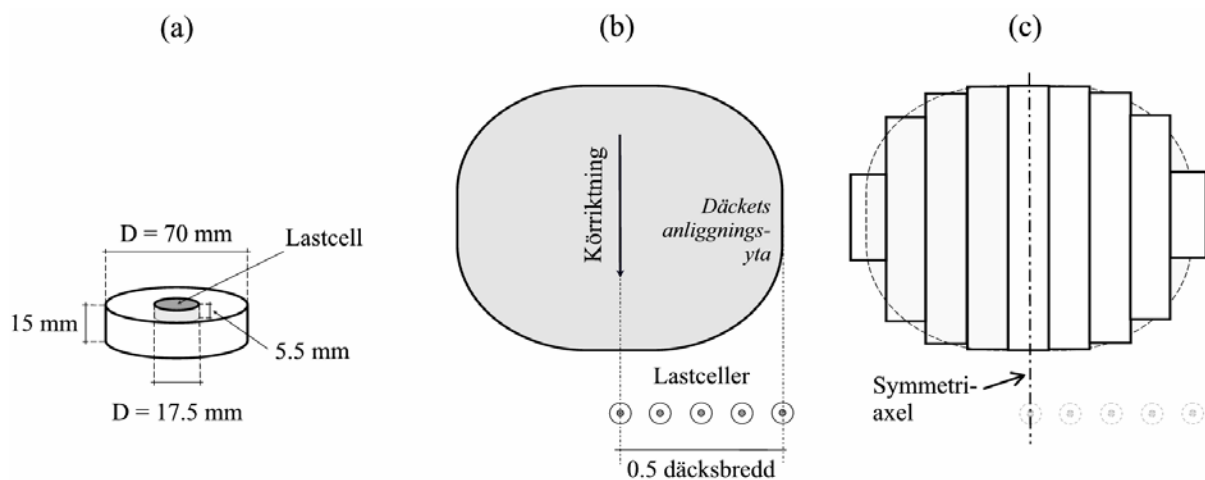
Ett annat sätt att mäta anliggningsytan är att använda sig av data från tryckmätningar (se nästa avsnitt). Denna metod har använts av en forskargrupp i USA (t.ex. Jun *et al.*, 2004; Way & Kishimoto, 2004), vid SLU:s avdelning för jordbearbetning (Trautner, 2003; Keller, 2004), och nyligen av forskare i Danmark (Schjønning *et al.*, 2006). Anliggningsytan approximeras som n band, där n beror på antal använda lastceller (figur 1). Längden på varje band beräknas från fordonets körhastighet och tiden som den respektive lastcellen är under belastning (dvs. där det uppmätta trycket är större än noll). Denna metod mäter däckets dynamiska anliggningsyta (däcket är i rörelse), medan den första metoden mäter den statiska anliggningsytan (däcket står still).

Tryckfördelning

Även här finns det två mätmetoder som skiljer sig principiellt. Antingen installeras tryckgivare (lastceller) i däckets slitbana (Burt *et al.*, 1987; Jun *et al.*, 2004; Way & Kishimoto, 2004) eller så installeras lastceller i marken några centimeter under markytan (Koolen *et al.*, 1992; Hammel, 1994; Trautner, 2003; Keller, 2004; Schjønning *et al.*, 2006), se figur 1. Den sistnämnda metoden lämpar sig bättre praktiskt när flera olika däck ska undersökas.

Inom detta projekt gjordes mätningar genom att installera lastceller i marken på 10 cm djup (figur 1).

Genom att integrera det uppmätta trycket över anliggningsytan kan de uppmätta värdena verifieras: det integrerade trycket ska motsvara hjullasten. För mätning med lastceller rapporteras att det integrerade trycket är inom 10 % (van den Akker & Carsjens, 1989), 3 % (Keller, 2005) respektive 26 % av den verkliga hjullasten (Schjønning *et al.*, 2006).



Figur 1 (a) Lastcell för att mäta tryck i marken; (b) principskiss över tryckmätningar i matjorden direkt under ett däck; (c) principskiss som visar n band för uppskattning av anliggningsytan

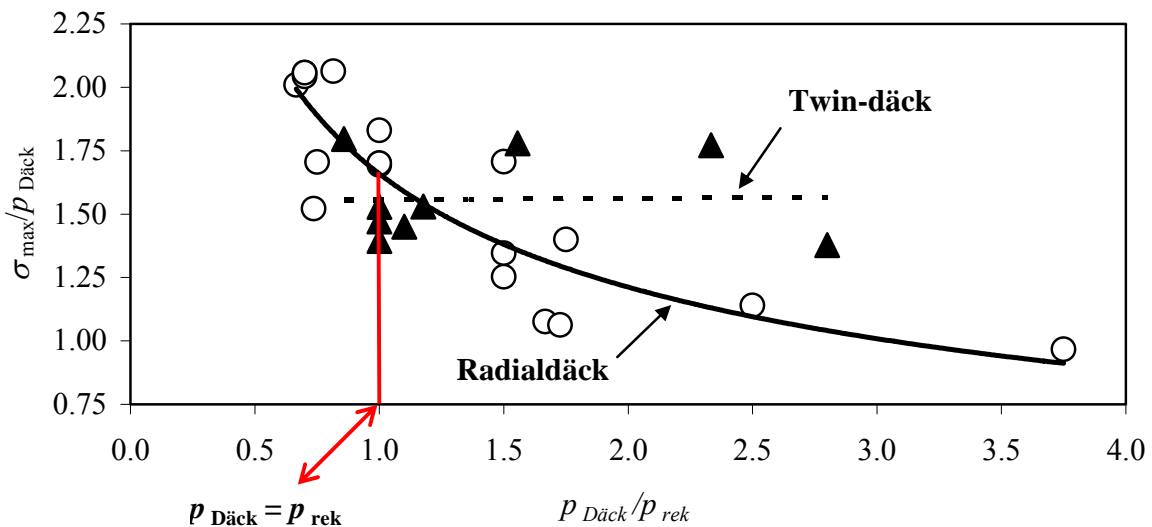
Inverkan av däckegenskaper, däckets belastning samt markegenskaper på anliggningsytan och tryckfördelningen i kontaktytan mellan däck och mark

Effekt av däckkonstruktion

Lantbruksdäck kan delas upp i tre kategorier: diagonaldäck, radialdäck och Twin-däck. Ett däckstomme är uppbyggd av flera lager väv som ligger i kors (diagonal och Twin-däck) respektive radial (radialdäck). Slitbanan är förstärkt med ett extra bälte (korslagda väv) hos radial- och Twin-däcket. Twin-däck är en kombination av diagonal- och radialdäckkonstruktion och kallas också för diagonalbältesdäck. Diagonalstommen ger starka däcksidor, medan bältet av radialtyp ger en plan slitbana och stor kontaktyta (Trelleborg, 2002). De olika däckkonstruktionerna bestämmer hur ett däck kan reagera på belastningsändringar: radialdäckets anliggningsyta förändras sig främst i längden, diagonaldäckets anliggningsyta förändras sig både i längd och bredd, medan Twin-däcket reagerar mitt i mellan.

Diserens (2002) mätte anliggningsytan för ett antal olika däck vid olika belastningar och olika markegenskaper. Han delade däcken i olika kategorier beroende på profilmått (AR; engelsk: aspect ratio). Vid samma däckdimension (dvs. samma bredd och diameter), samma ringtryck och samma hjullast har däck med $AR \leq 60$ något större anliggningsyta än däck med $60 < AR < 80$; medan däck med $AR \geq 80$ har betydligt lägre anliggningsyta.

Arvidsson & Ristic (1996) uppmätte högre tryck under ett Twin 650/60-38 däck jämfört med ett 520/70 R38 däck vid samma last och samma ringtryck (däcken hade samma rekommenderade ringtryck vid den använda lasten). Koolen *et al.* (1992) uppmätte högre tryck under diagonaldäck jämfört med radialdäck. De fann också att tryckfördelningen kan variera mycket för olika däckkonstruktioner.



Figur 2 Samband mellan förhållande mellan maximalt marktryck och ringtryck, $\sigma_{max}/p_{Däck}$, och förhållande mellan ringtryck och rekommenderat ringtryck, $p_{Däck}/p_{rek}$ för radial- (cirkelar) och Twin-däck (trianglar)

Inom detta projekt analyserades data från Keller (2005) med hänsyn till däckskonstruktion. Figur 2 visar att radial- och Twin-däck reagerar olika på olika belastningar, uttryckt som förhållande mellan aktuellt och rekommenderat ringtryck, $p_{\text{Däck}}/p_{\text{rek}}$. Medan det maximalt uppmätta marktrycket i anliggningsytan, σ_{max} , avtar i relation till ringtrycket med ökande $p_{\text{Däck}}/p_{\text{rek}}$ (dvs. ju mera överpumpat (engelsk: over-inflated) däck är) för radialdäck, är förhållande mellan σ_{max} och $p_{\text{Däck}}$ ganska konstant oavsett belastningen (dvs. oberoende av $p_{\text{Däck}}/p_{\text{rek}}$) för Twin-däck. Vid rekommenderat ringtryck, dvs. vid $p_{\text{Däck}} = p_{\text{rek}}$, är $\sigma_{\text{max}} \approx 1,5 p_{\text{Däck}}$ för både radial- och Twin-däck (figur 2).

Effekt av däckmönster

Lantbruksdäck tillverkas med flera olika däcksmönster: långgribbade mönster, blockmönster och drivmönster. På vagnar och redskap används däck med långgribbade mönster, men idag rekommenderas även för vagnar och redskap däck med skonsamma drivmönster. Däck med blockmönster används sällan på lantbruksmaskiner. Därför används det nästan uteslutet däck med drivmönster på (moderna) lantbruksmaskiner. Drivmönster kan ha olika höga och kraftiga ribbor i olika vinklar. Ju större dragkraftsbehov, desto högre och kraftigare är ribborna.

Däckmönsters effekt på tryckfördelningen i anliggningsytan har inte undersökts i stor utsträckning. Way *et al.* (1995) kunde inte se några signifikanta effekter av ribbornas höjd på trycket i gränsytan däck-mark.

Effekt av däckets belastning

Däckets belastning karakteriseras med två parametrar: hjullast och ringtryck. Däckstillverkare tillhandahåller tabeller som anger vid vilket ringtryck ett däck borde användas vid en viss hjullast och en viss hastighet, det så kallade rekommenderade ringtrycket. Av olika anledningar används däcken dock i praktiken ibland med ett ringtryck som är högre eller lägre än det rekommenderade ringtrycket.

Trycket på markytan ökar generellt med ökande ringtryck (Raper *et al.*, 1995; Arvidsson & Ristic, 1996; Keller, 2005; Schjønning *et al.*, 2006) och med ökande hjullast (Arvidsson *et al.*, 2005; Keller, 2005). Tryckfördelningen är generellt jämnare när ett däck används vid det rekommenderade ringtrycket (Jun *et al.*, 2004; Schjønning *et al.*, 2006).

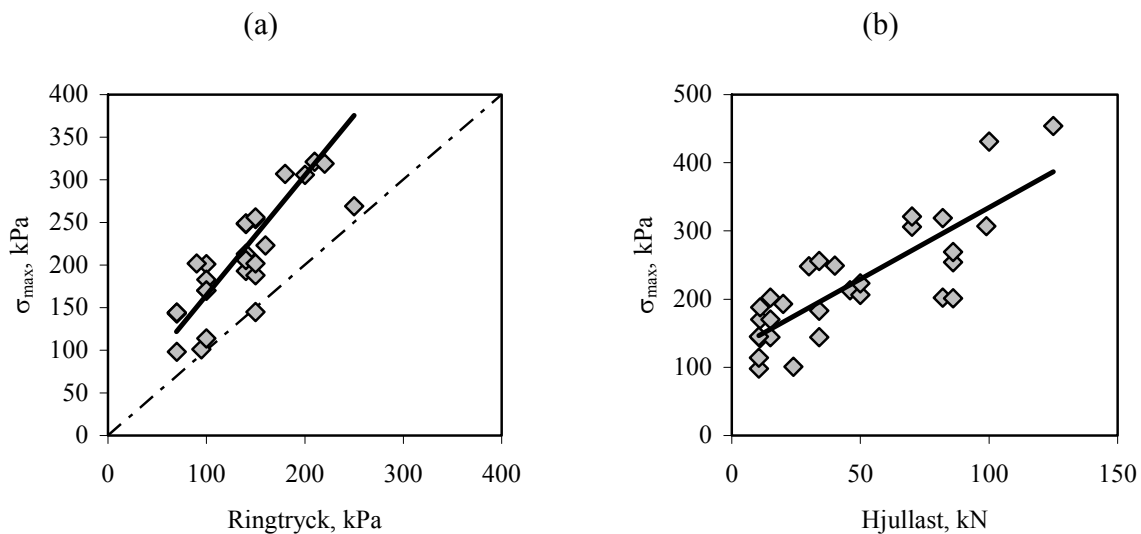
Analys av det relativt stora datamaterialet av Keller (2005) visar att det finns en positiv korrelation mellan det uppmätta maximala trycket, σ_{max} , och ringtrycket, $p_{\text{Däck}}$ (figur 3a) respektive hjullast, F_{Hjul} (figur 3b). De anpassade linjära regressionslikningarna i figur 3a respektive 3b är:

$$\sigma_{\text{max}} = 1,40 p_{\text{Däck}} + 24,2; R^2 = 0,72 \quad (\text{Ekvation 1})$$

$$\sigma_{\text{max}} = 2,10 F_{\text{Hjul}} + 124,3; R^2 = 0,68 \quad (\text{Ekvation 2})$$

där σ_{max} och $p_{\text{Däck}}$ har enheten kPa och F_{Hjul} har enheten kN. Det maximala marktrycket är i genomsnitt alltså ungefär 1,5 gånger ringtrycket (ekvation (1)).

Steiner & Söhne (1979) modellerade det genomsnittliga trycket i anliggningsytan som funktion av ringtryck, hjullast och däckets diameter. Enligt Koolen & Kuipers (1983) är det genomsnittliga trycket i anliggningsytan mellan 1,1 och 1,25 gånger ringtrycket.



Figur 3 Samband mellan uppmätt maximalt marktryck, σ_{\max} , och (a) ringtryck respektive (b) hjullast

Keller (2005) beskrev det maximala trycket i anliggningsytan, σ_{\max} , enligt

$$\sigma_{\max} = a + bp_{Däck} + cF_{Hjul} + d \ln\left(\frac{p_{Däck}}{p_{rek}}\right) \quad (\text{Ekvation 3})$$

där $p_{Däck}$ är ringtrycket, F_{Hjul} hjullasten, p_{rek} det rekommenderade ringtrycket och $a-d$ koefficienter.

Effekt av jordart och markegenskaper

Det finns endast liten kunskap om påverkan av jordart och markförhållanden på tryckfördelningen och kontaktytan i gränsytan mellan mark och däck. Enligt Burt *et al.* (1987) är det markförhållanden, snarare än jordart, som påverkar tryckfördelningen i anliggningsytan.

Anliggningsytan är generellt större, ju mjukare underlaget är (t.ex. Söhne, 1953; Diserens, 2002). Trycket i gränsytan däck-mark är högre ju hårdare markytan är (Söhne, 1958; Vanden Berg & Gill, 1962). Burt *et al.* (1990) uppmätte att det maximala trycket i anliggningsytan var ungefär lika med ringtrycket på mjuk jord, medan det var ungefär tre gånger ringtrycket på hård markyta. Enligt Way & Kishimoto (2004) är tryckfördelningen mera ojämn på mjuk jord.

Inom detta projekt gjordes mätningar för att studera tryckfördelningen i ostörd (hård) respektive uppluckrad (nybearbetad) matjord. I figur 4a visas ett exempel på en mätning. Tryckfördelningen tvärs emot körriktningen var ganska jämn på den relativt hårda markytan, medan trycket var högst under däckets mitt i uppluckrad jord. En mera ojämn tryckfördelning på mjuk markyta uppmättes också av Way & Kishimoto (2004). Burt *et al.* (1990) uppmätte dock högre tryck i gränsytan däck-mark på hård markyta. Olika däck kan reagera olika vid olika markförhållanden. Detta betyder att det troligtvis inte finns någon enkel relation mellan markens hållfasthet och tryckfördelning, utan det är ett mera komplicerat samband mellan belastning, däck(egenskaper) samt markförhållanden och tryckfördelningen i gränsytan däck-mark. Den modellerade

tryckutbredningen orsakat av de två olika tryckfördelningarna på hård respektive lucker markyta visas i figur 4b. Skillnaden i tryck är störst i matjorden, men trycket skiljer sig även under bearbetningsdjupet. Med tanke på prognostisering av markpackning med hjälp av modeller är det därför viktigt att kunna uppskatta tryckfördelningen på markytan så bra som möjligt.

Modeller för beräkning av däckets anliggningsyta och tryckfördelning i kontaktytan mellan däck och mark

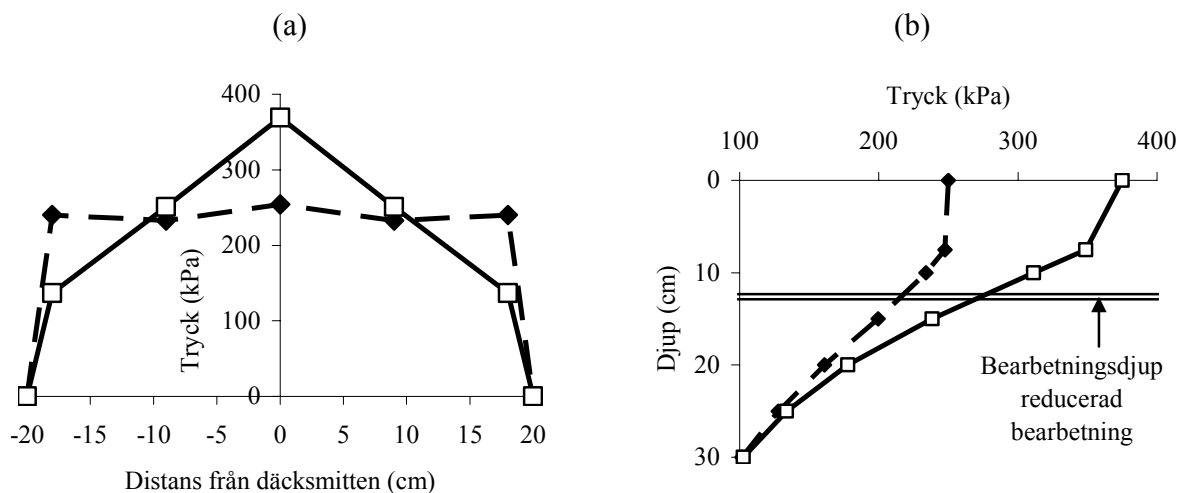
En rad teoretiska och empiriska modeller för beräkning av däckets anliggningsyta har utvecklats och testats (för en överblick se t.ex. Sharma & Paney, 1995; Febo *et al.*, 2000). De flesta modeller har dock utvecklats för hårda underlag, vilket innebär att deras användning är begränsad i praktiken. Diserens (2002) utvecklade regressionsekvationer för uppskattning av anliggningsytan utifrån ett stort antal mätningar för olika däck och olika markförhållanden. Han analyserade dock inte anliggningsytans form.

Tryckfördelningen i anliggningsytan har modellerats med t.ex. paraboliska funktioner (Söhne, 1953; Johnson & Burt, 1990) eller polynomer (Smith *et al.*, 2000). Söhne (1953) tog hänsyn till jordens fuktighet. Dessa ekvationer tillåter dock ingen direkt uppskattning av tryckfördelningen från däcksegenskaper och däckbelastning.

Keller (2005) utvecklade en modell för beräkning av kontaktytan och tryckfördelningen i gränssytan mellan däck och mark. Schjønning *et al.* (2006) modifierade denna modell något. I modellen beskrivs anliggningsytan med en s.k. superellips, som generellt kan skrivas som:

$$\frac{x^n}{a^n} + \frac{y^n}{b^n} = 1 \quad (\text{Ekvation 4})$$

där x och y är koordinater, a och b är superellipsens halvaxlar och n är en parameter som bestämmer superellipsens form. För $n = 2$ respektive $n \rightarrow \infty$ beskriver ekvation (4) en ren ellips respektive en rektangel.



Figur 4 (a) Uppmätt tryckfördelning tvärs emot körriktningen under ett 400/60-15.5 däck på ostörd, hård markyta (rhombi) och på uppluckrad jord (kvadrat), och (b) modellerad tryckutbredning i marken under de två uppmätta tryckfördelningar

Tryckfördelningen, $\sigma(x,y)$, modelleras enligt följande

$$\sigma(x,y) = F_{Hjul} C(\alpha, \beta, a, b, n) f(x,y) g(x,y) \quad (\text{Ekvation 5})$$

$$f(x,y) = \left\{ 1 - \left| \frac{x}{l_x(y)} \right|^\alpha \right\} \quad (\text{Ekvation 6})$$

$$g(x,y) = \left\{ \left(1 - \left| \frac{y}{w_y(x)} \right| \right) \exp \left(-\beta \left(1 - \left| \frac{y}{w_y(x)} \right| \right) \right) \right\} / gm \quad (\text{Ekvation 7})$$

där F_{Hjul} är hjullasten, C är en konstant, α och β är parameter, $f(x,y)$ och $g(x,y)$ beskriver tryckfördelningens form i körriktning respektive tvärs mot körriktningen, $l_x(y)$ och $w_y(x)$ är anliggningsytans halva längd respektive halva bredd, och gm är det maximala värdet av $g(x,y)$ inom $0 < y < w_y(x)$ som funktion av β (Schjønning *et al.*, 2006):

$$\begin{aligned} \beta \leq 1: gm &= \exp(-\beta) \\ \beta > 1: gm &= \exp(-1) / \beta \end{aligned} \quad (\text{Ekvation 8})$$

All modellparameter (dvs., a , b , α , β , n , l_x och w_y) kan uppskattas av enkelt mätbara egenskaper som hjullast, ringtryck och däckdimensioner (Keller, 2005). I modellens utveckling togs dock inte hänsyn till markens hållfasthet och/eller fuktighet. Att inkludera markegenskaper skulle därför kunna vara en potentiellt värdefull förbättring av modellen.

Skillnaden mellan modellen av Keller (2005) och Schjønning *et al.* (2006) är definitionen av parametern β , som beskriver tryckfördelningens form tvärs mot körriktningen. Inom detta projekt analyserades därför data från Keller (2005) med syfte att kunna uppskatta β från enkelt mätbara däckegenskaper. Det hittades bara ett svagt samband mellan β och däcksbredden, $b_{Däck}$, enligt:

$$\beta = -2,75b_{Däck}^2 + 3,91b_{Däck} + 0,14; R^2 = 0,16 \quad (\text{Ekvation 9})$$

En stor spridning i β konstaterades för breda däck, medan en positiv korrelation hittades mellan β och $b_{Däck}$ för däck med $b_{Däck} \leq 0.7$ m:

$$b_{Däck} \leq 0.7m : \beta = 1,59b_{Däck} + 0,55; R^2 = 0,45 \quad (\text{Ekvation 10})$$

Detta innebär att tryckfördelningen ändras från att det maximala trycket ligger under däckets mitt till att det maximala trycket ligger under däckets kanter med ökande däcksbredd.

Effekt av tryckfördelningen i kontaktytan mellan däck och mark på tryckutbredningen genom markprofilen

Effekt av ringtryck på tryckutbredning

Ringtryckets påverkan på tryckutbredning i marken har studerats av bl.a. Arvidsson *et al.* (2002) och Keller & Arvidsson (2004). Vid konstant hjullast påverkar dock ringtrycket inte bara tryckfördelningen i sig, utan också anliggningsytans storlek. Det är därför en kombinerad effekt

av förändrad tryckfördelning och ökad eller minskad anliggningsyta på tryckutbredning som undersöktes av Arvidsson *et al.* (2002) och Keller & Arvidsson (2004).

Mätningarna visar att ringtycket påverkar trycket såväl i matjorden som i alven. Andra studier (t.ex. Raper *et al.*, 1995) har visat ringtryckets effekt på trycket i matjorden.

Modellberäkningar

Flera författare har visat att tryckutbredningen i marken påverkas av tryckfördelningen i gränsytan mark-däck (van den Akker, 1992; Hammel, 1994; Tijink *et al.*, 1995; Keller & Arvidsson, 2004; Keller, 2005). Gupta & Raper (1994) konkluderar att däckets ribbor påverkar en betydande andel av anliggningsytan och därför skulle tas hänsyn till i samband med modellering av markpackning.

På grund av rumslig variation av markegenskaper är det svårt att kunna se några effekter av däckmönster på tryckutbredningen i fältexperiment. Därför belystes denna aspekt inom detta projekt med hjälp av modellsimuleringar. Simuleringar gjordes för teoretiska däck (i) utan ribbor, (ii) däck med drivmönster och (iii) däck med långgribbade mönster. I de senare två fallen antogs att trycket under ribborna var 2-3 gånger ringtrycket. Vid konstant hjullast skilde sig trycket på djup större än ungefär 10 cm bara marginellt under de tre däcken. Något större effekter på tryckutbredning mellan drivdäck och frirullande däck blev orsakades av dragkraftsuttaget; skillnaden i tryck var dock i det fallet i första hand ett resultat av dragkraftsuttaget respektive de uppbyggda skjuvkrafterna i gränsytan mellan däck och mark.

Slutsatser och rekommendationer för framtida studier

Projektet omfattade genomförandet av en litteraturstudie, analyser av data från mätningar utförda vid SLU:s avdelning för jordbearbetning under de senaste åren, mätningar i fält samt modellsimuleringar. Följande slutsatser kan dras:

- Trycket i marken påverkas till största delen av däckets belastning, dvs. ringtycket och hjullasten. En rad svenska och internationella undersökningar finns som visar att både ringtryck och hjullast påverkar tryckutbredningen såväl i matjorden som i alven.
- Olika däckstyper (diagonal-, radial- och Twin-däck) reagerar olika på belastningsändringar. Kunskapen är dock fortfarande begränsad eftersom det krävs data från ett relativt stort antal mätningar för att kunna dra generella slutsatser om hur olika däckstyper svarar på olika belastningar och hur detta påverkar trycket i kontaktytan.
- Däckmönstrets effekt på tryckutbredningen kan betraktas som obetydlig i praktiken. Däremot kan ett drivdäck orsaka högre tryck och större skador i marken till följd av dragkraftsuttaget jämfört med ett frirullande däck.
- Liten kunskap finns om påverkan av markförhållanden på tryckfördelningen under lantbruksdäck. Troligtvis finns det inte någon enkel relation mellan jordart respektive markförhållanden och tryckfördelning, utan det är ett mera komplicerat samband mellan belastning, däck(egenskaper) samt markförhållanden och tryckfördelningen i gränsytan mellan däck och mark.

- Eftersom tryckfördelningen i gränsytan mellan däck och mark påverkar tryckutbredningen även i alven är det med hänsyn till modellering av markpackning viktigt att kunna uppskatta den så bra som möjligt.

Framtid forskning skulle kunna inkludera studier kring dragkraftsuttagetets effekt på tryck och därav följande deformation och funktionsändring i marken samt studier om interaktionen mellan markegenskaper och däckegenskaper och dess effekt på tryckfördelning i gränsytan mellan däck och mark. Resultaten av dessa studier skulle kunna användas för att förbättra dagens modeller för uppskattning av tryckfördelning och anliggningsyta mellan däck och mark.

Litteraturförteckning

- Arvidsson J & Ristic S (1996) Soil stress and compaction effects for four tractor tyres. *Journal of Terramechanics* 33, 223-232.
- Arvidsson J; Keller T; Anselmsson M-O; Eitrem S; Nilsson E & Åkerblom J (2005) Mätning av tryck i matjord och alv med olika hjullaster och ringtryck. In: Arvidsson J (ed) *Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 2004*, SLU Uppsala, Division of Soil Management, pp. 56-60.
- Arvidsson J; Trautner A & Keller T (2002) Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. In: Pagliai M & Jones R (eds) *Advances in GeoEcology* 35, Catena Verlag Reiskirchen, pp. 331-338.
- Burt E C; Wood R K & Bailey A C (1987) A three-dimensional system for measuring tire deformation and contact stresses. *Transactions of the ASAE* 30, 324-327.
- Burt E C; Wood R K & Bailey A C (1990) Some comparisons of average to peak soil-tire contact pressures. *ASAE Paper* 90-1094.
- Dexter A R; Horn R; Holloway R & Jakobsen B F (1988) Pressure transmission beneath wheels in soils on the Eyre Peninsula in South Australia. *Journal of Terramechanics* 25, 135-147.
- Diserens E (2002) Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell. *FAT-Berichte* Nr. 582, Swiss Federal Research Station for Agricultural Economics and Engineering. Tänikon, Switzerland, 12pp
- Febo P; Lucarrelli F & Pessina D (2000) Soil-tyre interaction parameters influencing soil compaction: a study of contact area prediction models. In: Horn R; van den Akker J J H & Arvidsson J (eds) *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences*. *Advances in Geoecology*, Vol. 32, Catena Verlag, Reiskirchen, pp 191-201.
- Gupta S C & Raper R L (1994) Chapter 4: Prediction of soil compaction under vehicles. In: Soane B D & von Ouwerkerk C (eds) *Soil Compaction in Crop Production*. pp. 71-90.
- Håkansson I; Voorhees W B; Elonen P; Raghavan G S V; Lowery B; van Wijk A L M; Rasmussen K & Riley H (1987) Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil & Tillage Research* 10, 259-268.
- Hammel K (1994) Soil stress distribution under lugged tires. *Soil & Tillage Research* 32, 163-181.
- Johnson C E & Burt E C (1990) A method of predicting the soil stress state under tires. *Transactions of the ASAE* 33, 713-717.
- Jun H; Way T R; Löfgren B; Landström M; Bailey A C; Burt E C; McDonald T P (2004) Dynamic load and inflation pressure effects on contact pressures of a forestry forwarder tire. *Journal of Terramechanics* 41, 209-222.
- Keller T & Arvidsson J (2004) Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research* 79, 191-205.
- Keller T (2004). *Soil compaction and soil tillage – Studies in agricultural soil mechanics*. Doctoral Thesis. Agraria 489, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Keller T (2005) A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering* 92, 85-96.
- Koolen A J & Kuipers H (1983) *Agricultural Soil Mechanics*. Springer, New York, NY, USA. 241 pp.
- Koolen A J; Lerink P; Kurstjens D A G; van den Akker J J H & Arts W B M (1992) Prediction of aspects of soil-wheel systems. *Soil & Tillage Research* 24, 381-396.
- Raper R L; Bailey A C; Burt E C; Way T R & Liberati P (1995) The effects of reduced inflation pressure on soil-tire interface stresses and soil strength. *Journal of Terramechanics* 32(1), 43-51.

- Schjønning P; Lamandé M; Tøgersen F A; Arvidsson J & Keller T (2006) Distribution of vertical stress at the soil-tyre interface: effects of tyre inflation pressure and the impact on stress propagation in the soil profile. In: Horn R; Fleige H; Peth S & Xinhau P (eds) Soil management for sustainability. Advances in Geoecology, Catena Verlag, Reiskirchen, vol. 38, pp. 38-46.
- Sharma A K & Pandey K P (1996) A review on contact area measurement of pneumatic tyre on rigid and deformable surfaces. Journal of Terramechanics 33, 253-264.
- Smith R; Ellies A & Horn R (2000) Modified Boussinesq's equations for nonuniform tire loading. Journal of Terramechanics 33, 207-222.
- Söhne W (1953) Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundlagen der Landtechnik 5, 49-63.
- Söhne W (1958) Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agricultural Engineering 39, 276-281, 290.
- Spoor G & Godwin R J (1978) An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. Journal of Agricultural Engineering 23, 243-258.
- Steiner M & Söhne W (1979) Berechnung der Tragfähigkeit von Ackerschlepperreifen sowie des Konaktflächenmitteldruckes und des Rollwiderstandes auf starrer Fahrbahn. Grundlagen Landtechnik 29, 145-152.
- Tijink F G J; Döll H & Vermeulen G D (1995) Technical and economic feasibility of low ground pressure running gear. Soil & Tillage Research 35, 99-110.
- Trautner A (2003). On soil behaviour during field traffic. Doctoral Thesis. Agraria 372, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Trelleborg (2002) Däckinstruktionsbok – Lågtrycksdäcken Twin till lantbruk, skog, grönytor och industri. Trelleborg Wheel Systems, Trelleborg Industri AB, Trelleborg, Sweden.
- van den Akker J J H (1992) Stresses and required soil strength under terra tyres and tandem and dual wheel configurations. In: Proceedings of the International Conference on Soil Compaction and Soil Management, Tallinn, Estonia, 8-12 June, Estonian Research Institute of Agriculture and Land Improvement, Saku, Estonia, pp. 23-26.
- van den Akker J J H & Carsjens G J (1989) Reliability of pressure cells to measure traffic-induced stress in the topsoil-subsoil interface. In: Proceedings 4th European Conference of ISTVS, 21-23 March 1989, Wageningen, The Netherlands, Vol. 1, pp. 1-7.
- Vanden Berg G E & Gill W R (1962) Pressure distribution between a smooth tyre and the soil. Transactions of the ASAE 5, 126-129, 132.
- Way T R & Kishimoto T (2004) Interface pressures of a tractor drive tire on structured and loose soils. Biosystems Engineering 87, 109-120.
- Way T R; Bailey A C; Raper R L & Burt E C (1995) Tire lug height effect on soil stresses and bulk density. Transactions of the ASAE 38, 669-674.