

En markpackningsmodell som verktyg för lantbrukare och rådgivare (Slutrapport)

Förord

Denna rapport utgör slutredovisning från det av Stiftelsen Lantbruksforskning finansierade projektet ”En markpackningsmodell som verktyg för lantbrukare och rådgivare” (projektnummer H0533135). Projektets huvudsyfte var att utveckla en enkel modell för att kunna beräkna tryck¹ i marken och bedöma risken för packning av åkermark vid maskindrift.

Uppsala, juni 2009

Thomas Keller

Bakgrund

Markpackning betraktas som ett av de största hoten mot markens långsiktiga bördighet i EU (EU, 2006). Eftersom metoder för att åtgärda markpackning oftast misslyckas och dessutom är mycket dyra måste markpackning undvikas.

Viktiga verktyg för att analysera risken för markpackning av olika lantbruksmaskiner och av hela bearbetningssystem, samt för att utveckla strategier för att undvika markpackning, är markpackningsmodeller. För att bedöma risken för markpackning är det i första hand viktigt att kunna uppskatta tryckutbredningen i marken tillförlitligt. Trycket är den storhet i markpackningsprocessen som vi kan påverka genom maskinval.

Markpackning kan bara undvikas i praktiken om markanvändare (lantbrukare) samt rådgivare är medvetna om problematiken. För att en markpackningsmodell skall tillämpas i praktiken måste den vara enkelt tillgänglig och enkelt användbar, och samtidigt producera tillförlitliga resultat.

Det finns två typer av markpackningsmodeller (Défossez & Richard, 2002): numeriska modeller baserade på finit element metoden, och analytiska modeller. De sist nämnda är generellt enklare att använda, och lämpar sig därför bättre för praktiska tillämpningar. Det har visats att analytiska modeller har potential att beräkna tryckutbredningen i marken med bra noggrannhet, och att det beräknade trycket i de flesta fall inte skiljer sig nämnvärt mellan de två typerna av modeller (Keller *et al.*, 2007).

Projektets syfte

Projektets huvudsyfte var att utveckla en modell för att kunna beräkna tryck i marken och bedöma risken för packning av åkermark vid maskindrift. Modellen skulle vara lättillgänglig och enkel att använda. Målgruppen är i första hand lantbrukare och rådgivare.

Den nya modellen, som kallas TiM (Tryck i Marken), är till stor del baserad på mätningar av tryck i marken vid maskindrift som har utförts i Sverige (Keller & Arvidsson, 2006).

¹ I denna rapport används termen ”tryck” för att karakterisera intensiteten av de påkänningar som marken utsätts för. Detta görs för att ansluta till det vanliga praktiska språkbruket. Fysikaliskt är detta dock fel. Det fysikaliskt korrekta uttrycket är ”spänning”.

Modellens struktur

Den nya modellen TiM är en förenklad version av modellen *SoilFlex* (Keller *et al.*, 2007). Den inkluderar dock nya karakteristiska: förbättrad uppskattning av tryckutbredningen (Keller *et al.*, 2009) och tryckgränsvärden för markpackning (Keller, 2004; Keller & Arvidsson, 2006).

Kontaktyta och tryck i kontaktytan

Ytan på kontakten mellan däck och mark (kontaktytan eller anläggningsytan) bildar tillsammans med tryckfördelningen i kontaktytan (trycket mellan däck och mark) modellens övre randvillkor. Det har visats genom modellsimuleringar att tryckfördelningen i kontaktytan har stor betydelse för tryckutbredningen i marken (van den Akker, 1992; Hammel, 1994; Tijink *et al.*, 1995; Keller & Arvidsson, 2004; Keller, 2005). Därför är det med hänsyn till modellering av markpackning viktigt att kunna uppskatta tryckfördelningen i kontaktytan så bra som möjligt.

I TiM beräknas det övre randvillkoret, dvs. formen och arean på kontaktytan, och tryckfördelningen i kontaktytan, enligt Keller (2005), som utvecklade en modell för beräkning av tryckfördelningen i kontaktytan samt kontaktytans form och area, baserad på mätningar av tryck i kontaktytan av totalt 29 kombinationer av hjullast och däck. Hjullasten varierade mellan 1,1 och 12,5 ton. Det minsta respektive största däcket hade dimensionerna 11.2 R28 respektive 1050/50 R32. I modellen beskrivs anläggningsytan med en s.k. superellips, som generellt kan skrivas som:

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

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 (1) en ren ellips respektive en rektangel. Tryckfördelningen, $\sigma(x,y)$, modelleras med två olika funktioner för tryckfördelningen i körriktning, $\sigma(x)$, respektive tvärs mot körriktningen, $\sigma(y)$, enligt följande (Keller, 2005):

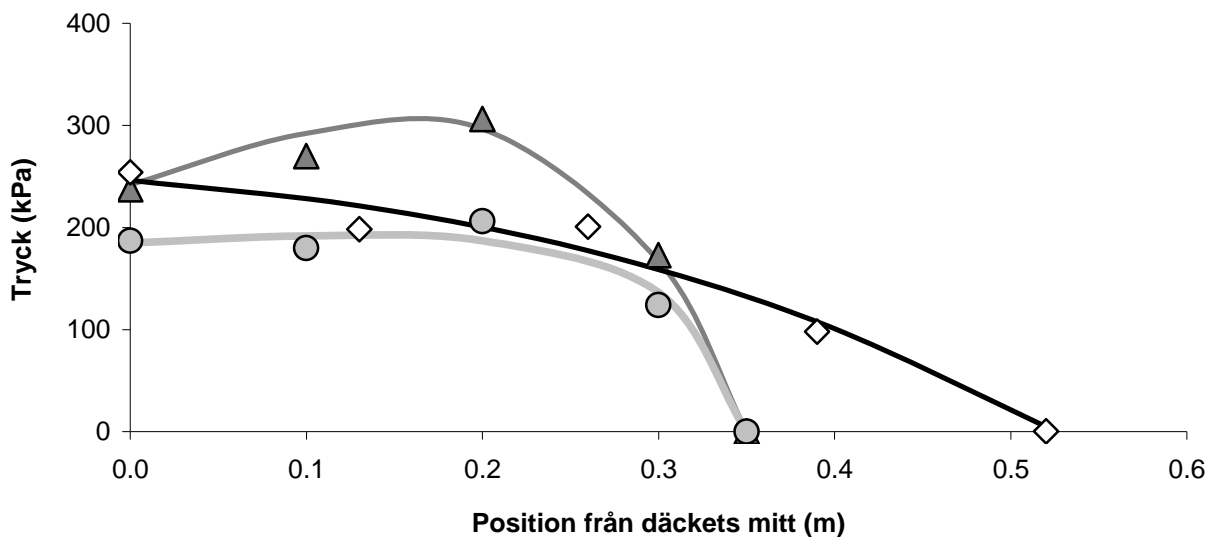
$$\sigma(x) = \sigma_{x=0,y} \left\{ 1 - \left| \frac{x}{l_x(y)} \right|^\alpha \right\} \quad (\text{Ekvation 2})$$

och

$$\sigma(y) = C \left\{ (w_x - y) e^{-\delta(w_x - y)} \right\} \quad (\text{Ekvation 3})$$

där $l_x(y)$ och $w_y(x)$ är anläggningsytans halva längd respektive halva bredd ($l_x(0) = a$; och $w_y(0) = b$), α och δ är formparametrar, och C är en konstant som bestämmer amplituden (dvs. det maximala trycket, σ_{\max}). Ekvationen (3) är mycket flexibel och kan modellera olika former av tryckfördelningar (Figur 1). Den har visat sig även fungera för modellering av tryckfördelning vid kontrasterande (hård respektive lucker) egenskaper av markytan (Per Schjønning, personligt meddelande).

Alla modellparametrar (dvs., superellipsens parametrar: a , b , n ; och tryckfördelningens parametrar: α , δ , σ_{\max}) uppskattas av enkelt mätbara egenskaper som hjullast, ringtryck och däcksdimensioner (Keller, 2005). Till exempel beräknas σ_{\max} i kPa enligt (Keller, 2005):



Figur 1. Exempel på tryckfördelningar i kontaktytan tvärs mot körriktning: uppmätta (symboler) och simulerade värden (kurvor) enligt Ekvation (3) för ett Twin 700/50-26,5 däck (hjullast: 7,0 ton; ringtryck 240 kPa; triangel och mörkgrå kurva) ett 1050/50 R32 däck (hjullast: 8,6 ton; ringtryck: 150 kPa; romber och svart kurva) och ett Twin 700/50-26,5 däck (hjullast: 5,0 ton; ringtryck: 140 kPa; cirklar och ljusgrå kurva).

$$\sigma_{\max} = 34,4 + 1,13p + 0,72F - 33,4 \ln\left(\frac{p}{p_R}\right) \quad (\text{Ekvation 4})$$

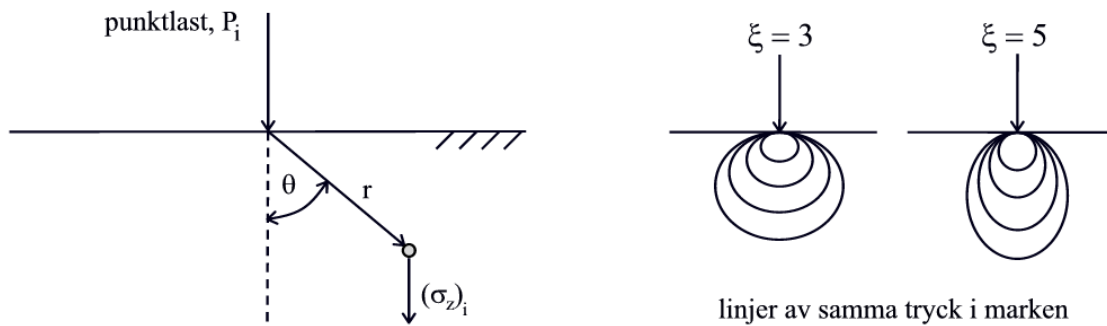
där p är ringtrycket i kPa, F är hjullasten i kN, och p_R är det rekommenderade ringtryck i kPa (dvs. det ringtrycket som däckstillverkaren anger för den givna hjullasten).

Tryckutbredning

Tryckutbredningen i marken beräknas enligt Söhne (1953), som baseras på de klassiska arbetena av Boussinesq (1885) och Fröhlich (1934). Anliggningsytan delas upp i i små rutor med en yta A_i och ett tryck σ_i , som bär en last $P_i = A_i\sigma_i$, som behandlas som punktlast. Trycket (vertikal spänning), σ_z , på ett visst djup, z , beräknas sedan genom summering:

$$\sigma_z = \sum_{i=0}^{i=n} (\sigma_z)_i = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{\xi P_i}{2\pi z_i^2} \cos^{\xi+2} \theta_i \quad (\text{Ekvation 5})$$

där: θ är vinkeln mellan normalvektorn och positionsvektorn från punktlasten till punkten i marken där trycket beräknas, och ξ är den så kallade koncentrationsfaktorn (Figur 2). I TiM beräknas enbart det vertikala trycket (Ekvation (5)). Det vertikala trycket anses vara direkt relaterat till markpackning, speciellt alvpackning (t.ex. Arvidsson, 1997).



Figur 2. Geometriska förhållanden för att beräkna tryck i marken (vänster); och effekt av koncentrationsfaktorn på tryckutbredning (höger)

Koncentrationsfaktorn, ξ , bestämmer tryckutbredningens form, dvs. hur mycket trycket sprids i vertikal- respektive horisontalled (Figur 2). Utifrån mätningar av tryck i marken på olika djup kunde ξ uppskattas för olika jordar och olika belastningar (Keller *et al.*, 2009b). Experimentella data från tryckmätningar på sju olika jordar (12-61 % lerhalt) och totalt 19 kombinationer av hjullast (11-86 kN), ringtryck (60-250 kPa) och jord kunde användas. Trycket i marken simulerades för de olika situationerna med hjälp av *SoilFlex* (Keller *et al.*, 2007). En ny funktion programmerades i *SoilFlex*; denna funktion beräknade root mean square error (RMSE) mellan uppmätta och simulerade tryckvärden som funktion av ξ , och därmed den optimala ξ vid minsta RMSE. Sedan testades sambandet mellan ξ och markegenskaper (textur, skrymdensitet, vattenhalt, samt mekaniska egenskaper) och belastningen (hjullast, ringtryck). Värdena för ξ var mellan 4,2 och 7,7, med ett medelvärde på 5,8. Koncentrationsfaktorn var negativt korrelerad med markens förkonsolideringstryck (ett mått på markens hållfasthet) och positivt korrelerad med markens sandhalt. Däremot hittades inga samband mellan ξ och belastningen. Vid användning av genomsnittliga värden av ξ för varje jord, hittades följande samband:

$$\xi = 7,42 - 0,023\sigma_{PC} + 0,034sand \quad (\text{Ekvation 6})$$

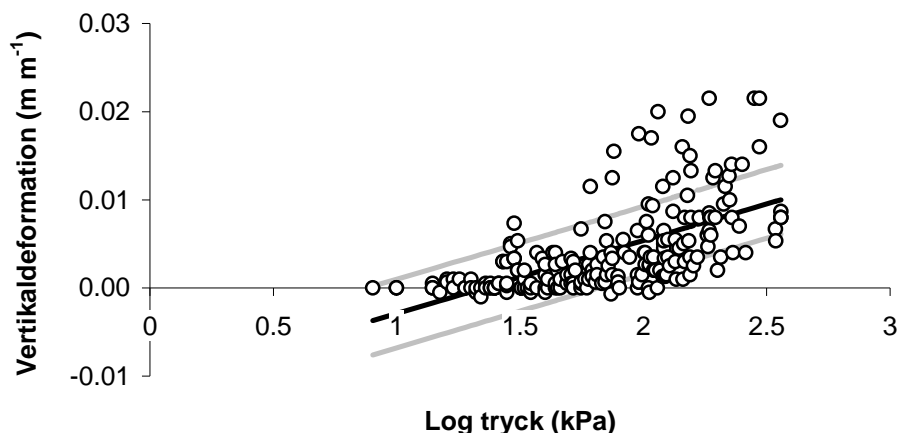
$$R^2 = 0.90, p < 0.01$$

där σ_{PC} är markens förkonsolideringstryck i kPa och *sand* är markens sandhalt i %.

Eftersom σ_{PC} och även jordens exakta sandhalt i vanliga fall är okända, räknar TiM med ett konstant värde för ξ , nämligen det ovannämnde medelvärdet för ξ på 5,8.

Packning av marken

Inom detta projekt analyserades de markmekaniska egenskaperna N (specifik volym vid $\sigma = 1$ kPa på den s.k. 'virgin compression line'), C_c (kompressionsindex) och C_r (svällningsindex) från oedometermätningar (Eriksson, 1982) av 69 individuella markskikt (tio svenska och fyra danska jordar). Sambanden mellan dessa markmekaniska egenskaper och lättillgängliga markegenskaper undersöktes (Keller & Arvidsson, 2007). Inget samband hittades mellan markmekaniska egenskaper och textur. N , C_c och C_r var positivt korrelerade med den initiala specifika volymen, v_0 , och därmed negativt korrelerade med skrymdensiteten. Detta antyder att de mekaniska egenskaperna framför allt är påverkade av markens struktur.



Figur 3. Deformation som funktion av tryck: uppmätta värden (symboler), linjär regressionslinje (svart linje) och 67 % -konfidensintervall (gråa linjer).

Eftersom skrymdensiteten i vanliga fall i praktiken är okänd, valdes en annan ansats i TiM. Inom detta projekt analyserades data från hjulningsexperiment (mätning av tryck och deformation på olika djup i marken vid överfarter med olika maskiner, däck, belastningar, etc.; engelsk: wheeling experiment) som utfördes på olika jordar i Sverige och Danmark (Keller, 2004; Keller & Arvidsson, 2006), se Keller *et al.* (2009a). Den uppmätta kvarstående deformationen (markpackning), ε , relaterades till det uppmätta trycket, σ (Figur 3). Linjen i Figur 3 är den linjära regressionslikningen:

$$\varepsilon = 0,0083 \log \sigma - 0,0112 \quad (\text{Ekvation 7})$$

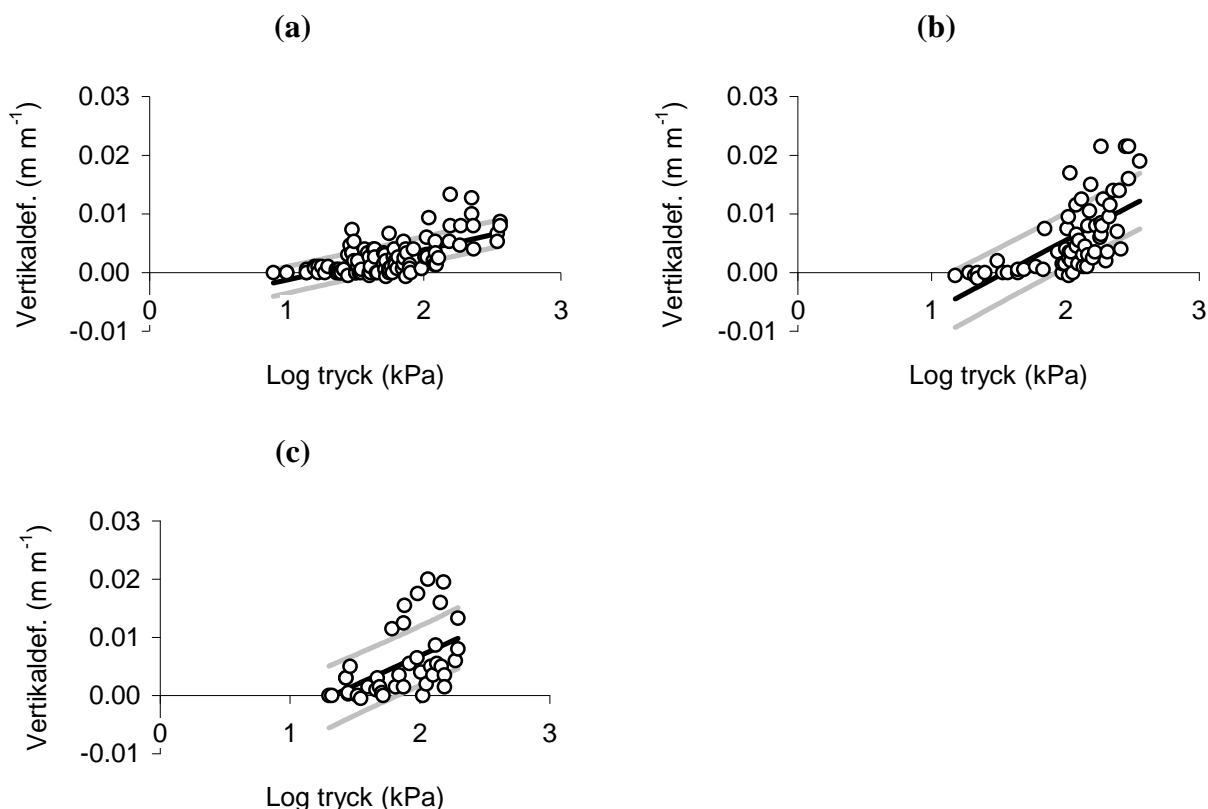
$$R^2 = 0,37; p < 0,0001.$$

För $\varepsilon = 0$ ger Ekvationen (7) ett värde för $\log \sigma$ på 1,35 dvs. $\sigma \approx 25$ kPa. Detta betyder att, i genomsnitt, trycket inte får överstiga 25 kPa för att undvika markpackning. Det är ganska mycket experimentell variation i data som visas i Figur 3; variationen har flera orsaker, t.ex. den naturliga variationen i marken och mätnoggrannheten, men beror nog mest på att data härstammar från experiment utförda på olika jordar. Därför definierades ett toleransområde i TiM, genom att beräkna 67 % -konfidensintervallet (två tredjedels sannolikhet att vara inom intervallet; gråa linjer i Figur 3). Den relativt låga sannolikhetsnivån valdes pga. den stora variationen i experimentella data, och för att vara ”på den säkra sidan”. Det övre tryckgränsvärdet kunde därmed beräknas till $\log \sigma = 1,82$ respektive $\sigma \approx 65$ kPa (snittpunkt mellan den undre intervallsgränsen och x-axeln; Figur 3). I TiM implementerades dessa gränsvärden ($\sigma \leq 25$ kPa: helt ”grönt”, dvs. ingen packning förväntas; $25 \text{ kPa} < \sigma \leq 65 \text{ kPa}$: viss risk för packning, trycket inom toleransområdet) till ett referensmarkdjup på 50 cm. Djupet på 50 cm motiverades med att (i) data som presenteras i Figur 3 uppmättes på djup mellan 30 och 70 cm, med ett genomsnittligt djup på 50 cm, och med att (ii) viss strukturförbättring av packningsskador genom vätnings-upptorkningscyklar och frysning-tjälningcyklar (Schjønning *et al.*, 2006).

Gränsvärdena på 25 kPa (”ingen packning”) respektive 65 kPa (”tolerans”) kan tyckas väldigt låga. De är dock i enlighet med Rusanov (1994), som föreslog ett gränsvärde för det maximalt

tillåtna trycket på 25-50 kPa på 50 cm djup, och med Schjønning *et al.* (2006), som föreslog den s.k. ”50-50” regel (maximalt 50 kPa tryck på 50 cm djup). De här föreslagna gränsvärdena stämmer också bra överens med gränsvärden för maximalt ringtryck på mellan 40 och 80 kPa som föreslogs av Petelkau (1984), Vermeulen *et al.* (1988) och Rusanov (1994). Om man tar hänsyn till dagens däckdimensioner och tillåtna hjullaster respektive rekommenderade ringtryck, överensstämmer 25-65 kPa på 50 cm djup också ganska bra med den maximala tolererbara axellasten på 6 ton (dvs. hjullast på 3 ton) som föreslogs av Håkansson & Danfors (1981).

Figur 3 och Ekvation (7) visar ett generellt samband mellan tryck och deformation i marken vid överfarter med lantbruksmaskiner, utan att specificera mellan olika jordarter. Data uppdelades också i tre jordartsklasser, nämligen lerjordar (engelsk: ”clay”; >50 % ler), mjåla jordar (engelsk: ”silty clay” och ”silty clay loam”; >40 % silt) och sandiga jordar (engelsk: ”loam” och ”sandy loam”; >40 % sand). Skillnaderna mellan de tre klasserna är förvånansvärt små (Figur 4). Gränsvärdet för tryck för att helt undvika markpackning skiljer sig inte nämnvärt mellan de tre jordklasserna. Gränsvärdet för ”ingen packning” respektive toleranstryckvärdet var ~20 respektive ~50 kPa för lerjordar (Figur 4a), ~30 respektive ~80 kPa för mjåljordar (Figur 4b) och ~25 respektive ~65 kPa för sandiga jordar (Figur 4c). Anledningen till de små skillnaderna kan vara att det är främst markens struktur som bestämmer de mekaniska egenskaperna hos jorden (t.ex. Keller & Arvidsson, 2007). Däremot syns det dock att deformationen vid ett visst tryck är generellt lite mindre hos lerjordar.



Figur 4. Deformation som funktion av tryck: uppmätta värden (symboler), linjär regressionslinje (svart linje) och 33 %-konfidensintervall (gråa linjer): (a) lerjordar (>50 % ler), (b) mjåljordar (>40 % silt), och (c) sandiga jordar (>40 % sand).

Inom projektet jämfördes dessutom tryck-deformationskurvor uppmätta på cylinderprov i oedometerapparaten (Eriksson, 1982) med tryck-deformationskaraktäristiska uppmätta i fält vid hjulningsexperiment (Keller *et al.*, 2009a). Det visade sig att deformationen i fält är betydligt mindre än vad som uppmättes på cylinderprov i laboratoriet. Orsaken tros vara den mycket kortare belastningstiden i fält: belastningstiden är upp till flera tusen gånger kortare i fält vid överfarter med lantbruksmaskiner än vid mekaniska tester på laboratoriet (Keller *et al.*, 2009a).

Programmering

TiM är en Excel användning, dvs. modellen är implementerad i en Excel fil, och innehåller flera makron som är skrivna i Visual Basic.

Modellens indata är: hjullast, ringtryck och rekommenderat ringtryck, samt däckets bredd och diameter. Modellen kan simulera enkla hjul, dubbelmontage och tandemhjul. I de senare fallen krävs det uppgifter om avståndet mellan hjulen (dubbelmontage) respektive mellan axlarna (tandemhjul).

Modellen beräknar trycket i tvärsnittsarean tvärs mot körriktning (enkelhjul, dubbelmontage) respektive i körriktning (tandemhjul). Trycket som funktion av markdjupet visas i form av tabeller och figurer. Slutligen visas om trycket överstiger gränsvärdet för markpackning, dvs. om körning i det beräknade fallet förväntas leda till ”Ingen packning förväntas / körning OK”, ”Viss risk för packning / tryck inom toleransområdet” eller ”Stor risk för packning / för högt tryck”.

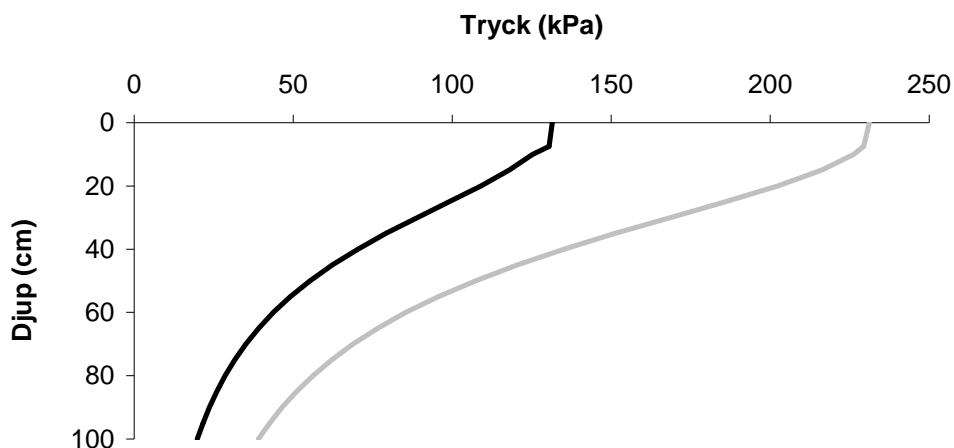
Praktiskt exempel

I detta avsnitt visas ett praktiskt exempel. I exemplet beräknas tryck i marken och risken för markpackning för en gödseltunna. Gödseltunnan antas väga 10 ton och vara utrustad med Twin 700/50-26,5 däck. En första simulering med TiM gjordes för en enkelaxlad gödseltunna; hjullasten var således 5 ton, som kräver ett ringtryck på 170 kPa enligt däckinstruktionsboken. TiM beräknar ett tryck på 107 kPa på 50 cm (Figur 5), vilket resulterar i meddelandet ”Stor risk för markpackning / tryck för högt!”. Ett sätt att reducera trycket i marken är att utrusta gödseltunnan med tandemaxlar. Hjullasten i detta fall blir 2,5 ton, vilket kräver ett ringtryck på 80 kPa enligt däckinstruktionsboken. För den tandemaxlade gödseltunnan beräknar TiM ett tryck på 55 kPa på 50 cm djup (Figur 5), och ger meddelandet ”Viss risk för markpackning / tryck inom toleransområdet”.

Att utrusta gödseltunnor med tandemaxlar (eller för större tunnor: trippeltandemaxlar) är alltså ett effektivt sätt att reducera trycket i marken och därmed reducera risken för markpackning.

Sammanfattning och slutsatser

En ny modell, TiM (Tryck i Marken), för beräkning av tryck i marken och bedömning av risken för packning av åkermark vid maskindrift utvecklades. TiM är en enkel Excel användning och riktar sig främst till lantbrukare och rådgivare. En kopia av modellen kan fås från Thomas Keller, thomas.keller@mark.slu.se. Modellen kommer också att kunna nerladdas på SLU:s avdelningen för jordbearbetning och hydrotekniks hemsida, som för närvarande är under uppbyggnad. TiM är gratis; författaren påtar sig inget ansvar.



Figur 5. Beräknat tryck som funktion av djup för en gödseltunna utrustad med enkelaxel (grå kurva) respektive tandemaxel (svart kurva). Däcksutrustningen är Twin 700/50-26,5 i båda fallen, med en hjullast på 5,0 ton och ett ringtryck på 170 kPa för den enkel axlade tunnan, och en hjullast på 2,5 ton och ett ringtryck på 80 kPa för tunnan med tandemaxlar.

TiM är till stor del baserad på resultat från omfattande fältexperiment som utförts i Sverige: (i) mätningar av tryck i kontaktytan mellan däck och mark, och (ii) mätningar av tryck och deformation på olika djup vid hjulningsexperiment.

Indata som krävs i TiM är få och lättillgängliga: däcksdimensioner och belastning (hjulast, ringtryck). Ifrån dessa parametrar genererar TiM kontaktytan mellan däck och mark samt tryckfördelningen i kontaktytan enligt Keller (2005). Tryckutbredningen i marken räknas sedan analytiskt enligt de välkända ekvationerna för tryckutbredning i marken (Boussinesq, 1885; Fröhlich, 1934; Söhne, 1953), där den s.k. koncentrationsfaktorn bestämdes och uppskattades från data från hjulningsexperiment (Keller *et al.*, 2009b). Slutligen jämförs det beräknade trycket med ett gränsvärde för att bedöma risken för markpackning; gränsvärdet togs fram genom att analysera data från hjulningsexperiment.

I den nuvarande versionen av TiM specificeras inga jordar, dvs. TiM räknar tryckutbredningen med en unik koncentrationsfaktor och bedömer risken för markpackning med ett unikt tryckgränsvärde. Det vore önskvärt att kunna göra beräkningar anpassade till olika jordar. Denna rapport visar dock att de mekaniska egenskaperna hos jorden främst beror på markens struktur snarare än markens textur. En modell som kan ta hänsyn till markstrukturens inverkan på tryckutbredning i marken och markens deformation kräver dock indata (markmekaniska egenskaper) som inte är tillgängliga i praktiken. Exempelvis kunde Keller & Arvidsson (2007) hitta en korrelation mellan kompressionsindexet och markens skrymdensitet; det senare är en storhet som i de allra flesta fall inte är känt *a priori*. Det finns också tre starka argument som talar för den nuvarande lösningen utan jordartsspecificering: (i) en lantbrukare har oftast olika jordar på sin gård (men använder samma maskiner på hela gården), (ii) modellens främsta användning är att stödja vid val av maskiner och däcksutrustning för att minska risken för markpackning (som inledningsvis nämnts är det snabbaste och enklaste sättet att minska risken för markpackning att

minska trycket i marken), och (iii) modellen blir universellt användbar, vilket kan vara en fördel för framtagandet av rekommendationer och regler.

Publicering och resultatförmedling

Projektet resulterade i ett antal publikationer. Resultaten presenterades också på internationella konferenser. Modellen har använts i undervisning på SLU i Uppsala, samt på Swiss College of Agriculture i Zollikofen, Schweiz. Modellen ska läggas ut på Avdelningen för jordbearbetning och hydrotekniks hemsida, som är under uppbyggnad.

Publikationer

- Keller T & Arvidsson J (2007) Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *European Journal of Soil Science* 58(6), 1373-1381.
- Keller T, Défossez P, Weisskopf P, Arvidsson J & Richard G (2007) SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research* 93(2), 391-411.
- Keller T, Stettler M, Arvidsson J, Lamandé M, Schjønning P, Berli M & Rydberg T (2009) Stress Propagation in Arable Soil: Determination and Estimation of the Concentration Factor. Proc. 18th Conf. ISTRO, Izmir, Turkey, 15-19 June 2009.
- Keller T, Arvidsson J & Rydberg T (2009) In situ stress-strain behaviour during wheeling experiments as compared to stress-strain behaviour measured in uniaxial compression tests in the laboratory. Proc. 18th Conf. ISTRO, Izmir, Turkey, 15-19 June 2009.
- Keller T, Défossez P, Weisskopf P, Arvidsson J & Richard G (2006) SoilFlex: A model for prediction of traffic-induced soil compaction including a synthesis of analytical approaches. In: Proceedings of the 17th Conference of ISTRO, Kiel, Germany, pp. 332-337.

Presentationer på internationella konferenser

- Keller T, Stettler M, Arvidsson J, Lamandé M, Schjønning P, Berli M & Rydberg T (2009) Stress Propagation in Arable Soil: Determination and Estimation of the Concentration Factor. Presented at the 18th Conference of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) in Izmir, Turkey, 15-19 June 2009
- Keller T, Arvidsson J & Rydberg T (2009) In situ stress-strain behaviour during wheeling experiments as compared to stress-strain behaviour measured in uniaxial compression tests in the laboratory. Presented at the 18th Conference of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) in Izmir, Turkey, 15-19 June 2009
- Keller T, Défossez P, Weisskopf P, Arvidsson J & Richard G (2006) SoilFlex: A model for prediction of traffic-induced soil compaction including a synthesis of analytical approaches. Presented at the 17th Conference of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) in Kiel, Germany, 28 August - 3 September 2006

Tack till

Detta arbete var finansierat av Stiftelsen Lantbruksforskning (SLF). Tack till projektets referensgrupp, Pär-Johan Löf (Lantmännen, Enköping), Dave Servin (SLU Omvärld, Alnarp) och Janne Linder (Jordbruksverket, Uppsala) för värdefulla diskussioner.

Litteraturförteckning

- Arvidsson J (1997) Soil Compaction in Agriculture – From Soil Stress to Plant Stress. Doctoral Thesis. Agraria 41, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Boussinesq J (1885) Application des Potentiels à l'étude de l'équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques. Gauthier-Villars, Paris, 30 pp.

- Défossez P & Richard G (2002) Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil & Tillage Research* 67, 41-64.
- Eriksson J (1982) *Markpackning och rotmiljö* Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences, Division of Agricultural Hydrotechnics, Uppsala. Report 126.
- EU, 2006. Thematic Strategy for Soil Protection. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
- Fröhlich OK (1934) *Druckverteilung im Baugrunde*. Springer Verlag, Wien, 178 pp.
- Hammel K (1994) Soil stress distribution under lugged tires. *Soil & Tillage Research* 32, 163-181.
- 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 & Arvidsson J (2006) Prevention of traffic-induced subsoil compaction in Sweden: experiences from wheeling experiments. *Archives of Agronomy and Soil Sciences* 52(2), 207-222.
- Keller T & Arvidsson J (2007) Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *European Journal of Soil Science* 58(6), 1373-1381.
- 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.
- Keller T, Arvidsson J & Rydberg T (2009a) In situ stress-strain behaviour during wheeling experiments as compared to stress-strain behaviour measured in uniaxial compression tests in the laboratory. Proc. 18th Conf. ISTRO, Izmir, Turkey, 15-19 June 2009.
- Keller T, Défossez P, Weisskopf P, Arvidsson J & Richard G (2007) SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research* 93(2), 391-411.
- Keller T, Stettler M, Arvidsson J, Lamandé M, Schjønning P, Berli M & Rydberg T (2009b) Stress Propagation in Arable Soil: Determination and Estimation of the Concentration Factor. Proc. 18th Conf. ISTRO, Izmir, Turkey, 15-19 June 2009.
- Schjønning P; Lamandé M; Tøgersen FA; Pedersen J & Hansen POM (2006) Reduction of soil compaction. Magnitude and distribution of stress in the contact area between wheel and soil. Report No. Markbrug 127, 102pp. The Danish institute of Agricultural Sciences, Tjele; Denmark (in Danish with English Summary).
- 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.
- van den Akker J J H (1992) Stresses and required soil strength under terra tyres and tandem and dual wheel configurations. In: Proc. Int. Conf. Soil Compaction and Soil Management, Tallinn, Estonia, 8-12 June, Estonian Research Institute of Agriculture and Land Improvement, Saku, Estonia, pp. 23-26.