

Modellering av effekter av markpackning på avkastning (H0633191) – Slutrapport

Thomas Keller *SLU, Institutionen för mark & miljö, Box 7014, 75007 Uppsala*

1. Bakgrund

Markpackning påverkar många markegenskaper och processer, fysikaliska såväl som kemiska och biologiska, och i regel i ogynnsam riktning (Håkansson, 2005). Följderna för jordbruket och samhället är många, med sänkning av grödornas avkastning som en av dem.

Effekter av matjordspackning beskrivs bäst genom ett samband mellan en relativ skrymdensitet, ρ_{rel} , och skörd (Håkansson & Lipiec, 2000). Håkansson (1990) definierade ρ_{rel} som:

$$D = 100 \frac{\rho_{fält}}{\rho_{ref}} \quad (1)$$

där D är den s.k. packningsgraden, $\rho_{fält}$ är skrymdensiteten i fält och ρ_{ref} skrymdensiteten vid ett definierat referenstillstånd (200 kPa tryck) eller standardpackningen som den också kallas. Fördelen med att använda ρ_{rel} istället för $\rho_{fält}$ är att ρ_{rel} inte är jordartsberoende och har samma ”effekt” på olika jordar (Håkansson, 1990; Håkansson & Lipiec, 2000).

Den mest omfattande studien på avkastningseffekter av alvpackning gjordes på 70- och 80-talet i Nordeuropa och Nordamerika av Håkansson *et al.* (1987). Resultaten visade att den negativa påverkan av tunga fordon på avkastningen ökade med ökande lerhalt och ökande antal överfarter. Avkastningseffekterna av alvpackning avtog med tiden och var i de flesta fall konstanta men kvarstående fem år efter packningen av alven hade skett.

Arvidsson & Håkansson (1991) utvecklade en statistisk (empirisk) modell för beräkning av markpackningens effekter på grödornas avkastning. Modellen används t.ex. inom rådgivningen. Modellens beräkningar baseras på antal tonkm per hektar (Mgkm ha^{-1}), vilket är produkten av fordonens vikt i ton och respektive körsträcka i km per ha (Arvidsson & Håkansson, 1991). I modellen relateras sedan antal tonkm per ha till skördeförlusten. Tonkm-värden ger dock en ofullständig bild av maskinernas packningspotential: tonkm är inte fysiskt relaterat till det verkliga trycket som uppstår i marken och tonkm tar inte heller hänsyn till markens egenskaper.

Projektets syfte var att analysera data av Prof. em. Inge Håkansson, delvis publicerade i Håkansson (1985, 1990) och Håkansson *et al.* (1987), för att: (i) utveckla en modell för beräkning av ρ_{ref} från markens textur och mullhalt och (ii) hitta samband mellan packningsgraden i alven och skörd. Detta skulle användas för att vidareutveckla en markpackningsmodell genom att inkludera beräkning av avkastningseffekter av markpackning.

2. Material och metoder

2.1 Standardpackning som funktion av markens kornstorleksfördelning och mullhalt

Data för standardpackning, ρ_{ref} (1), och kornstorleksfördelning (textur) och mullhalt från totalt 170 svenska, tre finska (Pietola, 1995) och två polska jordar (Lipiec *et al.*, 1991) sammanställdes.

Förutom att dela upp kornstorleksfördelningen i de vanliga internationella kornfraktionerna ler (engelsk: clay; $< 2 \mu\text{m}$), mjåla (engelsk: silt; $2\text{-}50 \mu\text{m}$) och sand ($50\text{-}2000 \mu\text{m}$) analyserades också själva kornkurvan. Kornkurvan eller kornfunktionen (Fig. 1) är en kontinuerlig funktion

som beskriver hela kornstorleksfördelningen och har därmed potential att bättre kunna karakterisera jordens mekaniska egenskaper. Kornkurvan anpassades till Rosin-Rammler relationen (Rosin & Rammler, 1933; Perfect *et al.*, 1993):

$$P(X > x) = 100e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2)$$

där $P(X > x)$ är viktsprocent partiklar större än storlek x , och α och β är konstanter relaterade till fördelningens karakteristiska storlek och fördelningens form (Perfect *et al.*, 1993). Ekvation (2) är enkel och praktisk eftersom den bara har två parametrar. I Fig. 1 visas en anpassning med (2). Ett litet α -värde beskriver en fördelning som domineras av små partiklar och vice versa, medan ett litet β -värde beskriver en bred spridning av partikelstorlekar och vice versa (Perfect *et al.*, 1993).

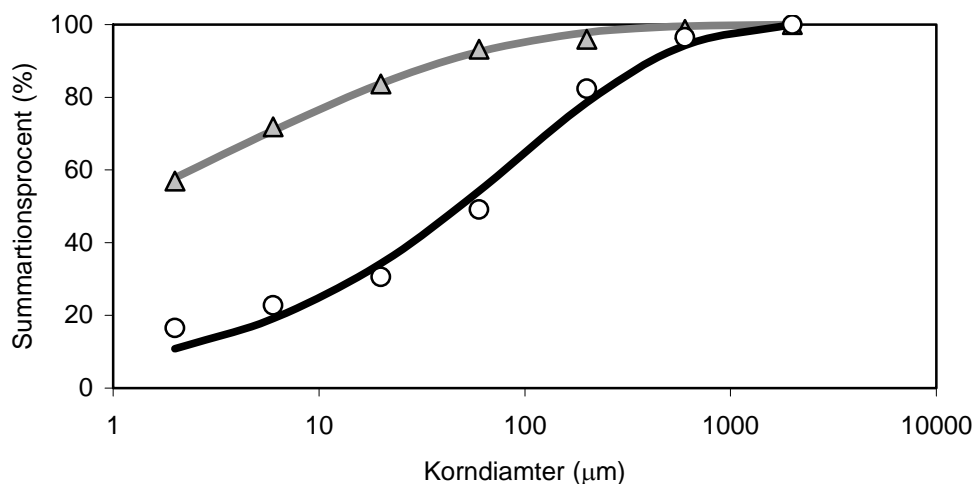
Datamängden användes sedan för att utveckla regressionsmodeller mellan ρ_{ref} och markens textur (ler-, silt-, sand-, och mullhalt) respektive parametrarna från kornkurvan (α och β) i syftet att kunna uppskatta ρ_{ref} för olika jordar. Statistiska beräkningar utfördes i dataprogrammet SAS 9.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) med proceduren ”STEPWISE”. De olika regressionmodellerna jämfördes sedan med hjälp av det s.k. Akaike information criterion (AIC) (Akaike, 1974). En utförlig beskrivning finns i Keller & Håkansson (2010).

2.2 Effekt av matjordspackning på skörd

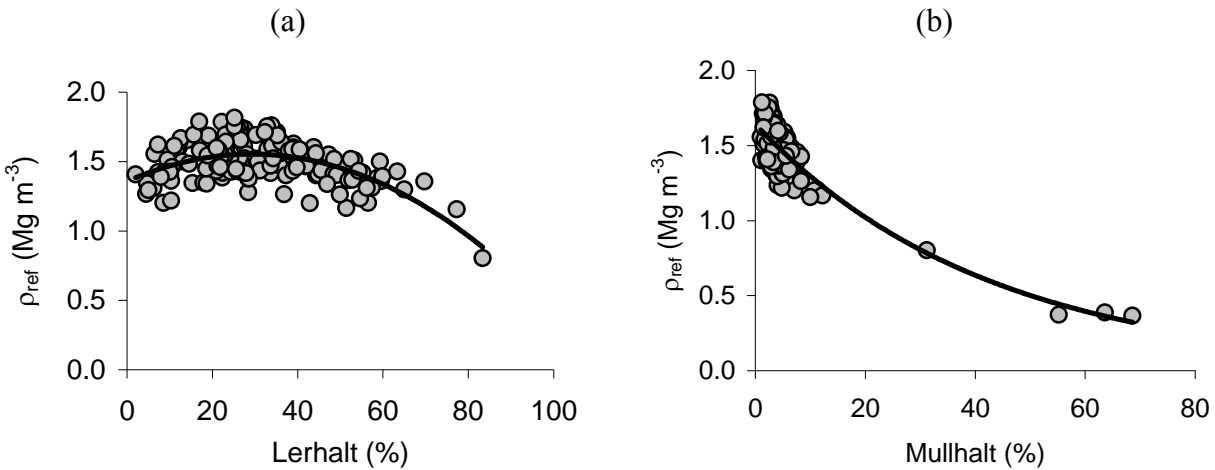
Data från ett stort antal fältförsök sammanfattade i Håkansson (1990) analyserades för att få fram en matematisk ekvation som beskriver sambandet mellan D (1) och skörden (skördenivån).

2.3 Effekt av alvpackning på skörd

Data från svenska försök på effekt av alvpackning på skörd, publicerade i Håkansson (1985) och Etana & Håkansson (1994), analyserades. För alla försök redovisade i Håkansson (1985) och Etana & Håkansson (1994) beräknades D (1), där ρ_{ref} beräknades enligt ekvation (3). Skillnaden mellan packningsgraden innan och efter en körning, ΔD , relaterades sedan till skördesänkningen.



Figur 1. Exempel på kornkurvor från en styv lera (trianglar) och en lätt mo (cirklar), anpassad med Rosin-Rammler ekvation (kurvor).



Figur 2. Standardpackningen, ρ_{ref} , som funktion av (a) lerhalt och (b) mullhalt.

3. Resultat och diskussion

3.1 Standardpackning som funktion av markens kornstorleksfördelning och mullhalt

Standardpackningen, ρ_{ref} , påverkades av jordens textur, och speciellt av mullhalten (Fig. 2). Jorden är en blandning av stora (sandkorn) och små partiklar (lerpartiklar); blandningen har olika egenskaper vid olika andelar stora respektive små partiklar. Enligt Larson *et al.* (1980) ändrar sig det mekaniska beteende vid en lerhalt av ca. 33 %, vilket stämmer väl överens med det maximala värdet för ρ_{ref} vid en lerhalt på 29,3 % i Fig. 2a. Mullhalten har en stark inverkan på markens skrymdensitet och markens mekaniska hållfasthet. Skrymdensiteten minskar med ökande mullhalt. Effekten på markens mekaniska egenskaper och hållfasthet är dock mera komplex, men enligt Soane (1990) ökar mullhalten markens motstånd mot packning och ökar dess elasticitet.

Följande modell hittades för att uppskatta ρ_{ref} från jordens textur och mullhalt:

$$\rho_{ref} = 1,308 + 0,0119 \text{ clay} + 0,0103 \text{ sand} - 0,00018 \text{ clay}^2 - 0,00008 \text{ sand}^2 - 0,00062 \text{ silt OM} - 0,00059 \text{ sand OM} \quad (3)$$

$$R^2 = 0,81; p < 0,0001.$$

där ρ_{ref} är standardpackningen i Mg m^{-3} , *clay*, *silt* och *sand* markens ler-, silt-, respektive sandhalt i %, och *OM* markens mullhalt i %. För uppskattning av ρ_{ref} från kornkurvas karakteristiska parametrar (α och β) hittades följande modell:

$$\rho_{ref} = 1,508 + 0,226 \log \alpha - 0,417 \beta + 0,110 \beta^2 - 0,0242 \text{ OM} - 0,0110 \text{ OM} \log \alpha \quad (4)$$

$$R^2 = 0,84; p < 0,0001.$$

där α är kornkurvas karakteristiska korndiameter i μm och β kornkurvas form. De beräknade AIC-värdena (Akaike, 1974) visade att (4) var en bättre modell än (3).

3.2 Standardpackning och växtlighet

Håkansson (1990) visade att den optimala D (1), dvs. värdet där skörden var maximal, låg vid $D = 87$ för korn. Därmed blir den optimala skrymdensiteten, ρ_{opt} : $\rho_{opt} = 0,87 \rho_{ref}$. Heinonen (1960) definierade den "normala skrymdensiteten", ρ_n , som skrymdensitet i matjorden av 2-4 år gammal

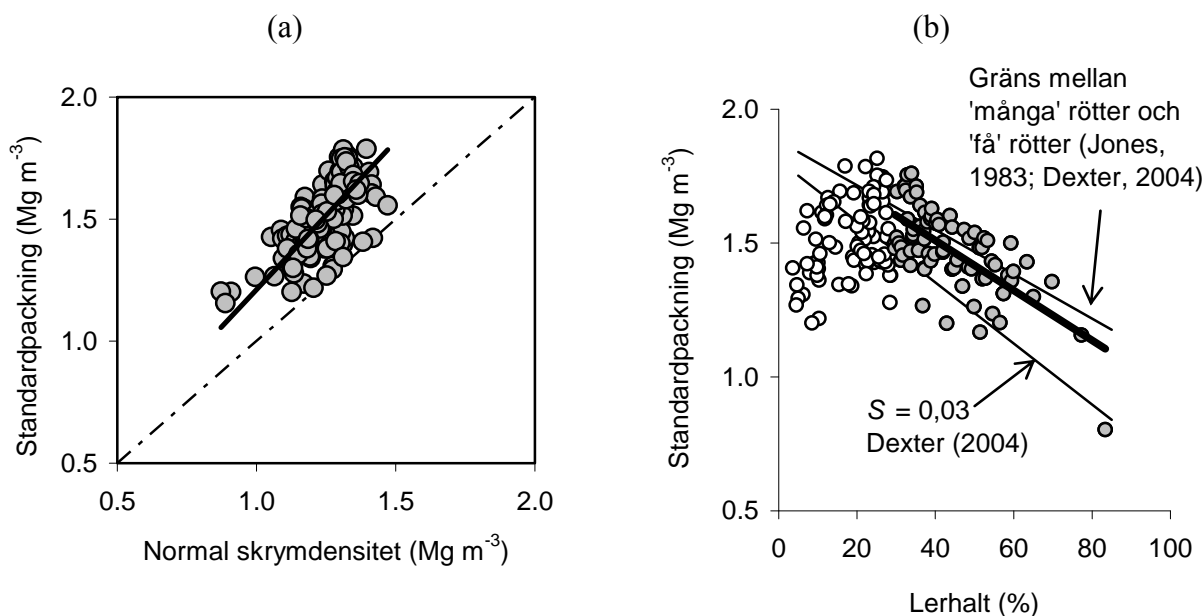
vall. Heinonen (1960) resonerade att ρ_n var en naturlig utvecklad skrymdensitet som därför skulle vara optimal för växtlighet. Vi beräknade ρ_n för våra jordar med hjälp av en ekvation i Heinonen (1960), och jämförde med ρ_{ref} (Fig. 3a). Regressionslinjen i Fig. 3a är: $\rho_n = 0,83 \rho_{ref}$ ($R^2 = 0,39$; $p < 0,0001$). Den optimala skrymdensiteten är alltså nära ρ_n av Heinonen (1960). Detta förvånar föga, eftersom de finska jordar som undersöktes av Heinonen (1960) liknar de svenska vad gäller geologiskt ursprung och även de klimatiska förhållandena är ungefär desamma.

Jones (1983) och Dexter (2004) presenterade linjära samband mellan skrymdensiteter, kritiska för rötternas tillväxt, och markens lerhalt. Ett kvadratisk samband mellan ρ_{ref} och lerhalten hittades dock i denna studie (Fig. 2a), vilket stämmer väl överens med observationer att rottillväxten upphör vid relativt låg skrymdensitet på sandjordar (Håkansson *et al.*, 1985; Dexter, 2004). Baserad på resultaten i Fig. 2a producerades ett linjärt samband mellan ρ_{ref} och lerhalt för jordar med lerhalt $>29,3$ %:

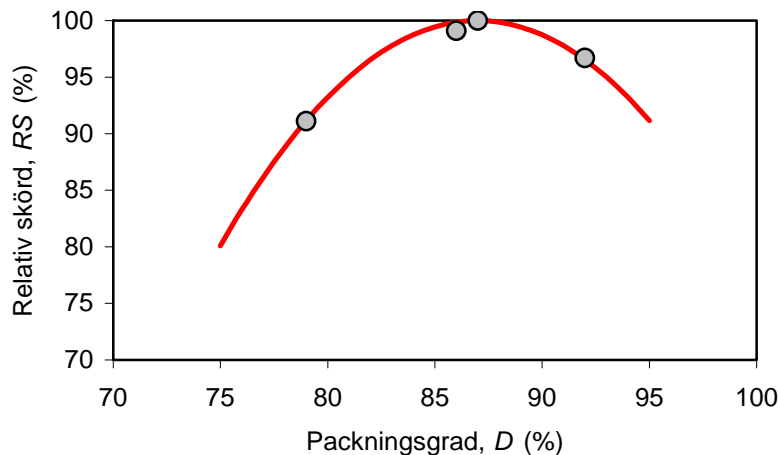
$$\rho_{ref} = 1,882 - 0,0093 \text{ clay} \quad (5)$$

$$R^2 = 0,47, p < 0,0001.$$

Denna linje visas i Fig. 3b, tillsammans med regressionslinjer av kritisk skrymdensitet för rottillväxt som funktion av lerhalt som utvecklades av Jones (1983) och Dexter (2004). Ekvationen (5) skiljer sig bara marginellt från gränsen mellan "många" och "få" rötter av Jones (1983) och är nära regressionslinjen för $S = 0,03$ av Dexter (2004), se Fig. 5b. Därför kan vi ställa upp hypotesen att standardpackningen kan anses som en kritisk skrymdensitet vad gäller rottillväxt: överstiger markens skrymdensitet standardpackningen så hindras rottillväxten.



Figur 3. Standardpackningen, ρ_{ref} , som funktion av (a) den "normala skrymdensiteten" enligt Heinonen (1960); och (b) jämförelse mellan standardpackningen som funktion av lerhalt med skrymdensitet-värden som är kritiska för rottillväxt enligt Jones (1983) och Dexter (2004). Den feta linjen är regressionslinjen för svenska jordar från denna studie med lerhalt $>29,3$ %.



Figur 4. Relativ skörd i % som funktion av packningsgraden i %; experimentella data redovisade i Håkansson (2005) (cirkelar), och anpassning med Ekvation (6) (parabol).

3.3 Effekt av matjordspackning på skörd

Den relativa skörden, RS , som funktion av packningsgraden, D , kunde beskrivas med en parabol (Fig. 4). Om vi antar att funktionen har ett maximum (relativ skörd = 100 %) vid en packningsgrad på 87 (Håkansson, 1990), kan parabeln i Fig. 4 beskrivas som:

$$RS = 0,138 D^2 + 24,06 D - 946,7. \quad (6)$$

3.4 Effekt av alvpackning på skörd

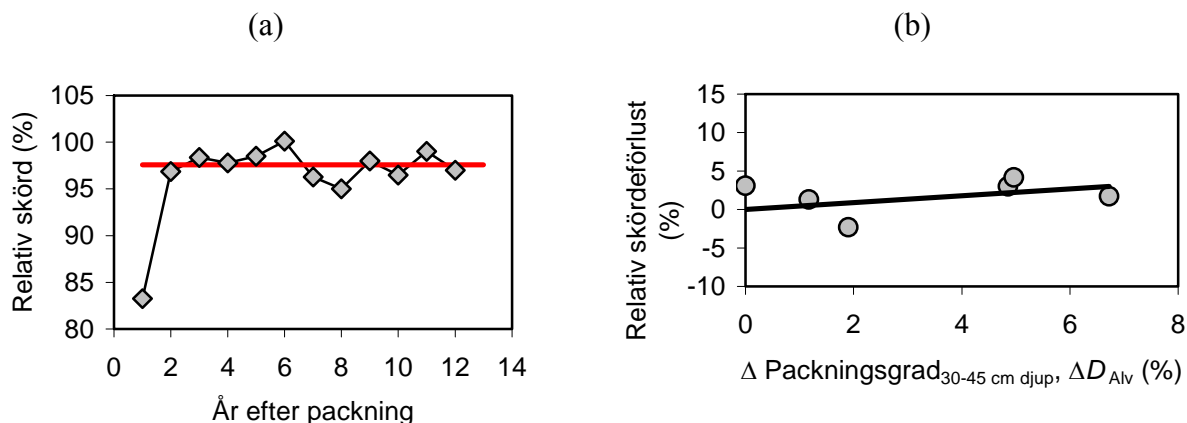
Den genomsnittliga relativa skörden av de svenska alvpackningsförsöken redovisade i Håkansson (1985) och Håkansson & Etana (1994) visas i Fig. 5a. Skördevariationen från år till år var ibland stor i de enskilda försöken. Den genomsnittliga skördenedsänkningen var stor första året, men stabiliserades på en genomsnittlig nivå på 97,6 % de efterföljande åren (Fig. 5a). Om man antar att första årets stora skördesänkning främst berodde på matjordspackning, så var alltså den genomsnittliga skördeförlusten pga. alvpackning i dessa försök 2,4 % per år.

Den genomsnittliga relativa skördeförlusten, RSF , i de enskilda försöken under skördeåren 2-12 efter packningen relaterades till förändringen i packningsgraden i skiktet 30-45 cm, ΔD_{Alv} (Fig. 5b):

$$RSF = 0,45 \Delta D_{Alv} \quad (7)$$

Sambandet är svagt. Detta beror troligtvis (1) på de delvis stora temporala skördevariationerna som tidigare nämnts, (2) på de få fältförsök som fokuserar på skördeeffekter av alvpackning, och (3) på svårigheten att isolera effekten av alvpackning från andra faktorer som påverkar skörden.

Skördeförlusterna pga. alvpackning kan tyckas vara små. Alvpackningen är dock nästintill permanent (Håkansson, 2005; Schjønning *et al.*, 2009), dvs. skördeförlusten uppstår år efter år (*cf.* Fig. 5a). En skördeförlust på 2 % per år motsvarar ett helt års totala skördeutfall inom en period av 50 år. Skördeförlusten pga. alvpackning kan också ses så här: anta att en lantbrukare har 100 ha åker, och skördeförlusten pga. alvpackning är 2 %. Detta är lika med en full skörd på 98 ha och en noll skörd på 2 ha.



Figur 5. (a) Genomsnittlig relativ skörd i de svenska alvpackningsförsöken redovisade i Håkansson (1985) och Håkansson & Etana (1994), med ett medeltal för år 2-12 på 97,6 % (dvs. en skördeförlost på 2,4 % per år); och (b) relativ skördeförlost per år som funktion av ändring i alvens packningsgrad.

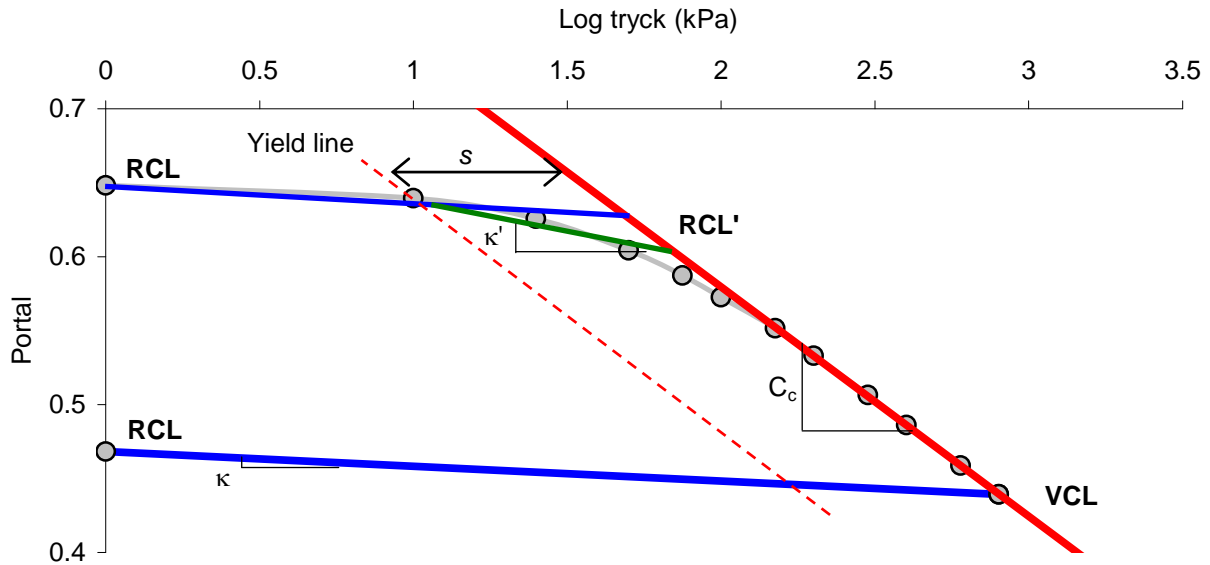
4. TiM-S – En modell för beräkning av tryck i marken, markpackning och dess effekt på skörd

En ny modell, TiM-S, utvecklades, baserad på modellen *SoilFlex* (Keller *et al.*, 2007). Den inkluderar dock nya karakteristiska: förbättrad uppskattning av tryckutbredningen (Keller *et al.*, 2009), uppskattning av markmekaniska egenskaper och uppskattning av skördeeffekter. TiM-S modellen är implementerad i en Excel fil, och innehåller flera makron som är skrivna i Visual Basic. I det följande beskrivs modellens struktur.

TiM-S innehåller följande beräkningssteg: (1) beräkning av kontaktytan mellan däck och mark samt tryckfördelningen i kontaktytan enligt Keller (2005); (2) beräkning av tryckutbredning i marken enligt (Boussinesq, 1885; Fröhlich, 1934; Söhne, 1953), där den s.k. koncentrationsfaktorn bestämdes och uppskattades från data från hjulningsexperiment (Keller *et al.*, 2009); (3) beräkning av deformation och ändring av skrymdensitet enligt O’Sullivan & Robertson (1996), med en funktion för uppskattning av de markmekaniska parametrarna för svenska jordar (se nedan); och (4) uppskattning av skördeförlost, enligt resultaten från denna studie. De första två beräkningsstegen är välbeskrivna i Keller *et al.* (2007) och i slutrapporten från det SLF-finansierade projektet (projnr H0533135) ”En markpackningsmodell som verktyg för lantbrukare och rådgivare” (Keller, 2009), och ska därför inte beskrivas ytterligare här.

4.1 Packning av marken – uppskattning av markmekaniska egenskaper

TiM-S använder sig av en modell av O’Sullivan & Robertson (1996) för beräkning av förändringar av skrymdensitet som funktion av tryck. Modellen är illustrerad i Fig. 6. För att karakterisera markens täthet användes storheten portal, e , som är lika med $e = \rho_s/\rho - 1$, där ρ är skrymdensiteten och ρ_s kompaktensiteten. Tre linjer behövs för att beskriva packningsprocessen (Fig. 6): den s.k. virgin compression line (VCL), den s.k. recompression line (RCL), och den s.k. ”brantare” recompression line (RCL’), vilka beskrivs med följande parametrar (markmekaniska egenskaper). VCL beskrivs med kompressionindexet, C_c , och portalet vid $\sigma = 1$, N . RCL beskrivs med svällningsindexet, κ , och det initiala portalet, e_0 . RCL’ beskrivs med κ' och s (Fig. 6).



Figur 6. Exempel på en kompressionskurva uppmätt i en oedometer (cirklar), och parameterisering enligt O'Sullivan & Robertson (1996). VCL: virgin compression line; C_c : kompressionsindex/lutningen på VCL; RCL: recompression line; κ : svällningsindex/lutningen på RCL; RCL': "brantare" recompression line; κ' : lutningen på RCL'.

Alla dessa parametrar är i de allra flesta fall inte kända *a priori*. Därför analyserades befintlig data för att utveckla funktioner för uppskattning av dessa parametrar. Inom detta projekt analyserades data från 117 individuella markskikt från 16 svenska och fyra danska fält, med en lerhalt mellan 7 och 80 %. På dessa jordar mättes kompressionskurvor (Fig. 6) på ostörda cylindriska jordprover i oedomertest (Eriksson, 1982) på laboratoriet. Resultaten anpassades till Gompertz (1825) ekvation enligt Gregory *et al.* (2006):

$$e = a + c \exp\{-\exp[b(\log \sigma - m)]\} \quad (8)$$

där σ är trycket och a , b , c och m är parametrar. VCL (*cf.* Fig. 6) kan sedan skrivas som (Gregory *et al.*, 2006):

$$VCL : e = \frac{bc}{\exp(1)} \log \sigma + \left(a + \frac{c}{\exp(1)} (1 + bm) \right) = C_c \log \sigma + N. \quad (9)$$

Det s.k. svällningsindexet, κ , (*cf.* Fig. 6) har bara liten effekt på den beräknade skrymdensiteten och varierar bara lite mellan olika jordar (Keller & Arvidsson, 2007). Keller & Arvidsson (2007) analyserade svenska jordar och hittade ett medelvärde för κ på 0,042. I TiM-S används detta värde därför generellt som standardvärde. Lutningen av RCL' bestämdes som (O'Sullivan & Robertson, 1996):

$$\kappa' = \sqrt{C_c \kappa} \quad (10)$$

Data på C_c och N analyserades separat för matjorden respektive alven. För matjorden är det svårt att uppskatta markens mekaniska egenskaper, eftersom de framför allt beror på bearbetning, gröda och väderlek, snarare än på jordarten. Som standardvärde i TiM-S bestämdes därför för

matjorden en genomsnittlig skrymdensitet för olika tidpunkter på växtsäsongen enligt Andersson & Håkansson (1966). Tillhörande värden på C_c och N utvecklades från sambandet mellan C_c och ρ , respektive N och ρ (se t.ex. Keller & Arvidsson, 2007) på analyserade data och redovisas tillsammans med ρ i tabell 1.

För alven bestämdes medelvärden på C_c och N för de olika jordklassarna (tabell 1): styv/mycket styv lera (lerhalt ≥ 40 %), mellanlera ($25 \leq$ lerhalt < 40 %), lättlera ($15 \leq$ lerhalt < 25 %) och sand/mo/mjåla (lerhalt < 15 %). Den sista klassen (lerhalt < 15 %) kunde inte delas in i ”sand”, ”mo” och ”mjåla”, eftersom det fanns för lite data från sådana jordar.

4.2 Uppskattning av skördeeffekter

Effekten på skörden pga. matjordspackning beräknas med hjälp av ekvationerna (1), (3) och (8), där $\rho_{\text{fält}}$ (1) är den från TiM-S beräknade skrymdensiteten efter överfarer med en eller flera lantbruksmaskin(er). TiM-S beräknar effekter av matjordspackning på skörd bara om den initiala skrymdensiteten och markens textur och mullhalt är kända, eftersom osäkerheten annars är för stor. Se också ’Sammanfattning och slutsatser’.

Effekten på skörden pga. alvpackning beräknas med hjälp av ekvationerna (1), (3) och (9). Från den av TiM-S beräknade skrymdensiteten beräknas ΔD_{Alv} för markdjupet 30-45 cm med hjälp av (1) och (3). Därefter kan den relativa skördeförlusten beräknas enligt (9).

I alla beräkningarna av skördeeffekten tas hänsyn till redskapsbredden. Redskapsbredden bestämmer hur stor del av markytan som täcks av körspår, dvs. hur stor andel av den totala markvolymen som eventuellt packas: vid en liten bearbetningsbredd påverkas en stor andel av ytan respektive volymen och vice versa.

5. Sammanfattning och slutsatser

En ny modell, TiM-S (Tryck i Marken och Skörd), för beräkning av tryck i marken och bedömning av skördeeffekter pga packning utvecklades. TiM-S 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. TiM-S är gratis; författaren påtar sig inget ansvar.

TiM-S är baserad på resultat från omfattande fältexperiment och laboratorieundersökningar som utförts i Sverige: (i) mätningar av tryck i kontaktytan mellan däck och mark, (ii) mätningar av tryck på olika djup vid hjulningsexperiment, (iii) laboratorieundersökningar av markmekaniska egenskaper, och (iv) fältförsök för att studera alvpackningens inverkan på skörd.

Tabell 1. Skrymdensitet, ρ , kompressionsindex, C_c , och portal vid $\sigma = 1$, N , i matjorden för olika tidpunkter under växtsäsongen och i alven för olika jordarter

Tidpunkt/jordartsklass	ρ (Mg m ⁻³)	C_c (kPa ⁻¹)	N (-)
Efter gundbearbetning	1,00	0,418	2,03
Såbäddberedning	1,10	0,378	1,48
Mellan sådd och skörd	1,30	0,296	1,47
Vid skörd	1,36	0,272	1,36
Styv lera/mycket styv lera	1,43	0,189	1,18
Mellanlera	1,54	0,181	1,04
Lättlera	1,66	0,167	0,90
Mjåla, mo, sand	1,50	0,280	1,30

Modellen har flera osäkerheter, som mest berör de mekaniska egenskaperna och alvpackningens inverkan på skörd. Markpackning är en markmekanisk process. Därför är det i princip omöjligt att göra prediktioner om hur en mark packas vid körning med lantbruksmaskiner (och vad det har för konsekvenser för markens funktioner och/eller skörden) om man inte känner till markens mekaniska egenskaper. Alvpackningens inverkan på skörd är svårkvantificierbar, eftersom (i) de temporala skördevariationerna är stora, (ii) det bara finns data från ett fåtal fältförsök, och (iii) det är vanskligt att isolera effekten av alvpackning från andra faktorer som påverkar skörden.

För att kunna förbättra markpackningsmodeller är det mycket angeläget att förbättrade funktioner för uppskattning av markmekaniska egenskaper från lättillgängliga markdata och databaser för markmekaniska egenskaper utvecklas. Framtida forskning skulle även kunna belysa matjordens och dess mekaniska och fysikaliska dynamik under växtsäsongen; detta är en mycket viktig aspekt för många agronomiska (växtlighet, skörd) och miljörelaterade processer (erosion, utlakning), som dock ofta försummas. För förbättrade uppskattningar av alvpackningens effekt på skörd krävs det nya långliggande fältförsök.

6. Publicering och resultatförmedling

Projektet resulterade i internationella vetenskapliga publikationer, och delar av resultaten presenterades på en internationell konferens. Ytterligare två vetenskapliga artiklar är planerade, med preliminär titel: "Estimation of compressive properties from the soil particle size distribution, organic matter content and bulk density", respektive: "TiM-S: A model for prediction of soil compaction due to agricultural field traffic including effects on crop yield". Tidigare versioner av modellen/delmodeller har använts i undervisning på SLU i Uppsala och på Swiss College of Agriculture i Zollikofen. Modellen ska läggas ut på Avd f jordbearbetning & hydrotekniks hemsida (under uppbyggnad).

Keller T & Håkansson I (2010) Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma* 154, 398-406.

Keller T & Lamandé M. Challenges in the development of analytical soil compaction models. Submitted to *Soil & Tillage Research*.

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* (ISBN: 978-975F-483-823-7).

Presented at the 18th Conference of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) in Izmir, Turkey, 15-19 June 2009: 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.

Tack till

Jag vill tacka Stiftelsen Lantbruksforskning (SLF) som finansierade detta projekt. Jag vill också tacka Professor Emeritus Inge Håkansson för att jag fick använda hans data och för mycket värdefulla diskussioner.

Litteraturförteckning

Akaike H (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Automatic Control* 19, 716–723.

Andersson S & Håkansson I (1966) Struktur dynamiken i matjorden. *Grundförbättring* 1966:3, 191-228.

Arvidsson J & Håkansson I (1991) A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. *Soil Tillage Res.* 20, 319-332.

Boussinesq J (1885) *Application des Potentiels à l'étude de l'équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques*. Gauthier-Villars, Paris, 30 pp.

- Dexter AR (2004) Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201-214.
- Eriksson J (1982) Markpackning och rotmiljö Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences, Division of Agricultural Hydrotechnics, Uppsala. Report 126.
- Etana A & Håkansson I (1994) Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. *Soil Tillage Res.* 29, 167-172.
- Fröhlich OK (1934) *Druckverteilung im Baugrunde*. Springer Verlag, Wien, 178 pp.
- Gompertz B (1825) On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions Royal Society of London* 115, 513-585.
- Gregory AS; Whalley WR; Watts CW; Bird NRA; Hallett PD & Whitmore AP (2006) Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil Tillage Res.* 89, 45-57.
- Heinonen R (1960) Das Volumengewicht als Kennzeichen der "normalen" Bodenstruktur. *Zeitschrift der Landwirtschafts-wissenschaftlichen Gesellschaft in Finnland* 32, 81-87.
- Håkansson I (1985) Swedish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Use and Management* 1, 113-116.
- Håkansson I (1990) A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Res.* 16, 105-120.
- Håkansson I (2005) Machinery-induced Compaction of Arable Soils. Reports from the Division of Soil Management, SLU, No 109, 153 pp.
- Håkansson I & Lipiec J (2000) A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res.* 53, 71-85.
- Håkansson I, Henriksson L & Gustafsson L (1985) Experiments on reduced compaction of heavy clay soils and sandy soils in Sweden. *Int. Conf. Soil Dynamics Proc.* 17-19 June 1985, Auburn, Alabama, USA, pp. 995-1009.
- Håkansson I, Voorhees WB, Elonen P, Raghavan GSV, Lowery B, van Wijk ALM, 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 Res.* 10, 259-268.
- Jones CA (1983) Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 1208-1211.
- Keller T & Arvidsson J (2007) Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *Eur. J. Soil Sci.* 58, 1373-1381.
- Keller T & Håkansson I (2010) Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma* 154, 398-406.
- 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, 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. *Soil Tillage Res.* 93, 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.*
- Keller T (2009) En markpackningsmodell som verktyg för lantbrukare och rådgivare – Slutrapport, 10 pp.
- Larson WE; Gupta SC & Useche RA (1980) Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 450-457.
- Lipiec J, Håkansson I, Tarkiewicz S & Kossowski J (1991) Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Tillage Res.* 19, 307-317.
- O'Sullivan MF & Robertson EAG (1996) Critical state parameters from intact samples of two agricultural soils. *Soil Tillage Res.* 39, 161-173.
- Perfect E, Kay BD; Ferguson JA, da Silva AP & Denholm KA (1993) Comparison functions for characterizing the dry aggregate size distribution of tilled soil. *Soil Tillage Res.* 28, 123-139.
- Pietola L (1995) Effect of soil compactness on the growth and quality of carrot. Doctoral Thesis. *Agricultural Science in Finland* 4, 139-237.
- Rosin P & Rammler E (1933) Laws governing the fineness of powdered coal. *Journal of Inst. Fuel* 7, 29-36.
- Schjønning P, Heckrath G & Christensen BT (2009) Threats to soil quality in Denmark. DJF-Report Plant Science No. 143. The Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University, Denmark, 121 pp.
- Soane BD (1990) The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil Tillage Res.* 16, 179-201.
- Söhne W (1953) Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen Landtechnik* 5, 49-63.