

Förmedling av kunskap om markpackning: från mätningar till utveckling av beslutsstödsystem

Slutrapport för projekt O-17-23-959; Finansiering: Stiftelsen Lantbruksforskning

Sökande: Thomas Keller¹, Per-Anders Algerbo², Mikael Gilbertsson², Marcus Willert³

Medarbetare i projektet: Marin Sandin¹, Lorena Chagas Torres¹, Lorraine ten Damme¹, Daniel Iseskog¹

¹Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö, Box 7014, 75007 Uppsala

²RISE Research institutes of Sweden AB, Enheten för Jordbruk och Trädgård, Ideon Science Park, 22370 Lund

³HIR Skåne, Borgeby Slottsväg 11, 23791 Bjärred

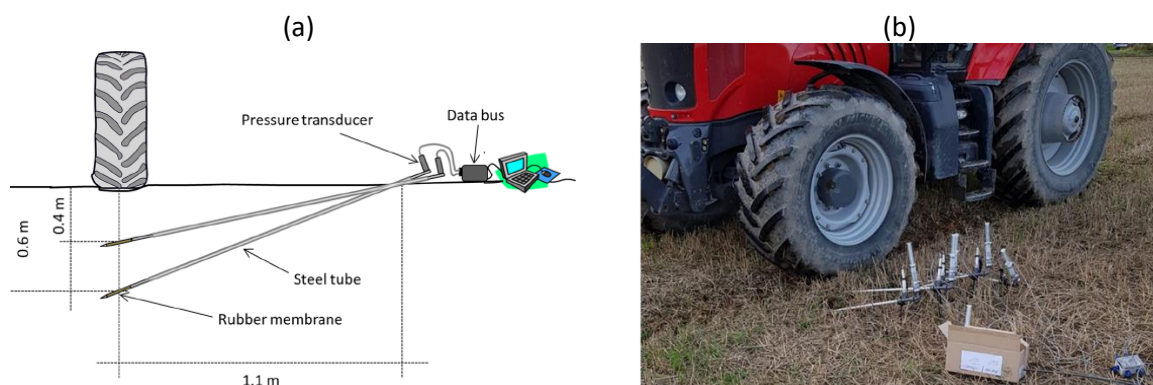
1. Bakgrund och projektets syfte

Markpackning är ett av de största hoten mot markens bördighet (Schjønning *m.fl.*, 2015) och orsaker stora kostnader för lantbrukare och samhället (Graves *m.fl.*, 2015). Eftersom markens funktioner (t.ex. växtproduktion, vattenreglering, klimatreglering) återhämtas mycket långsamt efter en packning (packningseffekter kvarstår i decennier), är det viktigt att undvika markpackning (Schjønning *m.fl.*, 2015). Trots att markpackning är ett relativt väl undersökt tema finns det kunskapsluckor och brist på data, framför allt vad gäller tryck och deformation i marken under fältförhållanden, samt behov för användarvänliga beslutsystem som kan hjälpa lantbrukare att minska risken för markpackning.

Projektets syfte var att (i) förbättra kunskapen om hur trycket utbreder sig i marken och hur marken deformeras vid upprepad belastning (t.ex. flera hjul i samma spår), (ii) utveckla mätsystem för mätningar av tryck och rörelse i marken som kan användas både i forskningssyfte och för demonstrationer vid fältdagar; (iii) vidareutveckla markpackningsmodellen www.terranimio.se, samt (iv) att förmedla kunskap om markpackning.

2. Mätsystem för tryckmätningar och rörelse i marken, som kan användas i forskningssyfte och för demonstrationer vid fältdagar

Inom projektet har vi införskaffat flera så kallade "Bollingsonder" (Bolling, 1987) som kombinerats till ett mätsystem med vilket tryckets mäts i marken på olika djup, med flera sonder samtidigt (figur 1). En Bollingsond mäter ett tryck, p_{Bolling} , som är korrelerat till den genomsnittliga normalspänningen i marken, σ_m (Berli *m.fl.*, 2006), som i sin tur är direkt relaterat till markens volymförändring, dvs. markpackning (Keller *m.fl.*, 2016). För att erhålla σ_m från det uppmätta p_{Bolling} krävs kunskap om markens Poissons konstant, ν (Berli *m.fl.*, 2006): $\sigma_m = [(1 + \nu)/(3 - 3\nu)] p_{\text{Bolling}}$. Poissons konstant kan mätas på ostörda cylinderjordprov i uniaxiala kompressionsförsök på laboratoriet (Eggers *m.fl.*, 2006).



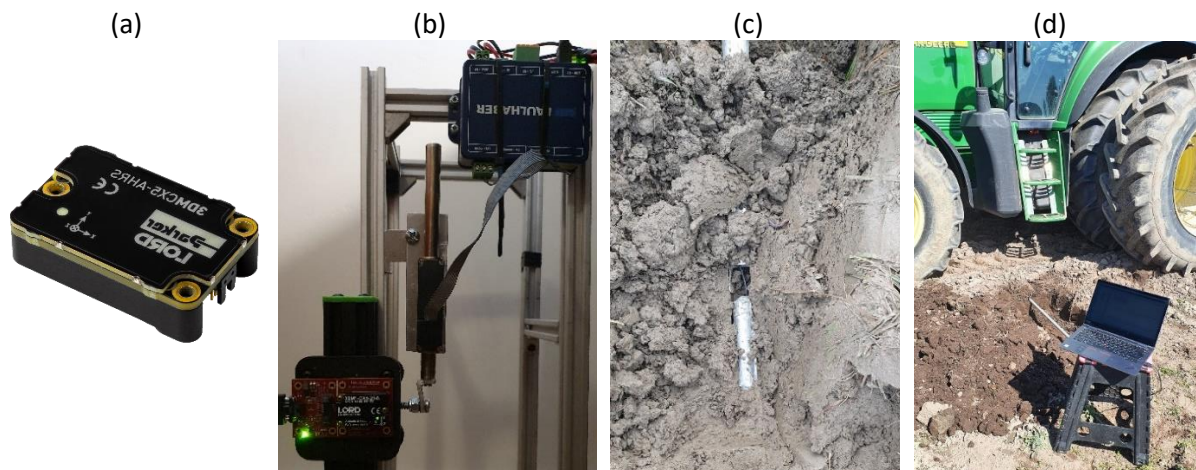
Figur 1. (a) Ett system för att mäta tryck i marken på olika djup med s.k. Bollingsonder (från Keller et al., 2016), (b) exempel från en mätning där den ovanjordiska delen av sonda syns (foto Gabriel Thor).

Typiska värden för Poissons konstant är mellan 0,3 och 0,4 för jordbruksmark (ofta antas ett värde på 0,33) (Keller *m.fl.*, 2016), och därför kan man lätt uppskatta σ_m från p_{Bolling} även när man inte mäter Poissons konstant. Vid fältdemonstrationer går det även bra att direkt jämföra p_{Bolling} , t.ex. när effekten av hjullast eller olika ringtryck ska visas – de relativa skillnaderna blir desamma oavsett om p_{Bolling} eller σ_m jämförs.

För att bestämma eventuell bestående markpackning, men även elastisk deformation efter hjulöverfart i marken konstruerades ett sensorsystem där jordens förflyttning bestäms med hjälp av en tredimensionell accelerometer. Flera olika accelerometrar införskaffades och testades. Den slutligt valda accelerometern var en accelerometer från Lord Sensing System, 3DM-CX5-25. Accelerometern är relativt liten, 10 mm x 20 mm x 40 mm och sensorn har ett mätområde på $\pm 8g$, en upplösning på $<0,1g$ och en maximal mätfrekvens på 1000 Hz vilket visade sig vara lämpligt för avsedda deformationsmätningar. Sensorn anslöts via sladd till en mät dator.

Accelerometern testades först i en kontrollerad miljö där en testrigg med en linjärmotor byggdes. Med testtriggen kunde en kontrollerad rörelse skapas. Med hjälp utav accelerometern kunde sedan linjärmotorns förflyttning mätas och verifieras. Accelerationen registrerades kontinuerligt i en riktning varvid hastighet och sträcka kan bestämmas. För att bestämma förflyttning användes ekvationen för likformig föränderlig rörelse $s = (a \times t^2)/2$, där s är sträcka, a är acceleration och t är tid. Noggrannheten i rörelsen uppmättes till ca 10%, dvs en förflyttning på 20 mm fram och åter beräknades till 2 mm avvikelse efter rörelsetestet. Vid beräkning av förflyttning är drift ett känt problem som måste tas hänsyn till. Ett sätt att lösa det är att behandla varje mätning separat och tarera efter varje mätning. Vid små accelerationer blir mätbruset stort i förhållande till mätdata vilket kan verka begränsande på mätningarna.

Vid fältmätning skyddades accelerometern från jord, fukt och mekaniska trycksador genom att placeras i ett aluminiumrör. Ett borr med 50 mm diameter konstruerades för att kunna borra horisontella hål i jorden under ytan för den tänkta hjulöverfarten. Mätningar kunde utföras på två djup samtidigt (t.ex. 20 och 40 cm). Med hjälp av ett aluminiumrör fördes sensorn på plats under hjulspåret för mätning, se figur 2. Materialet aluminium användes för att undvika magnetisk inverkan på sensorn.



Figur 2. (a) En 3DM-CX5-25 sensor. (b) För test av mätning i kontrollerad miljö och verifiering av rörelse/förflyttning placerades sensorn i en rigg varvid den förflyttades en känd sträcka med hjälp av en linjärmotor. (c) Sensorn frilagd efter mätning och (d) sensorn med mät dator vid traktoröverfart.

3. Marktryck och deformation vid upprepad belastning

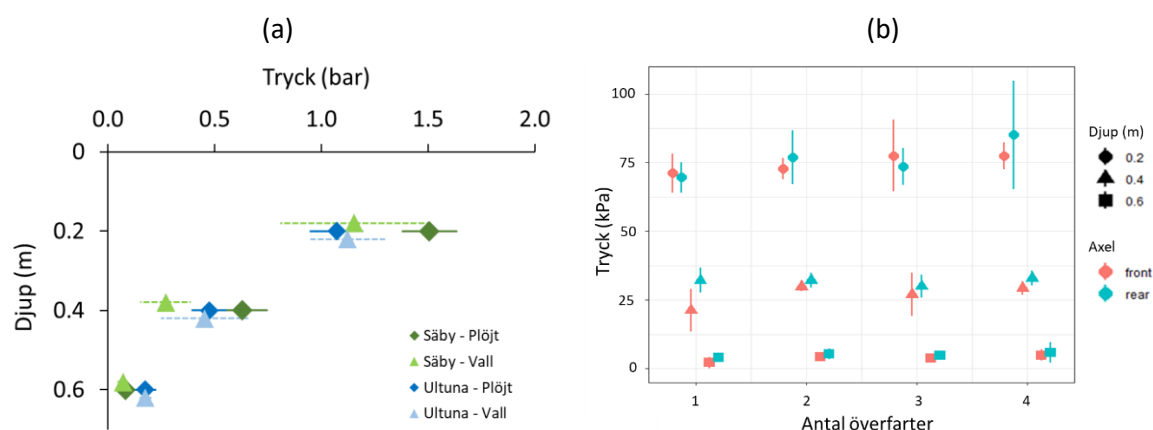
För att undersöka hur upprepad belastning påverkar tryck i marken och markens mekaniska beteende utfördes fältexperiment och det gjordes uniaxial kompressionsförsök med ostörda cylinderprov på laboratoriet. Fältförsöken gjordes i långliggande försök som etablerades 1997 (försöksserie R2-7115)

där vi kunde testa hur markstruktur (långvarig vall vs. bearbetad mark), jordart (lätthet vs. styv lera) och olika tryckbelastning (skillnader i hjullast) påverkar trycket på olika djup i marken och vad det har för konsekvenser för markens deformation. Vid laboratoriemätningar kunde vi undersöka inverkan av markens fuktighet genom att göra uniaxial kompressionstest vid olika initiala vattentensioner.

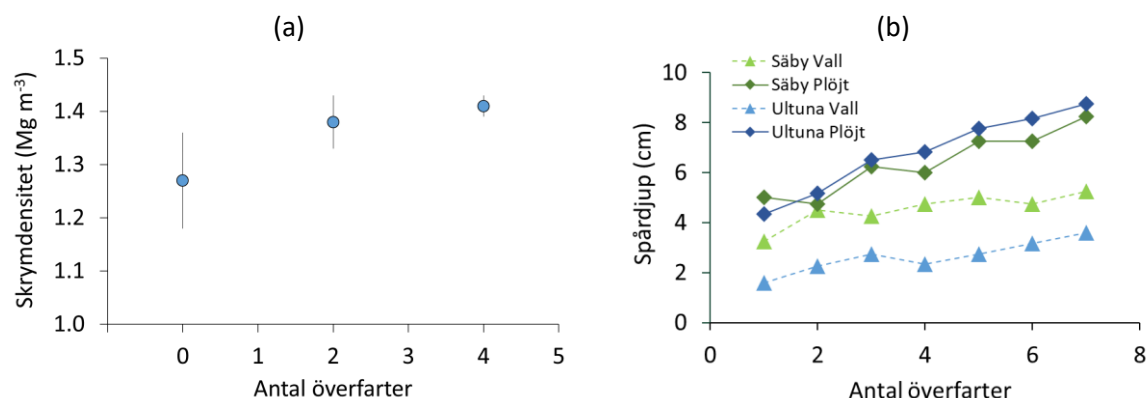
Resultaten från tryckmätningarna visade att marktrycket främst är en funktion av belastningen, dvs. hjullast, kontaktyta och kontakttryck mellan däck (eller band) och mark, och att markens egenskaper (figur 3a) eller antal överfarter har mindre betydelse (figur 3b). Mätningar som vi utförde inom projektet tillsammans med forskare i Schweiz (Lüthi, 2019) och Frankrike (Sandin *m.fl.*, 2019) visar liknande resultat. I ett långliggande försök som etablerades 1994 på en lerig mo (Martínez *m.fl.*, 2016) fann vi inga signifikanta skillnader i tryck mellan direktsådd och plöjt, förutom ett lägre tryck i det plöjda systemet nära markytan som förklarades med större kontaktyta och lägre kontakttryck pga. en mjukare jord jämfört med den direktsådda jorden som aldrig bearbetas (Lüthi, 2019). Mätningar med skogsmaskiner visade att trycket i marken inte ändras nämnvärt vid upprepade överfarter, förutom när marken är väldigt mjuk (fuktig jord) och djupa spår bildas (Sandin *m.fl.*, 2019). Inom detta SLF projektet har vi tillsammans med forskare i Danmark även undersökt hur däcksegenskaper påverkar tryck i marken och kommit fram till att det inte är däckskonstruktionen i sig som spelar roll, utan vilket ringtryck som däckskonstruktionen tillåter (ten Damme *m.fl.*, 2020)

Markens egenskaper (jordart, struktur, fuktighet) kan dock påverka också marktrycket, till exempel innebär en högre hållfasthet vid markytan (dvs. hårdare jord, pga. högre skrymdensitet och/eller torrare mark) än mindre kontaktarea mellan däck och mark och därför ett högre kontakttryck, vilket skulle kunna förklara skillnaden mellan "plöjt" och "vall" på "Säby" i figur 3a. En mjukare jord (lägre hållfasthet) innebär å andra sidan djupare spår, vilket innebär högre tryck i alven eftersom alven då är "närmare" däck (Keller *m.fl.*, 2014; Naderi-Boldaji *m.fl.*, 2018). Våra mätresultat är i linje med tidigare modellsimuleringar som tyder på att tryckutbredningen i marken inte påverkas av markens mekaniska egenskaper i större utsträckning under "normala" markförhållanden (Keller *m.fl.*, 2014, 2016). Det har dock visats att trycket kan spridas långt ner till alven på lerjordar under mycket torra förhållanden med djupa sprickor (Trautner & Arvidsson, 2003). Även om trycket i marken ofta inte är starkt påverkat av markens egenskaper, så har markens egenskaper en stor inverkan på markens deformation.

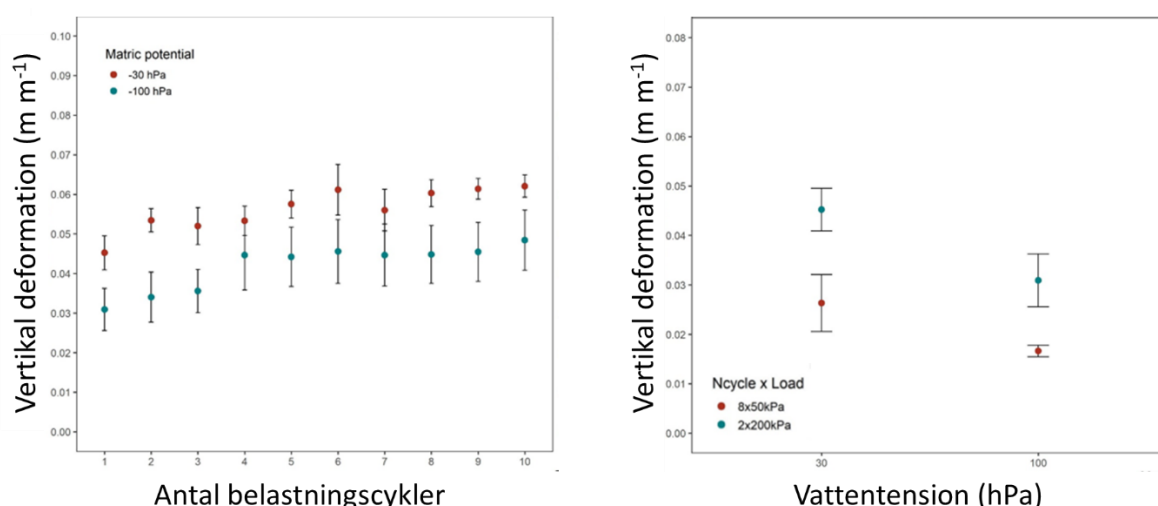
Markens deformation och därmed markens skrymdensitet ökar med varje överfart (figur 4a), även om trycket inte ökar med antal överfarter (figur 3b). Likaså ökar spår djupet med antal överfarter (figur 4b): ökningen avtar med antal överfarter, men det totala spår djupet blir större och större. I figur 4b ser vi att markens struktur och förhållanden påverkar markens deformation, med större deformation i mjukare (bearbetad) jord och betydligt mindre spår djup i långliggande vall.



Figur 3. (a) Tryck som funktion av djup vid överfart av en traktor (totalvikt 9,5 ton) på en lätthet ("Säby") och en styv lera ("Ultuna") i försöksrutor med permanent vall (ingen bearbetning på 23 år) eller växtföljd med konventionell bearbetning ("plöjt"). (b) Marktryck på olika djup för framaxeln (hjullast 1,7 ton) och bakaxeln (hjullast 2,2 ton) på en traktor som funktion av antal överfarter.



Figur 4. (a) Skrymdensitet (10 cm djup) som funktion av antal överfarter (traktor med totalvikt på 7,8 ton) i försöket på en styv lera. (b) Spår djup som funktion av antal överfarter på lättlera ("Säby") och styv lera ("Ultuna") i obearbetad jord (23 permanent vall, "Vall") och bearbetad jord ("Plöjt").

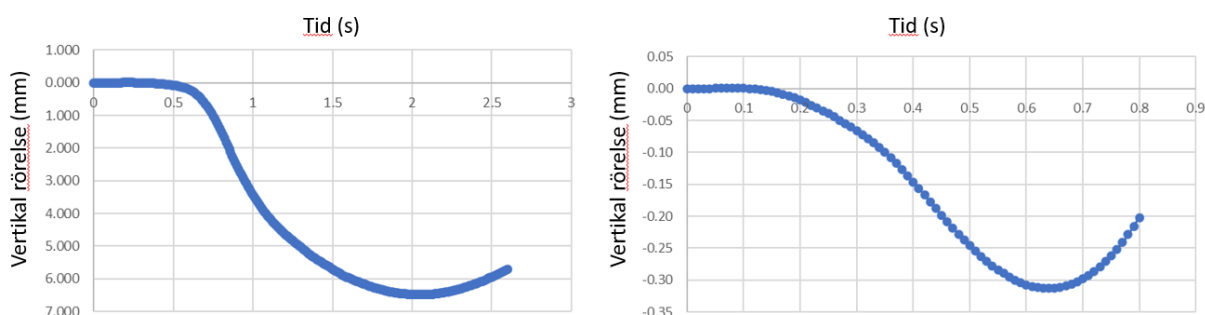


Figur 5. (a) Vertikal deformation som funktion av antal belastningscykler (varje cykel innebär en belastning till ett tryck på 200 kPa följt av en fullständig avlastning) för en lättlera vid två olika fuktigheter (30 och 100 hPa vattentension). (b) Den totala deformationen är större om jordprovet belastas två gånger till 200 kPa jämfört med om det belastas åtta gånger till 50 kPa (i båda fallen är den sammanlagda belastningen 400 kPa).

Dessa resultat från fältförsök stöds av resultat från uniaxiala kompressionsförsök på ostörda cylindriska jordprov (figur 5). Marken deformeras vid varje överfart/varje belastning (figur 4, figur 5a). Den största deformationen sker vid den första belastningen (figur 5a). I exemplet som visas i figur 5a är den deformation som tillkommer vid varje belastning små efter 2-3 belastningscykler. Som följd är den totala deformationen större vid en eller två överfarter med hög tryckbelastning jämfört med många överfarter med mindre tryckbelastning (figur 5b). Under blöta förhållanden och vid många överfarter med skogsmaskiner har vi dock observerat att markens deformation "plötsligt" kan öka när markens hållfasthet minskar pga. kraftiga skjuvdeformationer och marken börjar "flyta" (Sandin *m.fl.*, 2019), någonting som även har uppmärksamats av Horn (2003).



Figur 6. Mätning av rörelse/deformation i marken vid överfart med traktor på två djup. Övre respektive nedre figur till höger visar accelerationen för 20 cm respektive 40 cm djup.

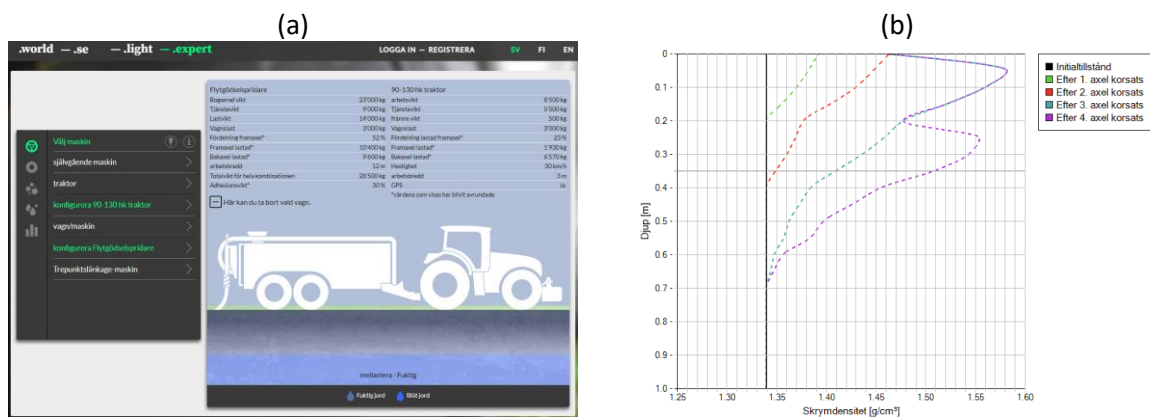


Figur 7. Exempel på vertikal rörelse i marken på 20 cm (vänster) och 40 cm djup (höger) vid överfart med framhjul.

Mer information om markens mekaniska beteende under belastning kan fås genom direkt mätning av rörelse i marken. Ett exempel på genomfört fältexperiment visas i figur 6. Med sensorerna placerade på 20 och 40 cm djup kördes en traktor (hullast ca. 3000 kg fram, 3400 kg bak; ringtryck 180 kPa fram och 130 kPa bak). Vid mätningarna på 40 cm djup är bruset i mätdata relativt stort i förhållande till utslag vid hjulöverfarten, vilket kan påverka osäkerheten i beräkningen av rörelsen. På 20 cm djup bestämdes den uppmätta rörelsen mellan 4 och 9 mm vid överfarterna, medan rörelsen bestämdes till mindre än 1 mm på 40 cm djup (figur 7). Viss rörelse i marken blir bestående efter hjulöverfarten, men det noteras även att en del av rörelsen är elastisk, dvs marken fjädrar tillbaka, efter att hjulet har passerat. Rörelsen i marken vid en viss punkt sker under en längre tid vid hjulöverfarten ju närmre ytan den befinner sig. Likaså kan sensorn komma att roteras ju närmre markytan den placeras. Sensorns rotation registreras med gyro, vilket utnyttjas för kontroll så sensorn inte har roterat och accelerometrarnas riktning förändrats. Vid 20 cm djup noterades en rotation om 0,1 grad. Vid 40 cm djup var rotationen 0,05 grader. Rotationen är så liten att den inte har påverkan på riktningen och därmed storleken på den beräknade rörelsen vertikalt. Med större rotation kan fler accelerometrar utnyttjas samtidigt med information från gyro för att bestämma riktningen för vertikal förflyttning.

4. Beslutsstödsystemet Terranimo®

Terranimo® är ett online beslutsstödsystem för att uppskatta risken för markpackning vid körning i fält (Stettler *m.fl.*, 2014). Terranimo® är fritt tillgänglig på www.terranimo.se och kan användas i version "light" (för en snabb bedömning, utan att behöva mata in exakta maskin- och markegenskaper) och i version "expert" där en lantbrukare kan lägga in sina egna maskiner och jordarter. Inom detta SLF-projekt har Terranimo® fått ett helt nytt användargränssnitt som är både modernare och mera intuitivt än tidigare versioner (figur 8a).



Figur 8. Skärmdumpar från www.terranimio.se som visar a) hur man väljer maskin, och (b) resultat från en simulering som visar hur markens skrymdensitet förändras efter varje överfart.

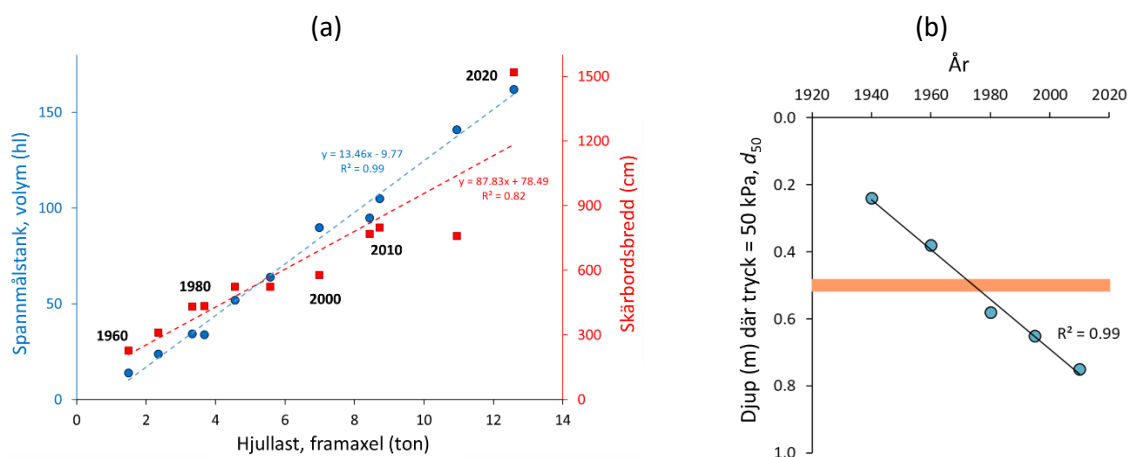
I samband med detta har vi även lagt till standardvärden för textur, mullhalt och skrymdensitet för svenska jordar, där skrymdensiteten och mullhalten uppskattades för varje jordart enligt Keller & Håkansson (2010). Vid framtagandet av det nya användargränssnittet har det tagits hänsyn till synpunkter från lantbrukare och rådgivare. Den nya versionen är programmerad så att Terranimo® kan användas på mobiltelefonen, en viktig egenskap om vi vill att Terranimo® ska användas av lantbrukare. Arbetet har gjorts i samarbete med forskare i Schweiz samt mjukvaruutvecklare från www.afca.ch. Tack vare ett samarbete med forskare från Finland har Terranimo® nu även översatts till finska.

Terranimo® har även funktionellt vidareutvecklats, så att Terranimo® nu kan simulera effekter av flera överfarter (flera hjul i samma spår) vilket redovisas som förändringar i skrymdensitet (figur 8b). För att kunna beräkna en förändring i skrymdensitet behöver modellen uppskatta markens mekaniska egenskaper (kompressionsindex, förkonsolideringstryck) med hjälp av så kallade "pedotransfer-funktioner", som togs fram inom projektet. Modellen beräknar de markmekaniska egenskaperna från markens lerhalt, mullhalt, skrymdensitet och vattenhalt. Med denna nya funktion i Terranimo® får användaren inte bara information om tryck i marken och risken för markpackningsrisken, utan även en indikation om marken kommer att deformeras och hur skrymdensiteten förändras efter varje överfart.

5. Hur har utveckling av lantbruksmaskiner påverkat marktryck och risken för markpackning?

Effektiviseringen i lantbruket har varit enorm sedan mitten av förra seklet (figur 9a): traktorer har mycket större motoreffekt och skördetröskor har ökat i kapacitet. Kapacitetsökningen har dock inneburit att lantbruksmaskiner har blivit allt tyngre, och idag finns maskiner med hjullaster över 10 ton (figur 9a). Detta har i sin tur medfört en ökning av tryckbelastningen i marken, speciellt i alven (figur 9b; Keller *m.fl.*, 2019; Keller & Or, 2022). Trycket i alven är mest beroende av hjullasten och påverkas i mindre grad av däcksegenskaper och ringtryck (t.ex. Keller & Arvidsson, 2004).

Genom modellsimuleringar har vi visat att ökningen av trycket i marken har lett till att jordbruksmarken har blivit mer kompakt, vilket medför ökat mekaniskt motstånd för rötter, försämrade gasutbyte mellan mark och atmosfären och minskad vatteninfiltration och vattenmagasinerings (Keller *m.fl.*, 2019). Detta resulterar i betydande kostnader i form av bl.a. skördeminskningar och ökad risk för översvämningar (Keller *m.fl.*, 2019). Risken för markpackning är stor i regioner där moderna (dvs stora och tunga) lantbruksmaskiner används och där klimatet medför fuktiga markförhållanden vid tidpunkter för bearbetning, skörd eller gödselspridning, som i Sverige (Keller & Or, 2022). Genom att kombinera enkla ekonomiska beräkningar och simuleringar med markpackningsmodeller och markväxt-modeller kunde vi visa att det finns en "ekonomiskt optimal packningsgrad" och att denna bl.a. beror på hur bra lantbrukarna får betalt för skörden (Parvin *m.fl.*, 2022): skulle man t.ex. få ett högre pris per ton spannmål skulle en skördesänkning pga. markpackning väga tyngre, så att mindre maskiner som leder till mindre markpackning skulle löna sig.



Figur 9. (a) Kapacitetsökningen av skördetröskor (år anger tröska för respektive tid) har medfört en ökning av tröskornas vikt, som (b) har resulterat i att ett visst tryck springs längre och längre ner i alven.

6. Förmedling av kunskap om markpackning och resultatförmedling

Ett specifikt mål med detta projekt var att förmedla kunskap om markpackning. Vilka faktorer påverkar trycket i marken och vad avgör om och hur marken deformeras? Covid-pandemin medförde tyvärr inställda fältdagar. Vi har skrivit artiklar, både i vetenskapliga tidskrifter och svenska lantbrukstidskrifter, hållit eller deltagit i webinarier och kunnat delta vid fältdagar när tillfället gavs. Tack vare projektförlängningen kunde vi demonstrera marktryckmätningar och förmedla kunskap om markpackning på Borgeby fältdagar 2022 inför stor publik (figur 10) med stort medieintresse.



Figur 10. Förmedling av kunskap kring markpackning inklusive live demonstration av tryckmätningar vid Borgeby fältdagar 2022 (foton: Marcus Willert, HIR Skåne).

Vetenskapliga artiklar

- 1) Keller, T. & Or, D., 2022. Farm vehicles approaching weights of sauropods exceed safe mechanical limits for soil functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119, e2117699119. *Artikeln har uppmärksammats i media i Sverige (bl.a. Lantbruksnytt, ATL) och hela världen (bl.a. BBC, der Spiegel, 3Sat, National Geographic, m.fl.).*
- 2) Parvin N., Coucheney E., Gren I.-M., Andersson H., Elofsson K., Jarvis N. & Keller T., 2022. On the relationships between the size of agricultural machinery, soil quality and net revenues for farmers and society. *Soil Security*, 6, 100044. *Artikeln listas som "most popular article" i Soil Security.*
- 3) Lima R.P., Keller T., 2021. Soil stress measurement by load cell probes as influenced by probe design, probe position, and soil mechanical behaviour. *Soil & Tillage Research*, 205, 104796.

- 4) ten Damme L., Stettler M., Pinet F., Vervaet P., Keller T., Munkholm L.J. & Lamandé M., 2020. Construction of modern wide, low-inflation pressure tyres per se does not affect soil stress. *Soil & Tillage Research*, 204, 104708.
- 5) Keller T., Sandin M., Colombi T., Horn R. & Or D., 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil & Tillage Research*, 194, 104293. *En av de mest citerade artiklar från 2019 i Soil & Tillage Research (citerat 201 ggr enligt Google Scholar, 2022-12-19), har också citerats i policydokument, bl.a. i rapporter av FAO.*
- 6) Lima R.P., Keller T., 2019. Impact of sample dimensions, soil-cylinder wall friction and soil elastic properties on stress and bulk density in uniaxial compression tests. *Soil Tillage Res.*, 189, 15-24.
- 7) ten Damme L., Stettler M., Pinet F., Vervaet P., Keller T., Munkholm L.J. & Lamandé M., 2019. The contribution of tyre evolution to reduction of compaction risks. *Soil Tillage Res.*, 194, 104283.

Bokkapitel

- 1) Stolte, J., Tesfai, M., Panagos, P., ten Damme, L., Daliakopoulos, I.N., Torres, L.C., Lamandé, M. & Papadimitriou, D., 2022. Regional case studies – Europe. In: Dang, Y., Menzies N. & Dalal R. (eds.) *Soil Constraints to Crop Production*. Cambridge Scholar, ISBN (10): 1-5275-8706-1, pp. 38-61.
- 2) Keller T., Lamandé M., Naderi-Boldaji M. & Lima R.P. 2022. Soil compaction due to agricultural field traffic: an overview of current knowledge and techniques for compaction quantification and mapping. In: Saljnikov E., Lavrishchev A. & Mueller L. (eds.) *Advances in Understanding Soil Degradation*. Springer book series, ISSN 2524-5155, pp. 287-312.

Examensarbeten

- 1) Hidén, A., 2022. Effekt av upprepad belastning och på jorddeformation och stress – fältförsök med upprepad körning i kombination med olika hjullaster på en mellanlera utanför Uppsala. SLU, Inst. mark och miljö, 53 pp. (Handledare: Loraine ten Damme, Lorena Chagas Torres, Thomas Keller)
- 2) Thor, G., 2022. Effekten av markpackning på konventionellt jordbearbetad mark och permanent vall – en fältstudie. SLU, Inst. mark och miljö, 37 pp. (Handledare: Maria Sandin, Thomas Keller)

Populärvetenskapliga artiklar och bidrag i tidskrifter, tidningar, nyhetsbrev och tv

- 1) Keller, T. & Larsbo, M., 2022. Hur påverkar jordbearbetningen markstrukturen? *Arvensis*, 06/2022, 10-12.
- 2) Arrázola-Vásquez, E.M. & Keller T., 2021. Markpackning minskar daggmaskarnas rörelse. *Väderstad Inför vårbruket 2021*, 46-49.
- 3) Colombi, T., Sjulgård, H. & Keller, T., 2020. Trycket på rötterna ökar. *Arvensis*, 06/2020, 8-10.
- 4) Keller, T., 2020. Räkna ut din markpackning. *Arvensis*, 06/2020, p. 11.
- 5) Willert, M., 2019. Conservation Agriculture – något för alla? *Arvensis*, 4/5 2019.
- 6) Keller, T. & Sandin, M., 2018. Markpackning – sker på sekunder men kvar i decennier. *Arvensis*, 03/2018, 28-31.

Projektet har uppmärksamats genom artiklar, nyhetsbrev och TV-inslag – ett urval:

- 1) Bidrag från Borgeby Fältdagar 2022 i *Lantbruksnytt*: <https://lantbruksnytt.se/tv/video/2740/>
- 2) Borgeby special i ATL TV: <https://www.atl.nu/borgeby-special-markpackning-energimarknaden-och-valldemo?token=premiumToken-PRCR-AucF49Su> och <https://www.atl.nu/rise-och-slu-bakom-ny-forskning-om-markpackning>
- 3) Bidrag i ATL TV: <https://www.atl.nu/tunga-maskiner-kan-knacka-matproduktionen?token=premiumToken-QmtFnh3ZYktIH>
- 4) *National Geographic*: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/increasingly-heavy-farm-equipment-is-crushing-fertile-soils>
- 5) Artikel *World Economic Forum*: <https://www.weforum.org/agenda/2022/05/modern-farm-vehicles-dinosaurs-damage-soil-decades-study/>
- 6) Bidrag i BBC: <https://www.bbc.com/news/science-environment-61468116>
- 7) Artikel i *Science*: <https://www.science.org/content/article/big-tractors-now-heavier-many-dinosaurs-can-damage-deep-soil>

- 8) Jordbrukets massiva maskiner äventyrar livsmedelsförsörjningen. *forskning.se*, maj 2022
- 9) Unvik markpackning med god planering. *Landbygdens Folk*, 10 December 2020, <https://www.landsbygdensfolk.fi/nyheter/undvik-markpackning-med-god-planering>
- 10) Bra markstruktur kommer att bli allt viktigare i växtodlingen. *Lantmännen*, December 2019.

Muntliga presentationer vid vetenskapliga konferenser och seminarier

- 1) EGU General Assembly, Wien och online, 23-27 maj 2022: *Soil compressive behavior: a global assessment of research outputs* (*Lorena Chagas Torres, Loraine ten Damme, Alena Holzknecht, Maria Dietrich, Attila Nemes & Thomas Keller*)
- 2) Red International para el Estudio de la calidada Física de Suelos Volcánico (REDES), webinar, 20 jan 2022: *Mechanisms and rates of soil structure recovery following compaction* (*Thomas Keller*)
- 3) Seminar of the Soil Science Society of Norway, Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norge, 22 maj 2019: *Historical increase in agricultural machinery weights: impacts on soil compaction levels and consequences for soil functioning* (*Thomas Keller*)
- 4) 21st Conference of the International Soil Tillage Research Organization, Paris, 24-27 sept 2018: *Soil stress, compaction costs and soil structure recovery* (*Thomas Keller, invited keynote lecture*)
- 5) 9th International Biosystems Conference, Tartu, Estland, 9-11 maj 2018: *Soil compaction: causes, costs and prevention* (*Thomas Keller, invited keynote lecture*)

Seminarier och fältdagar för lantbrukare och rådgivare

- 1) Borgeby fältdagar, 28-29 juni 2022: *Markpacknings demo* (*Thomas Keller, Loraine ten Damme, Lorena Chagas Torres, Per-Anders Algerbo, Mikael Gilbertsson, Marcus Willert*)
- 2) Northern Soil compaction conference, University of Minnesota Extension, 26 januari 2022: *Terranimo Table Talk* (*Thomas Keller*) och 27 januari 2022: *Soil Compaction: Causes, consequences and avoidance* (*Thomas Keller*)
- 3) Webinarium/utbildning för Jordbruksverket, oktober 2021: *Konsekvenser av och åtgärder för att minska markpackning* (*Thomas Keller, Loraine ten Damme*)
- 4) Webinarium/utbildning för LRF, oktober 2021: *Markpackning* (*Thomas Keller*)
- 5) Webinarium Baltic Sea Action Group, 26 november 2020: *Bättre skördar genom minskad markpackning och förbättrad markstruktur* (*Thomas Keller*)
- 6) Gröna möten, Roma (Gotland), 5 mars 2020: *Jordhälsa – och hur den påverkas av markpackning och jordbearbetning* (*Thomas Keller*)
- 7) Demodag Bjärstad gård, Östergötland, 2019 (*Per-Anders Algerbo, Mikael Gilbertsson*)
- 8) Partnerskap Alnarp SLU, Alnarp, 6 mars 2019: *Framtidens etablerings- och jordbearbetningsmetoder* (*Marcus Willert*)
- 9) Greppa Näringen, 13 november 2018: *Webinar Terranimo* (*Thomas Keller*)
- 10) Seminarium/Temadag "Vatten i balans", Linköping, organiserad av Odling i Balans, 2018. <https://www.odlingibalans.com/temadagar-seminarium-%C3%A5rsm%C3%B6ten/temadag-2009-2019/2018-tema-vatten,-presentationerna-38037620> (*Per-Anders Algerbo, Mikael Gilbertsson*)
- 11) Vårupptakt 2018, HIR Skåne för kunder och lantbrukare, fyra olika platser i Skåne: *Hur hanterar vi sönderkörda fält? Rekommendationer för jordbearbetning* (*Marcus Willert*)

Undervisning på SLU

Resultat eller delar av resultat från detta projekt har använts i undervisning av agronomiestudenter vid SLU i Uppsala inom kurserna "Växtproduktion" och "Marken i odlingen".

7. Slutsatser

Markpackning är ett hot mot markens produktionsförmåga. Inom detta projekt har vi utvecklat och testat sensorer för att mäta tryck och rörelse i marken. Mätutrustningen har använts i fältexperiment och för demonstrationer vid fältdagar. Att kunna visa tryck i marken och hur marken rör sig vid överfart med olika maskiner, olika däck eller ringtryck är värdefullt vid fältdagar för att öka kunskap och

medvetenhet om markpackning och dess negativa effekter. Fältexperimenten fokuserade på att undersöka marktrycket och markens deformation under upprepade belastning (flera maskinöverfarter). Fältundersökningarna kompletterades med uniaxiala kompressionstest på laboratoriet. Slutsatsen från dessa studier var att trycket i marken inte ändrar sig med antal överfarter (förutsatt små spår djup) men att deformationen i marken ökar vid varje överfart. Deformationen var störst för den första tryckbelastningen och relativt små efter två-tre belastningar. Våra resultat tyder på att flera överfarter med mindre last leder till mindre deformation än en överfart med stor last, vid samma ackumulerade tryckbelastning. Fler mätningar på olika jordar och förhållanden skulle dock behövas. Inom projektet kunde vi också visa att utvecklingen mot allt större och därmed tyngre lantbruksmaskiner leder till högre och högre tryck, speciellt i alven, vilket medför negativa konsekvenser på växtproduktion, vattenreglering och andra markfunktioner.

Tack till

Vi vill tacka Stiftelsen Lantbruksforskning (SLF) som finansierade detta projekt (projekt no. O-17-23-959). Vi tackar Albin Hidén och Gabriel Thor som har gjort sina Mastersarbeten inom projektet, John Löfkvist och team på SLU Lövsta fältforskningsstation för hjälp vid fältmätningar, HIR Skåne AB och alla som har hjälpt till vid Borgeby fältdagar 2022, alla medförfattare, samt projektets referensgrupp Pernilla Kvarnmo (Jordburksverket), Martin Terning (Continental Tyres), Thony Ljungh (Gripen Wheels), Jan Jönsson (Lydinge Jordbruk AB) och Stefan Ranch (By Ranch AB).

Litteratur (för egna publiceringar från projektet se "6. Förmedling av kunskap om markpackning och resultatförmedling")

- Berli M., Eggers C.G., Accorsi M.L., Or D., 2006. Theoretical analysis of fluid inclusion for in situ soil stress and deformation measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1441-1452.
- Bolling, I. 1987. Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen: Neue Mess- und Rechenmethoden. Diss. Technische Univ. München, München, Germany.
- Eggers C.G., Berli M., Accorsi M.L., Or D., 2006. Deformation and permeability of aggregated soft earth materials. *Journal of Geophysical Research*, 111, B10204.
- Graves A.R., Morris J., Deeks L.K., et al. 2015. The total costs of soil degradation in England and Wales. *Ecological Economy*, 119, 399-413.
- Horn R., 2003. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma*, 116, 77-88.
- 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., 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, 191-206.
- Keller T., Lamandé M., Arvidsson J., et al., 2014. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil & Tillage Research*, 140, 106-117.
- Keller T., Ruiz S., Arvidsson J., et al., 2016. Determining soil stress beneath a tire: measurements and simulations. *Soil Science Society of America Journal*, 80, 541-553.
- Lüthi A., 2019. Understanding Stress Propagation and Compaction in Agricultural Soils – Comparing a Ploughed and a No-Till Soil. MSc thesis, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), 19 pp.
- Martínez I., Chervet A., Weisskopf P., et al., 2016. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile. *Soil & Tillage Research*, 163, 141-151.
- Naderi-Boldaji M., Kazemzadeh A., Hemmat A., et al., 2018. Changes in soil stress during repeated wheeling: A comparison of measured and simulated values. *Soil Research*, 56, 204-214.
- Sandin M., Ruch P., Stettler M., Pousse N., Keller T., 2019. Rut depths and impacts on soil properties due to forwarder traffic. Report "Efficient forestry by precision planning and management for sustainable environment and cost competitive bio-based industry (EFFORTE)", Luke, Finland.
- Schjønning P., van den Akker J.J.H., Keller T., et al. 2015. Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction – a European perspective. *Advances in Agronomy*, 133, 183-237.
- Stettler M., Keller T., Schjønning P., et al., 2014. Terranimo® – a web-based tool for evaluating soil compaction. *Landtechnik*, 69, 132-138.
- Trautner A., Arvidsson J., 2003. Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. *Soil & Tillage Research*, 73, 107-118.