



Effekter av upprepad belastning på jorddeformation och stress

– Fältförsök med upprepad körning i kombination
med olika hjullaster på en mellanlera utanför
Uppsala

*The physical effect of repeated loading on soil stress and soil deformation
-A field trial on repeated wheeling in combination with different wheel
loads on a loamy clay field outside Uppsala*

Albin Hidén

Examensarbete • 30 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
NJ-fakulteten, institutionen för mark och miljö
Agronomprogrammet: mark/växt
Serietitel, arbetets nummer i serien•2022:13
Uppsala 2022



Effekt av upprepad belastning på jorddeformation och stress- Fältförsök med upprepad körning i kombination med olika hjullaster på en mellanlera utanför Uppsala.

The physical effect of repeated loading on soil stress and soil deformation-A field trial on repeated wheeling in combination with different wheel loads on a loamy clay field outside Uppsala

Albin Hidén

Handledare: Loraine ten Damme, SLU, institutionen för mark och miljö
Bitr. handledare: Lorena Chagas Torres, SLU, institutionen för mark och miljö
Bitr. handledare: Thomas Keller, SLU, institutionen för mark och miljö
Examinator: Mats Larsbo, SLU, institutionen för mark och miljö

Omfattning: 30 hp
Nivå och fördjupning: Avancerad A2E
Kurstitel: Självständigt arbete i markvetenskap
Kurskod: EX0881
Program/utbildning: Agronomprogrammet mark/växt
Kursansvarig inst.: Institutionen för vatten och miljö

Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2022
Omslagsbild: Albin Hidén
Serienummer: 2022:13

Nyckelord:

Markfysik, markpackning, tonkm

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap (NJ)

Institutionen för mark och miljö

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Fulltexten kommer dock i samband med att dokumentet laddas upp arkiveras digitalt.

Om ni är fler än en person som skrivit arbetet så gäller krysset för alla författare, ni behöver alltså vara överens. Läs om SLU:s publiceringsavtal här:

<https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

☒ JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

☐ NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.

Sammanfattning

Den strukturrationalisering som pågår inom lantbruket har lett till att maskinerna som används blir större och tyngre. Samtidigt medför högre avkastningskrav att fler åtgärder i vissa fall görs och att de görs under mindre gynnsamma förhållanden. Detta har lett till att markpackning har blivit ett allt större problem, och vissa menar att det är det enskilt största hotet för jordbruksproduktionen. Det för med sig stora ekonomiska och miljömässiga kostnader, för lantbruket och för samhället i stort. Många försök har gjorts för att minska problemen som jordpackning medför. Trots det så ökar bara problemen och det krävs mer kunskap och ökad förståelse för hur jorden beter sig.

Fältförsök utfördes på Säby gård, utanför Uppsala, med fyra randomiserade upprepningar. Två ekipage och fem led jämfördes. Ett tungt ekipage med en maxhjullast på 4,15 Mg och en totalvikt på 10,3 Mg, där antingen en eller två överfarter gjordes, och ett lätt ekipage med en maxhjullast på 2,2 Mg och en totalvikt på 7,8 Mg, där antingen två eller fyra överfarter gjordes, samt ett kontrollad (ref) där ingen överfart gjordes. Körningen skedde på hösten i kultiverad jord med en körhastighet på 3 km/h. Stressmätningar gjordes under körningen med bollingsonder. Penetrationsmätningar gjordes efter körningarna och dessutom togs cylinderprover med jord på 10-15 cm djup och 30-35 cm djup för skrymdensitetsmätningar och kompressionstest på laboratoriet.

Stressmätningarna på 40 och 60 cm djup visade att stressen ökade mest med hjullasten medan det inte fanns någon skillnad på 20 cm djup. I kompressionstestet fanns en korrelation mellan skrymdensitet och deformation med ett R^2 -värde på 0,53. Det fanns signifikanta skillnader mellan de packade leden i alla mätningar bortsett från skrymdensiteten i matjorden där endast referensledet skiljde sig.

Slutsatsen är att det finns samband mellan packning och antalet förflyttade ton, antal passager och hjullast. För att få en tydligare bild över hur varje enskild faktor påverkar packningen och dess olika delar så behövs fortsatt forskning och fler försök, där variablerna kan testas enskilt, i större omfattning och i extremare varianter än vad som gjorts i detta arbete.

Nyckelord: Markfysik, markpackning, tonkm

Abstract

A structural rationalization is underway in agriculture; this has led to a significant increase in the size and weight of the machinery being used. At the same time, higher yield requirements have in some cases led to more field operations being carried out under less favorable conditions. This sums up to soil compaction being an increasing problem, and some argue that it's the single biggest threat to agricultural production. It comes with a great cost, both economically for the farmers and environmentally for the society. Many attempts have been made to reduce the compaction problem; despite this, it's an increasing problem and more knowledge and a better understanding of the soil behaviour are required to solve it.

A field experiment was carried out at Säby farm, outside Uppsala, Sweden, with four randomized replicates. Two loads and five treatments were compared. A heavy load with a maximum wheel load of 4.15 Mg and a total weight of 10.3 Mg, where either one or two passes were made. One light load with a maximum wheel load of 2.2 Mg and a total weight of 7.8 Mg, where either two or four passes were made, and a control where no passes was done. The trial took place in newly chiseled blocks with a speed of 3 km/h. Stress measurements were made during the wheeling with Bolling probes. Penetration resistance measurements were made after the last run for every treatment. Cylinder samples were taken at 10-15 cm and 30-35 cm depth, for bulk density and compression tests in the laboratory.

The stress measurements at 40 and 60 cm depth increased with higher wheel load, while there was no difference at 20 cm depth. The compression test showed a negative correlation between deformation and bulk density with a R^2 -value of 0.53. There were significant differences between the compacted treatments for all measurements except for the change in bulk density of the topsoil, where only the control differed from the rest.

There is a challenge to draw conclusions between the soil mechanism and factors such as total Mg passed, wheel load or the number of passages. There is a connection between those factors and the compaction. But it's hard to connect the individual compaction factors with the different soil properties. Continued research is needed, where the variables can be tested individually, to a greater extent and in more extreme variants, where these relationships can be sorted out better than this study has managed to do.

Keywords: soil physics, soil compaction, Mgkm

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	8
Figurförteckning.....	9
1. Inledning och syfte	11
1.1. Inledning	11
1.1.1. Syfte.....	12
1.1.2. Mål.....	12
2. Bakgrund	13
2.1. Markpackning	13
2.1.1. Skrymdensitet.....	13
2.1.2. Penetrationsmotstånd.....	13
2.1.3. Packningsgrad.....	13
2.1.4. Förkonsolideringstryck	14
2.1.5. Vattenhalt.....	14
2.1.6. Upprepad belastning	14
2.1.7. Hur däck påverkar	15
2.1.8. Övriga faktorer som påverkar packningen	15
2.1.9. Tonkm.....	16
2.1.10. Terranimo	16
2.1.11. Rotutveckling och skörd	16
2.1.12. Ekonomi.....	17
3. Metod och genomförande	18
3.1. Fältförsök	18
Försöksled 19	
3.1.1. Mätningar i försöket:.....	20
3.2. Data insamling	21
3.2.1. Cylinderprover, skrymdensitet och kompressionstest	21
3.2.2. Penetrationsmotstånd.....	23

3.2.3.	Tryckmätning med Bollingsonder	23
3.2.4.	Terranimo	24
3.3.	<i>Statistisk analys</i>	25
4.	Resultat	26
4.1.	<i>Cylinderprover</i>	26
4.1.1.	Skrymdensitet.....	26
4.1.2.	Kompressionstest	29
4.2.	<i>Bollingsonderna</i>	31
4.2.1.	20 cm	31
4.2.2.	40 cm	32
4.2.3.	60 cm	33
4.3.	<i>Penetrometer</i>	34
4.4.	<i>Terranimo</i>	37
5.	Diskussion.....	38
5.1.	<i>Ändringar i försöksupplägget:</i>	38
5.2.	<i>Bollingsonder</i>	39
5.3.	<i>Cylinderprover</i>	40
5.3.1.	Skrymdensitet.....	40
5.3.2.	Kompressionstest	41
5.4.	<i>Penetrationsmotstånd</i>	42
5.5.	<i>Terranimo</i>	43
5.6.	<i>Spåregenskaper</i>	44
5.6.1.	Spårdjup	44
5.6.2.	Spårbredd	44
6.	Slutsats	45
	Referenser	46
7.	Populärvetenskaplig sammanfattning	49
	Tack	50

Tabellförteckning

Tabell 1. Tekniska specifikationer för de olika försöksleden	19
Tabell 2. Deformation mm/1000 kPa för de olika försöksleden.....	30
Tabell 3. Överblick av penetrometerdata.....	34

Figurförteckning

Figur 1. Block 1–4, samt i vilka rutor respektive behandling genomfördes.....	19
Figur 2. Fälthärbete, jordprovtagning på 10-15 cm och 30-35 cm. Loraine till vänster och Lorena till höger.....	21
Figur 3. Maskinen där proverna komprimeras till förinställd belastning.	22
Figur 4. Körning i ett försöksled, bollingsonderna sitter på 20, 40 respektive 60 cm djup under centrumlinjen av hjulspåret. Mätdata registreras i datorn på bordet.	24
Figur 5. Skrymdensiteten på 10-15 cm djup mellan de olika behandlingarna, med medelvärde och standardavvikelse.	27
Figur 6. Endast signifikant skillnad mellan led L4 och referensledet. Här visas medelvärde och standardavvikelse.	28
Figur 7. Den blöta jorden från 10-15 cm djup trycks upp ur cylindern under kompressionen. Det var stor skillnad i hur mycket och vid vilket tryck jorden trycktes upp utanför cylinderns kanter.	29
Figur 8. Korrelation mellan mm deformation/1000 kPa och skrymdensitet. R ² -värde på 0,53.....	30
Figur 9. Maximal stress uppmätt på 20 cm djup, medelvärde från alla block och standardavvikelse.....	31
Figur 10. Maximal stress uppmätt på 40 cm djup, medelvärde från alla block och standardavvikelse.....	32
Figur 11. Maximal stress uppmätt på 60 cm djup, medelvärde från alla block och standardavvikelse.....	33
Figur 12. Variation i stress uppmätt på 60 cm djup, medelvärde från alla block och 95 % konfidens intervall.....	35
Figur 13. Vid vilket djup i markprofilen som det högsta penetrationsmotståndet uppmättes vid för respektive behandlingar. De blå strecken visar medelvärde och standardavvikelsen.	36
Figur 14. Riskbedömning tungt ekipage, terranimo. Grönt= ingen risk, gult=betydande risk, rött=stor risk. Betydande risk för alvpackning för bakaxeln.....	37
Figur 15. Riskbedömning lätt ekipage, terranimo. Grönt= ingen risk, gult=betydande risk, rött=stor risk. Ingen risk för alvpackning för någon av axlarna.	37

Figur 16. Till vänster visar stressmätning från 60 cm djup, och de dubbla topparna från varje axel, till höger visar stressmätning från 40 cm djup och en topp per axel.	39
Figur 17. De markerade siffrorna har samma mätvärde flera cm i rad och uteblivna resultat i de djupare lagren visas av asterixerna, från en av penetrometermätningarna med mest brister.	42

1. Inledning och syfte

1.1. Inledning

Anledningen till det här arbetet är ett växande problem med markpackning. Markpackningen är ett resultat av trafiken på fält och påverkas av ett flertal faktorer, där ibland antal överfarter, däck, ringtryck och hjullast samt jordart och markens fuktighet. Rationaliseringen av lantbruksdriften har lett till en användning av allt tyngre maskiner samt att arbete ibland genomförs vid mindre lämpliga tillfällen, som vid hög markfuktighet. Ett förändrat klimat kan medföra t.ex. blötare höstar och att kraven på avkastning kan leda till att fler åtgärder görs (Håkansson, 2000). Markpackning anses av vissa att vara det största hotet mot lantbrukets produktion, samtidigt som det medför stora samhällsekonomiska och miljömässiga kostnader och konsekvenser som bland annat sämre vatteninfiltration och ökad ytavrinning.

Enligt Håkansson (2000) så definieras markpackning med jordens skrymdensiteten. Densiteten och hur packad jorden är beror på jordens jordart, porer och mullhalt. Den kan även karaktäriseras av andra egenskaper i jorden, så som penetrationsmotstånd och gasdiffusionsförmåga. Ner till ett djup på ca 25 cm så kan uppkommen markpackning minskas med hjälp av luckrande bearbetning och abiotiska processer som torka och tjäle samt biotiska processer som mask- och rotgångar. Packning i alven är mer eller mindre irreversibel (Lipiec *et al* 2012) och Håkansson (2000) specificerar detta till att gälla packning på djup över 40 cm samt att det framförallt är maskiner med en hjullast över 3–4 ton som orsakar denna markpackning i alven. Markpackning kan leda till minskad produktivitet, ökade näringsläckage samt ökade utsläpp av växthusgaser (Schjønning *et al* 2004). Utöver skrymdensiteten så finns det annat som kan indikera markpackning, till exempel penetrationsmotstånd som är ett mått som speglar hur mycket kraft som behövs för att penetrera jorden på djupet, det motstånd som t.ex. en växtrot behöver trycka för att nå ner. Detta mått kan variera kraftigt och ett högt penetrationsmotstånd behöver nödvändigtvis inte betyda att växterna har svårt att växa så länge det finns makroporer och en god markstruktur.

Men i enkelkorniga jordar utan struktur och aggregat kan växterna få svårt trots ett lågt uppmätt penetrationsmotstånd (Ekholm 2016; Håkansson, 2000).

Det finns olika sätt att mäta risk och intensitet av packningen. Ett sätt är tonkm som i vissa fall även kan användas som ett mått på ett uträttat arbete. Man kan köra med ett dubbelt så tungt ekipage med dubbla arbetsbredden en gång eller ett hälften så tungt ekipage med halva arbetsbredden två gånger och få samma totala tonkm. I många fall så kommer antalet tonkm vara ungefär lika stort för samma uträttade arbete, till exempel vid jordbearbetning. Det är därför viktigt att hitta det bästa sättet att utföra arbetet på, för att minska packning och risken för den.

1.1.1. Syfte

Syftet med det här arbetet är att få en ökad förståelse för hur jorden beter sig vid ett flertal lättare överfarter kontra ett fåtal tyngre överfarter. Detta för att bättre kunna förstå hur den totala flyttade massan*transportlängd ($\text{ton} \cdot \text{km} = \text{tonkm}$) skall ske optimalt för att kunna minimera risken för skadlig markpackning. Och om fördelning av vikten på upprepade överfarter eller omfördelning av vikten på fler efter varandra följande axlar, är en väg att gå för att minska risken för packning.

1.1.2. Mål

Att i fältförsök belasta jorden i olika kombinationer av hjullast och antal överfarter och se hur det påverkar stressen i jorden.

Mäta olika faktorer och jordegenskaper för att kunna jämföra försöksled och kunna dra slutsatser av de uppmätta värdena för hur egenskaperna påverkas av den stress de varit utsatta för.

2. Bakgrund

2.1. Markpackning

2.1.1. Skrymdensitet

Enligt Håkansson (2000) så definieras markpackningen som skrymdensiteten av jorden. Skrymdensiteten är densiteten av jorden inklusive rotgångar och porsystem. När man kör så kan makroporer deformeras och volymen av en viss mängd jord minskas, den packas. I matjord, ner till ca 25 cm djup kan uppkommen markpackning minskas och åtgärdas med hjälp av luckrande bearbetning och abiotiska processer så som torka och tjäle samt biotiska processer som maskgångar.

2.1.2. Penetrationsmotstånd

Penetrationsmotstånd är ett annat mått som speglar hur mycket kraft som behövs för att penetrera jorden på djupet, det motstånd som t.ex. en växtrot behöver trycka för att nå ner. Detta mått kan variera kraftigt och ett högt penetrationsmotstånd behöver nödvändigtvis inte betyda att växterna har svårt att växa så länge det finns makroporer och en god markstruktur. Men i enkelkorniga jordar utan struktur och aggregat kan de ha svårt att växa trots ett lågt uppmätt penetrationsmotstånd (Ekholm, 2016; Håkansson, 2000).

2.1.3. Packningsgrad

Det finns en vedertagen definition för packningsgrad av matjorden som länge använts i Sverige. Den räknas ut som procenten av den aktuella torra skrymdensiteten dividerad med skrymdensiteten av samma jord som är packad med 200 kPa. När jorden packas så är den våt och lös, den packas i en cylinder med dränerande botten och packas till att packningen och dräneringen upphört (Håkansson 2000).

2.1.4. Förkonsolideringstryck

Förkonsolideringstryck är det tryck som jorden kan utsättas för innan den börjar packas och densiteten höjs. Vilket förkonsolideringstrycket är beror på jordart, vattenhalt, styrkan i jorden, om den är bearbetad och andra orsaker. Det beror även på hur packad jorden är sedan tidigare (Håkansson 2000). Jorden kan om trycket är lägre än förkonsolideringstrycket packas men sedan återgå till det ursprungliga stadiet, den deformationen kallas då för att vara elastisk. Om trycket övergår förkonsolideringstrycket och deformationen verkar permanent, kallas den för plastisk deformation.

2.1.5. Vattenhalt

Jorden tål mer när den har en lägre vattenhalt och är torr, vilket minskar risken för packningsskador jämfört när den är fuktig. Däremot vid en hög vattenhalt där jorden är mättad är den teoretiska packningsrisken lägre än i en torr jord, detta då porerna i marken är vattenfyllda i stället för luftfyllda, vilket försvårar packningen av porerna. Men då slirningen ökar i den blöta jorden, så ältas och förstörs strukturen i jorden och detta bör alltså undvikas av den orsaken. Fälttrafik ska alltså i den mån det praktiskt går, ske när det är torrt (Håkansson 2000).

2.1.6. Upprepad belastning

Enligt ett försök med olika hjullaster och upprepad belastning som genomfördes fyra år i sträck så ökade packningsgraden på över 50 cm djup mer vid upprepad belastning av 8 tons hjullast kontra enkel passage av en körning med 12 tons hjullast. 8-tons ledet bestod av fyra efter varandra följande passager och 12 tons ledet av endast en passage. Det fanns även ett led med 3 tons hjullast och fem passager, vilket inte hade samma degraderande effekt som 8 tonsledet hade vid upprepad belastning. Utöver packningsgraden bedömdes även jordstrukturen visuellt med SubVESS, där porsystemet bedömdes vara skadat och bland annat hade försämrade gasdiffusionsförmåga, även skrymdensiteten var högre. Författarna menar därför att andra faktorer som påverkar alvpackningen måste undersökas (Pulido-muncada *et al.* 2019).

Peth *et al.*, (2010) hävdar att i labbförsök med ett flertal kortvariga belastningar av jordprov, mer liknande en verklig fältsituation jämfört med enstaka och långvarigare belastning, så ter det sig som att packningsskadorna ackumuleras och påverkar jordens funktion negativt bland annat genom försämrade gasdiffusion. De föreslår därför att en tidsaspekt bör tas med i beräkningen av packningsrisken.

2.1.7. Hur däck påverkar

I en studie för att försöka få fram riktlinjer för packningsrisk så testade Schjønning *et al.*, (2012) ringtryck, kontaktyta och hjullastens påverkan på markpackningen på olika djup. Deras slutsats var rekommendationer i form av två regler, 50–50 regeln och 8–8 regeln. 50–50 regeln går ut på att när jorden befinner sig nära fältkapacitet, så bör inte stressen överstiga 50 kPa på över 50 cm djup. Och 8–8 regeln säger att djupet där 50 kPa stress är, ökar med 8 cm för varje ton som hjullasten ökar samt ökar med 8 cm vid fördubbling av ringtrycket.

Försök har gjorts med olika generationers däck och det har visat sig att många moderna däck kan ha ett lägre ringtryck och därför har en större kontaktyta mot marken, detta samt bättre utformning av däckmönstret har lett till en fördelaktigare stressfördelning i markprofilen. Störst skillnad är det i matjorden och sedan avtar skillnaden mellan moderna och äldre däck med sämre egenskaper med djupet, men en viss influens har ändå däckvalet även på alvpackningen (ten Damme *et.al* 2019).

I ett test med två bredder av samma däcktyp, 800 mm breda eller 560 mm breda, i kombination med två olika hjullaster, 30 och 60 kN. Deras försök visade att på 30 cm djup så korrelerade den uppmätta stressen i jorden bra med trycket mot markytan och ringtrycket i däcken, medan stressen på 90 cm djup korrelerade mycket bättre med hjullasten (Schjønning & Lamandé 2011).

Att ha dubbelmontage eller hjul monterade i tandemformation är enligt Keller & Arvidsson (2004) ett sätt att praktiskt minska hjullasten, vilket möjliggör ett lägre ringtryck vilket bidrar till lägre packningsrisk både i matjord och alv. Vid tandemmontering blir stressen lägre och mellan hjulen i ett dubbelmontage så blir stressen lägre än under centrumlinjen av varje hjul, detta även om det är ett litet avstånd mellan hjulen.

2.1.8. Övriga faktorer som påverkar packningen

Peth *et.al* (2010) påpekar vikten av att ta hänsyn för vilken tid jorden utsätts för packning. Ju längre tid som jorden belastas, desto högre risk blir det för packningsskador. Det stöttas av Naderi-Boldaji *et.al* (2017) som i försök visar på att vid en högre hastighet, och därmed kortare tid som marken utsätts för lasten, desto mindre packas den.

2.1.9. Tonkm

Tonkm är ett begrepp som används för att ge en enkel förklaring på intensiteten av trafiken på fälten och därmed risken för packning. Måttet fås ut genom att ta ekipagets totala vikt multiplicerat med den totala körda sträckan per hektar. Vid jordbearbetning ökar endast tonkm marginellt med större maskiner, då ett tungt ekipage ofta ökar arbetsbredden i ungefär samma utsträckning. För andra körslor så som tröskning så ökar däremot vikten i de flesta fall i större utsträckning än arbetsbredden, vilket ger ett högre värde på antalet tonkm och därmed högre trafikintensitet vilket medför en större packningsrisk (Håkansson 2005).

2.1.10. Terranimo

Terranimo är ett webbaserat verktyg för att kunna simulera riskerna för markpackning vid körning med olika ekipage vid olika förhållanden. Modellen tar hänsyn till vattenpotential samt lerhalt i jorden för att bedöma jordens styrka vid tillfället och kombinerar det med kontaktarea, typ av däck samt vikt på hjullasten på ekipaget.

Detta genom att kombinera fyra modeller, en för hur stressen fördelar sig i jorden från däckets kontaktyta med hjälp av FRIDA modellen, vilken ger en realistisk bild. En modell för hur stressen sedan fördelar sig vidare i jorden, en modell för jordens tålighet/styrka och en modell där packningsbenägenheten bedöms utifrån jordens styrka och stressfördelningen, så en kombination av de tre första (Stettler *et al.* 2014).

2.1.11. Rotutveckling och skörd

Rotutvecklingen i en packad jord missgynnas av framför allt två fenomen, ökat penetrationsmotstånd och minskad gasdiffusionen i jorden. Penetrationsmotståndet är främst ett problem i torra förhållanden då jorden är som starkast och rötterna behöver övervinna ett högre penetrationsmotstånd. Detta kräver ökad energi, samt minskar jordvolymen vilken ifrån plantan kan ta upp vatten och näring. Minskad gasdiffusion blir däremot ett större problem i fuktiga förhållanden, då rötterna lättare utsätts för syrebrist och kan bli skadade, med samma resultat som följd. Finns det ett välutvecklat system av makroporer, t.ex. torksprickor, maskgångar och en god markstruktur i övrigt så minskar risken för dessa problem (Håkansson 2005).

2.1.12. Ekonomi

Markpackning har stora ekonomiska konsekvenser både för lantbrukare och för samhället i stort. Det är dock svårt att kvantifiera dessa. Graves *et al.*, (2015) gjorde dock en uppskattning av kostnaderna för markpackningen i England och Wales, enligt dem så drabbade ungefär hälften av kostnaderna lantbrukaren på plats. Den största delen av kostnaderna var i form av skördeminskning, sedan i gödselförluster samt i ökad dieselförbrukning. De största kostnaderna för samhället var framför allt kostnader kopplade till översvämning i och med jordens minskade infiltrationsförmåga och förmåga att hålla vatten. Därefter kom kostnaderna för lustgasutsläpp, som är en kraftfull växthusgas. Keller *et al.* (2019) har räknat om dessa kostnader och kom fram till att det rör sig om 56,4 €/ha i snitt, vilket enbart i Sverige skulle innebära en totalkostnad av 171 miljoner €/år. I en undersökning där olika sätt att undvika och åtgärda markpackning studerats, så konstaterades att det var mer lönsamt för jordbrukarna att undvika markpackning än att åtgärda den redan existerande markpackningen (Chamen *et al.* 2015).

3. Metod och genomförande

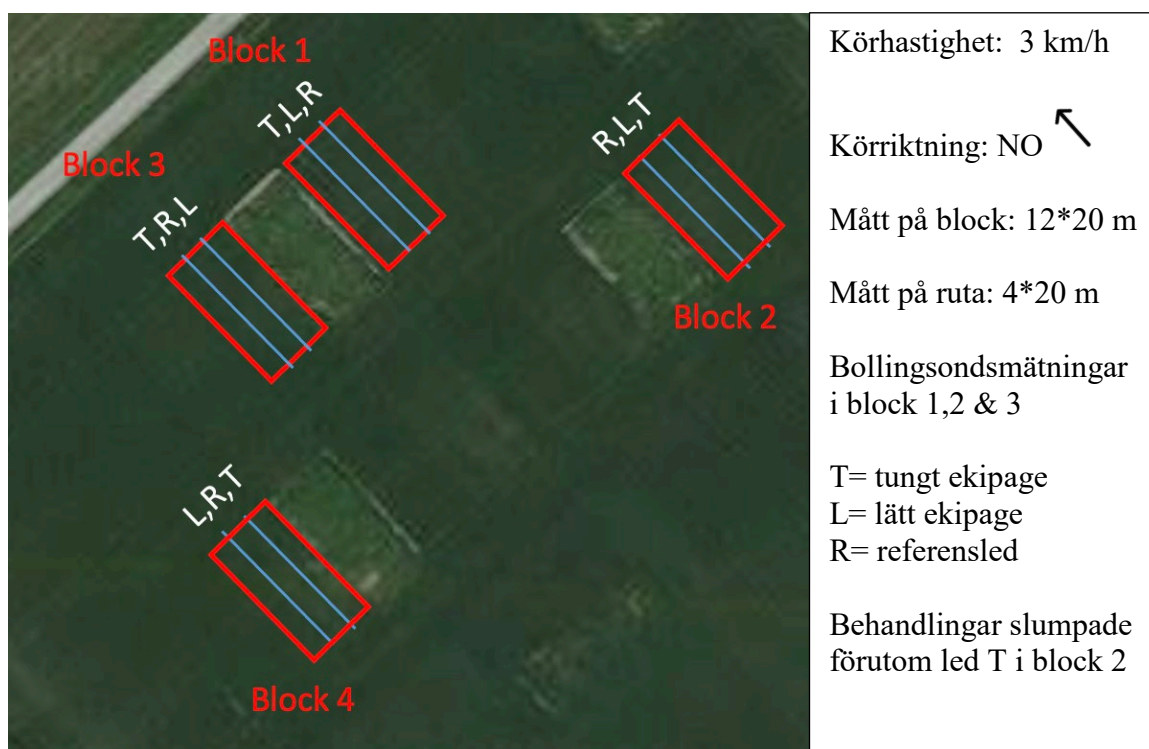
3.1. Fältförsök

Fältförsöket skedde på Säby gård utanför Uppsala i början av oktober 2021 i det redan liggande packningsförsöket R2-7115, på koordinaterna (59,83350° N, 17,70407° Ö). Försöken skedde i leden B2 som är tidigare varit kultiverade med lågt ringtryck.

Inget prov för jordart togs i det här försöket så därför finns ingen exakt information om jordarten vid det specifika försöket. Enligt tidigare jordprover från samma gård visar resultaten på att det rör sig om en siltig mellanlera (Sandin *et al* 2018; Åkesson 2017). I det kultiverade jordlagret var jorden porös och fin med tydliga aggregat och alven hade även den tydliga aggregat och en fin, fast struktur. Kan i båda fallen ansetts vara nära fältkapacitet när det gäller vattenmättnad.

I utgångsläget för det aktuella försöket kan marken anses som relativt opackad då den i det tidigare packningsförsöket, packats med låg vikt och lågt ringtryck. Det ansågs att ingen särskild hänsyn behövdes tas. Tvärs emot försöksrutorna har fälttrafik gått med gödningsspridare och vid spridning av växtskyddsmedel, för dessa spår togs hänsyn och inga cylindrar med jordprov eller stick med penetrometern tog i närheten av dessa. Däremot i längdriktning med jordbearbetning kunde ingen hänsyn visas för tidigare körning på grund av att det inte gick att urskilja var tidigare körningar gjorts.

Behandlingarna slumpades mellan de olika rutorna inom blocken, men med hänsyn till framtida försöksmöjligheter på den aktuella försöksplatsen så fick inte de tunga behandlingarna ligga i den mellersta rutan för vardera block. I de fall behandlingarna T1 och T2 hamnade där så slumpades försöket om tills att så inte var fallet.



Figur 1. Block 1–4, samt i vilka rutor respektive behandling genomfördes.

Försöksled

I försöket fanns fem led, fyra led med packad jord (T1, T2, L2 & L4) och ett referensled (ref). Nedan i tabell 1 finns de tekniska specifikationerna samt upplägg för vardera led. Däckdimension var samma på båda ekipagen, 650/65 R42 bak och 540/65 R30 fram.

Tabell 1. Tekniska specifikationer för de olika försöksleden

Försöksled	Antal passager	Total massa flyttad	Hjullast bak (kg)	Hjullast fram (kg)	Ringtryck bak (kPa)	Ringtryck fram (kPa)	Däckdimension bakaxel	Däckddimension framaxel
T1	1	10,3	4150	1000	1,25	0,8	650/65 R42	540/65 R30
T2	2	20,6	4150	1000	1,25	0,8	650/65 R42	540/65 R30
L2	2	15,6	2200	1700	0,8	0,8	650/65 R42	540/65 R30
L4	4	31,2	2200	1700	0,8	0,8	650/65 R42	540/65 R30
ref	-	0	-	-	-	-	-	-

3.1.1. Mätningar i försöket:

Penetrationsmotstånd mättes med en Eijkelkamp penetrologger, 10 upprepningar i varje led och ruta inklusive kontrollerdet där sticken tas i centrumlinjen av hjulspåren.

Cylindrar 50*72 mm, 203,6 cm³, för jordprov för mätning av bulkdensitet på 10 och 30 cm djup för alla behandlingar inklusive kontrollerdet. 4 stycken prov/djup.

Mätning av stressen i jorden under överfart i centrumlinjen av hjulspåren, med bollingsonder på 20, 40 och 60 cm djup i de packade leden.

Mäta hjulspårets bredd över bollingsonderna samt djupet från markytan till däckspåret över varje Bollingsond.

3.2. Data insamling

3.2.1. Cylinderprover, skrymdensitet och kompressionstest

Stålcylindrar med måtten 50*72 mm och volymen 203,6 cm³ användes till jordproverna för skrymdensitetsmätning och kompressionstest. Efter varje slutförd behandling togs 4 cylinderprover från 10 cm djup och 4 cylinderprover från 30 cm djup, 160 stycken prov totalt. Dessa togs rakt under centrumlinjen i traktorspåret och på slumpad plats i kontrollområdet.

Cylindrarna knackades ner med en cylinderprovtagare och grävdes sedan upp underifrån med spade eller kniv för att hålla provet intakt. Sedan lindades proverna in i aluminiumfolie och lades aktsamt i lådor. Användningen av aluminiumfolie var för att proverna inte skulle tappa jord och förstöras samt för att behålla den aktuella vattenhalten från fältförhållandena.



Figur 2. Fältarbete, jordprovtagning på 10-15 cm och 30-35 cm. Loraine till vänster och Lorena till höger.

Inne på laboratoriet skars överflödig jord bort från proverna så att jorden var jämn med cylinderns kant. En tunn duk sattes på proverna med en gummisnodd för att inte någon jord skulle förloras vid hantering. Proven vägdes och komprimerades sedan i en kompressionsmaskin som finns att tillgå på SLU, där cylindrarna

stoppas in och utsätts för ett förutbestämt tryck. I detta fall med ett tryck på 1000 kPa, sedan avlägsnades duken och gummisnodden och vägdes och proven sattes på aluminiumplattor. Proverna vägdes igen efter att ha ugnstorkats på 105° C i 72 timmar. Skrymdensiteten beräknades sedan fram genom att ta provernas vikt minus vikten av varje enskild cylinder dividerat med volymen för cylindrarna.

Komprimeringen gjordes för att se hur stor plastisk deformation proverna fick vid 1000 kPa belastning. Genom att logga distansen från cylinderkanten går det att mäta hur många mm som provet komprimerats när en stress på 1000 kPa uppmättes i maskinens vågceller.



Figur 3. Maskinen där proverna komprimeras till förinställd belastning.

3.2.2. Penetrationsmotstånd

Penetrationsmotståndet mättes med en penetrometer av modell Eijkelkamp penetrologger utrustad med 1 cm² spets, ned till 80 cm djup från markytan. I varje ruta togs 10 stick i centrumlinjen av hjulspåret i de rutor där behandling genomförts. I referensrutorna togs 10 stick spritt över hela rutan.

I referensleden gjordes mätningarna utan någon behandling, i led med behandling gjordes mätningarna efter den sista överfarten för respektive behandling. Så i led T1 gjordes mätningarna efter totalt en överfart, i T2 och L2 efter 2 överfarter och i L4 efter totalt 4 överfarter.

3.2.3. Tryckmätning med Bollingsonder

Bollingsonderna består av ett PVC rör som förs ner i ett förborrat hål, ena änden består av ett silikonmembran som trycksätts med vatten tills att god kontakt finns mot den omgivande jorden. I andra änden finns en trycksensor som mäter av tryckförändringen i det slutna systemet när silikonmembranet utsätts för stressförändringen i jorden. Bollingsonderna installerades på ett djup av 20, 40 och 60 cm med hjälp av en installationsrigg. Efter att de vattenfyllets och trycksatts kopplades de upp mot en dator med tillhörande mjukvara (control center series 30, från Keller software). körningen gjordes så att hjulens centrumlinje var på 130 cm avstånd från installationsriggens front, över spetsen på bollingsonderna.

Mätningarna gjordes vid varje passage i alla behandlingar, i block 1, 2 och 3 men ej i block 4. Detta på grund av tidsbrist vid försökstillfället samt att tre upprepningar bedömdes vara nog för att ge ett gott underlag för resultatet.



Figur 4. Körning i ett försöksled, bollingsonderna sitter på 20, 40 respektive 60 cm djup under centrumlinjen av hjulspåret. Mätdata registreras i datorn på bordet.

3.2.4. Terranimo

I det webbaserade verktyget för markpackningsrisk, Terranimo, lades de befintliga ekipagen in. Däckdimensioner, ringtryck och axeltryck registrerades samt val av jord, där en fuktig mellanlera valdes och sedan gjordes riskbedömningen.

3.3. Statistisk analys

All data från mätningarna har analyserats i mjukvaran JMP Pro (16.0.0), antingen genom ”fit Y by X” eller ”fit model”. Data för skrymdensitet och kompressionmätningarna är individuell för varje cylinderprov och den uppmätta stressen i bollingsonderna är kopplade till de individuella blocken där cylinderproverna är tagna från. För penetrometerdatan har ett medelvärde tagits ut från alla tio stick i samma ruta och block för det aktuella ledet, sedan har den data lagts ihop från att vara cm för cm till att presentera ett större djupintervall.

I de analyser där ett signifikant resultat fanns gjordes ett Tukeys test för att få fram vilka behandlingar som signifikant skilde sig åt från varandra. I andra analyser med kontinuerliga värden i både behandling och svar, kalkylerades korrelationen och i rapporten används R^2 -värdet vilket är ett värde mellan 0 och 1. R^2 -värdet beskriver hur stor del av resultatet som går att härleda till behandlingen, där 0 är 0% korrelation och 1 är 100 % korrelation.

I resultatdelen finns även tabeller, vilka är ”connecting letters report”, vilket innebär att de led som inte har någon gemensam bokstav, skiljer sig signifikant åt och de led som delar någon bokstav, inte skiljer sig signifikant från varandra.

Alla värden som anges som signifikanta har ett P-värde $< 0,05$.

4. Resultat

4.1. Cylinderprover

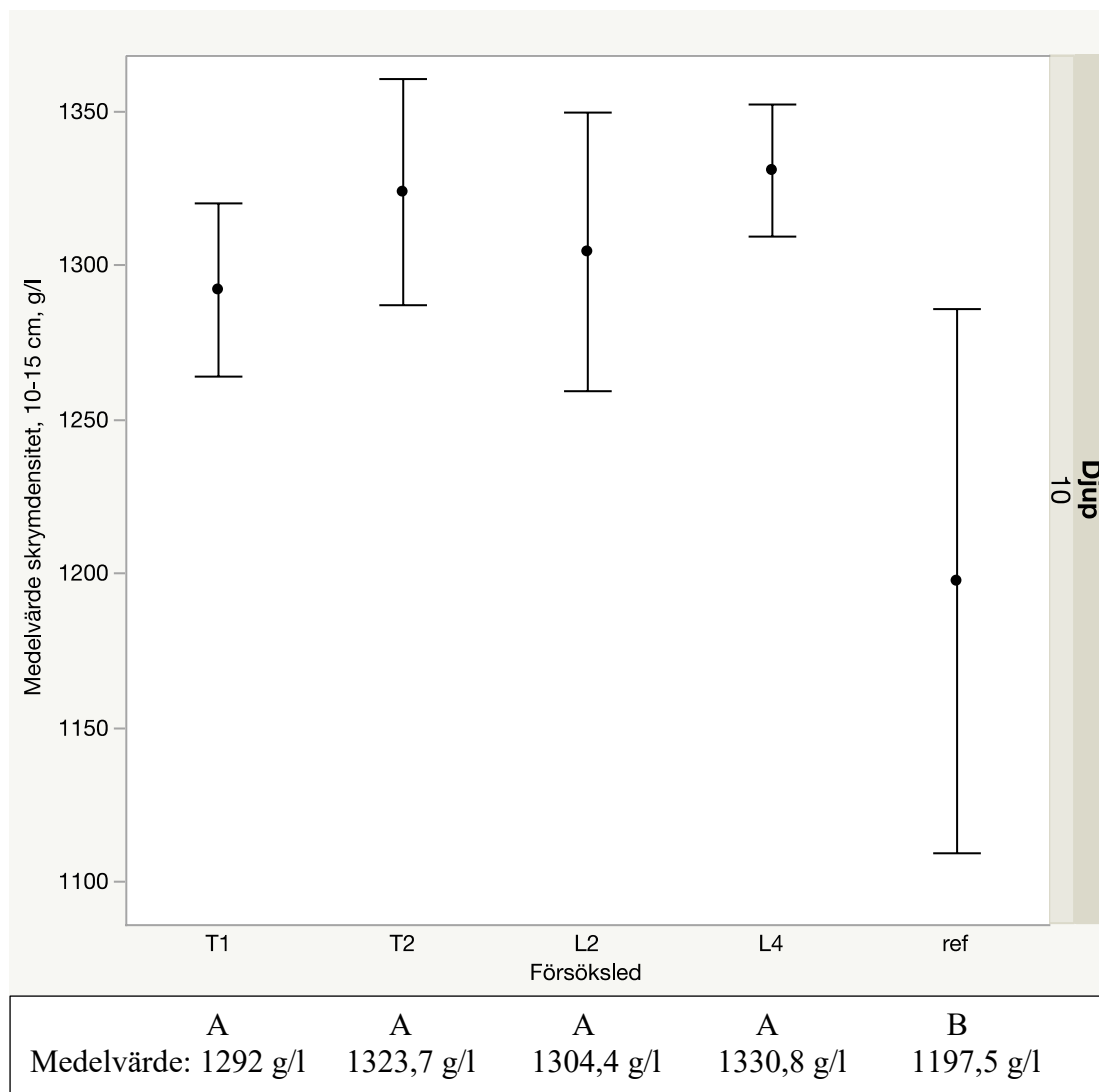
4.1.1. Skrymdensitet

Skrymdensiteten mättes på två djup, 10-15 cm och 30-35 cm, cylindrarna hade en höjd på 50 mm vilket medförde att proverna representerade ett jordskikt mellan 10 och 15 cm samt 30 och 35 cm djup.

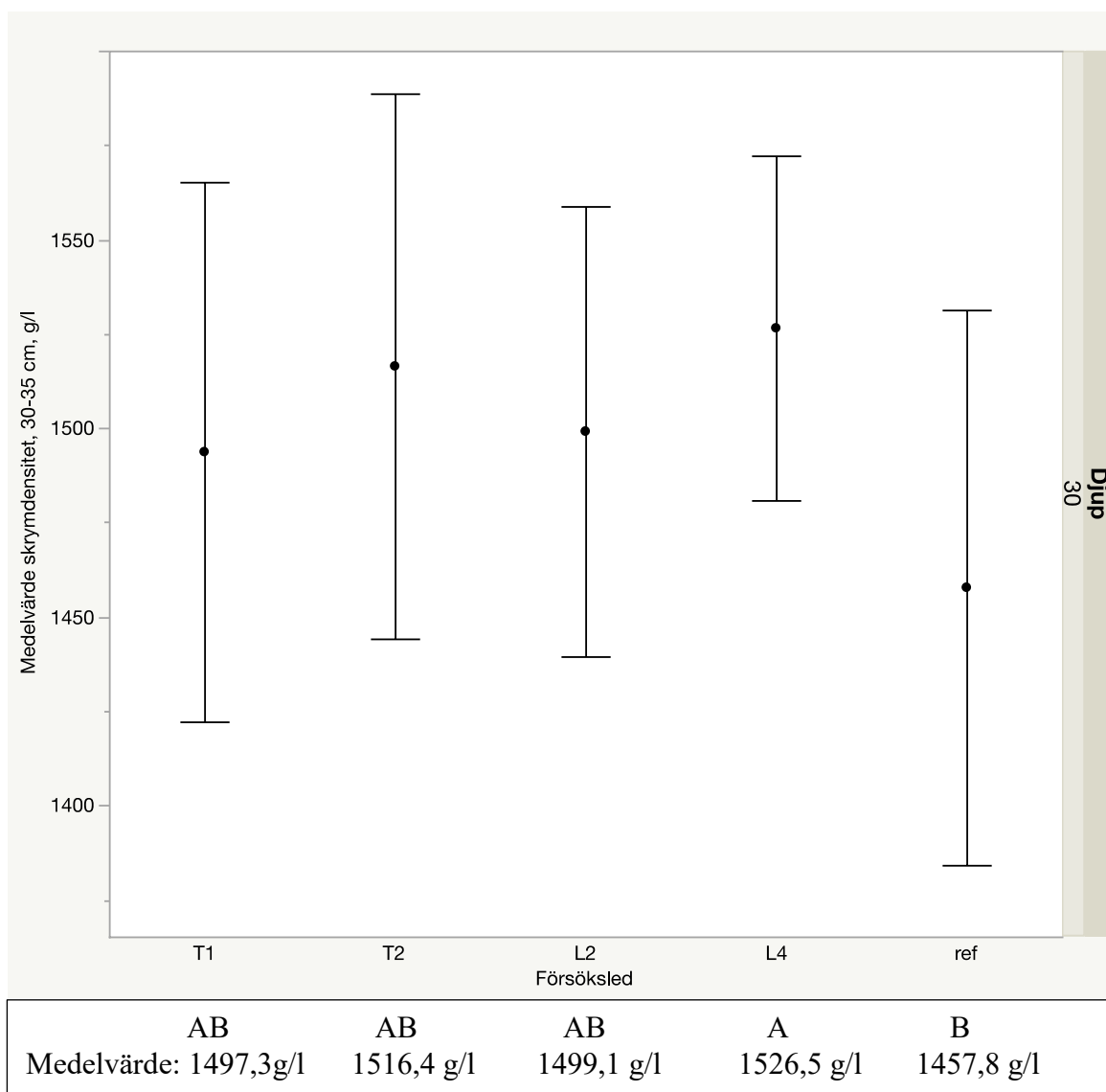
För 10-15 cm djup fanns ingen signifikant skillnad med avseende på skrymdensiteten mellan behandlingarna, vare sig antal överfarter eller den aktuella hjullasten. Behandlingarna skilde sig dock signifikant åt från referensledet som hade en lägre skrymdensitet. Det var även stor skillnad i variansen inom referensledet i jämförelse med de packade leden.

Till skillnad från 10-15 cm djup så är storleksskillnaden på variansen på 30-35 cm djup mycket mindre och det är inte lika uppenbart vilket led som är referensledet.

På 30-35 cm djup så är behandling L4 signifikant skild från referensledet, men annars finns ingen signifikans, allt enligt gemensam bokstavsrapporten i figur 6. Skillnaden i skrymdensitet är mindre på 30-35 cm djup, där differensen mellan ledet med högst skrymdensitet L4 och ledet med lägst, referens, är knappt 70 g/l. Även på 10-15 cm djup är skillnaden störst mellan led L4 och referensledet men där differensen är drygt 130 g/l.



Figur 5. Skrymdensiteten på 10-15 cm djup mellan de olika behandlingarna, med medelvärde och standardavvikelse.



Figur 6. Endast signifikant skillnad mellan led L4 och referensledet. Här visas medelvärde och standardavvikelse.

På 10–15 cm djup fanns en relativt tydlig korrelation med ett R^2 -värde på 0,40 mellan skrymdensiteten och det totala antalet ton transporterad massa i behandlingen. Det betyder att 40 % av skrymdensiteten i matjordlagret går att härleda till antalet ton transporterad massa. På 30-35 cm djup hade korrelationen endast ett R^2 -värde på 0,11, det vill säga att den totala flyttade massan endast kan förklara 11 % av skillnaden i skrymdensitet.

4.1.2. Kompressionstest

I kompressionsmätningarna mättes hur många mm deformation det blev på proverna vid en belastning på 1000 kPa. Det innebär att ju högre nummer, desto större deformation och i många fall ett luckrare prov från början. Det är endast resultaten från 30-35 cm djup som är med, då cylinderproverna från 10-15 cm djup var för blöta och/eller strukturlösa, så vid kompressionen trycktes jorden ut ifrån cylindrarna, vilket inte möjliggjorde en vetenskaplig jämförelse.



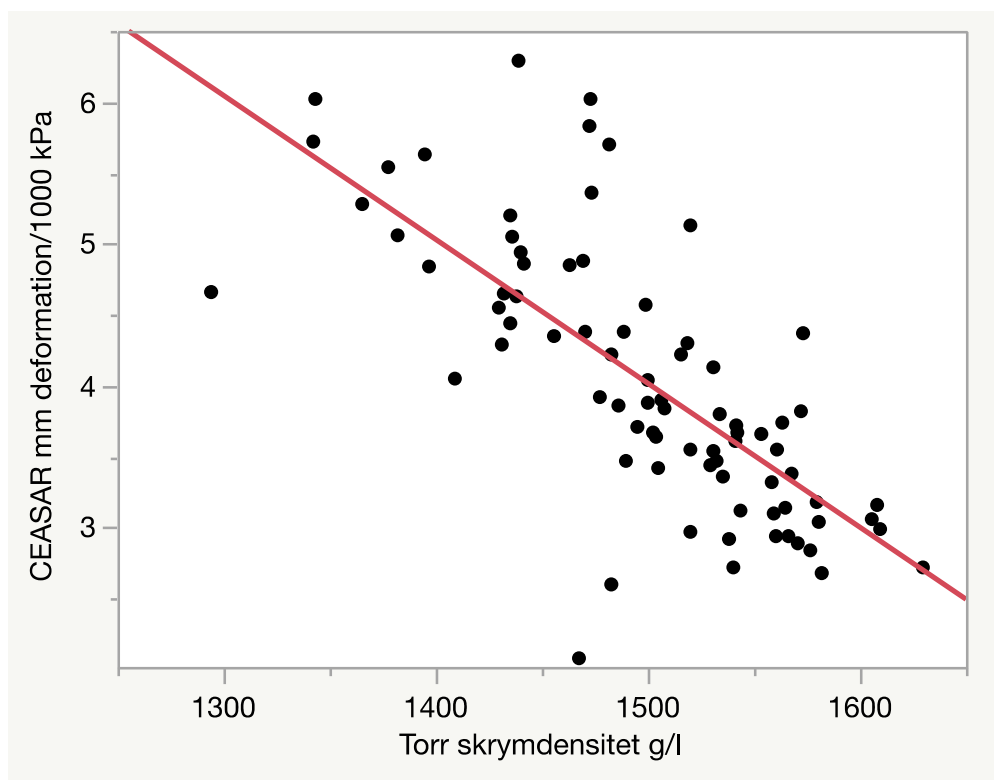
Figur 7. Den blöta jorden från 10-15 cm djup trycks upp ur cylindern under kompressionen. Det var stor skillnad i hur mycket och vid vilket tryck jorden trycktes upp utanför cylinderns kanter.

Tabell 2. Deformation mm/1000 kPa för de olika försöksleden.

Led			Medelvärde, mm vid 1000 kPa
ref	A		4,393
L2	A		4,181
T1	A		3,953
L4	A		3,858
T2	A		3,769

Vid en jämförelse av antal mm deformation och behandling finns ingen signifikant skillnad mellan något av leden.

Men vid jämförelse med mm deformation och skrymdensitet fanns ett R^2 -värde på 0,53, vilket betyder att 53 % av deformationen gick att förklara med skrymdensiteten.

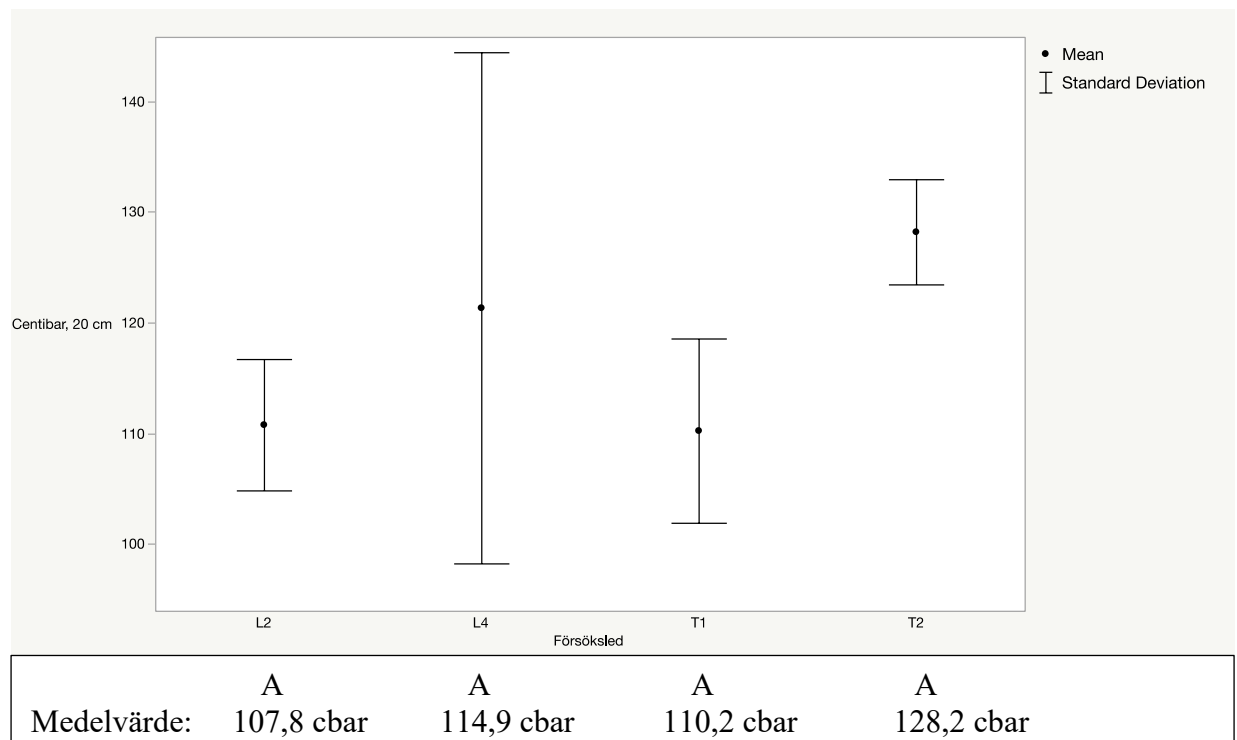


Figur 8. Korrelation mellan mm deformation/1000 kPa och skrymdensitet. R^2 -värde på 0,53.

4.2. Bollingsonderna

Det uppmätta trycket som redovisas i detta kapitel är det högsta uppmätta värdet för vardera behandlingen.

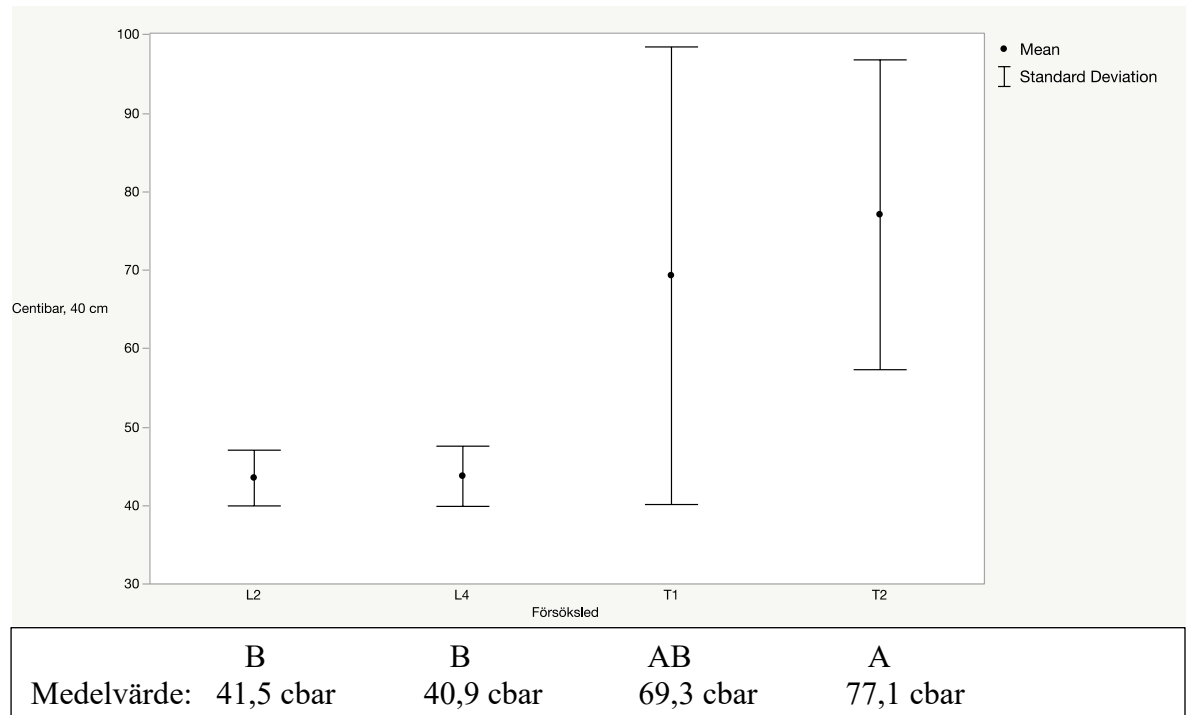
4.2.1. 20 cm



Figur 9. Maximal stress uppmätt på 20 cm djup, medelvärde från alla block och standardavvikelse.

För stressmätningarna med bollingsonderna på 20 cm djup finns ingen signifikant skillnad mellan försöksleden.

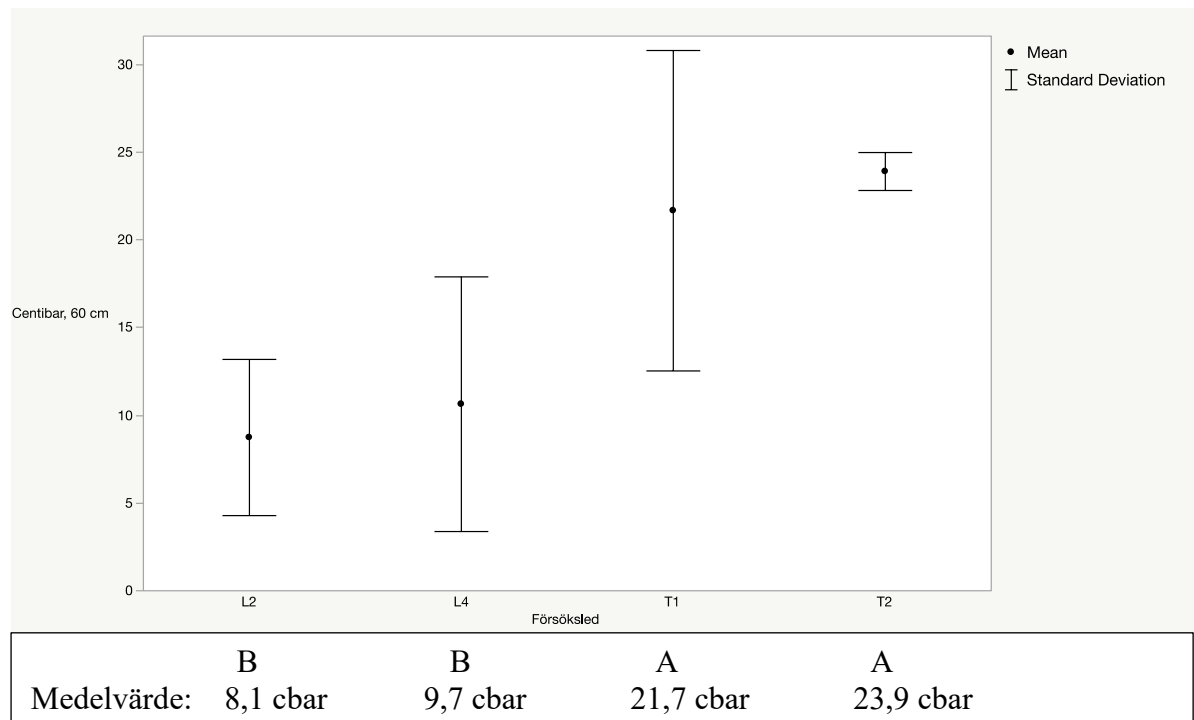
4.2.2. 40 cm



Figur 10. Maximal stress uppmätt på 40 cm djup, medelvärde från alla block och standardavvikelse.

För mätningarna på 40 cm djup så är försöksledet T2 signifikant skilt från behandlingarna L2 och L4, men inte från T1. Ser man till medelvärdena på trycket så har det lättare ekipaget i försöksleden L2 och L4 ett lägre uppmätt tryck jämfört med det tyngre ekipaget i försöksled T1 och T2.

4.2.3. 60 cm



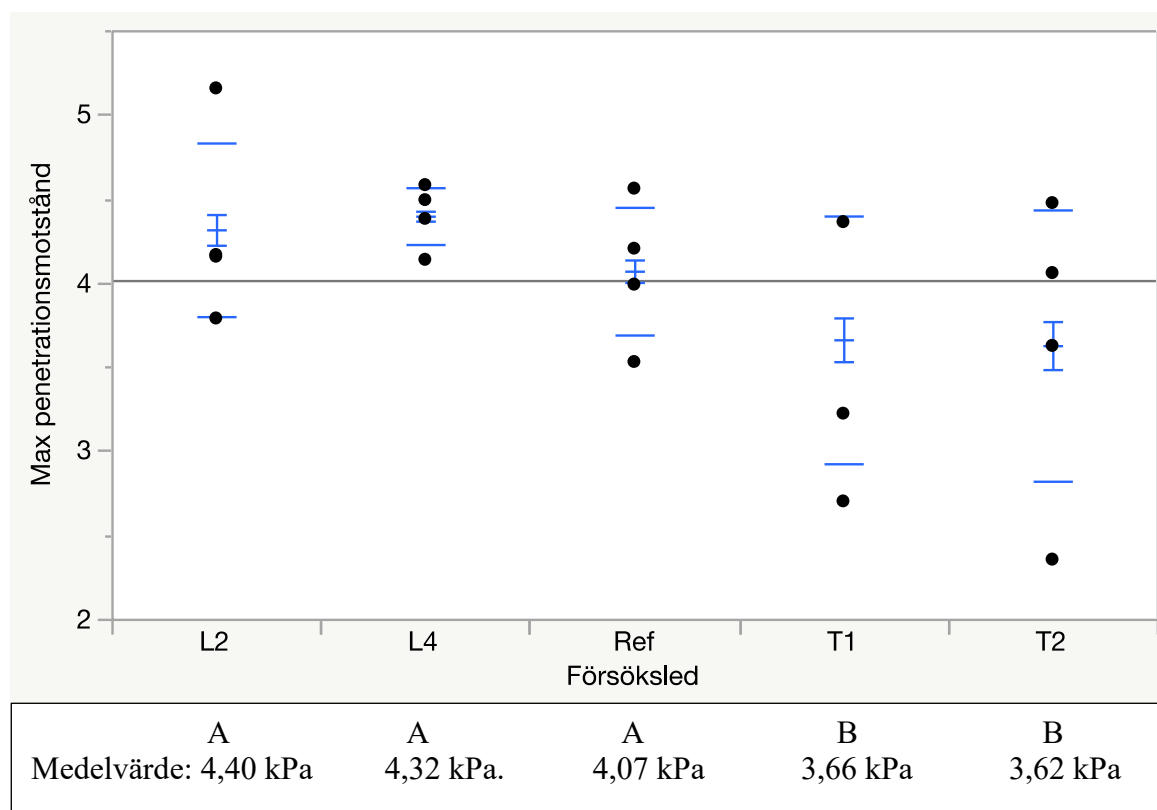
Figur 11. Maximal stress uppmätt på 60 cm djup, medelvärde från alla block och standardavvikelse.

På 60 cm djup är trycket signifikant skilt mellan det tyngre och det lättare ekipaget oavsett antal överfarter.

4.3. Penetrometer

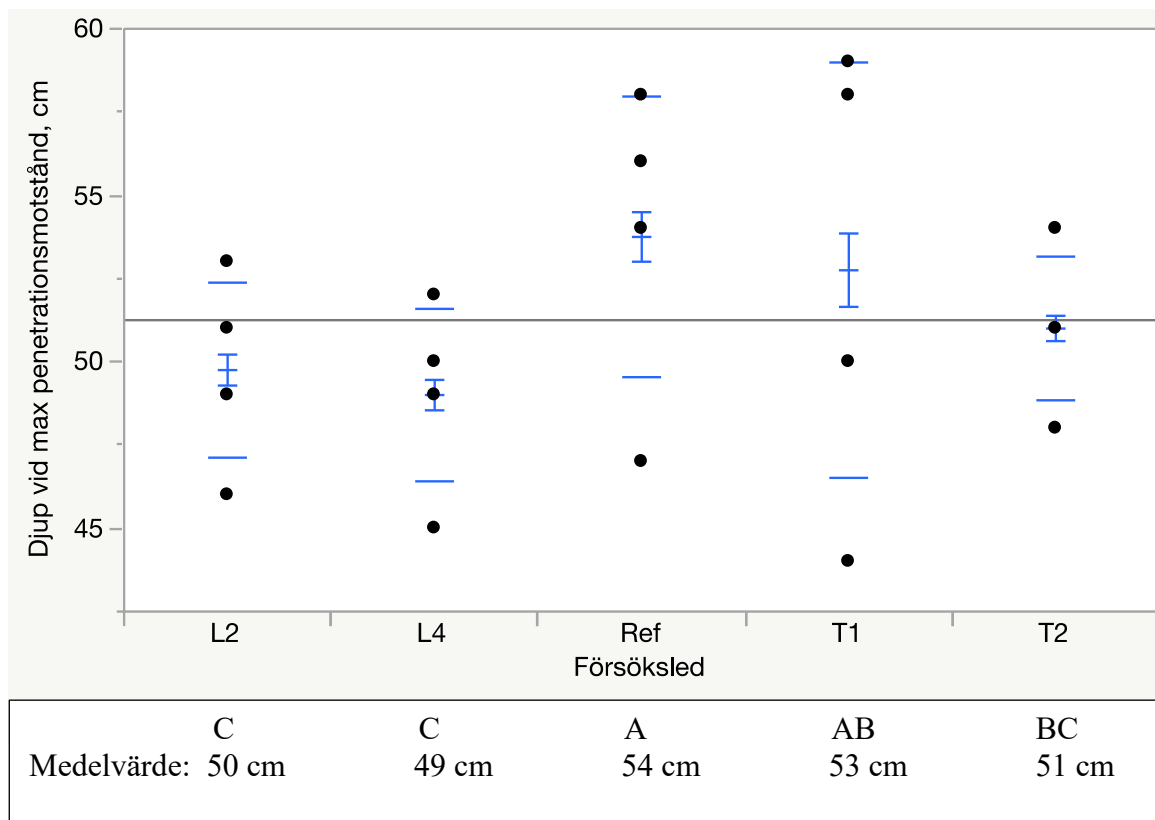
Tabell 3. Överblick av penetrometerdata.

Djup +/- 5 cm	Behandling					Medel penetrationsmotstånd kPa
		A	B	C	D	
20 cm	L4	A				2,1625
	L2		B			1,91
	T2		B	C		1,775
	T1			C		1,6675
	ref				D	1,345
40 cm	L4	A				3,625
	L2	A	B			3,265
	ref		B	C		3,0525
	T1		B	C		3,04
	T2			C		2,775
60 cm	ref	A				3,7275
	L2	A				3,4875
	L4	A				3,485
	T1		B			3,1675
	T2		B			2,9175
Matjord 0-25 cm	L4	A				1,4125
	L2		B			1,205
	T2		B	C		1,0975
	T1			C		0,975
	ref				D	0,825
Alv 26-80 cm	L4	A				3,2175
	ref	A				3,145
	L2	A				3,1375
	T1		B			2,805
	T2		B			2,6625



Figur 12. Variation i stress uppmätt på 60 cm djup, medelvärde från alla block och 95 % konfidens intervall..

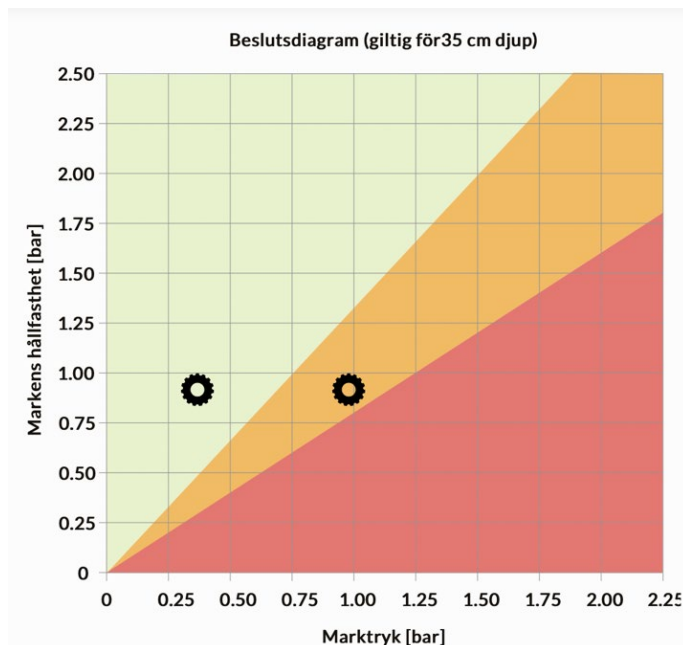
Behandling L2, L4 och referensledet är signifikant skilt från led T1 och T2 när det gäller det maximalt uppmätta värdet på penetrationsmotståndet.



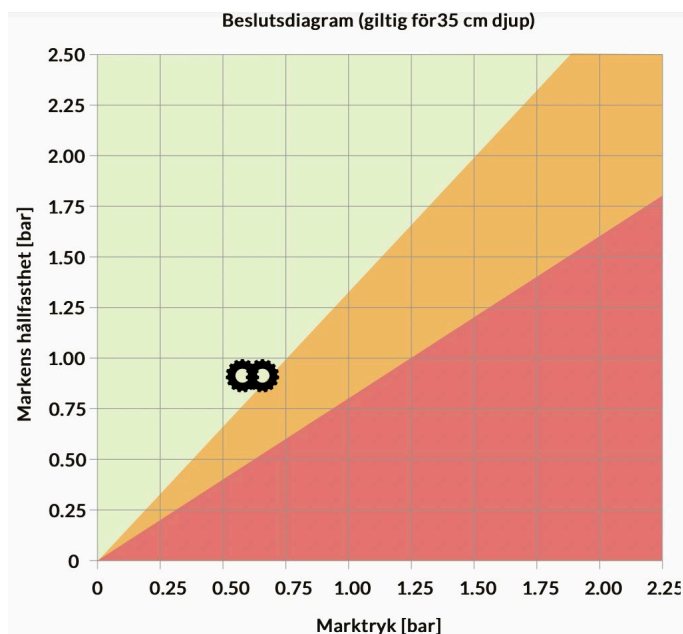
Figur 13. Vid vilket djup i markprofilen som det högsta penetrationsmotståndet uppmättes vid för respektive behandlingar. De blå strecken visar medelvärde och standardavvikelsen.

Referensledet hade det maximala penetrationsmotståndet djupast på 54 cm och följs sedan av led T1, T2, L2 och L4 som har maxpunkten grundast på 49 cm.

4.4. Terranimo



Figur 14. Riskbedömning tungt ekipage, terranimo. Grönt= ingen risk, gult=betydande risk, rött=stor risk. Betydande risk för alvpackning för bakaxeln.



Figur 15. Riskbedömning lätt ekipage, terranimo. Grönt= ingen risk, gult=betydande risk, rött=stor risk. Ingen risk för alvpackning för någon av axlarna.

Terranimo bedömde att det fanns en betydande risk för alvpackning på 35 cm djup med det tunga ekipaget, men ingen risk för det lätta ekipaget.

5. Diskussion

5.1. Ändringar i försöksupplägget:

Av praktiska skäl ändrades det ursprungliga försöksupplägget på en rad punkter varav vissa tyvärr ledde till att delar av den ursprungliga tanken med försöket var tvungen att frångås.

Då ingen enkelaxlad vagn med sidoförskjutning fanns att tillgå så genomfördes försöket med en traktor som lastades/lättades för att få så stor skillnad som möjligt i vikt. Det var endast möjligt att få till två vikter praktiskt, så lätt och så tungt som möjligt. Därtill ytterligare en axel som packar samt en ojämn viktfördelning mellan fram och bakaxel mellan de olika lasterna.

Behandlingarna anpassades till traktorns hjullaster och blev fem till antalet istället för fyra. De båda försöksleden med tungt ekipage kördes i en och samma ruta och de båda försöksleden med lätt ekipage kördes även de i en och samma, men en annan ruta i samtliga block. I och med att traktorns vikt inte gick att anpassa optimalt till den ursprungliga försöksplanen och att hänsyn var tvungen att tas till viktfördelning och vad som var praktiskt möjligt så blev det totala antalet ton förflyttad massa olika för de lätta och tunga ekipagen. Det till trots att den totala lastade vikten på bakaxeln var nästintill multiplikativ.

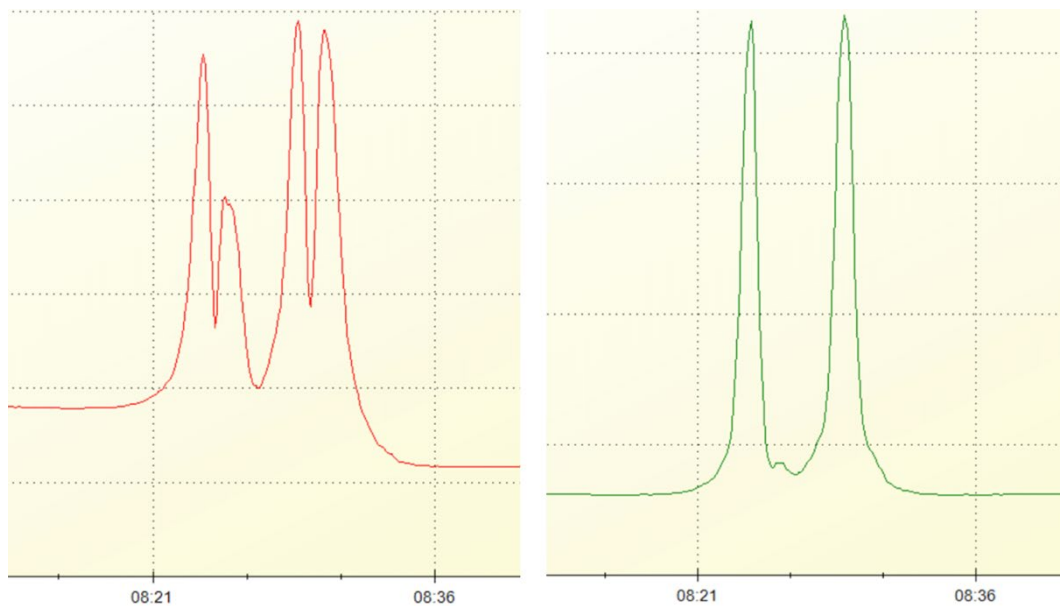
Ursprunglig plan med försöket var att kunna göra körningen i början av september med en sidoförskjuten enkelaxlad vagn, där hjullasten (X) och antalet överfarter hade kunnat delats upp i $X/3 * 3$, $X/2 * 2$ och $X * 1$ och så sett erhållit samma antal ton förflyttad massa oavsett behandling och led. Där $X/3$ hade bestått av en hjullast som ansetts vara låg, $X/2$ som en normal hjullast och X som en tung hjullast. Utöver de packade leden skulle ett kontrollerat funnits och det skulle vara 4 upprepningar av försöket. Alla behandlingar skulle vara slumpade i vilken ruta de skulle hamna.

Lufttrycket var det rekommenderade lufttrycket för varje individuell hjullast.

5.2. Bollingsonder

På grund av oklarheter vid installationen av bollingssonderna i försöken så kördes första försöket med centrumlinjen av däckens på traktorn 130 cm framför installationsramen, medans sonderna satt 137 cm framför installationsramen. För att det inte skulle påverka resultatet och kvalitén på försöket så genomfördes resten av bolling sondsmätningarna på samma avstånd, 130 cm. Det har dock troligtvis lett till en viss underskattning av trycket i alla led, speciellt på de djupare mätningarna på 40 och 60 cm djup. Med en däckbredd på 54 respektive 65 cm och en viss vingelmån på ekipaget så kan det finnas en viss variation på avståndet mellan centrumlinje och sonderna vid de olika överfarterna.

För sonderna på 20 och 40 cm djup var det tydliga och klara toppar och dalar där man lätt kunde utläsa ett tydligt resultat på trycket som uppstod. För samtliga sondmätningar på 60 cm djup så var det dock dubbla toppar och dalar på avläsningen. Detta var oberoende av vilken sensor eller vilka rör som användes. Detta tyder på att det inte varit något materialfel utan snarare något fenomen med jorden kring sonderna.



Figur 16. Till vänster visar stressmätning från 60 cm djup, och de dubbla topparna från varje axel, till höger visar stressmätning från 40 cm djup och en topp per axel.

På 20 cm djup fanns ingen signifikant skillnad oavsett hjullast eller antal överfarter i stressmätningen med bollingssonderna.

På 40 cm djup skiljer sig led T2 sig signifikant från L2 och L4 och led T1 är inte signifikant skilt från något led, dock så är det uppmätta medelvärde i T1 närmre det för T2 än för L2 och L4. Oavsett så blir det tydligt att en högre hjullast påverkar stressen mer på djupet än vad en lätt hjullast gör, helt enligt tidigare forskning och vad terranimo säger.

På 60 cm djup blir skillnaden ännu större då både led T1 och T2 är signifikant skilt från led L2 och L4.

5.3. Cylinderprover

5.3.1. Skrymdensitet

På 10–15 cm djup finns ingen signifikant skillnad mellan de packade leden, utan det är endast referensledet som skiljer sig signifikant åt. Dock så fanns en korrelation på 0,40 mellan skrymdensiteten och totala antalet ton, vilket är logiskt med tanke på att jorden nyligen varit bearbetad ner till det aktuella djupet och fortfarande var porös. I och med det grunda djupet så stämmer det väl med att stressen inte hunnit avta tillräckligt för att den lägre hjullasten ska vara fördelaktig ur packningssynpunkt, utan att det går att beskrivas av marktrycket vilket beskrivs av bland andra Schjønning & Lamandé (2011). Att variansen mellan proverna inom referensledet var betydligt större än mellan de packade leden är även det logiskt, då jorden inte packats ihop utan legat orörd efter kultiveringen och därmed borde vara mer heterogen.

För 30-35 cm djup så fanns det en signifikant skillnad mellan ledet med högst antal ton förflyttad massa, L4 och referensledet. Det är svårt att uttala sig om det är antalet ton eller antalet överfarter som står för skillnaden. Även i det ledet fanns en korrelation mellan skrymdensitet och antalet förflyttade ton, dock en svag korrelation, vilket även det stämmer väl med tanke på den avtagande stressen på det djupet kontra 10-15 cm djup. Överlag så var skrymdensiteten högre för jordskiktet 30-35 cm än för 10-15 cm samt variansen var mer lik mellan det opackade och de packade leden. Att jorden hade en högre skrymdensitet i alven var väntat, då den inte blivit luckrad på samma sätt som matjordslagret. Att det inte var signifikant skillnad mellan referensledet och led T1, T2 och L2, tyder på att hjullasten inte var tillräckligt hög i försöket och/eller att antalet upprepningar var för lågt för att jorden skulle packas och tydliga slutsatser kunna dras för hur alven packas beroende på hjullast och antal passager.

5.3.2. Kompressionstest

160 stycken cylindrar med jordprov, 80 cylindrar med matjord och 80 cylindrar med jord från alven komprimerades upp till 1000 kPa tryck. Samtidigt loggades distansen från cylinderkanten så att man vet hur mycket jorden minskat i volym vid ett viss tryck. Jorden i alla de 80 cylindrarna med matjord vällde över/smetades ut, från cylindern vid tryck från 100 till 950 kPa tryck. Detta fenomen samt variationen i när det vällde över var troligtvis beroende på varierande vattenhalten i proverna. På grund av att trycket kunde öka snabbt och det var svårt att definiera exakt när jorden började tryckas ut ur cylindern istället för att komprimeras så kunde detta enligt min mening inte göras med någon mätsäkerhet eller att få någon data som man skulle kunna använda för att dra några slutsatser av.

Om detta fenomen skulle ha noterats och använts som någon form av data för vidare användning och analys så hade det behövts tydligare definition om när jorden började tryckas ut och minst en extra person som hade kunnat övervaka det och läst av vid vilket tryck det skedde.

Det här fenomenet skedde inte alls i cylindrarna med prov från alven, kanske på grund av lägre vattenhalt men troligtvis är också en fastare markstruktur med stabilare aggregat en delförklaring till detta.

I proverna från alven fanns inte någon signifikant skillnad alls mellan de olika leden och dess deformation i mm, och de följer inte heller någon trend med antalet förflyttade ton, bortsett från att referensledet hade högst deformation. Detta skulle kunna bero på att volymen av makroporer bibehållits på grund av att packningen i de olika leden inte varit större.

Det finns dock en korrelation mellan skrymdensitet och deformation med ett värde på -0,53, vilket innebär att 53 % av deformationen går att härleda till skrymdensiteten. Det vill säga att en jord med lägre skrymdensitet deformeras mer vid ett visst tryck.

5.4. Penetrationsmotstånd

Tio stick togs i varje ruta. I de behandlade leden togs sticken i centrumlinjen av hjulspåren. I kontrollleden togs tio stick slumpmässigt i rutan. Då det är stor variation i mätvärdena mellan de olika sticken så skulle man kanske öka antalet stick till 20 st per ruta, dels för att få ett större underlag och säkrare skillnad mellan leden och dels för att fått bättre underlag och tagit höjd för uteblivna eller osäkra mätvärden. Efteråt så skulle även alla stick tagits av samma person, om olika penetrationshastighet eller dylikt skulle kunnat ha påverkat.

Vid analys av data från penetrationsmätningarna så upptäcktes det att i vissa av mätningarna så saknades mätdata för de djupaste mätpunkterna för profilen. Dessa är inte medräknade i medelvärdena för de olika behandlingarna. Det upptäcktes även att i vissa av sticken så hade samma tryck registrerats för flera centimeter i rad, vilket inte torde vara realistiskt då dessa värden sticker ut från de på samma djup i andra stick och även skiljer sig ifrån de andra mätvärdena där värdena skiljer sig mycket från varje centimeter i djup. Ett skräckexempel går att se i figuren nedan.

40	3,22	3,13	2,92	3,61	4,89	3,18	2,85	4	3,98	4,79	3,657
41	2,55	3,13	2,92	3,61	4,89	3,82	2,85	4	4,71	4,79	3,727
42	2,55	3,13	3,39	3,61	4,89	4,07	3,04	4	4,71	4,79	3,818
43	2,55	3,13	3,75	3,87	4,89	4,07	3,36	3,81	4,71	4,79	3,893
44	2,59	3,13	3,79	4,28	4,82	4,48	3,85	3,81	4,65	4,79	4,019
45	2,59	3,13	3,71	4,59	4,82	4,78	5,07	3,56	4,71	4,79	4,175
46	2,59	3,13	3,69	4,76	4,82	4,77	5,54	3,21	4,71	4,79	4,201
47	2,59	3,13	3,69	4,46	4,81	5,18	5,56	3,21	4,61	4,79	4,203
48	2,59	3,13	3,69	4,14	4,95	4,93	5,56	3,21	4,59	4,79	4,158
49	2,75	3,13	3,9	4,14	4,95	4,93	5,39	3,21	4,64	4,79	4,183
50	2,75	3,13	3,97	3,66	4,71	4,93	5,2	3,3	4,66	4,89	4,12
51	2,75	3,13	3,92	3,93	4,71	4,32	5,2	3,3	4,76	4,89	4,091
52	2,56	3,13	3,92	4,15	4,71	4,32	4,68	3,3	5,06	4,89	4,072
53	2,99	3,13	3,82	4,43	4,47	4,32	4,68	3,3	5,35	4,89	4,138
54	3,11	3,13	3,82	4,54	4,47	4,32	4,21	4,6	5,43	2,85	4,048
55	3,38	3,13	3,82	4,54	4,47	3,93	4,43	4,6	5,28	2,85	4,043
56	3,58	3,13	3,35	3,92	4,47	3,93	4,78	4,82	5,28	2,85	4,011
57	3,66	3,13	3,35	3,92	4,47	3,93	5,35	4,68	4,71	2,85	4,005
58	3,84	3,13	3,11	3,92	4,48	3,93	5,36	4,68	4,18	2,85	3,948
59	3,84	3,13	3,54	3,92	3,92	3,93	5,34	4,51	4,18	2,85	3,916
60	3,68	3,13	3,99	3,63	2,77	3,41	5,23	4,16	4,18	2,85	3,703
61	3,33	3,13	4,26	3,54	2,77	3,41	5,45	4,16	3,84	2,85	3,674
62	3,46	3,13	4,3	3,54	2,77	3,41	5,55	3,63	3,84	2,85	3,648
63	3,72	3,13	4,3	3,54	2,77	3,41	5,5	3,63	3,28	2,85	3,613
64	3,68	3,13	3,87	3,54	2,77	3,41	4,97	3,52	3,28	2,85	3,502
65	3,83	3,13	3,87	3,54	2,77	3,41	4,97	2,83	3,28	2,85	3,448
66	4,18	3,13	3,87	2,53	2,77	3,41	4,97	2,83	3,28	2,85	3,382
67	4,16	3,13	3,87	2,53	2,77	2,98	4,97	2,83	2,6	2,85	3,269
68	3,91	3,13	3,11	2,53	2,77	2,98	4,97	2,83	2,6	2,85	3,168
69	3,86	3,13	3,11	2,53	2,77	2,98	4,97	2,83	2,33	2,85	3,136
70	3,7	3,13	3,11	1,52	2,77	2,98	4,97	2,83	2,43	2,85	3,029
71	3,25	2,62	3,11	2,05	2,77	2,98	3,34	2,83	2,48	2,85	2,829
72	3,25	1,88	2,58	2,05	2,77	2,98	3,34	2,83	2,19	2,85	2,672
73	3,01	1,88	2,58	*****	2,35	2,98	3,34	2,83	2,34	2,85	2,684444
74	3,01	1,88	2,58	*****	2,35	2,45	3,34	2,7	*****	2,85	2,645
75	2,92	1,88	2,47	*****	2,35	2,45	2,44	2,89	*****	2,85	2,53125
76	3,21	1,88	2,47	*****	2,14	2,45	2,44	2,83	*****	2,26	2,46
77	3,31	1,88	2,4	*****	2,37	2,19	2,44	2,83	*****	2,26	2,46
78	3,31	1,88	2,42	*****	0,8	2,19	2,48	1,44	*****	2,26	2,0975
79	3,33	1,88	2,4	*****	*****	2,05	*****	*****	*****	*****	2,415
80	2,87	1,88	2,32	*****	*****	2,05	*****	*****	*****	*****	2,28

Figur 17. De markerade siffrorna har samma mätvärde flera cm i rad och uteblivna resultat i de djupare lagren visas av asterixerna, från en av penetrometermätningarna med mest brister.

Penetrationsmotståndet skiljer sig signifikant åt, där led L2, L4 samt referensledet har ett högre högsta penetrationsmotstånd än led T1 och T2. Det tycks märkligt att det maximala uppmätta penetrationsmotståndet inte följer antalet förflyttade ton eller antalet passager och att referensledet inte har ett lägre penetrationsmotstånd. Även skillnaderna i medelvärdena är märkliga, då det i L4 och L2 ligger mellan 4,3 kPa och 4,4 kPa, i referensledet runt 4,1 kPa och i led T1 och T2 mellan 3,6 och 3,7

kPa. Det skulle kunna vara bristen på data, både kvalitativt och kvantitativt som är orsaken till det här.

Djupet där de högsta mätvärdena för penetrationsmotståndet uppmätts följer antalet överfarter och antalet förflyttade ton något bättre. Där referensledet har sin topp djupast på 53,75 cm ner för att sedan följas av T1, T2, L2 och L4 som har maxmotståndet på det grundaste djupet 49 cm. Det är dock svårt att dra några större slutsatser utifrån detta dataunderlag då det inte är någon signifikant skillnad mellan de olika behandlingarna, svaga korrelationer och att det är framtaget med samma data som max penetrationsmotstånd, vilket lämnar en del att önska.

Att det var lägre penetrationsmotstånd i matjordslagret 0-25 cm jämfört med alvlagret 26-80 cm är ganska väntat då matjordslagret nyligen var kultiverat.

5.5. Terranimo

Med ekipagen inlagda i terranimo så gavs bedömningen att det för det lätta ekipaget inte finns någon risk för markpackning i alven men att risken är betydande för markpackning i alven av det tyngre ekipaget. Med en jordanalys av andelen lera samt mullhalt så hade bedömningen kunnat se annorlunda ut, då det påverkar jordens styrka. Terranimo beräknar analysen på 35 cm djup, ungefär samma djup som cylinderproven är tagna på i denna studie för att representera alven. L4, det lätta ekipaget med fyra passager, är det enda led som skiljer sig signifikant åt från referensledet gällande skrymdensitet på 30-35 cm djup, och är också det led som har högst medelskrymdensitet. Det skiljer sig inte signifikant från de andra leden dock. Även gällande penetrationsmotstånd på 40 cm djup har led L4 det högsta medelvärdet samt är signifikant skilt från alla led utom L2. Det i sig kanske inte är nog för att konstatera brister i bedömningen gjord av Terranimo, men kanske tillräckligt för att öppna en dörr för vidare forskning och utvärdering av antal passager eller att väga in den totala vikten av det inlagda ekipaget som en riskfaktor.

5.6. Spåregenskaper

5.6.1. Spårdjup

Djupet av hjulspåret mättes rakt över varje bollingsond, med markytan som nollpunkt, efter varje körning. Djupet varierade stort beroende på om det var mitt på eller direkt innan eller efter en klack i mönstret. Dessutom så varierade markytan i det kultiverade bruket mycket. Så jag skulle påstå att det är ett mått med stor variation som inte borde dras några slutsatser av. Det är mycket möjligt att det hade spelat en större roll ifall det hade varit blötare och kletigare i markytan, och att traktorn därav hade sjunkit och gått djupare, så bedöms inte ha varit fallet.

5.6.2. Spårbredd

Likt djupet så mättes bredden på hjulspåret över bollingsonderna. Det kunde skilja sig lite åt, främst beroende på var i spåret man mätte och var i hjulmönstret. Jag skulle inte påstå att traktorn sjönk djupare vid något tillfälle och därför skulle fått ett bredare spår. I de led med ett flertal överfarter mättes det i vissa fall bredare hjulspår än de 650 mm som bakhjulen var breda. Det bör dock snarare ses som en mått på vingelmån i detta försök än att däckets kontaktarea mot jorden skiljt sig åt mellan de olika rutorna och behandlingarna.

6. Slutsats

I både matjord och alv och finns det samband mellan packning och antal förflyttade ton, passager och hjullast. Det är svårt att dra några långtgående slutsatser om vilken variabel som leder till vilket utfall då de är tätt sammankopplade men inte proportionella vid förändring. Till exempel: bakhjulslasten på det tunga ekipaget är ungefär dubbelt så hög som på det lätta ekipaget, men antalet totalt förflyttade ton är inte i närheten av dubbelt så högt. Dessutom så har det lätta ekipaget en högre last på framaxeln än vad det tunga ekipaget har, och den vikten ligger då på smalare däck. Det är då svårt att veta orsak och verkan av de olika variablerna. Vissa resultat, så som att det maximala penetrationsmotståndet är högre i referensledet än i båda leden av det tunga ekipaget, är oväntade och tyder eventuellt på något fel, antingen i datainsamlingen eller i försökets omfattning.

Fortsatt forskning behövs på området, dels under fler omständigheter så som på fler typer av jordar och vid olika vattenhalter. Dels med färre felkällor, till exempel fler stick med penetrometern vid varje mätning och korrekt avstånd till bollingsonderna. Utöver det krävs att försöken görs med en reducerad mängd variabler så att varje mekanism kan förstås, kvantifieras, om möjligt kopplas till den enskilda faktorn. Även att variabel testas i större omfattning och i mer extrema varianter, som fler överfarter och högre hjullast för att få en bredare förståelse.

Referenser

- Chamen, W C T., Moxey, A P., Ttowers, W., Balana, B. & Hallett, P D. 2015. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. Soil and tillage research. Volym (146), 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.011>
- Ekholm, R. 2016. Markpackning: påverkan på markens fysikaliska egenskaper. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för mark och miljö. <https://stud.epsilon.slu.se/10031/>
- Graves, A.R., Morris, J., Deeks, L.K., Rickson, R.J., Kibblewhite, M.G., Harris, J.A., Farewell, T.S. & Tuckle, I. 2015. The total cost of soil degradation in England and Wales. Ecological Economics. Volym (119), 399-413. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.026>
- Håkansson, I. 2005. Machinery-Induced compaction of arable soils. Reports from the division of soil management. Volym (109). Sveriges lantbruksuniversitet, department of soil sciences Uppsala. https://pub.epsilon.slu.se/5517/1/hakansson_i_101206.pdf
- Håkansson, I. 2000. Packning av åkermark vid maskindrift. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen. Volym (99). Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för mark och miljö. https://pub.epsilon.slu.se/5082/1/hakansson_i_100823.pdf
- 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 and Tillage Research. Volym (79), 191-205. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.008>
- 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 and Tillage Research. Volym (194). <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>

- Lipiec, J., Hajnos, M. & Sweiboda, R. 2012. Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. *Geoderma*. Volym (179-180), 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.014>
- Naderi-Boldaji, M., Kaxemzadeh, A., Hemmat, A., Rostamj, S. & Keller, T. 2017. Changes in soil stress during repeated wheeling: A comparison of measured and simulated values. *Soil Research*. Volym (56), 204-214. <https://doi.org/10.1071/SR17093>
- Peth, S., Rostek, J., Zink, A., Mordhorst, A. & Horn, R. 2010. Soil testing of dynamic deformation process of arable soils. *Soil and Tillage Research*. Volym (106), 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.10.007>
- Pulido-muncada, M., Munkholm, L J. & Schjønning, P. 2019. Wheel load, repeated wheeling, and traction effects on subsoil compaction in northern Europe. *Soil and Tillage Research*. Volym (186), 300-309. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.005>
- Sandin, M., Jarvis, N. & Larsbo, M. 2018. Consolidation and surface sealing of nine harrowed Swedish soils. *Soil and Tillage Research*. Volym (181), 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.017>
- Schjønning, P., Elmholt, S. & Christensen, B.T. 2004. Soil quality management-concepts and terms. Schjønning, P (red.) *Managing Soil quality: Challenges in Modern Agriculture*. CAB International. 1-12. https://orgprints.org/id/eprint/1511/2/A4659_Schjonning_Chap01.pdf
- Schjønning, P. & Lamandé, M. 2011. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil and Tillage Research*. Volym (114), 71-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2010.08.011>
- Schjønning, P. & Lamandé, M., Keller, T., Pedersen, J. & Stettler, M. 2012. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. *Soil Use and Management*. Volym, (28), 378-393. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00411.x>
- Stettler, M., Keller, T., Weisskopf, P., Lamandé, M., Lassen, P. & Schjønning, P. 2014 Terranimo – a web-based tool for evaluating soil compaction. *Landtechnik*. Volym (3), 132-138. https://arbor.bfh.ch/6095/2/123-Artikeltext-242-1-1-20190605_en.pdf

ten Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., Munkholm, L J. & Lamandé, M. 2019. The contribution of tyre evolution to the reduction of soil compaction risks. Soil and Tillage Research. Volym (194).
<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.029>

Åkesson, O. 2017. Tea time for soils- decomposition experiments in Swedish long-term field trials. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för ekologi. https://stud.epsilon.slu.se/10068/1/akesson_o_170317.pdf

7. Populärvetenskaplig sammanfattning

En pågående strukturrationalisering inom lantbruket har lett till att större och tyngre maskiner används. Krav på högre skördar har lett till att lantbrukarna i många fall väljer att köra mer på åkrarna vilket leder till markpackning. Markpackningen gör att jorden blir kompaktare och porer förstörs, vilket i sin tur leder till att jorden syresätts och infiltrerar vatten sämre samt att växternas rötter får svårare att växa. Detta resulterar i avtagande skördar och ökade kostnader för lantbruket. Det medför även stora samhällsekonomiska kostnader för övergödning, ökad risk för översvämningar och ökad avgång av växthusgaser. Risken för markpackning kan bland annat minskas genom bredare däck, så att trycket mot markytan minskar, detta hjälper dock mest för att minimera markpackningen i det översta jordlagret. Längre ner i marken packas jorden främst av den totala vikten. I denna studie undersöktes det om flera ganska lätta körningar kunde påverka packningen på djupet.

Försöket gjordes utanför Uppsala, med en tung och en lätt traktor och olika mätningar gjordes under och efter att den tunga traktorn hade kört en och två gånger, och efter att den lätta traktorn hade kört två och fyra gånger.

Mätningarna visade att den tunga traktorn påverkade mer på djupet när den körde på åkern, men vissa resultat visade större packning där den lätta traktorn hade kört fler gånger. Resultaten varierade, vissa tydde på att en lätt traktor och fler överfarter var bättre och vissa tydde på att få överfarter med en tung traktor var bättre. Sammanfattningsvis så visades tre saker med försöket.

- 1) Tyngre traktor ökar risken för markpackning på djupet
- 2) Körning påverkar jorden negativt
- 3) Det behövs mer forskning för att förstå hur varje enskild variabel påverkar markpackningen

Tack

Jag vill tacka mina handledare Lorraine ten Damme, Lorena Chagas Torres och Thomas Keller för all hjälp. Även andra medarbetare på gruppen för markmekanik och jordbearbetning för hjälp och inspirerande samtal samt personal från Lövsta fältforskningsstation.