



# Effekter av markstruktur på tryckutbredning och packningsbenägenhet i åkermark

– en jämförande fältstudie mellan konventionellt jordbearbetad åkermark och permanent bevuxen åkermark

---

*The effect of soil compaction on conventional tilled soil and permanent grasslands - a field study*



Gabriel Thor

Examensarbete 30 hp  
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU  
Institutionen för mark och miljö  
Agronomprogrammet mark/växt  
Serietitel, arbetsnummer i serien • 2022:03  
Uppsala 2021



# Effekten av markpackning på konventionellt jordbearbetad mark och permanent vall

*The effect of soil compaction on conventional tilled soil and permanent grasslands  
– a field study*

Gabriel Thor

**Handledare:** Thomas Keller, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för mark och miljö

**Examinator:** Nicholas Jarvis, Sveriges lantbruksuniversitet, 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 mark och miljö

**Utgivningsort:** Uppsala

**Utgivningsår:** 2021

**Omslagsbild:** Gabriel Thor

**Serietitel:** 2022:03

**Nyckelord:** markpackning, hållfasthet, markstruktur, markttextur, direktsådd, reducerad jordbearbetning

## **Sveriges lantbruksuniversitet**

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för mark och miljö

Avdelningen för markmekanik och jordbearbetning

## 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

Att gårdar blir större är en tydlig trend inom det svenska lantbruket. Med det följer även en större efterfrågan på större maskiner och redskap. Denna rationalisering medför en ökad risk för att åkermarken blir kraftigt packad och därigenom skadad, vilket på sikt kan leda till försämrad bördighet. I detta arbete har två identiska jordbearbetningsförsök legat till grund för arbetets mätningar. Eftersom jordarten skiljde på de två försöksplatserna kunde även den skillnaden jämföras. På respektive försöksplats har två olika odlingssystem jämförts och undersökts hur de påverkas av kompaktion. Det ena odlingssystemet som jämförts var konventionell jordbearbetning med årlig plöjning. Det andra var ett odlingssystem bevuxen med ett permanent växttäck med vall. Permanent vall användes i jämförelsen för att simulera ett direkt sått odlingssystem. Det för att markstrukturen i ett direkt sått odlingssystem och permanent bevuxen gräsmark med vall ska i teorin ha en liknande struktur.

Både hållfasthet och tryckutbredning i marken i respektive jord och odlingssystem testats. För att testa hållfastheten togs sammanlagd 108 cylinderprover. Orörda markstrukturprover togs ifrån tre olika djup för varje markprofil, för att sedan testa provernas hållfasthet på labb med hjälp av en kompakteringsmaskin. Tryckutbredning testades genom att nergrävda trycksensorer passerades av en tung traktor med högt ringtryck. Sensorerna var placerade på tre olika djup i alla av försöksleden. Även här togs sammanlagd 108 cylinderprover före och efter överfarterna med traktorn för att undersöka skrymdensitet. Dessa prover analyserades också i labb. I samband med överfarterna mättes även spårdjupen som orsakats av traktorn.

Resultaten visar att markens bindningstryck dvs fuktighet är det som påverkar hållfastheten mest, till skillnad från struktur och textur. Av struktur och textur så var texturen mer bidragande till provernas hållfasthet. Strukturen i proven bidrog alltså minst till hållfastheten. Den permanenta vallen hade högre hållfasthet än det plöjda ledet för den styva lerjorden. I det fallet hade alltså strukturen en avgörande roll för hållfastheten på alla djup som testades. I proven som togs i den lättare jorden sågs ingen skillnad i hållfasthet mellan vall ledet och det plöjda ledet.

Däremot vad gäller tryckutbredning som testades i fält fanns tydliga skillnader mellan leden i den lättare jorden. Trycket som uppmättes var lägre för ledet med permanent vall jämfört med ledet som plöjs årligen. Marken med ett permanent växttäck kan alltså fördela trycket bättre med hjälp av strukturen som ett välutvecklat rotsystem ger. Gällande tryckutbredning i jorden med styv lera sågs ingen skillnad mellan leden. Den potentiella skillnaden i struktur var alltså inte avgörande för tryckutbredningen i markprofilen. Jordens fysikaliska egenskaper som textur och bindningstryck var det som påverkade tryckutbredningen mest. Såvida stämmer den äldre tesen om att styva leror är mera packningsbenägna än lättare jordar. Att en god struktur skapad av rotsystem hade störst effekt på den lättare jorden var väntat, men att det inte fanns någon skillnad på den styvare jorden var oväntat. En potentiell bieffekt av det permanenta växttäck är att det välutvecklade rotsystemet har en uttorkande effekt på jorden vid fuktiga förhållanden, då markfukten respireras bort eller hålls i rotsystem och i växterna. Det samma gäller torra förhållanden. Rötterna håller fukten då den andra jorden, som är mera homogen i sin struktur snabbt torkar ur. Denna vattenbuffrande effekt som rotsystemen ger i ett örört odlingssystem med permanent växttäck är det som till störst del svarar för hur påfrestningarna den utsätts för.

*Nyckelord:* markpackning, hållfasthet, markstruktur, markttextur, direktsådd, reducerad jordbearbetning

## Abstract

Farms getting bigger is a clear trend in Swedish agriculture. With that comes a demand for larger machines and implements. This rationalization entails an increased risk that the arable land will be heavily compacted and thereby damaged, which in the long run may lead to reduced soil fertility. In this thesis, two identical tillage field trials have formed the basis for the thesis. Since the soil type differed at the two experimental sites, the soil differences could also be compared. At each field trial site, two different cultivation systems have been compared and investigated on how they are affected by compaction. One of the cultivation systems was conventional tillage with annual mouldboard ploughing. The other cultivation system consisted of a permanent grassland. The permanent grassland was used in the comparison to simulate a directly sown cultivation system. This is because the soil structure in a directly sown cultivation system and permanent grassland should in theory have a similar structure.

Both tension strength and pressure distribution were tested and compared. To test the strength, a total of 108-cylinder samples was taken. Intact soil structure samples were taken from three different depths for each soil profile. Samples were then tested to determine strength in lab using a compaction machine. Pressure propagation was tested by passing over buried pressure sensors in each field trial lot, with a heavy tractor with high tire pressure. The sensors were placed at three different depths in each of the experimental test lot. Another batch 108-cylinder samples were taken before and after the crossings with the tractor to examine bulk density changes, before and after the passes. These samples were analysed in the lab. In connection with the crossings, even the track depths were measured.

The results show that the tension pressure of the soil, is what affects the strength the most, in contrast to structure and texture. Texture was more contributing to the strength of the samples. The structure of the samples contributed the least to the strength. The permanent grassland had higher strength than the annually tilled soil, for the heavy clay soil. In that case, the structure played a decisive role in the strength at all the depths tested. In the samples taken in the silty soil, no difference in strength were seen between the grass lot and the ploughed lot. However, in terms of pressure propagation tested in the field, there were clear differences between the slots in the silt soil. The pressure measured was lower for the joint with permanent grass compared to the lot that is ploughed annually. The soil with a permanent grass cover can distribute the pressure better with the help of the structure, which the well-developed root system provides. Regarding pressure distribution in the soil with heavy clay, no difference was seen between the plots. The potential difference in structure was not decisive for the pressure distribution in the soil profile.

The soil profiles physical properties such as texture and tension strength affected the pressure distribution the most. Old results stating that heavy clays are more prone to compaction than lighter soils are conforms with the findings from this thesis. It was expected that a good structure created by root systems would have a greater effect on the lighter soil. However, it was unexpected that there was no difference in this matter in the heavy soil. A potential side effect of the permanent grass lots is that the well-developed root system had a drying effect on the soil in wet conditions. Whereas soil moisture is respired by the grass or kept in the root system of the plants. It's the same in dry conditions, the roots will retain moisture, while a tilled soil which is more homogeneous in its structure, dries out more quickly. This water-buffering effect that the root systems provide in an undisturbed cultivation system responds for how the stress propagation will be distributed.

*Keywords:* soil compaction, soil strength, soil structure, soil texture, direct drilling, no-tillage

# Innehållsförteckning

<b>Tabellförteckning .....</b>	<b>8</b>
<b>Figurförteckning.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Inledning.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Syfte.....</b>	<b>12</b>
<b>3. Metod .....</b>	<b>13</b>
3.1. Försöksplatser .....	13
3.2. Kompressionstest för bestämning av förkonsolideringstryck och hållfasthet 14	
3.2.1. Provtagning för förkonsolideringstryck och hållfasthet .....	14
3.2.2. Kompressionstester på labb för bestämning av hållfasthet och förkonsolideringstryck.....	14
3.2.3. Sammanställande kompressions testen på labb .....	15
3.3. Tryckmätningar med Bollingsonder .....	16
3.3.1. Dataanalys av tryckmätningar med Bollingsonder .....	19
3.3.2. Cylinderprovtagning före och efter packning, för bestämning av skrymdensitet och mättad hydraulisk konduktivitet .....	20
<b>4. Resultat.....</b>	<b>21</b>
4.1. Mekaniska egenskaper- förkonsolideringstryck och hållfasthet .....	21
4.2. Tryckmätning Bollingsonder .....	24
4.2.1. Spårdjup.....	24
4.2.2. Skrymdensitet .....	25
4.2.3. Hydraulisk konduktivitet .....	27
<b>5. Diskussion.....</b>	<b>28</b>
5.1. Hur påverkas markens hållfasthet av markstrukturen och texturen, och hur förändras hållfastheten som funktion av markens fuktighet? .....	28
5.2. Hur påverkas tryckutbredningen av markens struktur och markens textur? 29	
5.3. Vad har fältöverfarer med en jordbruksmaskin för påverkan på marken, och hur skiljer sig detta mellan en permanent vall och en plöjd mark? .....	31

5.4.	Felkällor .....	32
5.5.	Slutsats .....	33
<b>Referenser</b>	.....	<b>34</b>
<b>Tack</b>	.....	<b>35</b>



## Tabellförteckning

Tabell 1. Partikelfraktioner samt tot-C i procent för djupen 10, 30 och 50 cm för Säby och Ultuna .....	13
Tabell 2 Beskriver medelvärde av den hydrauliska konduktiviteten samt standardavvikelse för Säby.....	27
Tabell 3 Beskriver medelvärde av den hydrauliska konduktiviteten samt standardavvikelse för Ultuna.....	27

## Figurförteckning

Figur 1 Beskrivning av hur tryckutbredningen blir i en markprofil vid torra, fuktiga och våta hörhållanden (Håkansson 2000).....	11
Figur 2. Exempel på regression vid förkonsolidering, utifrån en graf med logitimerat tryck för 400–800 kPa.....	16
Figur 3 Schematisk skiss över tryck mätning vid två djup med Bolling sonder (Keller et al. 2016).....	17
Figur 4 Maskinöverfart över Bolling trycksensorer (foto Gabriel Thor).....	18
Figur 5. Animering av metoden för att passerad över försöken utan att köra för långt in i försöksrutan. ....	18
Figur 6. Graf ifrån Control Center Series 30 för en mätning med bolling sonder.	19
Figur 7 Förkonsolideringstryck vid prov på 10 cm djup, för varje led och plats ..	22
Figur 8 Förkonsolideringstryck vid prov på 30 cm djup, för varje led och plats ..	23
Figur 9 Förkonsolideringstryck vid prov på 50 cm djup, för varje led och plats ..	23
Figur 10 Medel för uppmät tryck vid varje djup för överfart 3 och 4, med standardavvikelse.....	24
Figur 11 Spårdjup i cm, för varje led och plats efter antal överfarter.....	25
Figur 12 Skrymdensitet på Ultuna mät innan överfarter för båda försöksleden på 10, 30 och 50 cm. Samt efter 7 överfarter för båda försöksleden vid 30 och 50 cm djup. ....	26
Figur 13 Skrymdensitet på Säby mät innan överfarter för båda försöksleden på 10, 30 och 50 cm. Samt efter 7 överfarter för båda försöksleden vid 30 och 50 cm djup. ....	26

# 1. Inledning

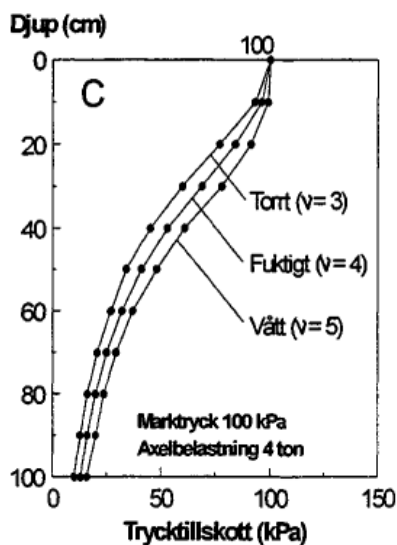
Att gårdar blir större är en tydlig trend inom det svenska lantbruket. Med det följer även en större efterfrågan på större maskiner och redskap, för att öka kapaciteten och hantera en större mängd areal. Odlingsinsatserna som görs i jordbruket sker allt som oftast i små tidsfönster som kan variera mellan åren. Med klimatförändringar som varmare temperaturer, varierad nederbörd och reducerad tjälsättning, kan insatsfönstren minska ytterligare (Neset et al. 2019).

Tillpackning av mark med tunga maskinöverfarter skapar många problem som hämmar växtproduktiviteten i jordbruket. Packning har länge varit ett problem men det blir allt alvarligare i jordbruket med en efterfrågan på större och tyngre maskiner för att rationalisera och effektivisera jordbruket. Vid tunga överfarter deformeras jorden av de spänningar (dvs trycket) som uppstår. Ringtryck i däck, axellast och fälttrafik är faktorer som påverkar hur kraftiga skadorna kan bli. Ett lågt ringtryck, låg axellast och lite fälttrafik minskar risken för skador ska uppstå. Tidpunkten för körning har också en betydande påverkan (Alakukku 2015).

Vid lätta maskiner sker skadorna som uppstår vid packning i marken främst i det övre skiktet dvs, matjorden. Trots det förblir packningen i matjorden oftast inte besvärlig eftersom det skiktet ofta bearbetas årligen, med konventionell bearbetning eller reducerad. Med lättare maskiner i fält går tryckutbredningen inte så långt ner i alven som en tyngre maskin gör. Tryckutbredningen blir större med tyngre maskiner vilket är allvarligare eftersom packningen sker mycket längre ner i alven. Skadorna riskerar att förbli permanenta så pass djupt. Metoder så som alvluckring förekommer för att luckra upp djupskadad mark med blandad effekt (Alakukku 2015).

Deformationen infattas av en volymetrisk deformation samt en skjuvningsdeformation. Volymetrisk deformation innebär att jorden blir kompaktare och porvolymen minskar, och skjuvning innebär att porernas kontinuitet minskar (Keller et al. 2016). Faktorerna som styr hur stor deformationen på jorden blir är spänningarna som jorden utsetts för, samt jordens struktur, textur, mullhalt, och framför allt vattenhalt vid kompakterings-tillfället (Nawaz et al. 2013).

Egenskaper som försämras i jorden på grund av packning är biologiska, fysikaliska och kemiska (Håkansson 2000). Främst försämras jordens fysikaliska egenskaper vid packning. Försämrad struktur resulterar i ett sämre gasutbyte och vatteninfiltration (Keller et al. 2016). Risken för ökad erosion genom mer avrinning är också något som kan bli en effekt av packskador (Håkansson 2000). Högre bulkdensitet på jorden leder till ett högre mekaniskt motstånd, vilket gör det svårare för rötter att penetrera jorden och för marklevande organismer att leva i den. Med erosionen som uppstår riskeras markbunden näring att lakas ut ur jordar (Nawaz et al. 2013).



Figur 1 Beskrivning av hur tryckutbredningen blir i en markprofil vid torra, fuktiga och våta hörhållanden (Håkansson 2000).

För att minska risken för markpackning ska jordbearbetningsinsatser helst ske vid torrare förhållanden, men med varierande årsnederbörd kan körningar i missgynnande förhållande bli oundvikligt. Tryckutbredningen i marken ökar under fuktigare förhållanden, vilket gör att även trycket längre ner i marken ökar (Håkansson 2000). Figur 1 visar på det sambandet. Grundförutsättningar så som god dränering och struktur är därför viktiga (Haldén et al. 2019).

Conservation agriculture är ett odlingssystem vars syfte är att bland annat ha bevuxen mark året runt som minimera packningsskador av tunga jordbruksmaskiner och gör att skadorna i marken inte blir lika allvarliga (Farooq & Siddique 2014). Underlaget är bristfällig kring hur olika jordtyper packas i ett odlingssystem som conservation agriculture. Eftersom CA först implementerades till slätt/prärie jordbruk i andra delar av världen med i huvudsak lätta siltjordar, med erosionsproblematik. CA implementerat i svensk styv lerjord är därför relativt obeprövat i praktiken, men borde i teorin fungera bra.

Finns det då någon skillnad mellan hur lättare respektive styvare lerjordar reagerar på packning och hur påverkar olika odlingssystem markens stabilitet? I detta arbete har det undersökts hur olika jordar som styv- eller lättare leror påverkas av belastning, och hur olika odlingssystem påverkar markens stabilitet. Är bevuxen mark året runt bättre för markens hållfasthet än plöjt mark?

## 2. Syfte

Syftet med detta arbete var att undersöka hur markstrukturen påverkar tryckutbredningen i marken, markens hållfasthet och därmed markens packningsbenägenhet. För att undersöka detta gjordes tryckmätningar i fält vid överfart av en jordbruksmaskin samt togs prover för markmekaniska och markfysikaliska mätningar i ett långliggande fältförsök.

Frågeställningar:

- Hur påverkas tryckutbredningen av markens struktur och markens textur?
- Hur påverkas markens hållfasthet av markstrukturen och texturen, och hur förändras hållfastheten som funktion av markens fuktighet?
- Vad har en överfart med en jordbruksmaskin för påverkan på marken, och hur skiljer sig detta mellan en permanent vall och en plöjd mark?

En hypotes var att permanent vall i många år har en bättre struktur och därigenom lägre packningsbenägenhet.

En annan hypotes var att permanent vall i många år skulle ha mindre tryckutbredning än de plöjda försöksleden.

## 3. Metod

I detta arbete har mätningar gjorts i två likadana långliggande försök. Båda försöken är placerade utanför Uppsala, Säby och Ultuna. För att svara på frågeställningarna i arbetet har både tryckmätningar i fält med hjälp av Bolingsonder genomförts, samt att prover tagits i fält för hållfasthet vilka har testats genom analyser på labb.

### 3.1. Försöksplatser

Försöksplatserna Säby och Ultuna valdes för provtagningarna. De valdes för att kunna se skillnaderna mellan jordarterna; en lättare jord, Säby och en styvare jord, Ultuna. Vid texturanalysen kunde man se tydliga skillnader mellan jordarna, tabell 1. Dessutom valdes det att göra undersökningar i två behandlingar med så stor kontrast i markstruktur som möjligt: permanent vall (23 år) och konventionell bearbetning (plöjning).

Tabell 1. Partikelfraktioner samt tot-C i procent för djupen 10, 30 och 50 cm för Säby och Ultuna

Plats/Djup	Ler d<0,002	Fin mjäla 0,002- 0,006	Grov- mjäla 0,006- 0,02	Fin- mo 0,02- 0,06	Grov- mo 0,06- 0,2	Mellan- sand 0,2- 0,6	Grov- sand 0,6- 2	Mull- halt	Tot-C
Säby 10 cm	21,5	6,7	10,8	38,8	21,8	0,3	0,2	4,1	1,6
Säby 30 cm	24,3	7,9	11,6	41	14,7	0,4	0,2	1,3	0,5
Säby 50 cm	32,7	9,4	16	36,8	4,5	0,4	0,2	0,2	0,4
Ultuna 10 cm	52,5	12,8	10,3	8	12,5	3,2	0,6	1,8	2,7
Ultuna 30 cm	46,8	11,3	9,5	12,4	18,5	1,3	0,1	0	1,3
Ultuna 50 cm	72,1	9,6	5,5	6,9	5,5	0,4	0,1	0	0,6

Båda försöken är båda uppförda 1997 och har betäckningen R2-7115. Det valdes att jämföra sen höstplöjning med normalt ringtryck och permanent vall. Vallen har i detta arbete används för att simulera hur strukturen skulle kunna se ut i ett direkt sått odlingsystem. Mätningar av marktryck med Bollingsonder har gjorts vid överfart av en traktor. Jordprovtagning för analys av markfysikaliska och-mekaniska egenskaper gjordes också i båda försöksleden. Alla provtagningar samt tryckmätningar med Bolingsonder gjordes i oktober 2020.

## 3.2. Kompressionstest för bestämning av förkonsolideringstryck och hållfasthet

### 3.2.1. Provtagning för förkonsolideringstryck och hållfasthet

Från varje försöksplats togs ostörda cylindriska jordprov på 10, 30 och 50 cm djup. Proven består sedan av jordkärna omslutet av numrerade stålcyllindrar med en diameter på 72 mm. Vid varje försöksplats togs totalt 72 prover, 12 per djup (3) och försöksled (2), jämnt fördelade på de två blocken. Vid varje ruta mättes tre provpunkter ut diagonalt, varvid två borrhöjningar uppfördes max 30 cm ifrån provpunkten. Spade användes för att skrapa av växttäcket på marken varvid proven skulle tas. För att ta sig ner till önskat djup användes en manuell jordborr, med en tumstock säkerställdes att djupet var korrekt. För att rensa ur hålet på löst material som fallit i efter borrhöjningen, användes till sist ett rensverktyg som jämna till botten på hålet.

Cylindrarna fästes i botten på ett nedslagningsdon. Efter att slagit ner donet strax över 50mm, vrids det om och förs uppåt med ett intakt, ostört prov i nedre änden som försiktigt tas av och läggs åter i en låda med lock på och under provet. Efter färdig provtagning förvaras prov i kylrum med en temperatur runt 3°C, för att bibehålla fukten i proven.

Vid dessa provtagningar samlades också lös jord i rutorna på de tre olika djupen. Jorden från samtliga rutor slogs samman för varje enskild försöksplats och användes för att göra en texturanalys som sammanställs i tabell 1.

### 3.2.2. Kompressionstester på labb för bestämning av hållfasthet och förkonsolideringstryck

På markmekanik labbet vid institutionen för mark och miljö på SLU har cylinderprover behandlats och utvärderats. Proverna ifrån varje försök, jord och djup har sedan randomiserats i tre grupper, en för varje tension. Det gjordes för att jämna ut möjliga skillnader mellan de två försöksrutorna.

Innan proverna kunde dräneras ner till rätt tension vattenmättades de. Detta gjordes genom att ställs proven i backar med tillsatt artificiellt regnvatten. Artificiellt regnvatten användes eftersom det simulerar en naturlig nederbörd. Avjonat vatten eller kranvatten med en annan jonkoncentration skulle kunna störa provernas struktur. Under cirka två veckor vattenmättas proven, under de första dagarna

tillsattes mindre mängder vatten. Det gjordes så att proven skulle hinna med att absorbera vätska, också för att inte riskera att skada provens struktur.

Efter cirka två veckor, när proven var mättade, vägdes de igen innan de placerades på tensionsplattor för att dräneras ner till önskad tension, vilka var: 3, 10 och 30 kPa. Efter 10–15 dagar när rätt dräneringsnivå uppnåtts, vägdes proverna återigen och strax därpå pressades proverna i en kompakteringsmaskin, som trycker ihop jorden i cylindrarna vid de olika vattenhaltarna.

Maskinen var inställt på att hålla en konstant kompressionshastighet (vertikal) på 0,1 mm/s varvid maskinen loggar det tryck som den måste applicera för att hålla den hastigheten, med ett inställt maxtryck på 1000 kPa. Den registrerade 20 loggningar/s. Hastigheten var konstant och trycket varierade mellan prov och över tid för samma prov som funktion av provets ”hållfasthet”. När maskinen uppnått 1000 kPa håller den det trycket en halv minut innan den återgår till sin startposition.

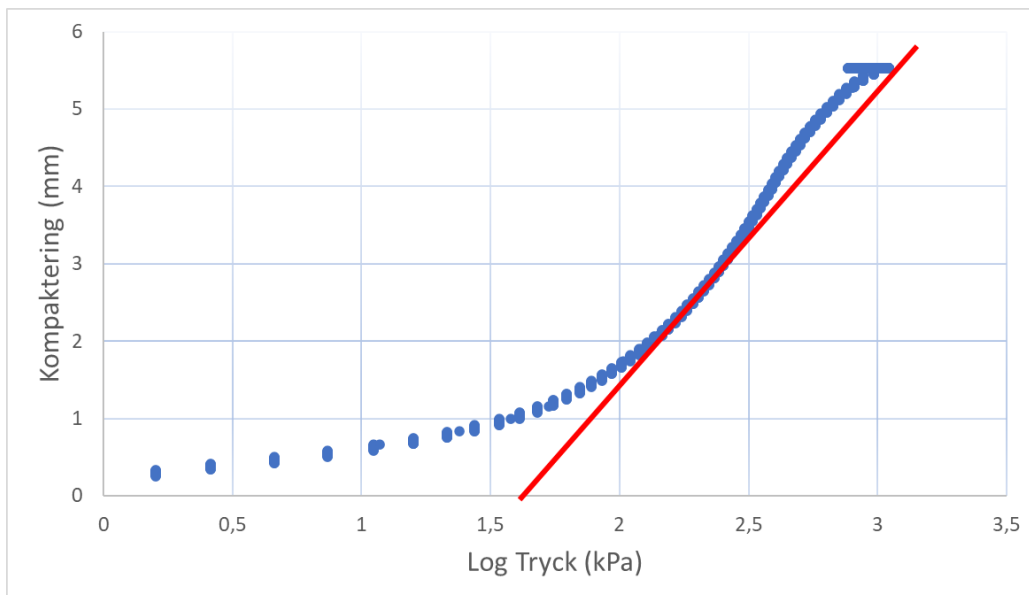
Genom denna metod kan man få fram förkonsolideringstrycket, dvs när jordens struktur inte längre kan upprätthållas vid det tryck som den utsätts för. Maskinens program sparar ner loggningarna som Excel filer. Med denna data kan man sedan skapa en graf som visar hur mycket provet har komprimerats under ett visst tryck. Trycket ökar med avståndet genom komprimeringen, till den punkt att strukturen kollapsar (förkonsolideringspunkt). Kvoten mellan tryck och avstånd ändras alltefter att strukturen uppnått sin förkonsolideringspunkt. Efter att proven blivit körda i maskinen ställs proverna in i en ugn på 105°C i 2 till 3 dygn, för att sen kunna bestämma skrymdensiteten. Proven vägdes också efter torkningen i ugnen samt att stål cylindrarna som omsluter proven också vägdes in på slutet.

### 3.2.3. Sammanställande kompressions testen på labb

Resultaten ifrån kompakteringstesterna sammanställdes genom att de grafer som utvisades ifrån varje prov logitimerades vilket då visar ett logaritmiskt avtagande i höjd (mm) för ökat tryck. En regression räknas ut för den period som följer precis efter konsolideringen (logitimerat intervall 400–800 kPa i exemplet i figur 2. Det logitimerade värdet varvid regressionen skär x-axeln för varje prov och graf, höjs efter det upp en tiopotens. Anledningen till att först ta ut tiopotensen är för att se var grafen kröker sig. Eftersom underlaget av prover var stort och arbetet främst ska visa på skillnader mellan behandlingarna ansågs det tillräckligt att kolla var regressionerna skär x-axeln. I resultaten blir effekten att de visar något lägre tryck för konsolideringstryck än var provens struktur faktiskt kollapsar. Som grafen i exemplet visar är det svårt att avgöra exakt vid vilket tryck strukturen kollapsar,



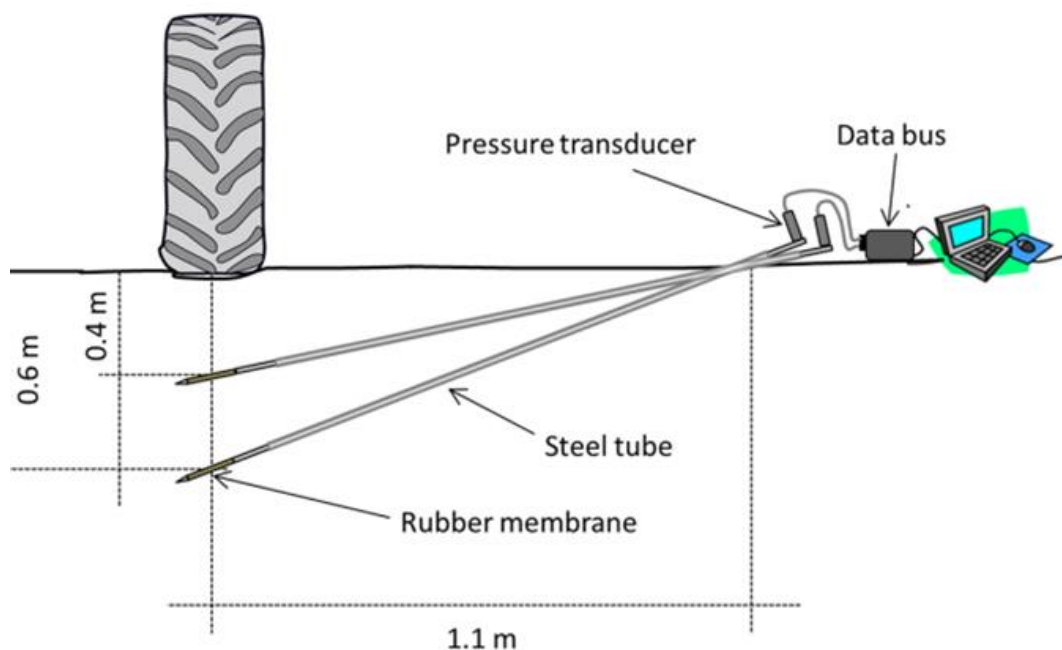
men med denna metod blir jämförelserna konsekventa. Utifrån varje led fanns tre uppsättningar av prover, av de räknades medelvärde och standardavvikelse ut.



Figur 2. Exempel på regression vid förkonsolidering, utifrån en graf med logitimerat tryck för 400–800 kPa.

### 3.3. Tryckmätningar med Bollingsonder

De mätningar som utfördes i fält genomfördes med hjälp av Bollingtrycksonder (Figur 3). Trycksonderna är utformade likt ett långt smalt rör med en silikon blåsa i nedre änden. I andra änden sitter en sensor med en ventil. I rörarmaturen tillsätts en vätska (vatten i detta fall). Sensorn registrerar tryckförändringar i vätskesystemet som uppstår när silikonbubblan utsätts för yttre tryckpåverkan (Keller et al. 2016). Eftersom det mättes på tre djup och tre uppsättningar användes fyra sonder i den ena och fem i den andra av de två blocken.



Figur 3 Schematisk skiss över tryck mätning vid två djup med Bolling sonder (Keller et al. 2016).

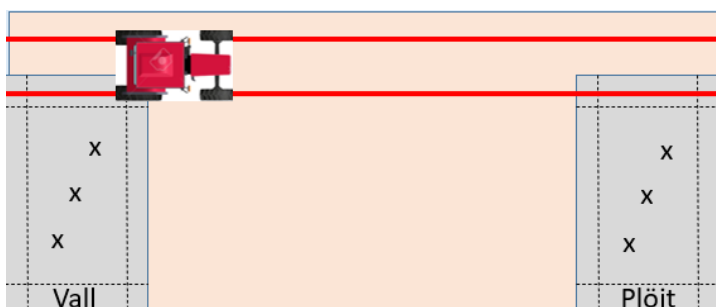
Hål måste borraras i marken där sensorarmaturen förs in, de måste borraras med ett långt jordborr och 25 mm i diameter. Hålen måste vara gjorda i en vinkel av 10–22,5° grader, beroende på djupet. För att hålen blir korrekt placerades används ett metallstativ som ställs in med hjälp av vattenpass och fixeras vid marken. Ställningen har färdiginställda hål som jordborren kan föras igenom, så silikonbubblorna hamnar mitt under körspåret på önskat djup. I de borrhålen förs först ett PVC-rör ner i hålet och sedan själva tryckarmaturen, eftersom utrustningen annars skulle ta skada av friktionen mot jorden. Med sönerna installerade kopplas de ihop med en kabel till en fördelarcentral som i sin tur är kopplad till en dator. I programmet Control Center Series 30 logas värdena. Ifrån programmet har vi sedan exporterat mätdata till Excel och tagit ut de mätvärden som användes.

Sensorerna placerades i rad ett par dm ifrån varandra, och på tre djup (20, 40 och 60 cm), i det hjulspår där en traktor sedan kör över, som visas i figur 2.

Spåret där traktorn framförs är placerat cirka 1,5 meter in i kanten på varje ruta (Figur 5). Traktorn som användes till för att köra över sonderna var en Massey Ferguson 6490 med en totalvikt på 9480 kg (Figur 4). Av den vikten bestod 1460 kg av påhängsvikter, 660 kg fram samt 800 kg bakpå traktorn. Framaxelvikten blev då 4200 kg, samt 5280 kg på bakaxeln. Däck dimensionen fram på traktorn var 540/65 R30 och bak 650/65 R42, dvs 54 cm breda fram och 65 cm bak.



Figur 4 Maskinöverfart över Bolling trycksensorer (foto Gabriel Thor)



Figur 5. Animering av metoden för att passerad över försöken utan att köra för långt in i försöksrutan.

För att simulera en kraftig markpackning var däcktrycken vid tillfället 1,7 bar i samtliga däck, vilket är dubbelt så högt tryck som rekommenderas vid jordbearbetningskörning (Arvidsson & Feiza 1995). Maskinen körde över trycksonderna med 7 överfarter varav 4 framåt och 3 bakåt. Mellan varje överfart

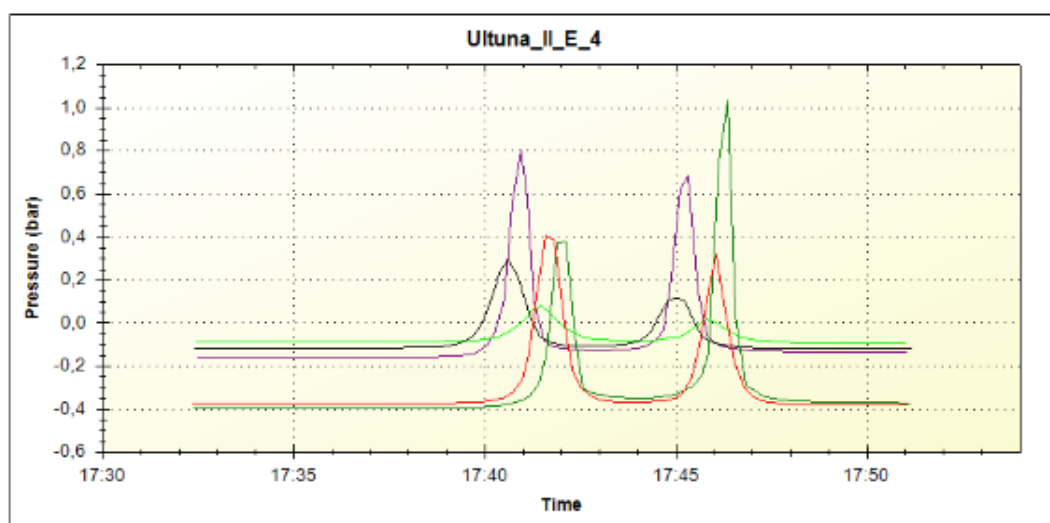
mättes också spårdjupet. Det användes endast resultaten ifrån överfart 3 och 4 i alla rutor, eftersom vid fler och färre överfarter bedömdes att felkällorna är större. Ett ökat spårdjup efter fler överfarter var den främsta anledningen till att överfart 5 och över exkluderades. Djupet på spåren gjorde att däcken kom längre ner i marken och avståndet till sondaerna inte längre stämde utifrån startposition i marknivå. De två första överfarterna exkluderades då marken kring tryckblåsan eventuellt inte är i kontakt.

Mellan varje överfart mättes djupet i det spår som traktorn lämnar efter sig. Mätningarna sammanställdes i ett punktdiagram för alla sju överfarter, plats och försöksled.

Önskad överfartshastighet hade varit 6–8 km/h, vilket skulle motsvara hastigheten vid tung jordbearbetning. Tyvärr hade den hastigheten gått för fort för sondaerna att registrera mätfrekvenserna under överfarten med ett så glest avstånd mellan sondaerna, därför blev en kompromiss att sänka hastigheten till cirka 4 km/h, samma hastighet hölls vid både framfart och bakåt.

### 3.3.1. Dataanalys av tryckmätningar med Bollingsonder

Mätningarna utförda i fält samlades och sparades i programmet Control Center Serie 30. Det värde som jämfördes var det maxtryck i bar som uppstod efter varje överfart. En graf visades för varje enskild överfart med fyra eller fem av de installerade sondaerna. Anledningen till att grafen i exemplet (Figur 6) visar två toppar för varje sond, beror på att de registrerar tryck ifrån både fram och bakaxeln på traktorn. Även här räknades medelvärde och standardavvikelse fram för de tre uppsättningarna.



Figur 6. Graf ifrån Control Center Series 30 för en mätning med Bolling sonder

### 3.3.2. Cylinderprovtagning före och efter packning, för bestämning av skrymdensitet och mättad hydraulisk konduktivitet

För att ta reda på hur skrymdensiteten och den mättade hydrauliska konduktiviteten förändras efter att ha utsatts för trycket under traktorns däck i rutorna på marken, så togs cylinderprover från en yta som inte tidigare utsatts för något tryck i de spår som uppstått efter 7 överfarter samt i det spår där traktorn endast passerat en gång. Även här togs proven på djupen 10, 30 och 50 cm. Cylinderproverna togs på samma sätt som beskriven under punkt 3.2.1.

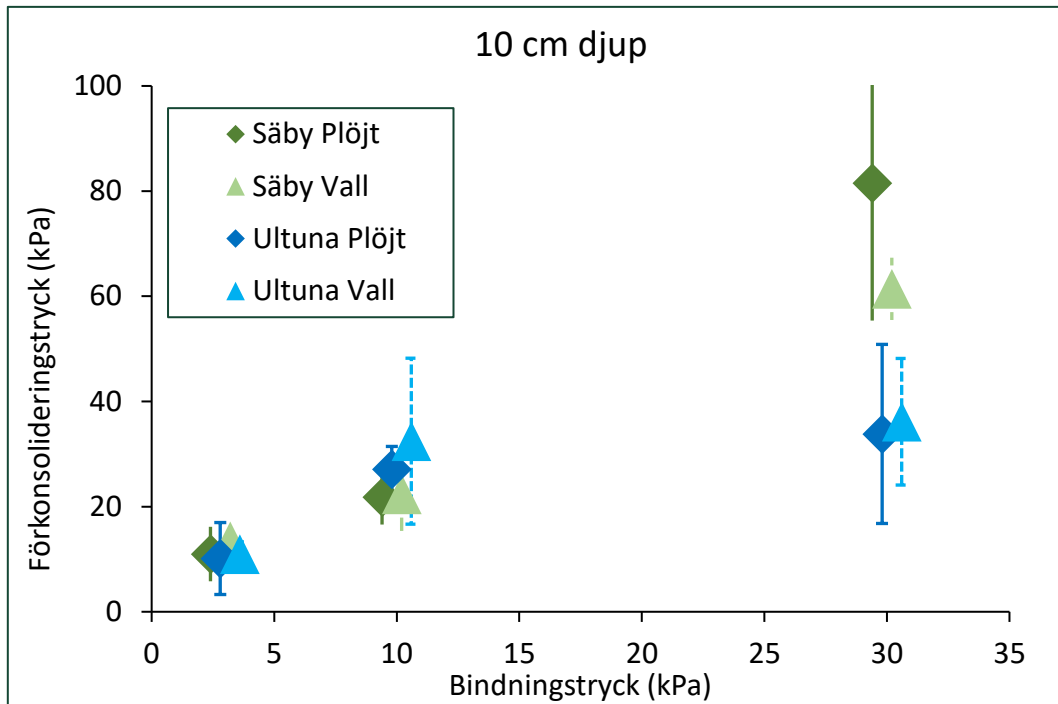
Dessa cylinderprover har sedan skickats in på analys för att bestämma den mättade hydrauliska konduktiviteten. Cylinderproverna som användes för att bestämma skrymdensiteten har analyserats i labb. Precis som beskriven under 3.2.2 har skrymdensitet räknats fram för cylinderprover som togs innan och efter 7 överfarter. Detta för att se hur skrymdensiteten har förändrats av överfarterna av traktorn.

## 4. Resultat

### 4.1. Mekaniska egenskaper- förkonsolideringstryck och hållfasthet

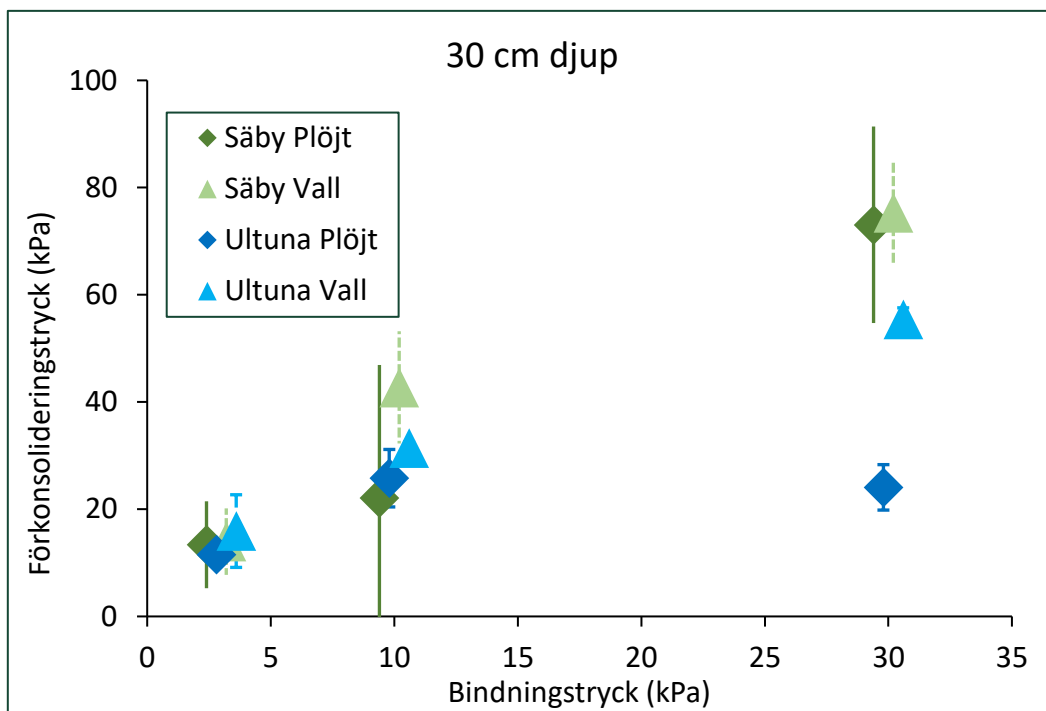
Resultaten ska i huvudsak jämföra vall mot plöjda led, men jämförelser ska också gå att göra mellan jordarna och även de olika bindningstrycken. Prover med olika bindningstryck dvs vattenhalt, visar på störst skillnader av de parametrar som jämförts. Sammanfattningsvis visar resultaten att förkonsolideringstrycket för alla prover är lägst vid den lägsta bindningstrycket på 3 kPa. Vid det högsta bindningstrycket på 30 kPa var också förkonsolideringstrycket högre. Det gällde alla försöksleden förutom Ultuna plöjt då förkonsolideringstrycket inte skiljer sig mycket åt mellan bindningstrycket av 10 och 30 kPa. Avvikelse vid sammanlagda resultat var också störst vid det högsta bindningstrycket av 30 kPa. Kompressionstest visar för de flesta led och djup att förkonsolideringstrycket ökar med bindningstrycket. Störst skillnader sågs mellan bindningstrycken på 3 och 10 kPa.

Av försöksleden för ett djup på 10 cm så visar Säbyleden en tydlig ökning av förkonsolideringstryck i både det plöjda ledet och ledet med permanent vall, mellan de olika bindningstrycken. I figur 7 framgår resultaten tillsammans med standardavvikelsen för de sammanställda resultaten. För Ultuna leden vid 10 cm djup var skillnaden mellan bindningstrycken 10 och 30 kPa inte lika tydliga som för Säby.



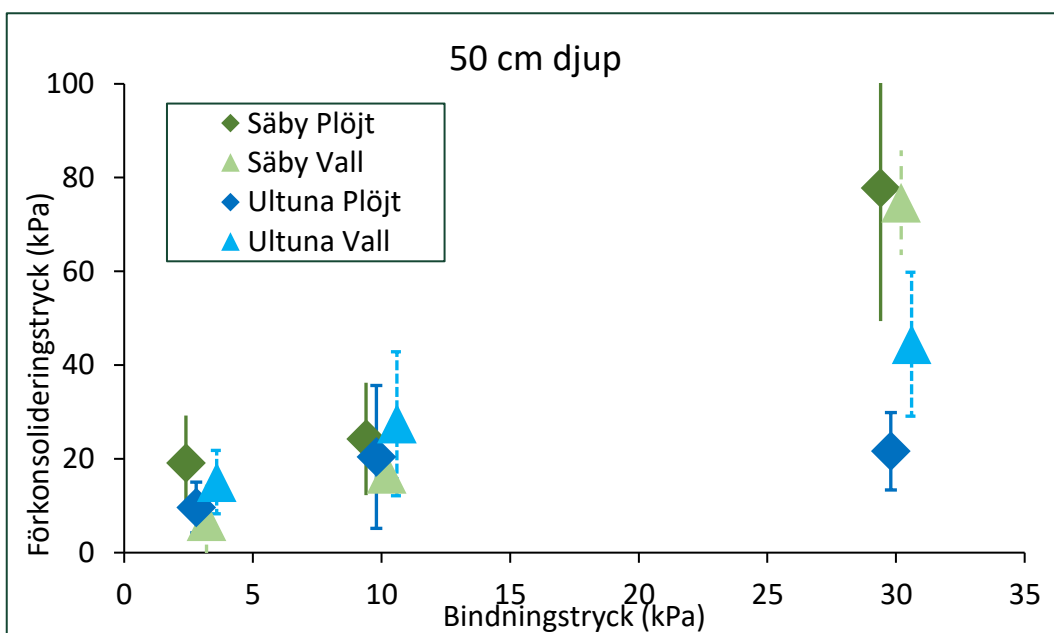
Figur 7 Förkonsolideringstryck vid prov på 10 cm djup, för varje led och plats

Resultaten ifrån mätningar av proven ifrån 30 cm djup visas i figur 8. Hållfastheten vid Säby är starkare än vid Ultuna, för båda försöksleden. För Säby var skillnaderna större mellan plöjd och vall vid bindningstrycket 10 kPa, vid 30 kPa var det ingen skillnad för Säby. Standardavvikelserna var också där större i det plöjda ledet. För proverna vid Ultuna skiljde det mera mellan försöksleden vid bindningstrycket 30 kPa. För det plöjda ledet vid Ultuna var förkonsolideringstrycket likvärdigt vid både 10 och 30 kPa, för ledet med vall sågs däremot en tydlig ökning i hållfasthet med bindningstryck.



Figur 8 Förkonsolideringstryck vid prov på 30 cm djup, för varje led och plats

Resultaten ifrån proverna tagna vid 50cm djup visar likt för de andra djupen att båda Säby försöksleden (vall och plöjt) håller en likvärdig hållfasthet vid det högre bindningstrycket. Ultuna skiljde sig mellan behandlingarna vid bindningstryck 30 kPa. Vall håller bättre än det plöjda ledet, vilket framgår i figur 9.

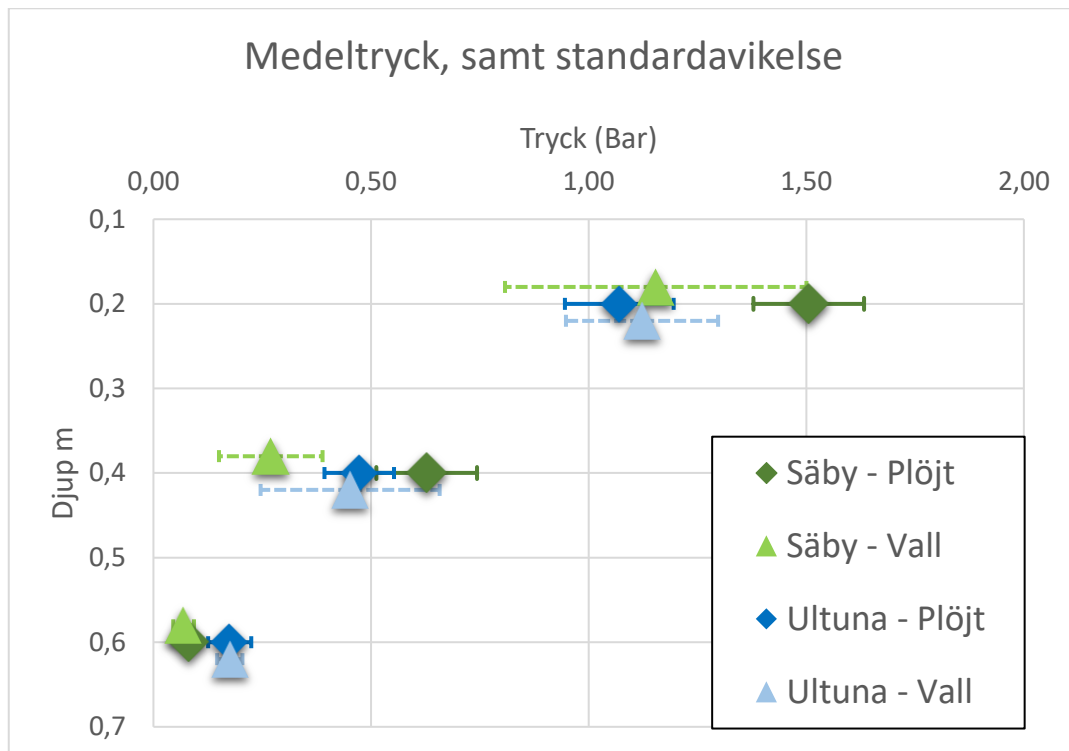


Figur 9 Förkonsolideringstryck vid prov på 50 cm djup, för varje led och plats



## 4.2. Tryckmätning Bollingsonder

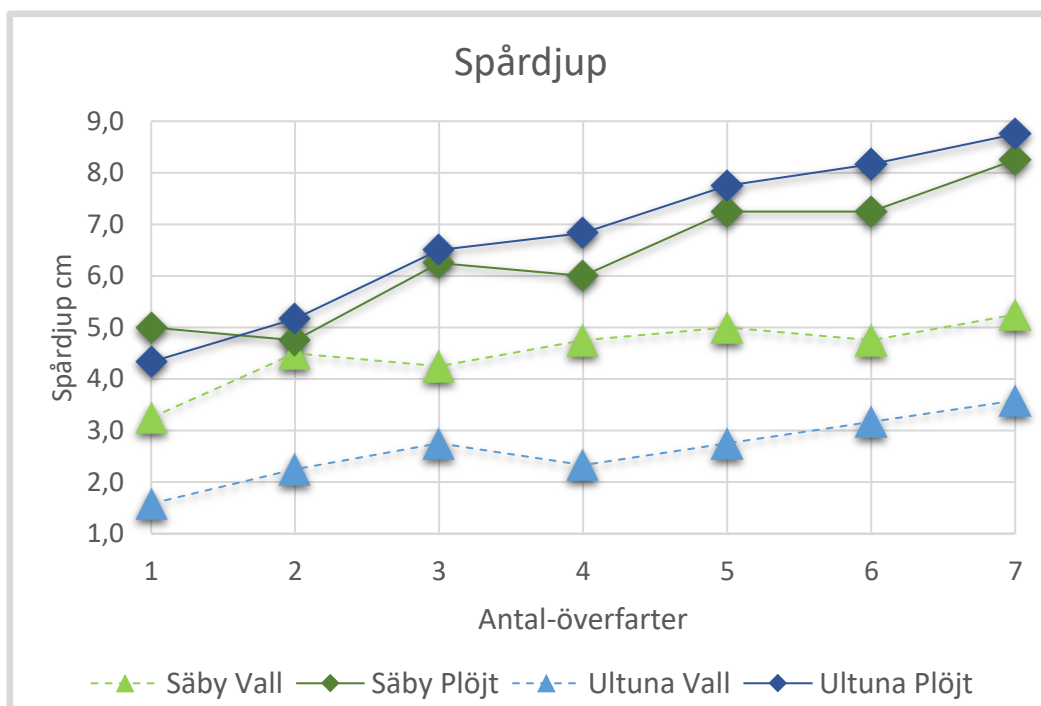
För Ultuna jorden sågs inga tydliga tryckskillnader mellan plöjt led och valledet. Tryckskillnaderna i behandlingarna för Säby jorden var däremot större jämfört med i Ultuna jorden. För Säby var även skillnaderna i uppmätt tryck större ju högre upp i profilen mätningarna gjordes. Högre upp i profilen var också standardavvikelse större vilket visas i figur 10, avvikelserna var också något större i försöksleden med vall.



Figur 10 Medel för uppmätt tryck vid varje djup för överfart 3 och 4, med standardavvikelse

### 4.2.1. Spårdjup

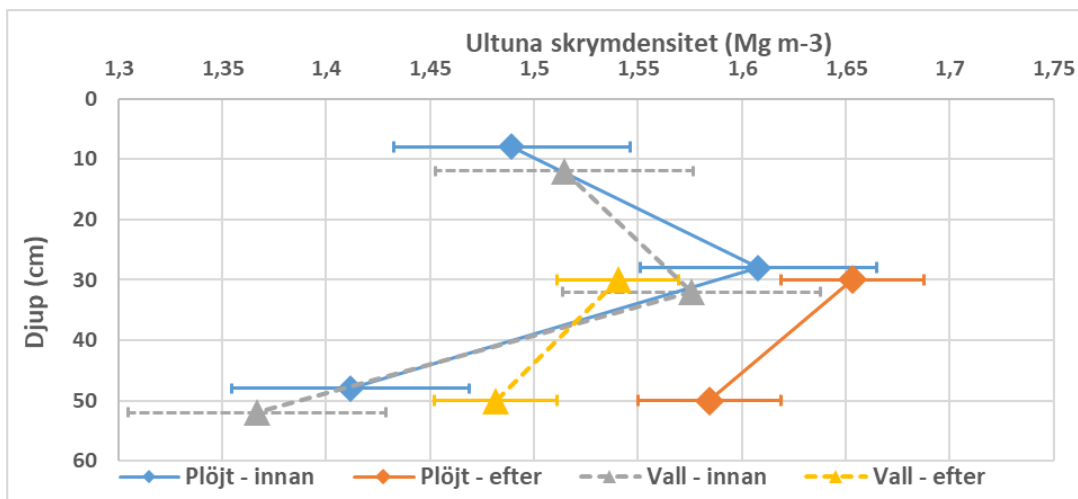
Tydligaste skillnader mellan behandlingarna gick att se vid mätning av spårdjupen som uppstod efter överfarterna. I figur 11 syns de tydliga skillnaderna mellan de plöjda försöksleden och de med permanent vall efter varje enskild överfart. I vallen uppstår inte alls lika djupa spårdjup som i de plöjda försöksleden.



Figur 11 Spårdjup i cm, för varje led och plats efter antal överfarer

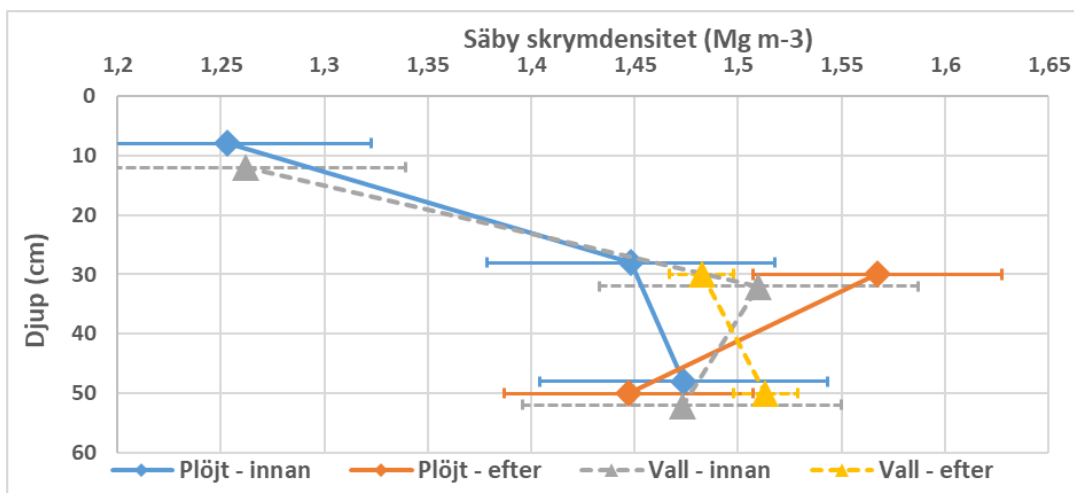
#### 4.2.2. Skrymdensitet

Skrymdensiteten för Ultuna beskrivs i figur 12 för varje led innan och efter de sju överfarerna. Det plöjda försöksledet visade en lägre densitet innan överfarerna (blå linje) och en högre efter (orange linje) med störst skillnad på 50 cm djup för Ultuna. För vallen var skrymdensiteten något lägre innan överfarerna jämfört med det plöjda ledet vid djupen 30 och 50 cm. Vid 10 cm djup var dock skrymdensiteten hos vallen större. Efter överfarerna i vallen visade resultaten en ökning i skrymdensitet vid 50 cm djup och en minskning vid 30 cm. Proverna för 10 cm plöjt samt vall efter saknas.



Figur 12 Skrymdensitet på Ultuna mät innan överfarer för båda försöksleden på 10, 30 och 50 cm. Samt efter 7 överfarer för båda försöksleden vid 30 och 50 cm djup.

För Säby var skrymdensiteten betydligt större efter överfarterna vid 30 cm djup och något lägre efter överfarterna vid 50 cm (Figur 13). Innan överfarterna var skrymdensiteten snarlik i de båda försöksleden emellan, vid 10 cm och vid 50 cm djup. Vid 30 cm djup visade den permanenta vallen en större skrymdensitet. Efter överfarterna i vallen ökade skrymdensiteten vid 50 cm djup och minskade något vid 30 cm djup. Proverna för 10 cm plöjt samt valledet efter överfarterna saknas.



Figur 13 Skrymdensitet på Säby mät innan överfarer för båda försöksleden på 10, 30 och 50 cm. Samt efter 7 överfarer för båda försöksleden vid 30 och 50 cm djup.

### 4.2.3. Hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliska konduktiviteten för Säby presenteras i tabell 2. Resultatet för Ultuna finns i tabell 3. Den hydrauliska konduktiviteten visar ingen tydlig skillnad mellan försöksleden med plöjd bearbetning och den med permanent vall. För båda jordarna fanns det dock en trend att den permanenta vallen har högre hydraulisk konduktivitet vid 50 centimeters djup, jämfört med de plöjda försöksleden. Efter överfarterna ökade den hydrauliska konduktiviteten i samtliga plöjda led på 30 och 50 cm, och minskade i vallen förutom för Säby 30 cm djup. Det ska dock kommas ihåg att Standardavvikelserna för mätningarna var mycket stora.

Tabell 2 Beskriver medelvärde av den hydrauliska konduktiviteten samt standardavvikelse för Säby.

Säby					
0 överfarter			Efter 7 överfarter		
Djup (cm)	Medel K cm/h	Standardavvikelse	Djup (cm)	Medel K cm/h	Standardavvikelse
Plöjt 30	0,13	0,11	Plöjt 30	11,14	10,23
Plöjt 50	5,80	3,67	Plöjt 50	16,71	1,68
Vall 30	0,78	0,49	Vall 30	1,78	2,32
Vall 50	15,91	10,79	Vall 50	9,95	8,25

Tabell 3 Beskriver medelvärde av den hydrauliska konduktiviteten samt standardavvikelse för Ultuna.

Ultuna					
0 överfarter			Efter 7 överfarter		
Djup (cm)	Medel K cm/h	Standardavvikelse	Djup (cm)	Medel K cm/h	Standardavvikelse
Plöjt 30	0,09	0,12	Plöjt 30	0,56	0,76
Plöjt 50	0,39	0,27	Plöjt 50	24,13	26,04
Vall 30	0,11	0,02	Vall 30	0,02	0,01
Vall 50	38,63	31,81	Vall 50	17,04	24,06

## 5. Diskussion

Resultaten ifrån tryckmätningarna i fält ska i teorin visa på samma samband mellan leden som resultaten ifrån kompressionstesten på lab. I båda metoderna testades markens egenskaper på tre olika djup. En skillnad var att de djupen som testades för tryck och hållfasthet, varierade mellan metoderna. För kompressionstesten togs proven ifrån 10, 30 och 50 cm djup. I tryckmätningarna i fält var djupen 20, 40 och 60 cm. Det gör att det inte är direkt jämförbart, eftersom man kollar på olika djup där strukturerna kan skilja på en decimeter, trots att testerna är utförda på samma ruta. Det till trots så går det ändå att göra indirekta jämförelser. Eftersom vi vill visa på förändringar nedåt i profilen och inte förhållanden vid exakta djup.

I detta arbete har följande frågeställningar besvarats.

### 5.1. Hur påverkas markens hållfasthet av markstrukturen och texturen, och hur förändras hållfastheten som funktion av markens fuktighet?

Resultaten visar samma trend för alla djup. Bindningstrycket har störst påverkan på hållfastheten, dvs hållfastheten är bättre desto torrare jorden är då den utsätts för höga tryck.

Arbetet visade på att markens textur påverkar hållfasthet mera än vad markens struktur gjorde. Så var det för det högre bindningstrycket av 30 kPa, för alla djup. Vid lägre bindningstryck dvs fuktigare förhållanden var det svårt att urskilja om hållfastheten berodde på textur eller struktur. Markfukten är inte heller direkt jämförbar med bindningstrycket. Beroende på jordarnas olika fysikaliska egenskaper (textur och struktur) binder de sannolikt olika mängd vätska vid samma bindningstryck. För den styva lerjorden vid Ultuna var det tydligt att vall hade en bättre hållfasthet vid 30 och 50 cm djup, vilket sannolikt beror på strukturen som rotsystemen ger. För att tydligare urskilja om textur eller struktur har störst inverkan på hållfasthet skulle man jämfört vid högre bindningstryck, alltså när markprover

är torrare. Det är såklart svårt att i förhand veta vid vilka bindningstryck man ska jämföra, men proven skulle behöva vara torrare för att ge tydligare resultat. I motsats till hypotesen så var det plöjda ledet starkare än vallen för Säby.

Vid lågt bindningstryck är hållfastheten låg för alla prov. Spridningen i testunderlaget är också stor inom varje led, det gäller för alla djup vid 3pKa. Vid bindningstryck 10 kPa visar resultaten att hållfastheten fortfarande är låg, och spridningen är så pass sprid att det inte går att urskilja några tydliga skillnader. Med vetskapen om att hållfastheten vid 30 kPa är betydligt bättre än vid 3 och 10 kPa, säger det oss att risken för markpackningsskador är stor vid dessa låga bindningstryck.

Även en packningsskadad lättjord kan vara svårare att återställa än en tillpackad lerjord. Lerjorden har finare material och kan skapa aggregat. Egenskaper som svällning, krympning och sönderfrysning skapar strukturer som underlättar för växtligheten. Vallen kan tänkas ha en indirekt positiv effekt på markens hållfasthet genom dess stora utvecklade rotsystem som tar upp och respirera bort vatten från marken.

Enligt (Lamandé & Schjønning 2011c) så är markens styrka försvagad när marken är blöt och att trycket koncentreras i en blöt jord vertikal nedåt och inte fördelas åt sidan som i en torr jord. Arbetets resultat visar på att den blöta jorden fördela trycket som den utsätts för sämre än en torrare jord. En annan källa (Koolen & Kuipers 2012) förklarar också att en omättad jords styrka är alltid känslig för förändringar i vattenhalt vilket det här arbete också påvisade väldigt tydligt i mätningarna i kompressionstesten där de mättade proverna inte alls klarade att motstå någon tryckpåfrestning. Även i följande källa (Saffih-Hdadi et al. 2009) förklaras att en fuktig mark kan försämra strukturen genom att den fuktiga marken är mera mottaglig för kompaktion.

## 5.2. Hur påverkas tryckutbredningen av markens struktur och markens textur?

Utifrån tryckutbredningsmätningarna med Bolling sonder är det svårt att säga vad som påverkade tryckutbredningen mest. För Säby sågs en tydlig skillnad mellan vall och plöjt led. Den skillnaden fanns inte hos Ultuna jorden. Markens struktur hade alltså lite påverkan på tryckutbredningen på Ultuna jorden. Den fysikaliska skillnaden mellan jordarna kan möjligen förklaras genom skillnaden i textur mellan jordarna. Ultuna jorden bestående av styv lera kan hålla betydligt mer vätska än vad Säby jorden kan, vilket har utvärderats i hållfasthetstesterna. Hållfastheten är en

bidragande faktor till hur tryckutbredningen i marken blir. Anledningen till att man inte ser någon tydligare skillnad mellan leden för Ultuna skulle kunna bero på att markfukten är för hög i båda leden, vid det tillfället då testet utfördes. Detta har resulterat i en sämre hållfasthet. Slutsatsen som går att dra av det är att vallens bidragande till struktur är viktigare i en jord med grövre textur t.ex. Säbys.

Tryckutbredningen har varit mindre för vallen i Säby i de övre skikten vid 20 och 40cm. Det verkar som att vallen har bidragit till att fördela trycket vilket inte vallen på den styva Ultuna jorden kunde göra. Trycket var högre vid 20 cm än vid 60cm vilket var förväntat. Vi trodde att trycket skulle fördela sig exponentiellt ner i profilen vilket det också gjorde. Dock var i den tunga jorden tryckutbredningen mer kännsbar längre ner i profilen jämfört med den lätta jorden. Den lätta jorden fördela trycket bättre djupare ner i profilen.

När tryckmätningarna i fält gjordes var marken mycket torr vid mättillfället. Detta gjorde att båda jordarna, Säby och Ultuna såväl som de plöjda försöksleden och vall leden var hårda och föll lätt sönder vid provtagningen. Önskvärt hade varit om marken hade varit fuktigare när provtagningen gjordes. Fuktigare mark hade troligen visat på större skillnader mellan försöksleden i detta fall. Den torra strukturen kan också kanske förklara varför avvikelserna i vallen är större än för de plöjda försöksleden där mera fukt fanns.

Enligt (Lamandé & Schjønning 2011b) så påverkar en ökad vikt av lantbruksmaskiner på sikt även strukturen i alven. I arbete har trycket undersökt i olika jordar ner till 60cm. Det fanns en skillnad mellan jordarterna men inte mellan odlingssystemen. Det kunde påvisas att effekten av trycket av traktorn syntes i 60cm djup, dock har inga tryckmätningar gjorts längre ner i markprofilen.

En behandlingseffekt som är både en för och nackdel är att vallen som varit orörd under många år, har bara blivit utsatt för minimal trafik. Det ända tryck försöksrutorna har utsatts för är överfarterna vid putsning och hjälpsådd. Det kan göra att jorden blir känsligare för tryck när den väl utsätts för det. Till skillnad från de plöjda försöksleden som är utsatta för tung trafik flera gånger under odlingssäsongerna. Marken kan sätta sig och bli mer resistent mot trafik med högre tryck.

### 5.3. Vad har fältöverfarer med en jordbruksmaskin för påverkan på marken, och hur skiljer sig detta mellan en permanent vall och en plöjd mark?

Det är tydligt att Säbyjorden är kompaktare vid 50 cm djup, skrymdensitet är som tyngst då. På Ultuna är densiteten som störst vid plogsulan på 30 cm, och lättare vid 50 cm djup jämfört med 30cm. Eftersom skrymdensiteten ser ut som den gör på Säby kan man förmoda att även den lättare jord kan skadas av packning. Markens textur förändras också med djupet mellan 30 och 50 cm skikten. För Säby är halten ler 24,3% vid 30 cm och 32,7 % vid 50 cm. Men trots att lerhalten och skrymdensiteten ökar med djupet är den hydrauliska konduktiviteten fortfarande bättre på 50 cm än vid 30 cm. På Ultuna är skillnaden i lerhalt ännu större mellan skikten (46,8% vid 30 cm) och (72,1% vid 50cm), även där syns en bättre hydraulisk konduktivitet i 50 cm skiktet, trots den höga halten ler. Däremot var skrymdensiteten för Ultuna som högst vid 30 cm, vid plogsulan där halten ler är 25,2 procent lägre än vid 50 cm. Plogsulans hydrauliska konduktivitet och struktur beror alltså till liten del på texturen i de här fallen. Packningsbenägenheten i alven behöver då inte bara bero på texturen.

Plogsula är en faktor som i viss grad kan ha spelat in på resultatens utfall för proven tagna på 30 cm djup. Det gäller för både valledet och det plöjda ledet. Plogsulan påtaglighet i plöjt led är en självklarhet, men även i vallen kan den gamla plogsulan fortfarande göra sig påmind, dvs innan man sådde in vallen och slutade bearbeta marken. 23 år med vall är alltså troligen inte tillräckligt för att rotsystemen hunnit luckra upp plogsulan. Jämfört med en jord som aldrig blivit utsatt för den typen av packning. Utöver det är vall en gröda med förhållandevis grunt och fint rotsystem. 30 cm proven var ofta de som var mest kompakta. När proverna togs på vallen var marken grovt bevuxet och hade högt tuvigt gräs på drygt 40 cm. Växtligheten kan ha påverkat framför allt spårdjupet och i framtida tester skulle man kanske putsat eller på annat sätt klippa av växtligheten på vallen innan proverna tas.

Markens fysikaliska egenskaper riskeras att försämrats vid överfarer med en jordbruksmaskin. Det kan inte dras en allmän slutsats om att vall är bättre än de plöjda försöksleden utifrån resultaten ifrån detta arbete. På en lättare jord som Säby finns det en större skillnad mellan hur mycket marken håller som är bevuxen med permanent vall respektive plöjt. Det plöjda ledet från Säby var mer packningsbenägen än vallen i det fallet. Det såg annorlunda ut på Ultuna jorden. Ultuna jorden har en mycket högre lerhalt och skillnaderna mellan vallen och plöjda försöksleden var mindre än för Säby jorden. Med andra ord så verkar inte odlingssystemet (vall eller plöjt) påverka markens stabilitet mycket på styva



lerjorden. Enligt (Keller et al. 2016) försämras jordens fysikaliska egenskaper vid packning och den försämrade strukturen resulterar i sämre gasutbyte och vatteninfiltration. Detta kunde delvis påvisas i och med att den hydrauliska konduktiviteten i vissa fall minskats efter att marken tillpackats. Det har inte undersökts hur gasutbytet eller vatteninfiltration påverkas.

I markytan har strukturen av vallen spelat en stor roll för båda jordarna vad gäller markens förmåga att hålla ihop horisontellt. Spårdjupsmätningar som genomfördes mellan varje överfart, visar på att spårdjupet i de plöjda leden blev djupare än för valleden. Rotsystemen i valleden har med tiden bildat en struktur likt en mattväv, som troligen hjälpt till att markens bärlighet blir bättre vid spårbildningen. För de plöjda leden blir spåren djupa då strukturen saknas och markmaterialet beter sig som en homogen massa som lättare svallar sig jämte spåren.

## 5.4. Felkällor

För att testa de mekaniska egenskaperna var proven tvungna att genomgå många olika moment, som alla kan ha påverka hur slut resultatet blir. Alla prover togs tre gånger för varje djup och varje led. Detta är möjligen ett för litet underlag, då resultaten varierar mycket. Ett större försöksunderlag hade troligen visat på ännu tydligare skillnader mellan jordarna och behandlingarna.

Vid själva provtagningstillfällena var jordarna på försöksplatserna mycket torra. Önskvärt hade varit om markerna varit mera fukthållande, särskilt på de djupare horisonterna. Vissa av proven som var ifrån 50 cm djup var så torra att somliga föll sönder och fick kasseras och tas om. Det gällde främst på den lättare Säbyjorden. Strukturerna i proven kan redan då vara brutna, och då kommer proven att inte kunna motstå lika höga tryck som de annars skulle klara. Försöksleden med vall var över lag torrare än de plöjda försöksleden, där kan resultaten också påverkats genom att vallen skadats vid hanteringen, och då ha en svagare struktur som redan brutits.

Inne på labb var en logistisk utmaning under arbetets gång att de tensionsplattor som användes för att dränera provcylindrarna inte fanns tillgängliga från första början. Vid sammanställandet och räknandet på hållfastheten och förkonsolideringspunkt för proven räknades en enkel regression ut. Metoden var i detta fall passande med tanke på tidsramen för arbetet, dock hade ytterligare beräkningar behövts göras om man mer exakt skulle bestämma förkonsolideringspunkten.

Om arbetet hade genomförts igen hade jag valt att använda flera upprepningar av varje prov framför allt i de proven där vi mätte den hydrauliska konduktivitet där vi mätte stora avvikelser. För hållfasthetsproven skulle jag kolla på ett högre bindningstryck då det låga bindningstrycket vi undersökte 3, 10 och 30. Att kolla på bindningstryck 20, 30 och 40 skulle eventuellt leda till att tydligare resultat skulle visas detta på grund av att proven var för fuktiga för att visa på de potentiella skillnaderna i dem som kunde ses vid högre bindningstryck. Alternativt skulle det även vara intressant att testa hållfastheten vid fler bindningstryck än just tre. Med fler bindningstryck att utgå ifrån skulle man kunna beskriva när markens struktur deformeras. För att veta just hur upptorkat ett prov eller mark måste vara för att klara ett visst tryck.

## 5.5. Slutsats

Utifrån detta arbete skulle man kunna prioritera parametrarna enligt följande på deras påverkan på packningsbenägenhet: fuktighet, textur, struktur. Ju fuktigare marken är desto sämre är hållfastheten oberoende textur eller struktur. Dock har vid samma bindningstryck den grövre Säbyjorden en bättre hållfasthet än den styva Ultunajorden. Trycket fördelas bättre i den lättare jorden än i lerjorden och vallen hämmar trycken mer än de plöjda leden. Vallen verkar ha en mer positiv inverkan på markens hållfasthet än det plöjda ledet.

## Referenser

- Alakukku, P.L. (2015). Vårda din åker - markpackning. 9
- Arvidsson, J. & Feiza, V. (1995). *Låga ringtryck i odling med och utan plöjning*. (18). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5242/> [2021-03-11]
- Haldén, P., Viketoft, M. & Haldén, P. (2019). Gynna mångfalden i marken. 24
- Håkansson, I. (2000). *Packning av åkermark vid maskindrift: omfattning, effekter, motåtgärder*. Uppsala: Instför markvetenskap, Avd för jordbearbetning, SLU. (Rapporter från Jordbearbetningsavdelningen, Sveriges lantbruksuniversitet, 99)
- Keller, T., Ruiz, S., Stettler, M. & Berli, M. (2016). Determining Soil Stress beneath a Tire: Measurements and Simulations. *Soil Science Society of America Journal*, 80 (3), 541–553. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.07.0252>
- Koolen, A.J. & Kuipers, H. (2012). *Agricultural Soil Mechanics*. Springer Science & Business Media.
- Lamandé, M. & Schjønning, P. (2011b). Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil and Tillage Research*, 114 (2), 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.011>
- Lamandé, M. & Schjønning, P. (2011c). Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part III: Effect of soil water content. *Soil and Tillage Research*, 114 (2), 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.10.001>
- Nawaz, M.F., Bourrié, G. & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33 (2), 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Neset, T.-S., Wiréhn, L., Opach, T., Glaas, E. & Linnér, B.-O. (2019). Evaluation of indicators for agricultural vulnerability to climate change: The case of Swedish agriculture. *Ecological indicators*, 105, 571–580. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.042>
- Saffih-Hdadi, K., Défossez, P., Richard, G., Cui, Y.-J., Tang, A.-M. & Chaplain, V. (2009). A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil and Tillage Research*, 105 (1), 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.05.012>

# Tack

Genomförandet av denna studie hade inte varit möjligt utan en hel del hjälp.  
Därför vill jag rikta ett stort tack till:

Maria Sandin och Thomas Keller som handlett arbetet.  
Petronella Möller och Daniel Iseskog som hjälpt till med provtagningar och arbetet på lab.