



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för mark och miljö

Effekt på mark och gröda av olika bearbetningssystem, med och utan CTF

*Soil and crop responses to different tillage systems,
with and without CTF*

Louice Lejon

Magisteruppsats i markvetenskap
Agronomprogrammet – inriktning mark/växt

Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU
2014:05

Uppsala 2014

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för mark och miljö

Louice Lejon

Effekt på mark och gröda av olika bearbetningssystem, med och utan CTF
Soil and crop responses to different tillage systems, with and without CTF

Handledare: Johan Arvidsson, institutionen för mark och miljö, SLU
Examinator: Tomas Rydberg, institutionen för mark och miljö, SLU

EX0728, Självständigt arbete i markvetenskap - magisterarbete, 30 hp, Avancerad nivå, A1E
Agronomprogrammet – inriktning mark/växt 270 hp

Serienamn: Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU
2014:05

Uppsala 2014

Nyckelord: fasta körspår, CTF, bearbetningssystem, datortomografi, makroporositet

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Sammanfattning

Jordbruket i Sverige har under de senaste 60 åren genomgått stora förändringar. Gårdsarealerna har ökat, och med dessa även traktor- och maskinstorlekar, vilket har lett till ökade problem med markpackning. En metod att minska risken för markpackning är att använda sig av fasta körspår, CTF. All körning koncentreras då till specifika körspår med hjälp av GPS.

Syftet med detta arbete var att studera hur marken påverkas av olika bearbetningsprinciper, med eller utan CTF, och tyngdpunkten har lagts vid hur makroporositeten påverkas. I Säby utanför Uppsala och Alnarp utanför Malmö har randomiserade blockförsök lagts ut, och det är främst från dessa som data har hämtats. På Lydinge gård utanför Helsingborg har storrutor anlagts i fält från vilka planträkning och skördedata fanns att tillgå. Mätmetoderna som användes var datortomografi med bildbehandling kombinerat med traditionella markvetenskapliga metoder.

I led med CTF hade en kompaktion skett i spåren. Markpackningen påverkades dock både av bearbetningstekniken och antalet överfarter, vilket kunde ses genom att djup bearbetning var den enda bearbetningsprincip som utmärkte sig med kraftigt ökad makroporositet i förhållande till andra bearbetningsprinciper, både med och utan CTF.

Avkastningen var i försöket högst för konventionellt bearbetade led, vilket tyder på att en viss återpackning är nödvändig för att få optimal skörd. För led med CTF fanns inga skillnader mellan spår och opackad yta i blockförsöken, medan avkastningen i Lydinge var högre i opackad yta än i spår.

Värden framtagna med hjälp av datortomografi visade sig korrelera starkt till andra parametrar. Starkast samband återfanns mellan skrymdensitet och makroporositet respektive porarea. Datortomografi kan därför anses vara en användbar metod vid markvetenskapliga studier.

Abstract

Swedish agriculture has gone through big changes in the latest 60 years. The farm sizes have increased, which has led to raised tractor and machinery sizes and therefore increasing problems with soil compaction. A method to reduce these problems is to implement controlled traffic farming, CTF. All field operations are then concentrated to specific tracks by using GPS guidance.

The aim of this work was to study how the tillage regime, with or without CTF, affects the soil, with the main focus on macroporosity. In Säby close to Uppsala, and Alnarp close to Malmö, randomized block trials has been carried out, and the data has mainly been taken from these trials. At Lydinge farm, outside Helsingborg, large plots (1 ha) were placed in the farmer's fields, with and without CTF, and from these number of plants counting and yield data are available. To study soil properties, computed tomography was used together with traditional soil physical measurements; determination of bulk density, saturated hydraulic conductivity and penetration resistance.

For plots with CTF a compaction could be seen in the tracks. Tillage regime as well as traffic system affected the level of compaction. The system with deep reduced tillage had the highest macroporosity and was most distinguished from other tillage regimes, both with and without CTF.

The highest yield was found for conventionally tilled plots, which suggests that a certain degree of soil recompaction is needed to obtain maximum yield. For plots with CTF, no difference in yield was found between tracks and untrafficked soil at Säby and Alnarp, but for Lydinge the yield was higher in the untrafficked soil than in the tracks.

Data obtained with computed tomography were strongly correlated to other data. The strongest relationships were found with bulk density, macroporosity and pore area. Computed tomography therefore showed to be a useful tool in soil science studies.

Innehållsförteckning

1	Inledning	5
2	Bakgrund	7
2.1	Markpackning	7
2.1.1	Markpackningens uppkomst	7
2.1.2	Packningens effekt på mark och gröda	8
2.1.3	Mätning av markpackning	8
2.1.4	Metoder att minska risken för markpackning	10
2.2	Bearbetningssystem	11
2.2.1	Olika typer av bearbetningssystem	11
2.2.2	Jordens luckringsbehov	12
2.2.3	Bearbetningens effekter på porositet och hydraulisk konduktivitet	12
2.3	Fasta körspår	13
2.3.1	Teknik	14
2.3.2	Omläggning från konventionell bearbetning till CTF	15
2.3.3	Fasta körspårs fördelar och nackdelar	15
3	Material och metod	17
3.1	Avgränsning	17
3.2	Försök R2-7120	17
3.2.1	Säby och Alnarp	17
3.2.2	Lydinge	19
3.3	Provtagning	20
3.4	Torr skrymdensitet	20
3.5	Hydraulisk konduktivitet	20
3.6	Penetrometermätningar	22
3.7	Datortomografi av porsystemet	22
3.8	Såbäddsundersökning	25
3.9	Planträkning	25
3.10	Skörd för avkastningsmätning	26
3.11	Väderdata	26
3.12	Statistisk analys	27
4	Resultat	28

4.1	Torr skrymdensitet	28
4.2	Hydraulisk konduktivitet	29
4.3	Penetrometermätning	29
4.4	Bilder från scanningen	30
4.5	Mått på makroporsystemet	32
4.6	Såbäddsundersökning	35
	4.6.1 Aggregatstorleksfördelning	35
	4.6.2 Vattenhalt	36
4.7	Planräkning	37
4.8	Skörd	38
4.9	Korrelationer	40
5	Diskussion	42
6	Slutsatser	47
	Tack	48
	Referenslista	49

1 Inledning

Jordbruket utsätts ständigt för nya utmaningar, vilket har lett till stora förändringar inom sektorn de senaste 60 åren. En drivande orsak till förändringarna är ekonomin. För att få god lönsamhet krävs allt större arealer, och en stor förändring har skett gällande brukningsenheternas storlek från innan industrialiseringen tills idag. År 1927 var endast 2500, av de då drygt 300 000, brukningsenheterna 100 ha eller större vilket kan jämföras med siffror från 2010 då 6500 gårdar var 100 ha eller större, samtidigt som totala antalet gårdar minskat till 71 100 (Jordbruksverket, 2013). För att klara av att föra driften av dessa växande gårdar med en ekonomisk vinst krävs ständigt nya idéer om effektivisering för att kunna kapa kostnaderna.

En stor del av tiden på en växtodlingsgård investeras i jordbearbetning, och det är även den som lägger grunden för vilken avkastning som kan uppnås i slutet av säsongen. Traditionellt sett har plöjning varit den mest använda tekniken i Sverige och övriga Europa (Alletto & Coquet, 2009). Plöjning är dock både energi- och tidskrävande vilket gjort att reducerad bearbetning, med alternativa bearbetningsmetoder istället för plöjning, under senare år fått en ökad användning, dock främst i sydvästra Europa (Soane, et al. 2012).

Utöver vilken typ av bearbetning som används har, sedan mekaniseringen av jordbruket på 1950- talet, även en kraftig ökning skett gällande maskinstorlekarna. Bredare redskap effektiviserar jordbearbetningen och minskar läglighetskostnaderna, precis som större volym på gödselspridare, tröskor, vagnar med mera gör. Detta har även ökat behovet, och användningen av, starkare traktorer. Maskinerna inom jordbruket har därför utvecklats mot att bli allt tyngre, och i Västeuropa är axelvikter över 10 ton inte längre ovanligt (Zink, et al., 2010).

Som en följd av effektiviseringen av jordbruket, med förändrade bearbetningssystem och tyngre maskiner, har problem med markpackning ökat. Ökad markpackning kan få stora konsekvenser då den framför allt påverkar markens makroporer (Kim, et al., 2010) vilka har flera viktiga uppgifter såsom att förbättra dränering av vatten och gasutbyte (Rasmussen, 1993; Castellini & Ventrella, 2012), och markpackningen bör därför i största möjliga mån minimeras.

Packningen av marken påverkas av flera olika faktorer, till exempel markens textursammansättning (Heinonen, 1979) och vid vilken vattenhalt fältoperationer utförs (Hamza & Anderson, 2005). Andra viktiga faktorer är vilket bearbetnings-system som används (Tebrügge & Düring, 1999; Alletto & Coquet, 2009; Chamen, 2011) samt vilka axelvikter som maskinerna som används till fältarbetet har. För att minska risken för packning på grund av det senare har därför en teknik med användning av fasta körspår, CTF, utvecklats. Alla fältoperationer utförs då så att hjulen går i samma spår, vilket lämnar övrig mark opåverkad av maskinvikten (CTF Europe, 2013d).

Syftet med detta arbete var att studera hur marken och grödan påverkas av olika bearbetningsprinciper, med eller utan CTF. Tyngdpunkten lades vid hur dessa parametrar påverkar markens makroporositet. Metoden som användes var dator-tomografi tillsammans med traditionella markvetenskapliga metoder.

2 Bakgrund

2.1 Markpackning

2.1.1 Markpackningens uppkomst

Markpackning är den process då ett trycktillskott får markens partiklar att omfördelas så att porositeten minskar och skrymdensiteten ökar (Håkansson, 2000; Nawaz, et al., 2013). Vanligaste anledningen till markpackning i dagens jordbruk är överfarter med tunga maskiner och redskap, bland annat vid jordbearbetning. För att en packning av marken ska ske måste trycket dock vara större än förkonsolideringstrycket, det vill säga det tryck som marken tidigare har varit utsatt för (Arvidsson & Pettersson, 1995). Hur stort tryck marken klarar av innan packning sker beror även på andra faktorer. Den viktigaste faktorn för markens packningskänslighet är vattenhalten i marken, då ökad vattenhalt ger minskad hållfasthet (Hamza & Anderson, 2005). Detta betyder att leror, som på grund av sin förmåga att binda mycket vatten, är extra känsliga för tryck. Vid höga vattenhalter förändras även tryckfördelningen, och trycket utbreder sig mer i vertikal riktning än vid torra förhållanden, vilket kan leda till ökad packning av alven (Arvidsson, et al., 2001). Denna typ av packning är allvarligare än packning i matjorden, då jordbearbetning inte når ner till dessa djup och andra strukturbildande processer, som tjälning och uttorkning, inte påverkar alven i lika hög grad som matjorden. Detta leder till att packningen finns kvar under en mycket lång tid (Håkansson, 2000; Tullberg, et al., 2007). Även tiden som marken utsätts för trycket spelar in och korrelerar positivt med markpackningen (Arvidsson & Pettersson, 1995).

Vad är det då som avgör hur stor packning en maskin orsakar? Förenklat bestäms trycket i matjorden av ringtrycket, medan trycket i alven bestäms av hjullasten (Botta, et al., 2002; Zink, et al., 2010). Håkansson och Danfors (1981) fastslog att för att inte riskera markpackning bör axelbelastning inte överstiga 6 ton. Denna gräns överskrids dock av många av de maskiner som används inom dagens jord-

bruk, vilket kan komma att leda till stora och långvariga packningsskador, om körning utförs vid fel förhållanden (Alakukku, et al., 2003).

2.1.2 Packningens effekt på mark och gröda

Den främsta effekten av markpackning är en minskning av markens porandel. Makroporer, och till viss del även mesoporer, påverkas mest, medan mikroporerna i regel förblir relativt opåverkade (Kim, et al., 2010). Detta kan få stora konsekvenser för grödan, då makroporerna har flera viktiga funktioner i marken.

Vattnet i marken återfinns i lerjordar främst i de små porerna där det adsorberas till markpartiklarna med hjälp av elektrostatiska krafter och ytspänning. Eftersom vatten är en dipol bildas krafter både mellan vattenmolekyler och negativt laddade mineralpartiklar samt mellan vattenmolekylerna. Ju mindre porer, desto lättare har därför vattnet att bindas (Grip & Rhode, 2003). En av makroporernas viktigaste egenskaper är därför deras förmåga att dränera marken på vatten. Vattenflödet är proportionellt med por diametern upphöjt till fyra (Rasmussen, 1993), vilket betyder att minskad makroporositet kan ge kraftigt minskad hydraulisk konduktivitet samt ökad vattenhållande förmåga (Rasmussen, 1993; Castellini & Ventrella, 2012). Den ökade vattenhalten i marken leder i sin tur till minskad hållfasthet (Hamza & Anderson, 2005), men även ökad denitrifikation vilket ger negativ påverkan både växtodlingsmässigt och ekonomiskt (Lipiec & Stepniewski, 1995; Håkansson, 2000).

Eftersom makroporerna är den del av porvolymen som dräneras först är dessa även mycket viktiga för utbytet av gas mellan mark och luft. Syre kommer in till marken via diffusion, vilket är en process som går 10000 gånger snabbare i luft än i vatten (Arvidsson & Pettersson, 1995). En minskning av makroporerna kan därför leda till syrebrist (Nawaz, et al., 2013), speciellt vid hög temperatur, hög markfuktighet och hög mullhalt vilket gynnar den biologiska aktiviteten (Stepniewski, et al., 1994).

Förutom minskat gasutbyte och minskad dräneringsförmåga ger markpackning även ett ökat motstånd för rötterna. Detta kan leda till sämre rottillväxt, mindre upptagningsvolym av vatten och näring och ökad risk för utlakning av både kväve och fosfor (Hamza & Anderson, 2005).

2.1.3 Mätning av markpackning

Att mäta hur mycket en mark har packats kan göras genom att bestämma olika markegenskaper, till exempel markens porositet, andelen makroporer samt markens penetrationsmotstånd. I denna studie har resultat från mätningar av torrskrymdensitet, hydraulisk konduktivitet, penetrometermätningar samt makroporositet med hjälp av datortomografi använts för att bedöma markpackningen i de olika leden.

Torr skrymdensitet

Torr skrymdensitet är ett av de mått som är vanligast använt när det gäller att karakterisera kompaktion (Nawaz, et al., 2013). Det är ett mått på hur mycket ett torrt jordprov väger, inklusive både mineralpartiklar och luft, per volymenhet, och ger således en god indikation på hur stor porositet marken har. Densiteten för rent mineral ligger runt $2,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, och för en mineraljord mellan ca $1,3$ och $1,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Höga värden är en indikation på att markpackning har skett, medan låga värden tyder på hög porositet (Håkansson, 2000; Eriksson, et al., 2011). Skrymdensiteten kan även användas för att beräkna markens packningsgrad, vilket är uppmätt skrymdensitet dividerat med skrymdensiteten för samma jord som blivit tryckt med 200 kPa i en odometer. Ett relativt värde fås då ut, vilket gör det enklare att jämföra olika jordar med varandra (Håkansson, 2000).

Hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliska konduktiviteten är ett mått på markens genomsläpplighet. Eftersom markens genomsläpplighet till stor del bestäms av andelen makroporer tyder höga värden på hög porositet och låg kompaktion (Kim, et al., 2010). Värdena är dock inte bara beroende av andelen makroporer, utan även på porernas kontinuitet (Castellini & Ventrella, 2012). Hög kontinuitet ger högre värden, medan låg kontinuitet ger lägre värden.

Penetrationsmotstånd

Den bästa metoden att bedöma penetrationsmotståndet i marken är genom provtagning med penetrometer. Penetrometern består av en metallstav med en kon i änden, och penetrationsmotståndet, Q ($\text{N}\cdot\text{m}^2$), beräknas som den kraft, F (N) som behövs för att trycka ner konens tvärsnittsarea, A (m^2), i marken enligt:

$$Q = \frac{F}{A} \text{ (Bengough & Mullins, 1990)}$$

Penetrationsmotståndet är en indikator på hur packad jorden är, och jordar med högt motstånd har i regel låg porositet och få makroporer (Håkansson, 2000). Penetrationsmotståndet kommer även att vara starkt beroende av markens vattenhalt. Ökat penetrationsmotstånd ger minskad rottillväxt, och vid värden över 3 MPa anses rottillväxten vara mycket låg (Soane & van Ouwerkerk, 1994). Skillnaderna är dock stora mellan olika jordar på grund av rötternas tillväxtsätt. Penetrometern mäter motståndet rakt ner i profilen, medan rötterna använder sig av gamla rotkanaler, maskgångar och sprickor vid tillväxt. Detta gör att det uppmätta motståndet i regel överskattar det verkliga motståndet med 2-8 gånger, beroende på jordart samt hur markens porsystem är uppbyggt (Bengough & Mullins, 1990; Håkansson, 2000). Rottillväxten i en mark med högt penetrationstillstånd kan så-

ledes vara god om det finns ett rikligt utvecklat och kontinuerligt makroporsystem tillgängligt.

Datortomografi

Datortomografi, även kallat skiktröntgen, är en teknik för att ta fram tredimensionella bilder av ett objekt. Tekniken utvecklades under 1970- talet och användes då inom medicinen (Udawatta, et al., 2006), och det är även inom detta område som tekniken har haft störst användning. Inom markvetenskap användes datortomografi för första gången 1982. Då konstaterades att det fanns en positiv korrelation mellan skrymdensitet och röntgenförsvagning (Petrovic, et al., 1982). Under senare år har tekniken dock blivit allt vanligare, och den har använts inom en mängd olika områden. Exempel är studier av markens sammansättning av mineral, luft och vatten (Rogasik, et al., 1999), porositet och porsystem (Gantzer & Anderson, 2002; Pierret, et al., 2002; Udawatta & Anderson, 2008; Youbing, et al., 2013), vattenrörelser i marken (Mooney, 2002) och förhållanden mellan jord och rötter (Garbout, et al., 2012).

I denna studie har datortomografi använts för att studera makroporsystemet, vilket även är det område inom markvetenskapen som har blivit mest studerat (Taina, et al., 2008). Innan datortomografien hade utvecklats var det svårt att skapa tredimensionella bilder av markens porsystem. För att göra en uppskattning av porsystemets storlek och utseende användes då istället tester som infiltrationshastighet och skrymdensitet (Gantzer & Anderson, 2002; Udawatta, et al., 2006). 2D bilder sattes även ihop för att skapa en tredimensionell bild. Ett jordprov eroderades då ner i etapper, och varje nytt framtaget skikt fotograferades digitalt. (Vogel 1997). Teknik gav dock inte tillräckligt stor noggrannhet, och det var svårt att se porer som hade sin utbredning horisontellt (Youbing, et al., 2013). Datortomografi kan ge tredimensionella bilder med mycket stor noggrannhet, ner på μm -nivå. Tack vare detta kan porsystemet studeras på ett sätt som inte varit möjligt tidigare. Tekniken är dessutom ickedestruktiv, vilket gör att ett prov som använts för scanning kan återanvändas. På grund av att tekniken fortfarande är relativt ny finns dock ingen speciell standard för hur utförandet skall verkställas. Det förekommer således många olika metoder, och resultat mellan olika studier kan därför vara svåra att jämföra (Taina, et al., 2008).

2.1.4 Metoder att minska risken för markpackning

Det finns en rad olika metoder för att minska risken för markpackning. En av de viktigaste faktorerna är att inte utföra fältoperationer under blöta förhållanden eftersom marken får större skador vid högre vattenhalt, även om trycket och vikten är densamma. För att öka det fönster då körning är möjligt är det därför viktigt med åtgärder som torkar ut profilen. Dränering är en effektiv, men dyr, teknik

(Håkansson, 2000). En enklare teknik att torka ut marken med är att använda sig av grödan (Hamza & Anderson, 2005; Tullberg, et al., 2007). Hög produktion samt växande gröda så stor tid av året som möjligt ger högst vattenupptag. Höstgrödor, vall och där det är möjligt även fånggrödor, är därför passande till ändamålet (Håkansson, 2000).

Maskinmässigt bör en så låg vikt som möjligt eftersträvas på både traktorer och redskap för att minska risken för packning i alven. För matjorden kan lågtrycksdäck samt dubbelmontage vara fördelaktiga att använda (Botta, et al., 2002; Hamza & Anderson, 2005). Utöver dessa finns även ett mer extremt alternativ, nämligen användning av fasta körspår (Hamza & Anderson, 2005; McHugh, et al., 2009).

2.2 Bearbetningssystem

Jordbearbetning är en av de viktigaste faktorerna när det gäller påverkan på markens fysikaliska egenskaper såsom porositet, skrymdensitet och hydraulisk konduktivitet. Detta beror dels på att jordbearbetning är en regelbundet återkommande företeelse, men även för att den påverkar en stor del av marken (Strudley, et al., 2008).

2.2.1 Olika typer av bearbetningssystem

Jordbearbetning delas generellt in i tre olika kategorier; konventionell bearbetning, reducerad bearbetning och direktsådd. I Sverige, och övriga Europa, har plojen traditionellt sett varit ett viktigt redskap vid jordbearbetningen, och konventionell bearbetning syftar därför i detta område till bearbetningssystem där plöjning ingår (Alletto & Coquet, 2009). Reducerad bearbetning syftar istället till bearbetningssystem där plöjningsdjupet minskats eller system där plojen inte längre används. Vid direktsådd utförs ingen såbäddsberedning alls, utan sådd sker direkt i föregående grödas stubb (FAO, 2012).

Plöjning är en bearbetningsprincip som är relativt dyr. Det specifika dragkraftsbehovet är för plojen lågt i jämförelse med exempelvis kultivator. Detta beror till stor del på dess låga angreppsvinkel. Att plöjning trots detta är en dyr bearbetningsteknik beror på att en stor volym jord påverkas, vilket kräver energi (Arvidsson & Gustafson, u.d.). Plöjning har dock många positiva effekter, såsom kraftig påverkan på ogräs, och då inte minst perenner (Håkansson, 1995), nedmyllning av halm vilket minskar risken för dålig gröningsfrekvens, växtföljdsjukdomar och försenad sådd samt stor luckring av jorden (Håkansson, 1994), vilket gör den till en populär bearbetningsteknik.

Reducerad bearbetning har till stor del utvecklats på grund av de allt kärvare ekonomiska förutsättningar som dagens lantbrukare utsätts för. Genom att plocka

bort plöjningen kan både energi och tid sparas in, vilket gynnar ekonomin (Soane, 2010). Det är således denna anledning som europeiska bönder anger som främsta skälet till varför de använder sig av denna bearbetningsteknik (Holland, 2003).

Direktsådd är den mest extrema typen av reducerad bearbetning, och i Sverige är renodlad användning av direktsådd mycket ovanligt. Att lägga in den som en del av bearbetningssystemet, mellan år när jorden bearbetas, är dock vanligare, och 2013 såddes ca 3 % av Sveriges jordbruksareal utan någon föregående bearbetning (SCB, 2013).

2.2.2 Jordens luckringsbehov

En av jordbearbetningens viktigaste egenskaper är dess förmåga att luckra jorden (Håkansson, 1994). När jorden vänds ökar porvolymen och skrymdensiteten minskar. Jordvolymen är således som störst direkt efter den primära jordbearbetningen, och minskar sedan kontinuerligt under säsongen på grund av bland annat maskinöverfarter och naturlig packning (Håkansson, 2000; Alletto & Coquet, 2009). Luckringsbehovet varierar dock kraftigt mellan olika jordar, och bestäms främst av jordens textur. Friktionsjordar, såsom sand, har ingen självuppbbyggnad av strukturen. De porer som finns är de som bildas mellan mineralpartiklarna, och dessa är i regel för små för rötterna att penetrera. Penetrationsmotståndet kan således bli mycket högt, och årlig luckring är nödvändigt för att god tillväxt ska kunna uppnås. I kohesionsjordar är förutsättningarna annorlunda, vilket beror på lerjordarnas strukturbildande egenskaper. Vattenhaltsförändringar samt omväxlande tjäle och tö leder till att jorden spricker upp i aggregat och att porer och sprickor bildas. Detta ger förbättrade förhållanden för växtrötterna som kan använda de naturligt bildade porerna i marken till att utbreda rotsystemet i djupare markskikt. Årlig bearbetning på lerjordar är därför ej nödvändig (Heinonen, 1979; Willcocks, 1984; Arvidsson & Pettersson, 1995; Håkansson, 2000).

2.2.3 Bearbetningens effekter på porositet och hydraulisk konduktivitet

Plöjning är i regel en energikrävande bearbetningsteknik beroende på att den i många fall påverkar en stor volym jord, upp till 25 cm av markens översta del. Att en stor jordvolym bearbetas gör dock att marken luckras kraftigt, luft kommer in i profilen och marken kan torka ut (Josa, et al., 2010). Detta är viktigt på lerjordar som annars kan ha svårt att torka upp. Omfördelningen av jorden gör även att kokor och kompakterade aggregat kan föras närmare markytan och i större grad utsättas för väder och vind, och därför falla sönder till mindre aggregat (Castellini & Ventrella, 2012). Trots den ökade porositeten i de övre marklagren kan plöjning dock även leda till kompaktion, men då i djupare marklager. Vanligen uppkommer kompaktionen direkt under bearbetningsdjupet, på grund av trycket som denna

mark utsätts för när traktordäcket rör sig i plogfåran, och en trafiksula, bildas (Pagliai, et al., 2001).

Vid reducerad bearbetning sker inte lika stor luckring av markens översta lager som vid plöjning. En mindre volym jord bearbetas, och bearbetningsdjupet är i regel mindre än vid konventionell bearbetning. Detta leder till en kompaktion av jorden under bearbetningsdjupet, ofta ca 10 cm i ett system med plöjningsfri odling, med en ökad skrymdensitet och minskad porositet som resultat (Tebrügge & Düring, 1999; Capowietz, et al., 2009; Josa, et al., 2010; Raczkowski, et al., 2012). För porositeten kan även en övergång ses mot fler mikroporer medan andelen makroporer minskar (Raczkowski, et al., 2012). Reducerad bearbetning har på grund av detta visat sig vara ofördelaktig på sandjordar. Penetrationsmotståndet är på dessa jordar redan från början stort, och rotdjupet begränsat ofta till bearbetningsdjupet, varvid rottillväxten kan hämmas kraftigt om den årliga luckringen uteblir (Soane & van Ouwerkerk, 1994).

Jordar som brukas med reducerad bearbetning har ofta, trots ökad kompaktion i ytan och minskad makroporositet, lika stor hydraulisk konduktivitet som konventionellt brukade jordar (Logsdon, et al., 1990; Castellini & Ventrella, 2012). När den årliga störningen, som jordbearbetning innebär, uteblir förstörs inte de makroporer som bildats av bland annat maskar och rötter i marken (Logsdon, et al., 1990; Lipiec & Stepniewski, 1995), vilket är fallet i konventionella system (Pagliai, et al., 2001). De förändrade förutsättningarna i marken vid införandet av reducerad bearbetning påverkar även markfaunan. För maskar, som står för en stor del av bildandet av makroporer, har studier visat på en förändring i artsammansättningen. Andelen arter som förflyttar sig i vertikalt led ökar i förhållande till de arter som lever vid markytan eller som förflyttar sig horisontellt vilket är till stor nytta vid uppbyggandet av ett kontinuerligt makroporsystem (Capowietz, et al., 2009) och ökar infiltrationen och den hydrauliska konduktiviteten (Logsdon, et al., 1990; Lipiec & Stepniewski, 1995). På grund av att den hydrauliska konduktiviteten till största delen beror av dessa välutvecklade makroporer, kan resultaten från mätningar av den hydrauliska konduktiviteten från jordar med främst reducerad bearbetning, men även konventionell bearbetning, dock variera kraftigt beroende på om det analyserade provet innehåller dessa porer eller ej (Raczkowski, et al., 2012).

2.3 Fasta körspår

Markpackningen påverkas till stor del av vilket bearbetningssystem som används, men en annan faktor, som fått allt större uppmärksamhet under senare år, är packningen som uppkommer vid överfart med maskiner. Denna typ av packning har ökat i takt med att maskinerna har blivit allt större, och på grund av den stora

tyngden påverkas inte bara matjorden, utan även alven (Arvidsson & Pettersson, 1995). Att minska antalet överfarter kan vara en del av lösningen på problemet, men upp till 90 % av den totala volymminskningen efter ett antal överfarter kan orsakas enbart av den första överfarten (Taylor, 1983; Elaoud & Chehaibi, 2011). För att få bukt med problemet krävs därför även att arean som påverkas av överfarter minskas. Vid slumpmässig körning beräknas hela fältarealen bli överkörd av hjul minst en gång under växtodlingssäsongen (Håkansson, 2000; Hamza & Anderson, 2005). Genom att använda sig av reducerad bearbetning, med 2-3 överfarter per säsong, kan den påverkade arealen sänkas till 60 % och vid direktsådd ner till 30 % (Hamza & Anderson, 2005).

En teknik för att minska antalet överfarter, utan att minska bearbetningen, är användning av fasta körspår, även kallat CTF efter engelskans controlled traffic farming. Det är en teknik som utvecklats för att minska packning orsakad av maskinöverfarter, och istället för att köra slumpvis över fältet görs alla fältoperationer i bestämda körspår. Tekniken utvecklades under 1960-talet och störst användande finns i Australien (Tullberg, et al., 2007), med strax under 14 miljoner ha (Australian Bureau of Statistics, 2013). I Europa har införandet hittills varit i relativt begränsad omfattning (Tullberg, et al., 2007).

CTF är ett system som ofta kombineras med reducerad bearbetning (Tullberg, et al., 2007). Plöjning behöver dock inte uteslutas helt, utan kan vara en del av jordbearbetningen. Plöjning on-land är då att föredra för att minska risken för slirning i plogfåran med markpackning som följd. Plöjningen bör även utföras vinkelrätt mot de fasta körspåren så att kompakterad jord i körspåren förflyttas i körspårens riktning, och inte i sidled från spåren som skulle bli fallet om plöjningen utfördes i spårriktningen. Körspåren kan då lättare återkompakteras, och jord med dålig struktur kommer inte ut i fältet utanför spåren (Tinker, et al., 2010; CTF Europe, 2013d).

2.3.1 Teknik

Vid användning av CTF kan fasta markörer placeras ut i fält som riktmärken att köra efter, men absolut vanligast är användningen av GPS-teknik (Tinker, et al., 2010). GPS är en teknik då en mottagares position beräknas med hjälp av satellit-signaler. För att få en korrekt position krävs signaler från minst fyra olika satelliter, och idag finns ett 30-tal satelliter som är utplacerade så att detta alltid ska vara möjligt, oavsett var man befinner sig. Noggrannheten för de enklaste systemen varierar då från ca 10 m och nedåt. För användning i jordbruket krävs dock mycket stor noggrannhet, och för att uppnå detta används GPS korrigerad med real time kinematic, RTK. Denna teknik utnyttjar fasmätning, istället för kodmätning, vilket kräver större datakapacitet hos mottagaren, men som ger bättre noggrannhet. Avståndet som mäts, mäts även mellan satelliterna och två olika mottagare, dels den

rörliga i traktorn och dels en fast mottagare. Eventuella fel som uppstår vid beräkningarna av avstånden mellan satellit och mottagare kan då antas vara lika stora, och tar därför ut varandra när skillnaderna mellan dem beräknas (Harrie, 2012), vilket leder till att en precision på ± 2 cm kan uppnås (Tullberg, et al., 2007; Tinker, et al., 2010; Holpp, et al., 2012).

2.3.2 Omläggning från konventionell bearbetning till CTF

För att kunna använda sig av CTF krävs att maskinparken anpassas till en fast modulbredd. Bredare maskiner, som spruta och gödnings-spridare, anpassas så att deras arbetsbredder är jämt delbara med modulbredden (CTF Europe, 2013d). Om systemet skall utnyttjas maximalt bör även avståndet mellan däcken, på både traktorer och skördetröska, anpassas så att de blir lika stora. Detta kan dock vara svårt att genomföra, och därför tolereras ofta ett visst överlapp.

Hur stora investeringar som krävs för att få en passande maskinpark beror till stor del på den befintliga maskinparken. Alvemar och Johansson (2013) kom fram till att en större gård, från 500 ha, i regel behöver göra färre förändringar i maskinparken och att lönsamheten ökar med ökad areal. Störst investeringar behövs i regel göras för inköp av GPS-systemet, om detta inte redan finns (Chamen, 2011).

2.3.3 Fasta körspårs fördelar och nackdelar

Vid CTF sker alla överfarter i samma körspår vilket leder till att marken i körspåren kompakteras medan marken på övrig areal hålls lucker. Detta kan föra med sig en rad fördelar, både odlingsmässigt och ekonomiskt.

Kompaktionen i körspåren är en av de viktigaste faktorerna vid CTF. Packningen av jorden leder till en skördeminskning, men tanken är att denna ska kunna kompenseras av den skördeökning som fås mellan spåren på grund av att denna mark inte packas (CTF Europe, 2013a). Där utvecklas då en god struktur med mycket porer. En god struktur ger bättre möjlighet för gasutbyte i profilen. Syre kan komma ner till rötterna, och koldioxid kan transporteras bort. God struktur ger även bättre möjligheter för god rotutbredning i profilen vilket gynnar grödans upptag av både näring och vatten. Avkastningen mellan spåren beräknas därför öka med ca 15 % (Tinker, et al., 2010; Chamen, 2011).

Kompaktion av marken ger ökad hållfasthet. Detta är något som utnyttjas i de fasta körspåren. Ju kompaktare jorden i körspåren är, desto bättre blir dragkraftseffektiviteten. Den förbättrade strukturen som fås mellan körspåren, på grund av minskad packning, gör också att dragkraftsbehovet minskar samt att ett grundare bearbetningsdjup kan användas. Lantbrukare som tillämpar CTF upplever därför ofta att de kan använda sig av mindre traktorer än innan de bytte system (CTF Europe, 2013a). Försök från Nederländerna visar att en energibesparing på upp till 50 % därför kan uppnås vid användning av CTF jämfört med slumpmässig kör-

ning (Lamers, et al., 1986). Den förbättrade strukturen mellan spåren leder även till att marken snabbare torkar upp. Lantbrukaren får då ett större tidspann för när fältoperationerna kan utföras, och ofta kan jordbearbetning och sådd ske tidigare på säsongen vilket minskar läglighetskostnaderna (Hamza & Anderson, 2005). Ett potentiellt problem med körspåren är dock om överfart sker när de är mycket blöta. Hållfastheten minskar med ökad vattenhalt, och någon typ av dränering kan vara nödvändig att ha för att körspåren inte ska bli allt för blöta (CTF Europe, 2013b).

Vid konventionell körning sker alltid ett visst överlapp vid alla typer av fältoperationer. Detta leder till att det går åt mer tid, energi och insatser såsom utsäde, konstgödsel och bekämpningsmedel än om körningarna optimeras. Eftersom en stor noggrannhet, ner till 2 cm, kan uppnås med hjälp av GPS- styrning (Holpp, et al., 2010) kan dessa överlapp minimeras. Detta är därför en stor orsak till att CTF ger en förbättrad ekonomi (Tullberg, et al., 2007; Tinker, et al., 2010; CTF Europe, 2013a).

3 Material och metod

3.1 Avgränsning

Det praktiska arbete som ingått i detta examensarbete är skörd, scanning, mätning av hydraulisk konduktivitet samt torkning och vägning av prover för skrymdensitetsberäkningar. Övrigt praktiskt arbete och övriga resultat har tagits fram av personal från avdelningen för jordbearbetning.

3.2 Försök R2-7120

Försök R2-7120 är ett randomiserat blockförsök (Engstrand & Olsson, 2003) och finns utlagt på Säby nära Uppsala, samt Alnarp nära Malmö. Till projektet hör även storrutor utlagda på Lydinge gård utanför Helsingborg. I denna studie har främst resultat från försöket i Säby analyserats. För avkastning och plantantal finns dock även siffror för både Alnarp och Lydinge.

3.2.1 Säby och Alnarp

Jordart och grödor för 2011- 2013 listas i tabell 1. De två platserna skiljer sig åt vad gäller jordart, som på Säby är styv lera och i Alnarp moränlättilera, samt växtföljd. För Säby har växtföljden varit vårkorn- vårraps- vårkorn. Enligt den initiala planen skulle även höstvetete ha ingått i växtföljden, men på grund av väderleksförhållandena, med mycket regn under höstarna 2010 och 2012, har höstsådd ej kunnat utföras. För Alnarp har växtföljden varit höstvetete- vårkorn- höstraps.

Tabell 1. Jordarter och grödor på de två försöksplaterna, Säby och Alnarp

Plats		Säby	Alnarp
Jordart		Styv lera	Moränlätter
Gröda	2011	Vårkorn	Höstvete
	2012	Vårraps	Vårkorn
	2012	Vårkorn	Höstraps

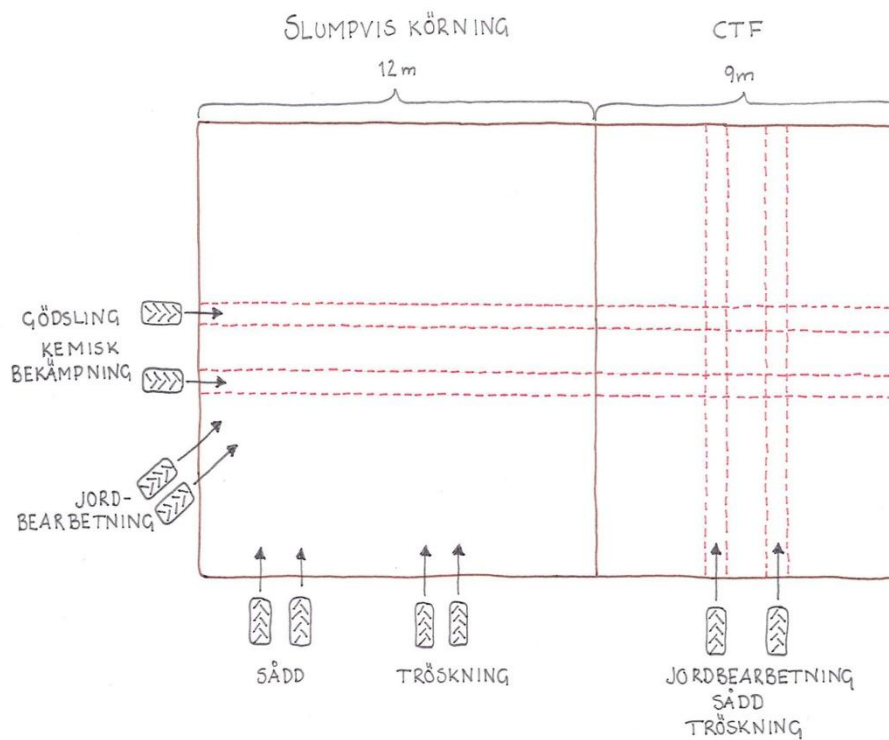
Försöken anlades 2010 och har pågått under en treårsperiod. Året innan försöket började plöjdes marken på Säby varpå spannmål odlades. I försöksplanen ingår fyra block med vardera åtta led. De olika leden har varierande bearbetningsprinciper och varierat fasta körspår eller slumpmässig körning, vilket redovisas i tabell 2. Ett av leden, led H, är plöjning, vilket inte är en bearbetningsteknik som förknippas med fasta körspår. Det är dock en mycket vanlig bearbetningsteknik, och därför viktig att ha med som jämförelse.

Tabell 2. Försöksplan för försöken på Säby och Alnarp

Led	Bearbetningssystem	Körspår
A	Djup plöjningsfri odling (15-20 cm)	Slumpvis
B	Grund plöjningsfri odling (5-10 cm)	Slumpvis
C	Direktsådd	Slumpvis
D	Djup plöjningsfri odling (15-20 cm)	CTF
E	Grund plöjningsfri odling (5-10 cm)	CTF
F	Grund plöjningsfri odling (5-10 cm) efter djupluckring	CTF
G	Direktsådd	CTF
H	Plöjning	Slumpvis

Parceller med fasta körspår är 9 m breda. I dessa parceller har jordbearbetning, sådd och tröskning utförts i utmärkta spår i parcellriktningen. Vid tröskning har överfart gjorts i alla spår, oavsett om det funnits växande gröda eller ej, för att få fram packningseffekterna. Parceller med slumpmässig körning är 12 m breda, förutom i led C- direktsådd där de är 9 m breda, och i dessa har sådd och tröskning utförts i parcellriktningen, men avsiktligt i olika spår. Jordbearbetningen har utförts diagonalt över parcellerna. I samtliga rutor har gödsling och sprutning skett vinkelrätt mot parcellriktningen i spår som sträcker sig över hela blocken, se figur

1. Traktorerna som användes var en Massey Ferguson 6290 med en totalvikt om 5500 kg samt, till djup kultivering, en Massey Ferguson 6490 med en total vikt om 6800 kg.



Figur 1. Schematisk bild över fältoperationerna i försöket. I parceller med CTF utfördes jordbearbetning, sådd och tröskning i samma körspår. I parceller med slumpmässig körning spreds dessa fältoperationer medvetet ut över hela ytan. Gödning och sprutning gjordes vinkelrätt mot parcellriktningen.

3.2.2 Lydinge

Lydinge gård ligger 20 km öster om Helsingborg. På gården brukas all mark sedan 2006 med reducerad bearbetning och fasta körspår. Implementerandet av reducerad bearbetning skedde redan 2001 (CTF Europe, 2013c).

För denna studie har storrutor om 1 ha lagts ut slumpmässigt på gården för att jämförelser mellan spår, opackad yta och konventionell bearbetning ska kunna göras i större skala. Fem storrutor har lagts ut på mark med CTF, och fem motsvarande rutor på mark med konventionell bearbetning.

3.3 Provtagning

Från försöket i Säby togs den 30-31 maj samt 3 juni jordprover, i cylindrar med en diameter av 7,2 cm och höjden 5,0 cm, ut från djupet 10-15 cm. Vädet hade då under en längre period varit torrt. Från parceller med slumpvis körning (led A, B, C och H) togs fyra prover per parcell. Från parceller med CTF (led D, E, F och G) togs fyra prover i körspåren och fyra prover mellan körspåren. Proverna plastades in och förvarades i kylrum med en temperatur om ca 5 °C, för att minska den biologiska aktiviteten. Proverna användes till, i följande ordning utfört, analys av makroporsystemet med hjälp av datortomografi, hydraulisk konduktivitet och skrymdensitet.

3.4 Torr skrymdensitet

Efter mätningen av den hydrauliska konduktiviteten torkades proverna för att kunna vägas inför skrymdensitetsberäkningarna. De vattenmättade proverna ställdes på metallock och torkades i ugn i 105 °C i tre dygn. Avsvalningen skedde under plastskivor för att minska risken för upptag av vatten från omgivande, svalare, luft. Proverna vägdes när de hade svalnat tillräckligt för att hanteras utan handskar. Vägningen gjordes på en ”Precisa 3100C” och en ”Precisa 500M-2000C”, båda ISO 9001 certifierade.

3.5 Hydraulisk konduktivitet

På samtliga cylinderprover utfördes mätningar av den hydrauliska konduktiviteten med konstant tryckhöjd (Andersson, 1955; Klute & Dirksen, 1986). Proverna förbereddes för konduktivitetsmätningen genom att vattenmättas genom kapillär uppsugning (Andersson, 1955). Jordens kanter, på cylinderns över- och undersida, skars till så att en jämn kant bildades. Detta var viktigt då proverna senare skulle användas för beräkning av skrymdensiteten. På provernas undersida lades ett filterpapper under en tunn duk som fästes med hjälp av en gummisnodd. Proverna ställdes i en back med nät i botten för att möjliggöra för vattnet att tränga in jämt underifrån. Vatten fylldes sedan på i backen i tre olika etapper, nagelhöjd, halva cylinderhöjden samt upp till cylindrarnas kant. Denna höjning skedde stegvis under cirka en vecka. Under denna period kontrollerades proverna regelbundet för att hitta spår av mask. Indikationer på att det finns mask i provet är jord runt cylindern, på backens botten, samt ett glansigt och smetigt utseende på provets ovansida. Prover som uppvisade sådana egenskaper sattes åt sidan i en separat back och täcktes helt med vatten för att bilda syrebrist. Maskar och andra markdjur som eventuellt fanns i provet drevs då upp till ytan och kunde plockas bort med pincett.

Samtliga prover där mask hade plockats bort antecknades, och dessa togs senare ej med i beräkningarna för att minska risken för felkällor. Marklevande organismer, och då speciellt maskar, äter och gräver i provet vilket kan förändra porstrukturen kraftigt och ge felaktiga resultat vid genomsläpplighetsmätningarna. Material som åker ut ur cylindern kommer även att ge upphov till för låga resultat på skrymdensiteten.

En dag innan mätning förbereddes proverna då en förlängningscylinder sattes ovanpå provet. Efter detta fylldes vattennivån på så att hela provet täcktes. Dagen efter utfördes mätningen. Förlängningscylindrarna kopplades då till separata vattenslangar som fyllde på vatten från en jämn vattenyta, se figur 2. Vattentrycket blev då detsamma för samtliga prover. Efter att vattnet kopplats in fick proverna stå i en timme för att en jämvikt i flödet skulle uppnås. Tog mätningen 20 sekunder eller mindre utfördes dock mätningarna direkt och proverna togs sedan bort. Detta beroende på att den höga vattenhastigheten kan komma att erodera eller slamma igen provet samtidigt som vattentrycket kan förändras (Andersson, 1955). Detta gäller främst för det enskilda provet, om vatten inte hinner rinna till tillräckligt snabbt, men också för övriga prover om tillräckligt stora mängder vatten går till ett enskilt prov.



Figur 2. Bild av permeabilitetsapparaturen. Förlängningscylindrarna (A) är här fästa på proverna och kopplade till en jämn vattenyta (B). Från vissa förlängningscylindrarna syns vattenavledning från en läckande övre skarv med hjälp av disktrasa (C).

45 minuter efter att vattnet hade kopplats till proverna tillsattes extra vatten i varje prov för att kontrollera att förlängningscylindrarna inte läckte i den övre skarven. För prover som läckte placerades smala remsor disktrasa i skarven och användes som en brygga för att leda bort vattnet, se figur 2. För att vattenpåfyllningen inte skulle påverka mätningarna utfördes den minst 15 minuter innan mätningen.

Vid mätningen bestämdes mängden vatten som passerade proverna under en viss tid. Vattnet samlades upp i separata provrör, ett för varje prov. Mätningen utfördes tills ca 80 ml vatten hade samlats upp eller i 60 minuter. Prover med hög hydraulisk konduktivitet, där mätningen tog mindre än 60 sekunder, mättes sammanlagt tre gånger medan övriga prover mättes en gång.

Efter provtagningen kontrollerades förlängningscylindern för att se att även den undre skarven inte läckte. Förlängningscylindern monterades av och eventuell svällning hos proverna noterades.

Den hydrauliska konduktiviteten beräknades med hjälp av Darcy's lag:

$$-K = \frac{V \cdot T_{\text{kor}} \cdot dx}{t \cdot A \cdot dH}$$

K	hydraulisk konduktivitet (m·s ⁻¹)
V	volymen vatten (m ³)
T _{kor}	vattentemperaturkorrektion (-)
dx	provlängd (m)
t	tid (s)
A	provets area (m ²)
dH	vattenpelare (m)

3.6 Penetrometermätningar

Under våren 2013 utfördes på Säby penetrometermätningar, i samtliga led, med en Eijkelkamppenetrometer. I parceller med slumpmässig körning togs tio, slumpmässigt utlagda, stick. I led med fasta körspår togs tio stick i spår och tio stick mellan spår.

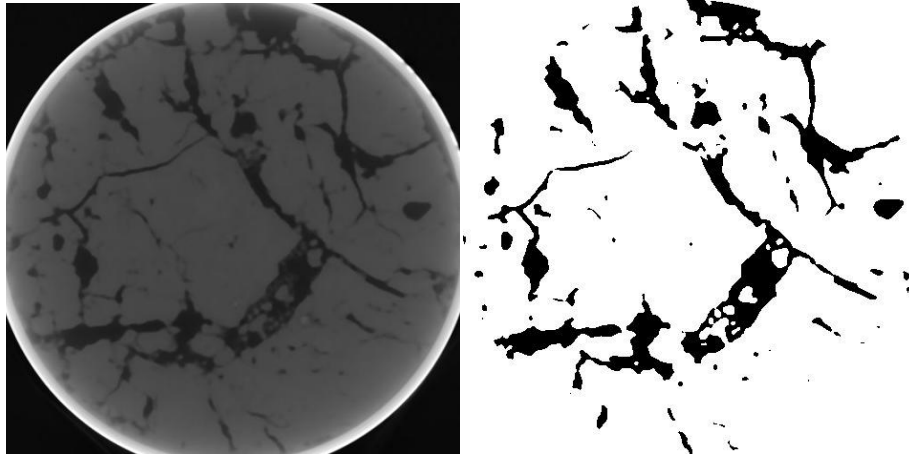
3.7 Datortomografi av porsystemet

I denna studie scannades prover från fyra olika bearbetningstyper, djup plöjningsfri bearbetning (led D), grund plöjningsfri bearbetning (led B och E), direktsådd (led C och G) samt plöjning (led H). Datortomografen som användes var en GE phoenix v/tome/v m, utvecklad för materialanalys inom industrin och med en maximal spänning på 300kV för att kunna analysera material med hög absorption

(General Electric Company, 2013). Inställningarna som användes varierade mellan 200- 240 kV och 220- 270 μ A. Exponeringstiden för samtliga prover var 333 ms. Tvådimensionella röntgenbilder togs från 1500 vinklar per prov, och för varje vinkel togs fyra bilder varav ett medelvärde från de tre sista användes för att skapa en bild. Voxelstorleken var 70,0 μ m. För att minska bildningen av artefakter användes en kopparplåt som placerades mellan provet och mottagaren. Datortomografer avger röntgenstrålar av flera olika våglängder. Ju färre våglängder som avges, desto klarare blir bilderna som tas. Kopparplåten absorberade vissa våglängder, och bilderna kunde på så vis fås klarare.

Tredimensionella bilder skapades med hjälp av programmet ”Phoenix datos x 2 reconstruction” och exporterades som 16 bits tif- filer till ImageJ-win 64.exe, ett gratis bildbehandlingsprogram, för vidare behandling. I ImageJ förminskades bilderna till 50 % med kommandot *scale*. Varje voxel, som från början var 70 μ m, omvandlades då till 140 μ m för att göra bilderna lättare att hantera. Filtret Median 3D användes sedan för att göra bilden klarare (reducera brus). Varje voxel gick igenom och ett medianvärde för de tre närmast intilliggande voxlarna gav den bearbetade voxeln dess värde. Bilderna korrigerades vertikalt med kommandot *Rotate*, och de korrigerades också i ljusstyrka i förhållande till varandra. Även ljusstyrkan i varje specifik prov korrigerades då metallcylindern gav provets yttre delar en ljusare färg än provets inre delar. Utan denna korrigering skulle porositeten i provernas ytterkanter underskattas medan porositeten i provernas inre delar skulle överskattas. För att ytterligare minska cylinderns påverkan på provet beskars bilderna så att de yttersta millimetrarna mot cylinderväggen togs bort. Även delar från provets över- och undersida beskars så att jorddelar påverkade av provuttagningen inte kom med i analysen. Så stor del som möjligt sparades dock eftersom övriga mätningar utfördes på hela volymen. Alla cylindrar beskars på samma sätt gällande diametern. Vissa skillnader förekom i hur stor del av provet som användes i höjddled eftersom proverna var olika påverkade från uttagningen. Detta ansågs vara godtyckligt då ett medelvärde beräknades för varje prov och användes i de statistiska analyserna.

För att separera makroporsystemet från det övriga provet användes kommandot *Threshold*. Samma tröskelvärde användes för alla prover för att skilja luft (porer) från fast material. Voxlar med ett värde över det valda tröskelvärdet, fast material, blev vita och voxlar med ett värde under tröskelvärdet, luft, blev svarta, se figur 3.

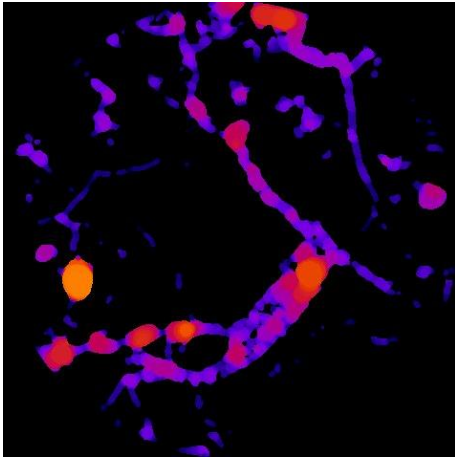


Figur 3. Bild av led H (plöjning), före (vänster) och efter (höger) att ett tröskelvärde har implementerats.

Eftersom ingen kalibrering gjorts för var tröskelvärdet skulle ligga gjordes en visuell bedömning av detta. För de första bilderna som analyserades jämfördes bilder där ett tröskelvärde lagts till med originalbilderna för att få fram ett värde där så stor del av makroporerna som möjligt skiljdes ut från det fasta materialet. Detta tröskelvärde användes sedan för alla bilder. Efter att detta tröskelvärde lagts på varierade värdet på voxlarna mellan 0 för fast material och 255 för luft. Bildernas andel porer analyserades sedan genom att medelvärdet för varje lager i provet beräknades.

Med hjälp av kommandot *Measure Surface Area* beräknades arean mellan porer och fast material, det vill säga porernas yta. Genom att jämföra porernas ytterarea med deras volym kan därför även en indikation på storleksfördelningen av porerna göras då ökande volym karakteriseras av minskande yta per volymsenhet.

För att få ett ytterligare mått på porstorlekarna användes kommandot *Thickness* i BoneJ. Största möjliga sfär passades in i varje por, och ett medelvärde för diametern på sfärerna för alla porer i ett prov beräknades, se figur 4. Samma sak gjordes för det fasta materialet för att få ett värde på jorrdiametern (mellanrummet mellan porerna). Pordiametern redovisades i BoneJ som *thickness* medan jorrdiametern redovisades som *spacing*.



Figur 4. Bild av led H (plöjning) efter att kommandot *Thickness* implementerats. Bilden visar resultatet av sfärer av maximal storlek har passats in i porema. Sfäernas färg varierar med diametern från lila (liten diameter) till gult (stor diameter).

3.8 Såbäddsundersökning

Efter sådd utfördes såbäddsundersökningar i led med djup- och grund plöjningsfri odling, med och utan CTF (A, B, D och E) samt plöjt led (H). En metallram, 0,4 m · 0,4 m placerades på marken och trycktes med handkraft ner i såbädden. Allt löst material i denna ruta fördes över till en mätcylinder i vilken sådjupet kunde avläsas i cm. För att få med allt löst material vid såbotten användes diskborste som hjälpmedel. En metallvinkel om 0,25 m · 0,4 m sammanfogades med metallramen. I den öppna delen togs materialet, med hjälp av en metallskopa, ut och sållades genom två ramar med vardera 5 och 2 mm maskstorlek. De olika aggregaten delades således in i storlekarna >5 mm, 2- 5 mm samt <2 mm, och volymen av samtliga fraktioner mättes. Slutligen mättes högsta och lägsta punkten för såbotten, såsom tidigare gjorts för markytan. Utförandet är samma som finns beskrivet av Kritz (1983).

Vid såbäddsundersökningen togs även prover av såbotten som vägdes, torkades i 105°C i tre dygn och sedan vägdes igen för att kunna beräkna mängden vatten i provet. Vattenmängden användes sedan för att beräkna vattenhalten i viktsprocent, det vill säga massan vatten per massa torr jord.

3.9 Planträkning

Under våren utfördes en planträkning för samtliga led. För räkningen användes en ram om 0,25 m² (0,5 m · 0,5 m). I slumpvis bearbetade led (A, B, C och H) räknades sex rutor om totalt 1,5 m² i varje parcell. Rutorna placerades minst 2 m in från

kanten i en diagonal över parcellen. I led med fasta körspår (D, E, F och G) räknades sex rutor om sammanlagt 1,5 m² både i och mellan spår.

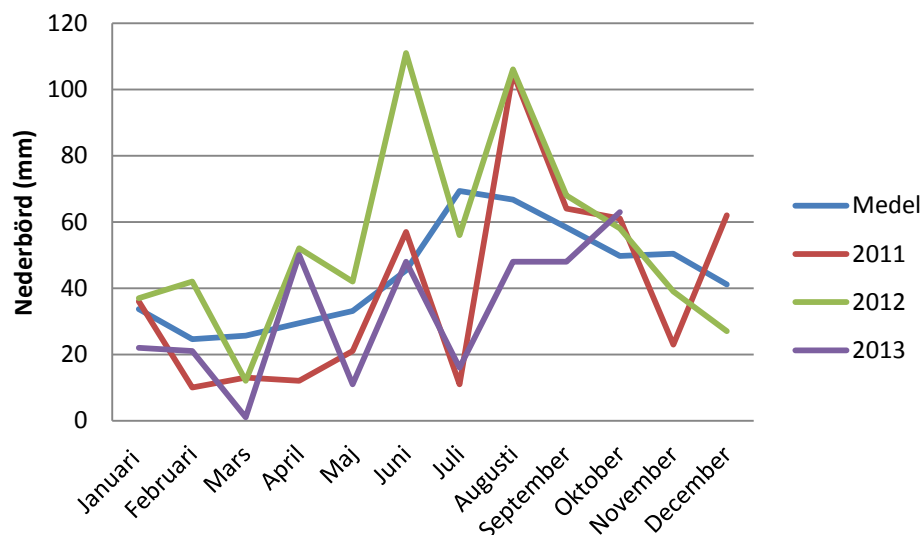
3.10 Skörd för avkastningsmätning

Avkastningsmätningar gjordes på prover som handskördats med sekator. Plantorna klipptes vid marknivå. Till skörden användes en metallram om 0,25 m² (0,5 m·0,5 m). I slumpvis bearbetade led (A, B, C och H) skördades åtta prov om totalt 2 m² i varje parcell. Proverna togs minst 2 m in från kanten i en diagonal över parcellen. I led med fasta körspår (D, E, F och G) togs prover både i och mellan körspåren. Proverna togs i de mittersta körspåren av rutan samt mellan dessa spår. I varje spår togs fyra prover om totalt 1 m². Dessa prover slogs ihop så en sammanlagd yta av 2 m² uppnåddes. Mellan körspåren togs åtta prover om totalt 2 m². Proverna togs slumpvis både i och mellan spår.

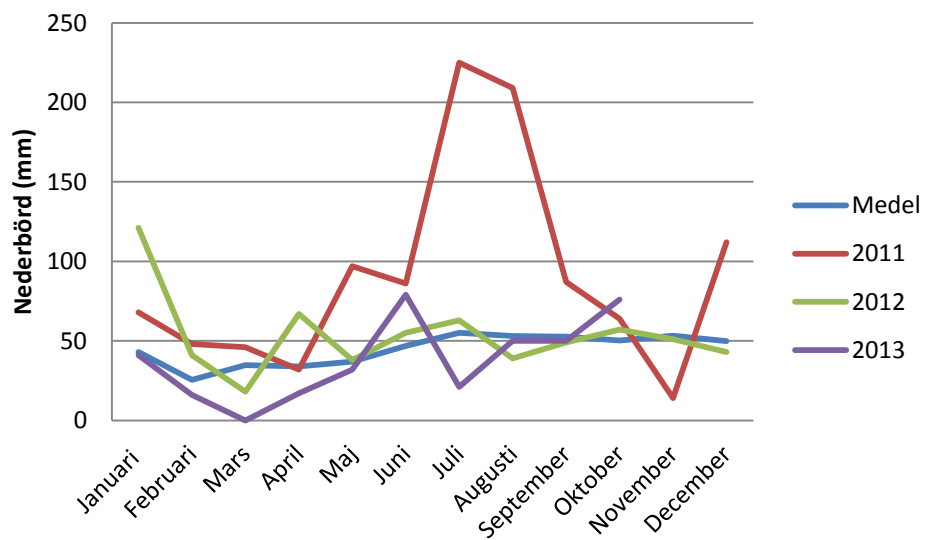
Proverna skickades till SLU där de tröskades i tröskverk, torkades och vägdes. Vägning gjordes av både kärnor och halm.

3.11 Väderdata

I figur 5 och 6 redovisas för nederbörden i Säby och Alnarp under de tre försöksåren. Under 2011 och 2013 rådde försommartorka i Säby. I Alnarp har nederbördsförhållandena varit normala eller över de normala under hela försöksperioden.



Figur 5. Nederbördsdata, månadsvis, för Säby 2011-2013, samt normalvärden från 1961-1990 (SMHI, 2009).



Figur 6. Nederbördsdata, månadsvis, för Alnarp 2011-2013, samt normalvärden från 1961-1990 (SMHI, 2009).

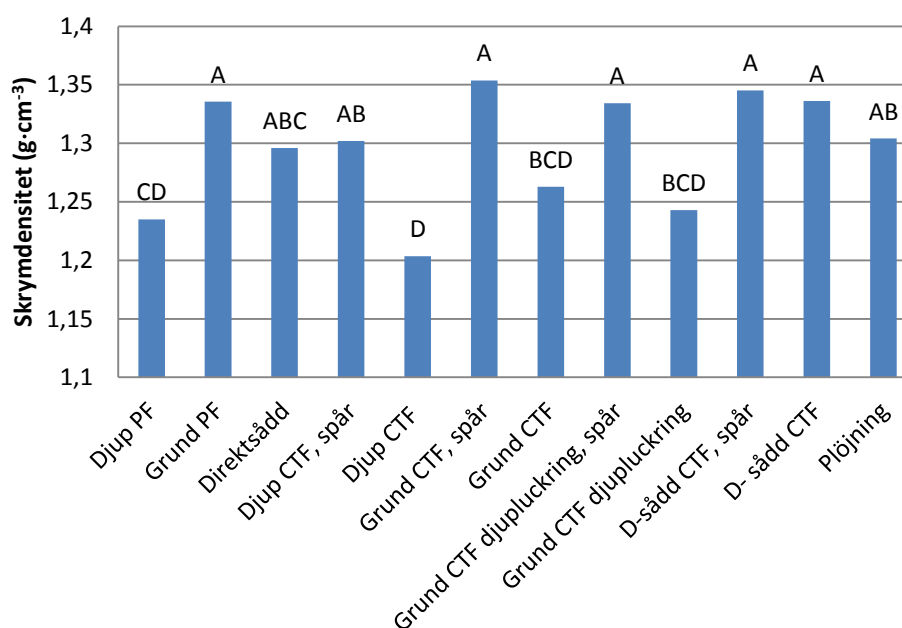
3.12 Statistisk analys

För samtliga resultat, förutom avkastningen för både Säby och Alnarp 2013, har statistiska analyser, ANOVA samt t- test, gjorts med hjälp av SAS (SAS, 1985).

4 Resultat

4.1 Torr skrymdensitet

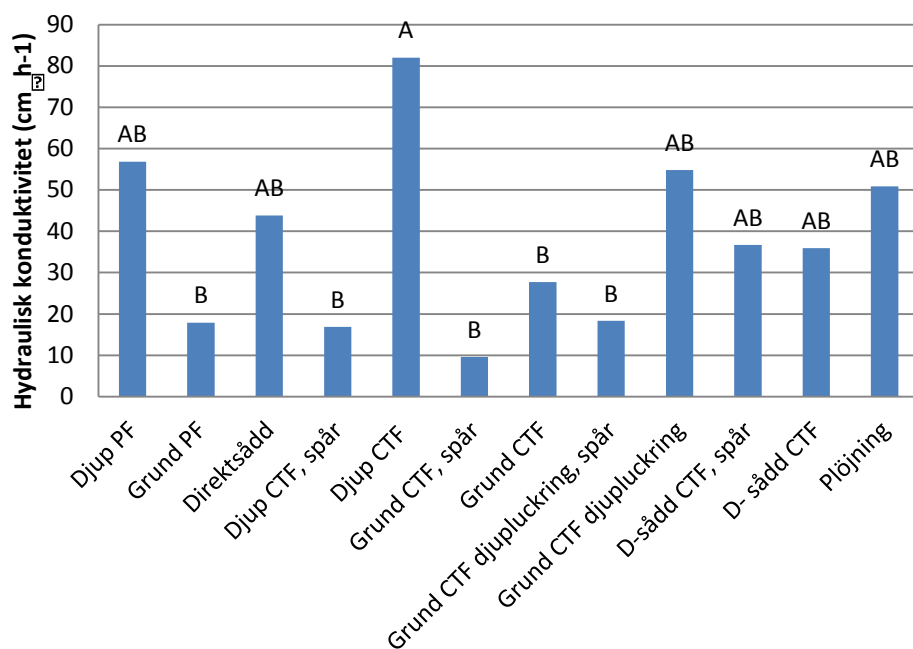
Lägst skrymdensitet av samtliga led återfanns i djup CTF, opackad yta, och skiljde sig signifikant från övriga led, men även djup plöjningsfri odling med slumpmässig körning uppvisade låga värden. För led med CTF kan signifikanta skillnader ses mellan spår och opackad yta, i alla led förutom direktsådd, se figur 7.



Figur 7. Torr skrymdensitet för Säby, 2013. Led med olika bokstäver skiljer sig signifikant ($p < 0,05$) från varandra.

4.2 Hydraulisk konduktivitet

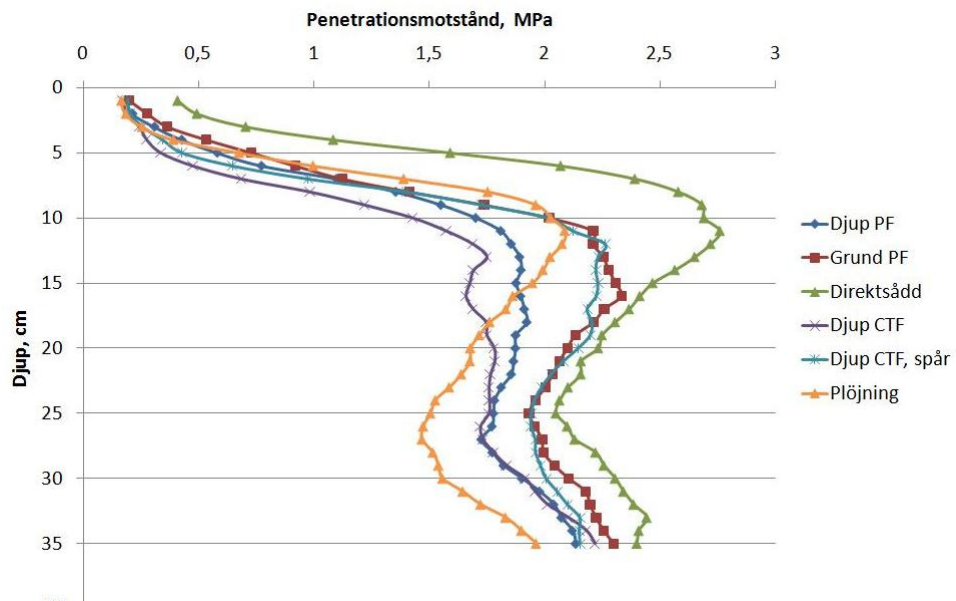
Högst hydraulisk konduktivitet återfanns i djup CTF, opackad yta. Lägst hydraulisk konduktivitet återfanns i spår för led med CTF samt i grund CTF opackad yta och grund plöjningsfri odling, se figur 8. Signifikanta skillnader kunde dock inte ses för de olika bearbetningsprinciperna, och för CTF återfanns endast signifikanta skillnader mellan spår och opackad yta i djup bearbetning.



Figur 8. Mättad hydraulisk konduktivitet, Säby 2013. Led med olika bokstäver skiljer sig signifikant ($p < 0,05$) från varandra.

4.3 Penetrometermätning

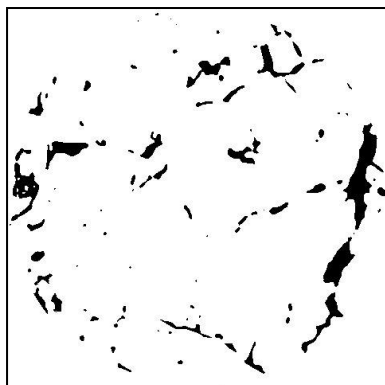
För de olika bearbetningsprinciperna var direktsådd det led som utmärkte sig genom hela profilen med högst penetrationsmotstånd. Vid 10 cm djup var djup plöjningsfri odling det led som hade minst motstånd, medan plöjning hade minst motstånd från 15 cm djup. Grund plöjningsfri odling intog här en mellanställning. För samtliga led med CTF återfanns högst motstånd i spåren, se figur 9.



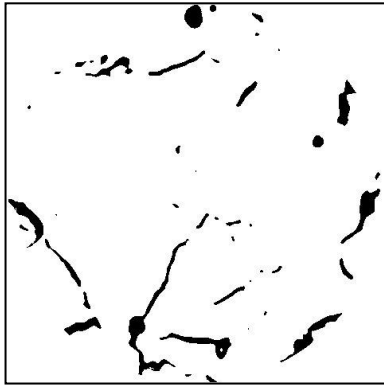
Figur 9. Penetrometermätning Säby våren 2013.

4.4 Bilder från scanningen

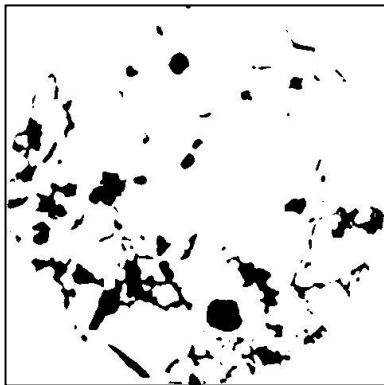
I figur 10- 15 visas bilder av scanningen av ett av blocken på Säby. På bilderna kan ses att led med CTF har större andel sprickor i spår än i opackad yta.



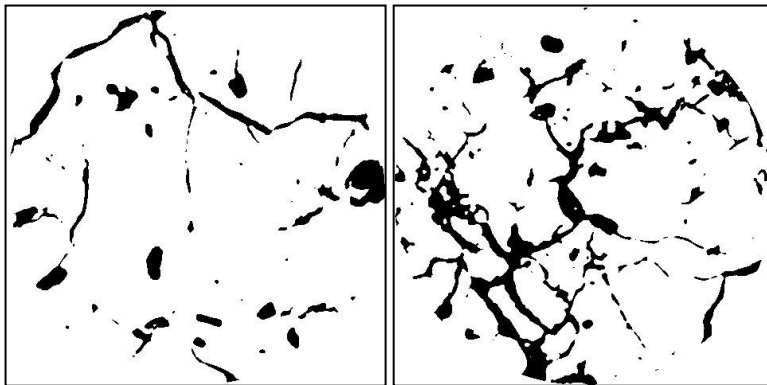
Figur 10. Led B, grund plöjningsfri odling, Säby 2013.



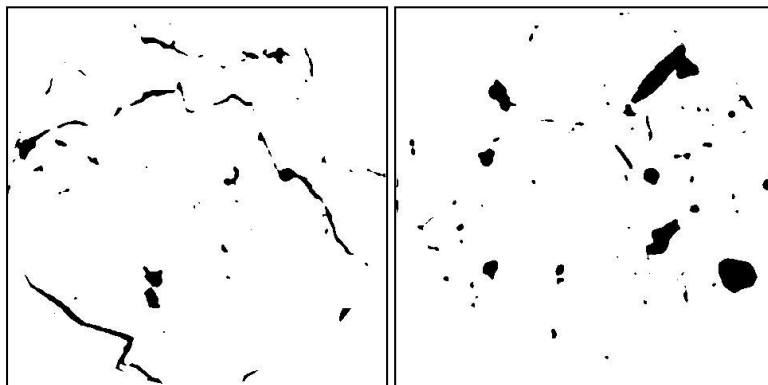
Figur 11. Led C, direktsådd, Säby 2013.



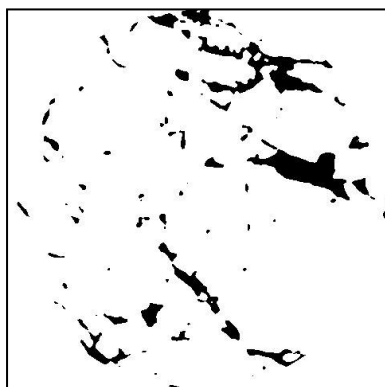
Figur 12. Led D, djup CTF, opackad yta, Säby 2013.



Figur 13. Led E, grund CTF. Till vänster spår, till höger opackad yta. Säby 2013.



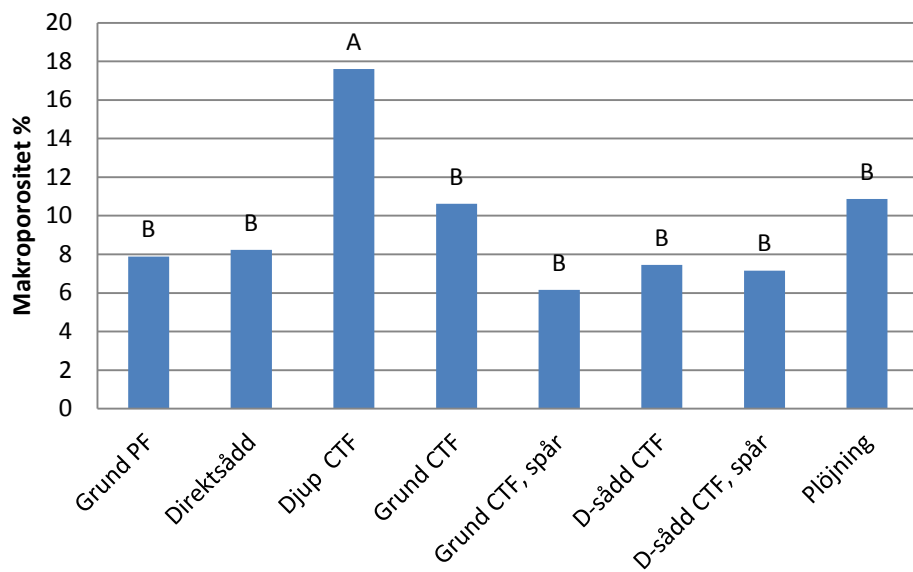
Figur 14. Led G, direktsådd CTF. Till vänster spår, till höger opackad yta. Säby 2013



Figur 15. Led H, plöjning, Säby 2013.

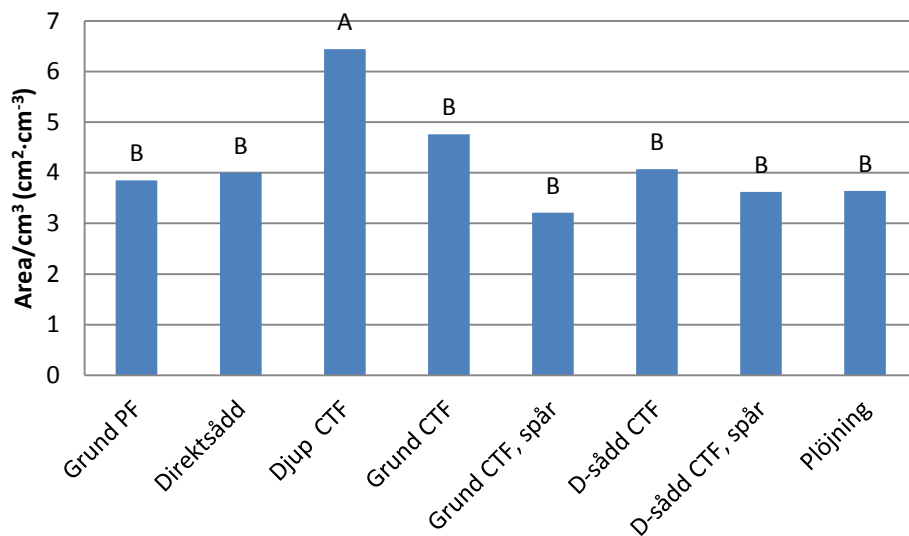
4.5 Mått på makroporsystemet

Makroporositeten i djupet 5-10 cm varierade mellan 6 och 18 %. Led djup CTF, opackad yta, urskiljde sig från övriga led och hade signifikant högre makroporositet. För övriga led var skillnaderna ej signifikanta. Det fanns dock tendenser att plöjt led var den bearbetningsprincip som hade högst makroporositet, samt att led med CTF hade lägre makroporositet i spår än i opackad yta, se figur 16.



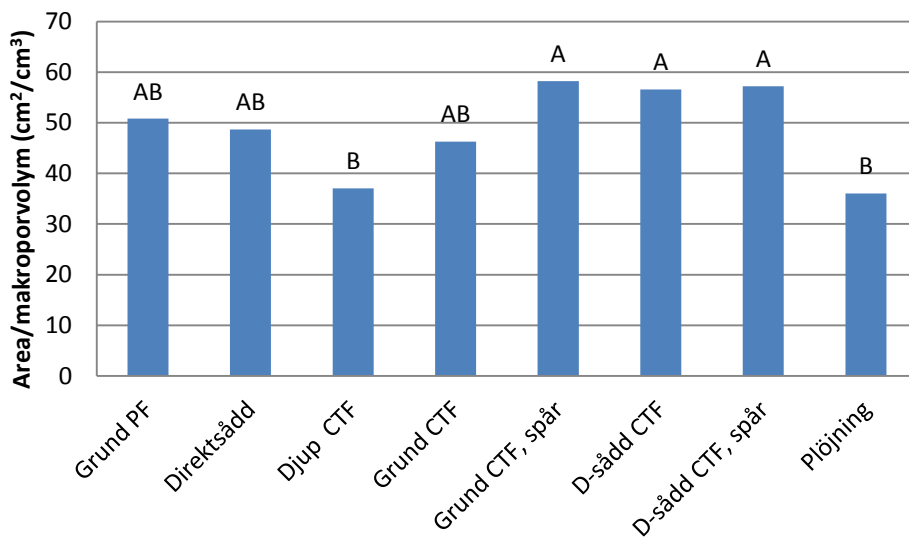
Figur 16. Makroporositeten i djupet 10- 15 cm för scannade led, Säby, 2013. Led med olika bokstäver skiljer sig signifikant ($p < 0,05$) från varandra.

För porarean erhöles liknande resultat som för makroporositeten. Det led som hade störst värde, och som skiljde sig signifikant från övriga, var djup CTF, opackad yta. För led med CTF kunde dock samma tendenser som för makroporositeten ses, med mindre area för spår än opackad yta, se figur 17.



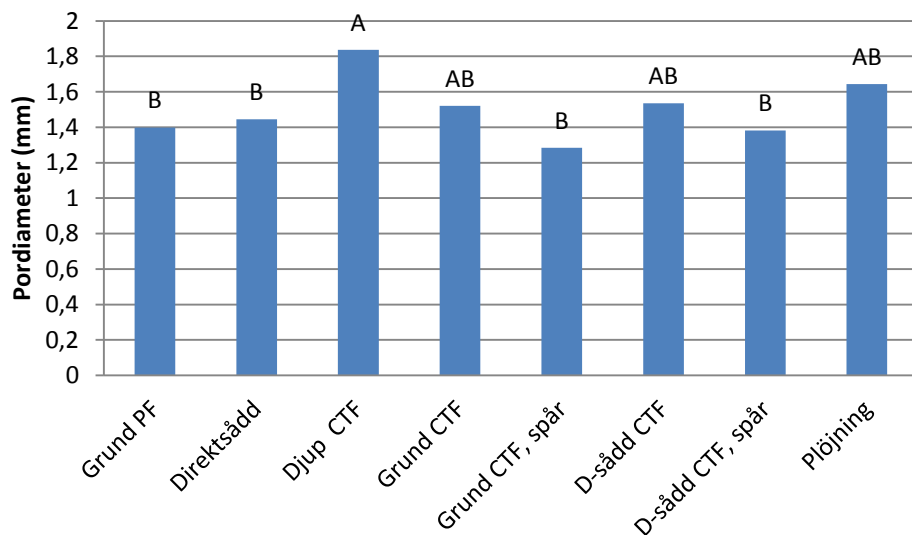
Figur 17. Porarea per cm³ för djupet 10- 15 cm för scannade led Säby, 2013. Led med olika bokstäver skiljer sig signifikant (p<0,05) från varandra.

I jämförelsen av porarean med porvolymen återfanns lägsta kvoten i djup CTF, opackad yta, samt plöjning, medan högsta kvoten återfanns i grund CTF, spår, samt både spår och opackad yta för direktsådd med CTF, se figur 18. Signifikanta skillnader kunde dock inte ses varken för de olika bearbetningsprinciperna eller för spår och opackad yta i led med CTF.



Figur 18. Area/makroporvolym för djupet 10- 15 cm för scannade led Säby 2013. Led med olika bokstäver skiljer sig signifikant (p<0,05) från varandra.

Pordiametern var störst för djup CTF, opackad yta. För de olika bearbetningsprinciperna fanns tendenser att plöjt led hade större diameter än övriga led. För led med CTF fanns tendenser att pordiametern var mindre i spår än i opackad yta, se figur 19. Skillnaderna var dock ej signifikanta.

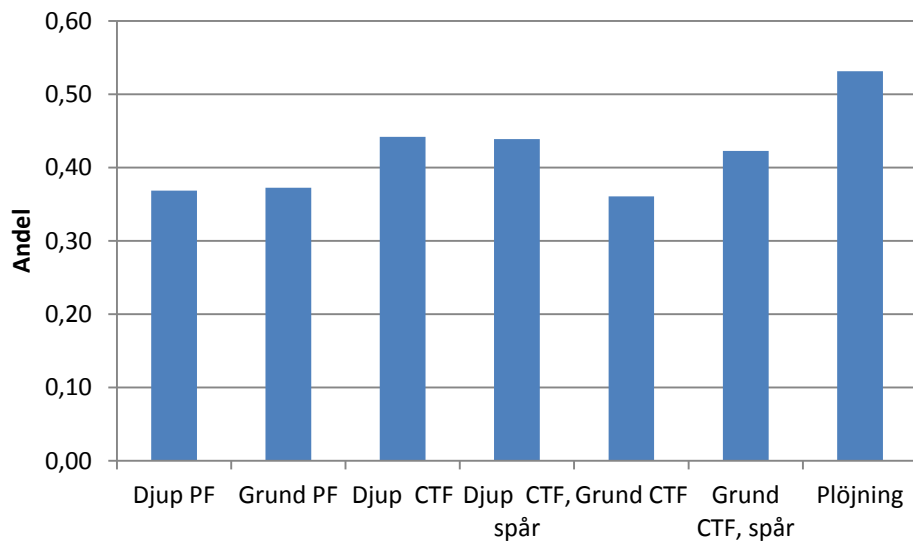


Figur 19. Pordiameter för djupet 10- 15 cm för scannade led, Säby 2013. Led med olika bokstäver skiljer sig signifikant ($p < 0,05$) från varandra.

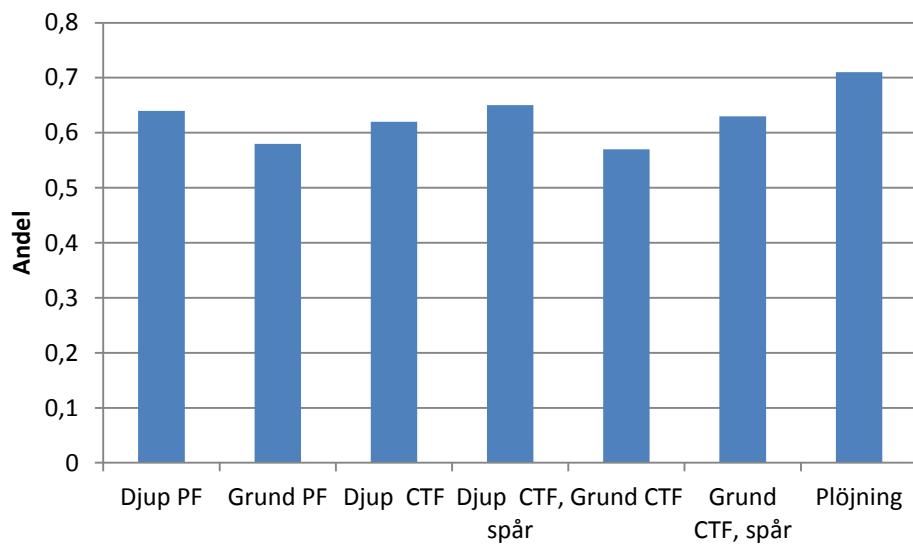
4.6 Såbäddsundersökning

4.6.1 Aggregatstorleksfördelning

Andelen aggregat mindre än 5 mm var större i det undre lagret än det övre. För de olika bearbetningsprinciperna återfanns högst andel aggregat, mindre än 5 mm, i plöjt led. För led med CTF kunde inget samband ses mellan aggregatfördelningen och om provet tagits i spår eller opackad yta, se figur 20 och 21.



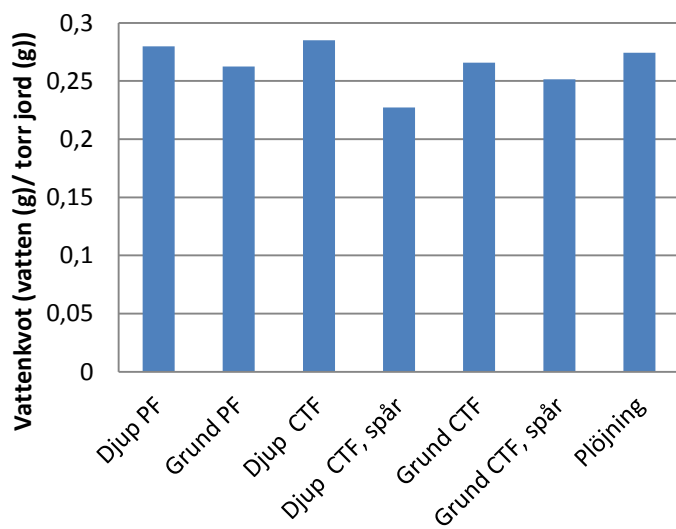
Figur 20. Andelen aggregat <5 mm i lager 1, Säby 2013.



Figur 21. Andelen aggregat <5 mm i lager 2, Säby 2013.

4.6.2 Vattenhalt

Vattenhalten i såbotten var ungefär lika stor för plöjt led och djup bearbetning medan grund bearbetning hade en något lägre vattenhalt. För led med CTF var vattenhalten högre i den opackade ytan än i spåren, se figur 22.



Figur 22. Vattenhalt i såbotten, såbäddsundersökning våren 2013, Säby.

4.7 Planträkning

Från planträkingen kunde ses att djup plöjningsfri bearbetning var den bearbetning som i medeltal för Säby och Alnarp gav bäst etablering. Direktsått led i Alnarp var dock det enda led som skiljde sig signifikant från övriga. För led med CTF kunde inga entydiga skillnader urskiljas, se tabell 3. I Lydinge var etableringen något bättre för opackad yta i led med CTF än i spår och konventionellt bearbetat led, se tabell 4.

Tabell 3. Planträkning från våren 2013 från Säby och Alnarp. Antalet anges både i plantor per m² och relativtal

Behandling	Uppsala	Relativtal	Alnarp	Relativtal	Medel
Gröda	Vårkorn		Höstvete		
A, djup PF, konv.	264	100	40	100	100
B, grund PF, konv.	255	97	39	98	98
C, direktsådd, konv.	276	105	7	18	62
D1, djup PF, CTF, opackat	272	103	28	70	87
D2, djup PF, CTF, spår	278	105	28	70	88
E1, grund PF, CTF, opackat	283	107	30	75	91
E2, grund PF, CTF, spår	246	93	30	75	84
F1, grund PF, CTF, djupl., opackat	237	90	36	90	90
F2, grund PF, CTF, djupl., spår	294	111	35	88	100
G1, direktsådd, CTF, opackat	276	105	14	35	70
G2, direktsådd, CTF, spår	264	100	3	8	54
H, plöjning, konv.	276	105	35	88	97
PROB	0,6251	0,6251	0,0001	0,0001	
LSD			9	23	

Tabell 4. Plantantal Lydinge 2013. För CTF spår anges plantantalet per m². CTF mellan spår, konventionell bearbetning och medel anges i relativtal.

Gröda	Vårkorn	Malkorn	Höstvete	Höstvete	Malkorn	Medel
CTF spår	111	221			323	100
CTF mellan spår	93	136			93	107
Konventionellt	74	127			102	101

4.8 Skörd

Avkastning i förhållande till bearbetningsprincipen

Avkastningen har över hela försöksperioden varit högst för plöjt led. Lägst avkastning återfanns i direktsått led, se tabell 5.

Avkastning i led med CTF

Avkastningen för Säby var under alla tre år högre i spår än i opackad yta. Resultaten var dock endast signifikanta 2011. För Alnarp var avkastningen högst i de opackade ytorna, men skillnaden var endast signifikanta för direktsådd 2013, se

tabell 5. I medeltal, för hela studietiden och båda försöksplatserna, var avkastningen dock lika stor i spår och opackad yta. Högst avkastning gav konventionellt bearbetade led, se tabell 6. För storruteförsöken i Lydinge finns skördesiffror för 2013, och även där gav konventionell bearbetning högst avkastning. Till skillnad från Säby och Alnarp var avkastningen i Lydinge dock högre i opackad yta än i spår, se tabell 7.

Tabell 5. Avkastning för Säby och Alnarp under åren 2011- 2013. För Alnarp 2011 visas kärnskörd+halm, för alla övriga kärnskörd. För led A visas avkastningen i kg, vilket motsvarar relativt 100. För övriga led visas relativt

År	2011	2011	2012	2012	2013	2013	Medel
Plats	Säby	Alnarp	Säby	Alnarp	Säby	Alnarp	
Gröda	Vårkorn	Höstvete	Vårkorn	Vårkorn	Vårkorn	Höstraps	
A, djup PF, konv.	4180	13530	2990	10180	4150	4300	100
B, grund PF, konv.	107	96	115	97	109	109	106
C, direktsådd, konv.	100	95	109	98	85	28	86
D1, djup PF, CTF, opackat	100	102	102	100	90	99	99
D2, djup PF, CTF, spår	112	99	121	94	92	98	103
E1, grund PF, CTF, opackat	99	102	92	92	84	97	94
E2, grund PF, CTF, spår	110	97	104	100	101	99	102
F1, grund PF, CTF, djupl., opackat	92	103	103	94	86	107	98
F2, grund PF, CTF, djupl., spår	111	98	105	92	99	102	101
G1, direktsådd, CTF, opackat	93	96	101	90	90	75	91
G2, direktsådd, CTF, spår	110	92	100	87	89	21	83
H, plöjning, konv.	124	97	108	100	104	110	107
PROB	0,0204	0,1179	0,8924	0,0070	0,0899	0,0001	
LSD	17			7		28	

Tabell 6. Relativt för skörd för konventionell bearbetning, CTF spår och CTF opackad yta. De bearbetningsprinciper som ingår i jämförelsen är djup plöjningsfri bearbetning (A och D), grund plöjningsfri bearbetning (B och E) samt direktsådd (C och G)

År	2011	2011	2012	2012	2013	2013	Medel
Plats	Säby	Alnarp	Säby	Alnarp	Säby	Alnarp	
Konventionell	100	100	100	100	100	100	100
CTF spår	108	99	100	95	96	92	98
CTF opackat	95	103	91	96	90	114	98

Tabell 7. Avkastning Lydinge 2013. Konventionell bearbetning anges i kg per ha. CTF spår, CTF opackat och medel anges i relativtal

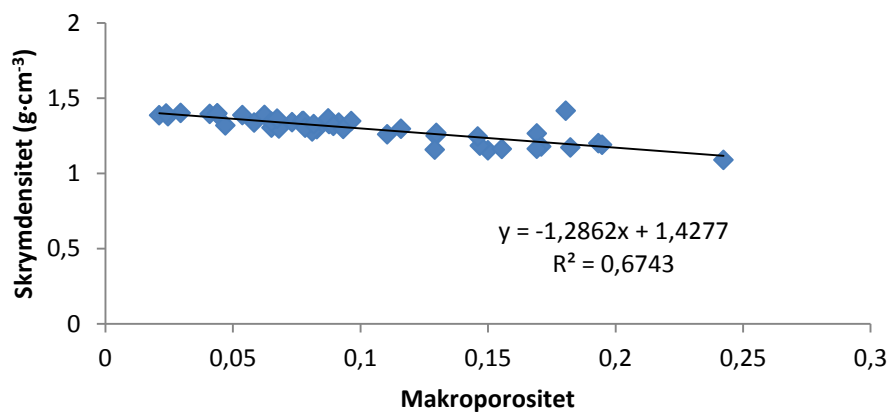
Gröda	Vårraps	Malkorn	Höstvete	Höstvete	Malkorn	Medel
Konventionellt	5070		8340	7520		100
CTF spår	68		93	107		89
CTF opackat	75		102	103		94

4.9 Korrelationer

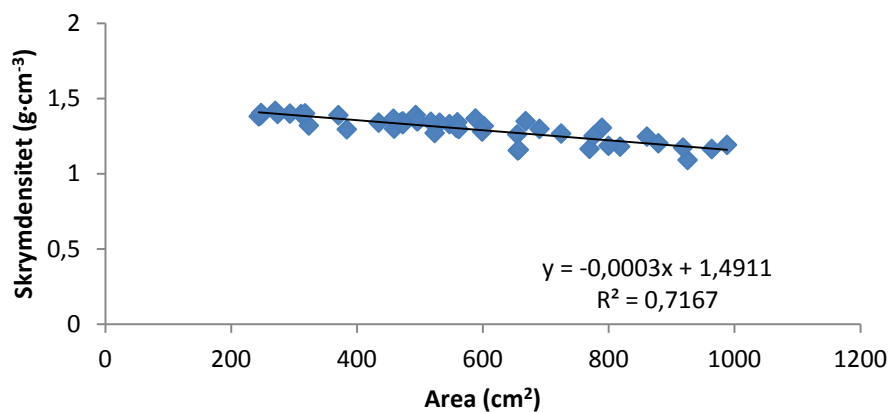
Korrelationer mellan parametrarna hydraulisk konduktivitet, makroporositet, porarea, skrymdensitet, pordiameter och jorrdiameter visas i tabell 9. Makroporositeten och porarean är de parametrar som generellt sett hade högst korrelation med övriga parametrar, medan den hydrauliska konduktiviteten generellt sett gav lägst korrelation till övriga parametrar. Starkast samband fanns mellan skrymdensitet och makroporositet ($R^2=0,674$) respektive porarea ($R^2=0,716$), se figur 23 och 24, medan skrymdensitet och hydraulisk konduktivitet hade svagast samband ($R^2=0,155$), tabell 9.

Tabell 8. Determinationskoefficienten, R^2 , för korrelationen mellan de testade parametrarna

	Hydraulisk konduktivitet	Makroporositet	Porarea	Skrymdensitet	Pordiameter	Jorrdiameter
Hydraulisk konduktivitet	-					
Makroporositet	0,234	-				
Porarea	0,233	0,654	-			
Skrymdensitet	0,155	0,674	0,716	-		
Pordiameter	0,269	0,453	0,211	0,392	-	
Jorrdiameter	0,201	0,354	0,705	0,356	0,078	-



Figur 23. Korrelationen mellan makroporositeten och skrymdensiteten.



Figur 24. Korrelationen mellan porarean och skrymdensiteten.

5 Diskussion

Syftet med denna studie var att se hur olika bearbetningsprinciper, med eller utan CTF, påverkar mark och gröda med tyngdpunkt på makroporositeten. Metoden som användes var datortomografi med bildbehandling kombinerat med traditionella metoder.

Generella iakttagelser från försöket

För samtliga led på Säby kan konstateras att skrymdensiteten var relativt låg samt att makroporositeten var hög. Skrymdensiteten för mineraljordar, som den på Säby, ligger i genomsnitt mellan 1,3- 1,6 g·cm⁻³ (Eriksson, et al., 2011). På Säby varierade skrymdensiteten mellan 1,2- 1,35 g·cm⁻³, vilket därför bör anses vara lågt. Makroporositeten varierade mellan 6- 18 %, vilket är över gränsen för optimal porositet på lerjordar som ligger mellan 5- 10 % (Reynolds, et al., 2008). Även penetrometermätningarna, vilka inte översteg ett värde av 2,5 MPa i något av leden, tyder på låg kompaktion i försöket.

Skillnader i markfysikaliska egenskaper mellan bearbetningsprinciper

Djup bearbetning CTF, opackad yta, är det led i försöket som utmärker sig mest genom att ha lägst skrymdensitet, högst hydraulisk konduktivitet, lägst penetrationsmotstånd och högst makroporositet. Dessa mått samstämmer bra, och tyder alla på att ledet har hög andel makroporer. Motsvarande led utan CTF uppvisar liknande värden för både skrymdensitet, hydraulisk konduktivitet och penetrationsmotstånd, och trots att detta led inte scannades så att beräkningar av makroporositeten kunde göras kan det antas att även detta led har hög makroporositet.

Grund bearbetning och direktsådd är de led som uppvisar högst penetrationsmotstånd i försöket. Detta tyder på att de utsatts för en kompaktion, vilket ofta är fallet för det översta marklagret på jordar som brukas med reducerad bearbetning (Tebrügge & Düring, 1999; Capowietz, et al., 2009; Josa, et al., 2010; Raczkowski, et al., 2012). Trots detta uppvisar de inga signifikanta skillnader från övriga led gällande hydraulisk konduktivitet och makroporositet. Detta tyder på att dessa led,

trots kompaktionen, har väl utvecklade och sammanhängande makroporer vilket bör bero på att en större andel porer bevaras när bearbetningen uteblir eller reduceras (Logsdon, et al., 1990; Lipiec & Stepniewski, 1995; Pagliai, et al., 2001; Capowietz, et al., 2009). Porerna kan sedan användas av grödan vid rottillväxten vilket betyder att de uppmätta penetrationsmotstånden troligtvis inte har påverkat grödan i lika hög grad som förväntat. Vad som ytterligare kan nämnas om dessa två led är att de, trots mycket lika värden på makroporositet, area och pordiameter, uppvisar en viss skillnad i hydraulisk konduktivitet. Denna skillnad tyder på att det inte bara är hur hög porositet ett prov har som avgör dess hydrauliska konduktivitet, utan att hur porerna är sammankopplade även har mycket stor påverkan.

Skillnader i markfysikaliska egenskaper i led med CTF

För led med CTF återfanns signifikanta skillnader mellan spår och opackad yta nästan enbart för led med djup bearbetning. Detta tyder på att bearbetningsprincipen och antalet överfarter samverkar gällande markpackningen. Tydliga tendenser kan dock ses för samtliga CTF led mot att det i spåren var högre skrymdensitet, högre penetrationsmotstånd och lägre makroporositet, vilka alla tyder på att en kompaktion har skett. Detta kan även ses på måttet area/makroporvolym, som för spåren är högre än för den opackade ytan. Stor area per makroporvolym tyder på en större andel små makroporer, vilket också stämmer med de värden som uppmätts på pordiametern. Detta stämmer bra överens med litteraturen, då markpackning ger en minskning av porositeten, och främst på bekostnad av de största porerna (Kim, et al., 2010).

Skörd

För Säby och Alnarp är plöjning den bearbetningsprincip som gett högst avkastning. Plöjning är även det led som gett högst avkastning av alla led, både med och utan CTF. Ledet urskiljer sig dock inte tydligt mot övriga led för varken skrymdensitet, hydraulisk konduktivitet, penetrationsmotstånd, makroporositet eller pordiameter. Plöjning skilde sig dock mot övriga led angående aggregatfördelningen, med en högre andel aggregat mindre än 5 mm. Eftersom en ökad andel små aggregat leder till minskad vattenavgång på grund av minskad turbulens (Kritz, 1983), kan detta vara en anledning till den goda avkastningen.

Den bearbetningsprincip som gett lägst avkastning i försöket är direktsådd, vilket till stor del beror den dåliga skörden av höstraps i Alnarp 2013. Eftersom direktsådd och grund bearbetning har mycket liknande värden på de markfysikaliska parametrarna bör skillnaden i skörd dock inte bero på porositeten i marken, utan har troligen med etablering och växtföljdssjukdomar att göra. Detta resonemang stärks även av resultaten från plantråkningen under våren 2013, då plantantalet för den direktsådda höstrapsen redan var mycket lågt.

För CTF var avkastningen lika stor i spår och opackad yta, trots att de markfysikaliska resultaten visar att en kompaktion skett i spåren. Anledningen till detta är troligen de väderförhållanden som rått i Uppsala under denna tid. Under 2011, men även 2013, var försommaren torr, se figur 5. Torkan bör ha lett till uppsprickning av den styva lera som finns på Säby, vilket gör att effekterna av kompaktionen inte är lika tydliga som om nederbördsförhållandena hade varit normala. Detta kan även ses visuellt på de scannade bilderna, figur 13 och 14, där porerna i spåren till större del består av sprickor än vad porerna i de opackade ytorna gör. Torkan bör även ha lett till att led med högre andel mikroporer gynnade grödtillväxten då dessa ger jorden bättre lagringskapacitet av vatten (Arvidsson & Pettersson, 1995). Vid såbäddsundersökningen 2013 var dock vattenhalten i såbotten högre för opackad yta än för spår. Ett förväntat resultat för vattenhalten hade varit en högre halt för spår i förhållande till opackad yta i led med CTF, samt högre halt för direktsådd och grund bearbetning i förhållande till djup bearbetning och plöjning. Såbäddsundersökningen gjordes dock tidigt under säsongen, och försommartorkan bör inte ha hunnit påverka marken vid denna tidpunkt. För Alnarp har vädret under försöksperioden inte avvikit lika mycket från det normala, se figur 6, och skillnaderna mellan spår och opackad mark var där inte heller lika stora. Intressant skulle här varit om en höstgröda odlats under något av de torra åren på Säby. Både 2011 och 2013 odlades nu vårkorn. Hade en höstgröda med ett mer utvecklat rotsystem kunnat odlas skulle skillnaderna möjligtvis kunnat vara mindre.

Resultaten i studien tyder på att varken för porösa eller för kompakterade förhållanden gynnar grödan, utan att en viss återpackning är optimalt vilket även påvisats i många andra försök (Bouwman & Arts, 2000; Håkansson & Lipiec, 2000). Vad som även bör tas i åtanke vid tolkning av resultaten är att försöken i Säby och Alnarp endast legat i tre år, vilket är en förhållandevis kort tid. De tendenser till kompaktion som ses idag kommer med stor sannolikhet att öka med tiden. Denna teori stärks även av avkastningssiffrorna från Lydinge, där CTF använts i sju år. Där var avkastningen fortfarande högst för konventionell bearbetning, men högre i opackad yta än i spår för CTF.

Korrelationer mellan den hydrauliska konduktiviteten och övriga parametrar

För hydraulisk konduktivitet, makroporositet, porarea, skrymdensitet, pordiameter och jorddiameter analyserades korrelationer. Av dessa kan ses att makroporositet och area är de mått som generellt gav högst korrelation till övriga parametrar. Detta tyder på att parametrar framtagna med hjälp av datortomografi är bättre att använda sig av än traditionella mått om estimeringar av andra parametrar skall göras.

Svagast samband återfanns mellan skrymdensiteten och den hydrauliska konduktiviteten, och generellt sett var den hydrauliska konduktiviteten den parameter som hade svagast samband till övriga värden. Detta tyder på att det finns andra

egenskaper hos porsystemet som har stor betydelse för den hydrauliska konduktiviteten, till exempel porernas kontinuitet, en parameter som inte har tagits fram i denna studie.

Datortomografi som metod

Förutom att värden framtagna med datortomografi visade sig ha högst korrelation till övriga värden, har användning av datortomografi även flera andra positiva egenskaper i jämförelse med traditionella metoder. Metoden är ickedestruktiv, vilket betyder att fler värden kan tas fram för ett och samma prov. Definitiva värden kan också tas fram på exempelvis pordiametrar, vilket inte tidigare varit möjligt. Datortomografi kan även ge värden på makroporer, så att dessa kan delas in i klasser och inte enbart ses som en kategori, vilket är svårt med traditionella metoder där makroporer oftast endast kan delas in i en klass (Rab, et al., 2014).

I denna studie togs inga värden för kontinuiteten hos porerna fram med hjälp av bildbehandling, men detta är något som har gjorts i flera andra studier (Prado, et al., 2009; Rab, et al., 2014). Eftersom kontinuiteten har en stor påverkan på transporten av vatten, och andra ämnen, i marken skulle detta varit ett intressant mått att jämföra med den hydrauliska konduktiviteten.

Största nackdelen med användandet av datortomografi är avsaknaden av riktlinjer för hur metoden skall användas, vilket leder till att utförandet varierar. Resultat från olika studier är därför svåra att jämföra. En standardisering av hur bilder skall behandlas efter scanning vore därför önskvärt (Taina, et al., 2008). Trots detta kan datortomografi ge mycket viktig fakta, och tillsammans med traditionella metoder är det en bra metod att använda sig av vid studier av markstrukturen.

Framtida studier

Försök R2-7120 har endast legat i tre år, men kommer att ligga kvar i ytterligare tre år. De tendenser som syns idag kommer troligen att förstärkas med tiden, men att se hur markens egenskaper förändras under en längre tid är ändå av mycket stort intresse.

Två av de tre försöksplatserna som har använts i detta försök, Säby och Lydinge, är styva leror. Även på den tredje försöksplatsen, Alnarp, är marken en lera, men dock en lättlera. Lerjordar är de jordar som anses bäst lämpade för reducerad odling, då dessa är självluckrande. Inga studier med CTF har gjorts på sandjordar i Sverige, men på grund av tidigare forskning kan slutsatsen ändå dras att CTF är bäst anpassat till jordar med en viss andel ler.

Ett nytt försök med CTF finns nu utlagt på Logården i Västergötland. I Sveriges västra delar är den årliga genomsnittliga nederbördsmängden ca 300 mm större per år än i Sveriges östra delar (SMHI, 2013). Den luckring av marken som CTF kombinerat med djup bearbetning leder till skulle därför kunna få bättre utslag i

landets västra delar än i syd och öst där försöken som sammanfattats i denna studie finns utlagda.

6 Slutsatser

Av resultaten kan följande slutsatser dras:

- En viss återpackning av marken är nödvändig för att uppnå optimal skörd vid odling på lerjordar.
- Vid användning av CTF sker en kompaktion av marken i spåren i förhållande till den opackade ytan.
- Både bearbetningsprincipen och antalet överfarter av marken påverkar markens packningsgrad.
- Datortomografi är en mycket effektiv metod att studera olika markparametrar och kan ge fler deskriptiva värden än traditionella metoder. Makroporositeten är även den parameter som generellt har starkast korrelation till övriga parametrar. En kombination av användandet av datortomografi och traditionella metoder är därför den bästa konstellationen för att kunna ta fram så mycket fakta som möjligt vid olika markvetenskapliga studier.

Tack

Detta examensarbete har skrivits för Institutionen för Mark och Miljö, avdelningen för jordbearbetning och hydroteknik. Stort tack till professor Johan Arvidsson som har handlett mig under arbetet och bistått med hjälp och inspiration. Tack även till Mats Larsbo, forskare på avdelningen för biogeofysik och vattenvård, för hjälp och stöd vid arbetet med scanning och bildbehandling.

Referenslista

- Alakukku, L. o.a., 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. *Soil & Tillage Research Volume 73 Issue 1-2*, pp. 145-160.
- Alletto, L. & Coquet, Y., 2009. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. *Geoderma, Volume 152, Issue 1-2*, pp. 85-94.
- Andersson, S., 1955. Markfysikalisk undersökning i odlad jord VIII En rationell metod. *Grundförbättring. Tidskrift för jordbrukets rationalisering genom grunförbättringar*.
- Arvidsson, J. & Gustafson, K., u.d. *Jordbearbetningsredskapens arbetssätt och dragkraftsbehov*, u.o.: u.n.
- Arvidsson, J. & Pettersson, O., 1995. Jordpackning och markstruktur. *aktuellt från lantbruksuniversitetet* 435.
- Arvidsson, J., Trautner, A., van den Akker, J. & Schjønning, P., 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden: II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. *Soil and Tillage Research, Volume 60, Issue 1-2*, pp. 79-89.
- Australian Bureau of Statistics, 2013. *Australian Bureau of Statistics Agricultural Resource Management Practices, Australia 2011-12*. [Online] Available at: <http://www.abs.gov.au> [Använd 29 10 2013].
- Bengough, A. & Mullins, C., 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science Vol. 41 Nr 3*, pp. 341-358.
- Botta, G., Jorajuria, D. & Draghi, L., 2002. Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics Volume 39 Issue 1*, pp. 47-54.
- Bouwman, L. & Arts, W., 2000. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties. *Applied Soil Ecology 14*, pp. 213-222.
- Capowietz, Y. o.a., 2009. The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil & Tillage Research 105*, pp. 209-216.
- Castellini, M. & Ventrella, D., 2012. Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in. *Soil & Tillage Research 124*, pp. 47-56.
- Chamen, W., 2011. *The effects of low and controlled traffic systems on soil physical properties, yields and the profitability of cereal crops on a range of soil types*, u.o.: Cranfield University.

- CTF Europe, 2013a. *Benefits of CTF*. [Online]
Available at: <http://www.controlledtrafficfarming.com/WhatIs/Benefits-Of-CTF.aspx>
[Använd 22 11 2013].
- CTF Europe, 2013b. *Challenges*. [Online]
Available at: <http://www.controlledtrafficfarming.com/WhatIs/Challenges-Of-CTF.aspx>
[Använd 23 11 2013].
- CTF Europe, 2013c. *Lydinge Farm, Southern Sweden*. [Online]
Available at: <http://ctfeurope.com/2012/lydinge/>
[Använd 18 12 2013].
- CTF Europe, 2013d. *What is CTF?*. [Online]
Available at: <http://www.controlledtrafficfarming.com/WhatIs/What-Is-CTF.aspx>
[Använd 18 09 2013].
- Elaoud, A. & Chehaibi, S., 2011. Soil Compaction Due to Tractor Traffic. *Journal of Failure Analysis and Prevention, Volume 11, Issue 5*, pp. 539-545.
- Engstrand, U. & Olsson, U., 2003. *Variansanalys och försöksplanering*. Lund: Studentlitteratur.
- Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I. & Simonsson, M., 2011. *Marklära*. Lund: Studentlitteratur AB.
- FAO, 2012. *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS*. [Online]
Available at: <http://www.fao.org/ag/ca/1b.html>
[Använd 15 11 2013].
- Gantzer, C. J. & Anderson, S. H., 2002. Computed tomography measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. *Soil & Tillage Research 64*, pp. 101-111.
- Garbout, A. o.a., 2012. The use of PET/CT scanning technique for 3D visualization and quantification of real-time soil/plant interactions. *Plant & Soil*, 352(1-2), pp. 113-127.
- General Electric Company, 2013. *GE Measurment & Control*. [Online]
Available at: <http://www.ge-mcs.com/en/radiography-x-ray/ct-computed-tomography/vtomex-m.html>
[Använd 18 09 2013].
- Grip, H. & Rhode, A., 2003. *Vattnets väg från reg till bäck*. Uppsala: Hallgren och Fallgren Studieförlag AB.
- Hamza, M. & Anderson, W., 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research 82*, pp. 121-145.
- Harrie, L., 2012. *Geografisk informationsbehandling. Teori metoder och tillämpningar*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Heinonen, R., 1979. *Jordarterna och deras brukningsegenskaper*, Östervåla: Tofters Tryckeri AB.
- Holland, J. M., 2003. The environmental consequences of adapting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *agriculture, Ecosystem and Environment 103*, pp. 1-25.
- Holpp, M. o.a., 2010. Controlled Traffic Farming under Central European Conditions. i: *International Conference on Agricultural Engineering - AgEng 2010: towards environmental technologies, 6-8 September*. Clermont-Ferrand, France: u.n.
- Holpp, M. o.a., 2012. *Benefits of Controlled Traffic Farming in Europe*, u.o.: u.n.
- Håkansson, I., 1994. Soil tillage for crop production and for protection of soil and environmental quality: a Scandinavian viewpoint. *Soil and Tillage Research 30*, pp. 109-124.
- Håkansson, I., 2000. Packning av åkermark vid maskindrift. Omfattning- effekter- motåtgärder. *SLU Rapport från Jordbearbetningsavdelningen nr 99*.
- Håkansson, I. & Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research 53*, pp. 71-85.
- Håkansson, S., 1995. *Ogräs och odling på åker*, Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet. Aktuellt från Lantbruksuniversitetet 437/438.

- Jordbruksverket, 2008. Åkerareal efter storleksgrupp åker, län/riket 1927-2007. [Online]
Available at:
<http://statistik.sjv.se/Dialog/varval.asp?ma=JISFTGASGL&ti=%C5kerareal+efter+storleksgrupp+%E5ker%2C+1%E4n%2Friket+1927%2D2007&path=../Database/Jordbruksverket/Historisk%20statistik.%20Jordbruket%20i%20siffror%201866-2007/Historisk%20statistik.%20Kap.%201>
[Använd 27 11 2013].
- Jordbruksverket, 2013. *Jordbruksstatistisk årsbok 2013.*, u.o.: u.n.
- Josa, R., Ginovart, M. & Solé, A., 2010. Effects of two tillage techniques on soil macroporosity in sub-humid environment. *Int. Agrophysics*, pp. 139-147.
- Kim, H., Anderson, S., Motavalli, P. & Gantzer, C., 2010. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. *Geoderma 160*, pp. 244-251.
- Klute, A. & Dirksen, C., 1986. Hydraulic conductivity of saturated soils. i: *SSSA Book Series: 5. Methods of Soil Analysis. Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. Madison, Wisconsin USA: American Society of Agronomy, pp. 694-700.
- Kritz, G., 1983. Säbäddar för vårstråsäd. *Fakta mark-växt nr 14*.
- Lamers, J., Perdok, U., Lumkes, L. & Klooster, J., 1986. Controlled traffic farming systems in the netherlands. *Soil & Tillage Research 8*, pp. 65-76.
- Lipiec, J. & Stepniewski, W., 1995. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil & Tillage Research 35*, pp. 37-52.
- Logsdon, S. o.a., 1990. Macroporosity and Its Relation to Saturated Hydraulic Conductivity under Different Tillage Practices. *Soil Science Society of America Journal Volume 54 Issue 4*, pp. 1096-1101.
- McHugh, A., Tullberg, J. & Freebairn, D., 2009. Controlled traffic farming restores soil structure. *Soil & Tillage Research 104*, pp. 164-172.
- Mooney, S., 2002. Three-dimensional visualization and quantification of soil macroporosity and water flow patterns using computed tomography. *Soil Use and Management 18*, pp. 142-151.
- Nawaz, M., Bourrié, G. & Trolard, F., 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, pp. 291-309.
- Pagliai, M., Vignossi, N. & Pellegrini, S., 2001. Soil structure and the effect of management practices. *Soil & Tillage Research 79*, pp. 131-143.
- Petrovic, A., Siebert, J. & Rieke, P., 1982. Soil Bulk Density Analysis in Three Dimensions by Computed Tomographic Scanning. *Soil Science Society of America Journal vol. 46 no. 3*, pp. 445-450.
- Pierret, A., Capowiez, Y., Belzunces, L. & Moran, C., 2002. 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. *Geoderma*, Issue 106, pp. 247-271.
- Prado, B. o.a., 2009. Image processing-based study of soil porosity and its effect on water movement through Andosol intact columns. *Agricultural Water Management 96*, pp. 1377-1386.
- Rab, M. o.a., 2014. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. *Geoderma 213*, pp. 460-470.
- Raczkowski, C. o.a., 2012. Soil physical properties of agricultural systems in a large-scale study. *Soil & Tillage Research 119*, pp. 50-59.
- Rasmussen, K. J., 1993. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A scandinavian review. *Soil and Tillage research 53*, pp. 3-14.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M. & Tan, C.S., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, Volumes 146, Issues 3-4, pp. 466-474.

- Rogasik, H. o.a., 1999. Discrimination of Soil Phases by Dual Energy X-ray Tomography. *Soil Science Society of America Journal* 63, pp. 741-751.
- SAS, 1985. *SAS User's Guide: Statistics, 1982 Edition*. Gary, NC: SAS Institute Inc..
- SCB, 1951. *Statistisk årsbok för Sverige 1951*. Stockholm: Kungliga Boktryckeriet P.A. Nordstedt & Söner.
- SCB, 2013. *Odlingsåtgärder i jordbruket 2012. Träda, slåttervall, vårkorn, havre, höstspannmål samt användning av halm och blast*, u.o.: u.n.
- SMHI, 2013. *Normal uppskattad årsnederbörd, medelvärde 1961-1990*. [Online] Available at: <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/nederbord/1.6934> [Använd 05 02 2014].
- SMHI, 2009. *Dataserier med normalvärden för perioden 1961-1990*. [Online] Available at: <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/temperatur/dataserier-med-normalv%C3%A4rden-1.7354> [Använd 11 11 2013].
- Soane, D. & van Ouwerkerk, C., 1994. Mechanisms of Crop Responses to Soil Compaction. i: *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: London, pp. 237-264.
- Soane, B. B. B. A. J. B. G. M. F. R.-E. J., 2010. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment.. *Soil and Tillage Research*, pp. 66-87.
- Soane, D. o.a., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil & Tillage Research* 118, pp. 66-87.
- Stpniewski, J., Glinski, J. & Ball, C., 1994. *Effects of Compaction on Soil Aeration Properties*, Amsterdam: Elsevier Science B.V..
- Strudley, M. W., Green, T. R. & Ascough II, J., 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil & Tillage Research* 99, pp. 4-48.
- Taina, I., Heck, R. & Elliot, R., 2008. Application of X- ray computed tomography to soil science: a literature review. *Canadian Journal of Soil Science* 88, pp. 1-20.
- Taylor, J., 1983. Benefits of permanent traffic lanes in a controlled traffic crop production system. *Soil & Tillage Research* 3, pp. 385-395.
- Tebrügge, F. & Düring, R.-A., 1999. Reducing tillage intensity- a review of results from a long term study in Germany. *Soil and tillage research* 53, pp. 15-28.
- Tinker, D. B., Chamen, W. C. T. & Pedersen, H. H., 2010. Controlled traffic farming - why and how. i: *International Conference on Agricultural Engineering - AgEng 2010: towards environmental technologies, 6-8 September*. Clermont-Ferrand, France: u.n.
- Tullberg, J., Yule, D. & Mc Garry, D., 2007. Controlled traffic farming—From research to adoption in Australia. *Soil & Tillage Research*, Issue 97, pp. 272-281.
- Udawatta, R. P. & Anderson, S. H., 2008. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soil influenced by agroforestry and grass buffers. *Geoderma*, Issue 145, pp. 381-389.
- Udawatta, R. P., Anderson, S. H., Gantzer, C. J. & Garrett, H. E., 2006. Agroforestry and Grass Buffer Influence on Macropore Characteristics: A Computed Tomography Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 70, pp. 1763-1773.
- Vogel, H.J., 1997. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections. *European Journal of Soil Science* 48, pp 365-377
- W.C.T., C., 2011. *THE EFFECTS OF LOW AND CONTROLLED TRAFFIC SYSTEMS ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES, YIELDS AND THE PROFITABILITY OF CEREAL CROPS ON A RANGE OF SOIL TYPES*, u.o.: Cranfield University.

- Willcocks, T. J., 1984. *Tillage requirements in Relation to Soil Type in Semi-arid Rainfed Agriculture*, Bedford: The British Society for Research in Agricultural Engineering.
- Youbing, H., Feng, J., Yang, T. & Wang, C., 2013. *A new method to characterize the spatial structure of soil macropore networks in effect of cultivation using computed tomography*, u.o.: John Wiley & Sons, Ltd.
- Zink, A., Fleige, H. & Horn, R., 2010. Load Risks of Subsoil Compaction and Depths of Stress Propagation in Arable Luvisols. *Soil Science Society of America Journal*, Volume 74, Issue 5, pp. 1733-1742.