



Fasta körspår – något för svenskt jordbruk?

Johan Andersson

Handledare: Johan Arvidsson

SLU
Institutionen för mark & miljö
Seminariearbete i kursen Marken i odlingen

Uppsala 2013

Abstract

Soil compaction has been considered as a problem for a long time, both for the global environment and the crop production. Root penetration, gas diffusion and soil density are some soil characteristics that change when soil compaction is present.

The trend towards larger and heavier machines has been clear the last decades. Some of them create soil compaction in the subsoil, which causes long-term soil degradation. One suggested solution has been to concentrate all wheel traffic to specific tracks, called controlled traffic farming (CTF). The purpose of this study was to determine if there are, in a crop production perspective, clear arguments to implement CTF in Sweden.

Increased soil strength, less gas diffusion and reduced plant available water and nutrients were shown to be important effects of soil compaction. Due to this heavy soil compaction was also shown to decrease crop productivity.

The use of CTF in mainly northern Europe increased crop yield overall and improved many soil characteristics. Some field trials indicated an increased need of recompactation in CTF systems. Few field trials and wide variation in northern Europe makes the conclusion that more field trials are needed to determine the changes when CTF is used.

Innehållsförteckning

Introduktion	4
Jordpackning förorsakar flera effekter på växtplatsen	5
<i>Penetrationsmotståndet påverkar rotutbredningen</i>	5
<i>Jordpackning förändrar växtnäringsupptaget</i>	5
<i>Förutsättningar att ta upp vatten minskar</i>	5
<i>Växtens möjlighet för gasutbyte påverkas</i>	6
Fasta körspår ger många effekter	6
<i>Förändrade markegenskaper</i>	6
<i>Fasta körspår påverkar jordens bördighet</i>	8
<i>Har skörden i spåren betydelse?</i>	8
Diskussion	9
Slutsatser	10
Tackord	10
Referenser	10

Introduktion

Jordpackning är ett känt problem sedan lång tid tillbaka. Flera av jordens komplexa system påverkas som sedan inverkar på rottillväxten. Ökat penetrationsmotstånd, minskat gasutbyte och lägre hydraulisk konduktivitet är några av dessa. Kraftig jordpackning kan således ha stor påverkan på rottillväxten och skörden (Tracy et al., 2011) Hur jordpackning påverkar skörden under olika förhållanden har därför studerats i flertal studier (Alakukku & Elonen, 1995; Håkansson, 2000; Edling & Fergedal, 1972). Jordpackning har också utbredd och långvarig verkan på miljön. Förändringar i jordens egenskaper resulterar i effekter på bland annat ytavrinning, avgång av växthusgaser och transport av nitrat och bekämpningsmedel till grundvatten (Soane & van Ouwerkerk, 1995)

Utvecklingen mot tyngre maskiner har under de senaste decennierna varit en iakttagen och tydlig trend (Håkansson, 2000). Som en följd av det höga kostnadstrycket på jordbruket med ursprung i den internationella jordbrukspolitiken och globaliseringen förväntas trenden fortsätta. Det höga kostnadstrycket medför fortsatt strukturförändring i jordbruket mot större och färre gårdar med ökat behov av större och effektivare maskiner (Dieter Kutzbach, 2000). Många av dagens maskiner är så tunga att djupare markskikt i alven packas och ökar därför risken för permanent nedsatt markbördighet (Håkansson, 2000). Försämrade markstruktur är en viktig faktor till minskning av markbördigheten, emellertid har förbättrad växtförädling, dränering och gödsling lett till att minskningen inte blivit så påtaglig (Warkentin, 1995).

För att minska packningens skadliga påverkan har flera sätt framarbetats för att minska de negativa påverkningarna. Håkansson, (2000) föreslog bland annat en begränsning i axelbelastning för att minska långvarig packning i alven. I Australien används ett system där all hjultrafik koncentreras till fasta körspår, resten av fältet överförs endast av redskap. Systemet kallas internationellt för controlled traffic farming (CTF) och använder ofta GPS-teknik med hög precision som numera finns att tillgå hos de flesta maskinhandlare (Tullberg et al., 2007)

Internationellt har flera studier genomförts för att beskriva skillnaderna mellan fasta körspår och konventionella system. Generellt visar försöken ökad skörd men även mindre miljöpåverkan till följd av lägre bränsleförbrukning vid bearbetning och lägre behov av kvävegödselmedel (Tullberg et al., 2007; Vermeulen & Chamen, 2010) I en sammanfattande studie för England, Nederländerna, Scotland och Tyskland var dragbehovet för primär- och sekundärbearbetningen 37-70 % lägre (Chamen, Vermeulen, et al., 1992). Vad som begränsar skörden kan skilja sig åt mellan olika klimat och förutsättningar i världen. En generell begränsning från de flertal undersökningar som genomförts i Australien är att skördarna ofta begränsas av fukt, vilket inte är fallet i norra Europas tempererade klimat (Vermeulen & Chamen, 2010).

Det här arbetets syfte var att visa om det ur odlingsperspektiv finns tydliga argument för att implementera fasta körspår i Sverige. I arbetet presenteras ett flertal resultat från försök med fasta körspår med fokus på skörd- och markstrukturförändringar, dessa beskrivs och jämförs också med konventionella led. Huvuddelen av litteraturen som användes utgår från försök som har genomförts i norra Europa. Arbetet redogör också för några inverkaner av jordpackning på jordbruksmark och de förändringar grödan ställs inför.

Jordpackning förorsakar flera effekter på växtplatsen

Penetrationsmotståndet påverkar rotutbredningen

Rotsystemets primära funktion är att uppta näring och vatten från marken. Rotens utbredning utgör grunden för avkastningsförmågan och styrs av en mängd olika faktorer, bland annat marktypen och odlingsåtgärderna på den specifika växtplatsen (Haak, 1994). En parameter för att beskriva marktypen är det mekaniska motståndet som en rot utsätts för, ofta används penetrationsmotstånd som mått för detta. Vid ökad jordpackning ökar också penetrationsmotståndet och därmed försämras rotens möjlighet att sprida sig i jorden (Gao et al., 2012). I en markprofil där porerna är lika stora som rötterna kan växten lätt penetrera markskiktet. Är jorden kompakterad och porerna har en lägre diameter måste roten övervinna det mekaniska motståndet genom osmoreglering. Cellerna ökar sitt osmotiska tryck genom en ökning av näringskoncentration vilket gör att roten kan tränga undan markpartiklar. Ökning av det osmotiska trycket kräver dock energi som translokteras från skotten (Haak, 1994). Hur högt tryck roten kan utöva på omgivningen varierar mellan olika undersökningar och mätmetoder (Clark et al., 1999). Vid uppmätning av det axiala trycket på lupin, solros, vete, ärt, majs, korn och ris uppvisade monokotyledoner ett genomsnittligt tryck på 0,44MPa, genomsnittstrycket för dikotyledoner var 0,41 MPa (Clark & Barraclough, 1999). I ett försök med fasta körspår var penetrationsmotståndet i markskiktet 0-270 mm negativt korrelerat med höstkornsskörden ($r^2 = 0,92$) och vårkornsskörden ($r^2 = 0,89$) (Dickson & Ritchie, 1996).

I en jämförelse mellan bearbetad och obearbetad jord påvisades att rottillväxt är linjärt korrelerat till penetrationsmotståndet. I undersökningen begränsade ett jordmotstånd på 3,6 MPa rottillväxten i det övre marskiktet på den bearbetade jorden. I den obearbetade jorden och alven i den bearbetade jorden krävdes ett penetrationsmotstånd på 4,6–5,1 MPa för att hindra rottillväxten. Att rötterna kunde växa vid ett högre jordmotstånd i alven och i den obearbetade jorden förklarades med den större andelen kontinuerliga porer i dessa markskikt (Ehlers et al., 1983).

Jordpackning förändrar växtnäringsupptaget

I Sverige har många fältförsök undersökt olika packningstillstånd påverkan på avkastningen. Generellt ger en viss packning högre skörd än ingen packning alls (Håkansson, 2000; Arvidsson, 1999). Även vall behöver en viss återpackning för att ge optimal skörd (Bouwman & Arts, 2000). Förändringar i näringsupptaget vid jordpackning är en faktor som påverkar detta. Jordpackning påverkar upptaget av framför allt näringsämnen som transporterades med hjälp av diffusion t.ex. fosfor och kalium. Näringsämnen som transporteras med massflöde påverkas inte lika mycket (Arvidsson, 1999)

I ett försök där rotintensitet i alven var lägre till följd av låg porvolym, hög skrymdensitet och högt penetrationsmotstånd i de djupare markskikten förhindrades näringsupptaget av ett flertal ämnen. Högre halt av näringsämnena N, K, Mg, Na och Ca uppmättes i växtbiomassan från jordarna där rotdjupet inte hade begränsats. Fosforinnehållet ökade inte med ökat rotdjup vilket i detta försök förklarades med att fosfor är mindre rörligt i marken och att de största koncentrationerna finns i matjordslagret (Rex et al., 1985). I ett annat försök visades upptaget av fosfor från alven ha betydelse speciellt vid lägre gödslingsintensitet (Kuhlmann & Baumgärtel, 1991)

Kan rötterna penetrera hela markprofilen finns större möjlighet att tillgodose resten av växten med näring. I 34 fältförsök där kaliumupptag i vårvete undersöktes visades att i genomsnitt togs 34 procent upp från alven. Mängden kalium som kunde utnyttjas från alven ökade med ökat rotdjup. Från i genomsnitt 8 procent när plantan hade en nod till i snitt 35 procent vid stadiet då axet framträdde då rotdjupet hade ökat. (Kuhlmann, 1990)

Förutsättningar att ta upp vatten minskar

Vattenfaktor har tillsammans med kväve den kvantitativt största effekten på skott- och rottillväxt. Både vattenöverskott och vattenbrist kan uppkomma men oftast är det senare

begränsande och inträffar när transpirationen är lägre än den potentiella transpirationen. Det är ett fenomen som förekommer dagligen på varma jordar med relativt gott vattentillstånd (Kozlowski, 1978). I Sverige är försommartorka vanligt och växterna är till stor del hänvisade till det vatten som de kan ta upp från marken. Mängden vatten som kan lagras i rotzonen är därför ofta grundläggande för vattenhushållningen (Grip & Rodhe, 2000).

Vid packning förändras porstorleksfördelningen i det påverkade markskiktet och därmed förändras markens vattenhållande- och infiltrationsegenskaper. Av den porstorleksförändring som sker är den största volymförändringen på grund av minskning av makroporer. Dessa är av stor betydelse för jordens genomsläpplighet (Edling & Fergedal, 1972). Hur hög genomsläppligheten är beror dock inte bara på mängden makroporer utan också på deras förbindelse med varandra (Jarvis, 2007; Grip & Rodhe, 2000)

När rötterna inte klarar av att penetrera jordvolymen på ett tillfredställande sätt minskar mängden vatten som är tillgängligt för växten (Eriksson, 2011). I Tyskland genomförde 9 försök för att studera rotdjup i höstvetete och havre. I försöken, som genomfördes på 3 respektive 2 olika jordarter, gav ökat rotdjup tillgång till mer växttillgängligt vatten. Skördarna ökade i försöken med ökat rotdjup och det fanns hög korrelation ($r=0,94$) mellan ökad rotlängd i alven och mängden växttillgängligt vatten (Rex et al., 1985).

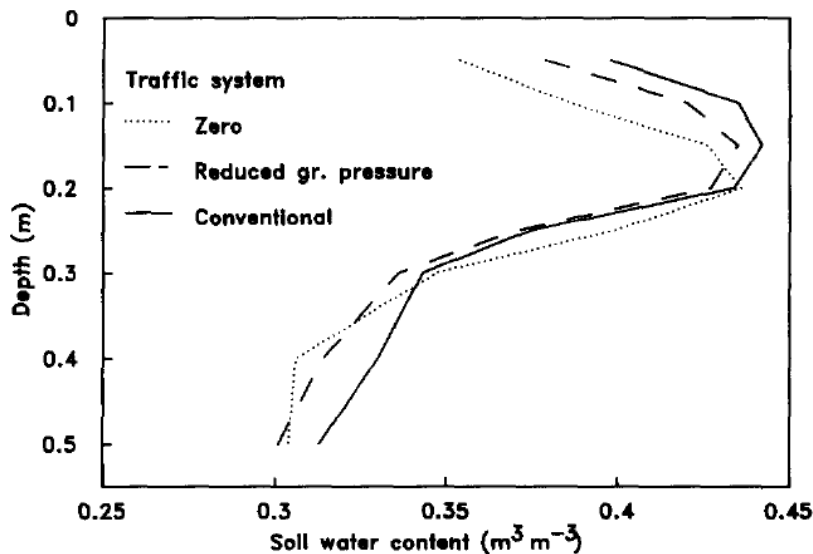
Växtens möjlighet för gasutbyte påverkas

Vid jordpackning försämras jordens förmåga att tillgodose rötterna med luft då de större porerna som är viktigast för gastransporten minskas. Rötternas respiration gör att de flesta växter är helt beroende av att jorden kan tillgodose rötternas behov av syre. Jordens fuktighet är en viktig faktor för gastransport då en hög vattenhalt kraftigt begränsar luftens diffusion. I normala odlingsjordar är syrehalten i markluften ca 17-21 % (Eriksson, 2011). Det är inte ovanligt att syrehalten sjunker till 10 % i en packad jord samtidigt som koldioxidhalten kan öka till lika hög koncentration (Håkansson, 2000). Även traktorer med låg totalvikt (2 ton) kan åstadkomma jordpackning som begränsar lufttransporten för vårkorn (Czyż, 2004).

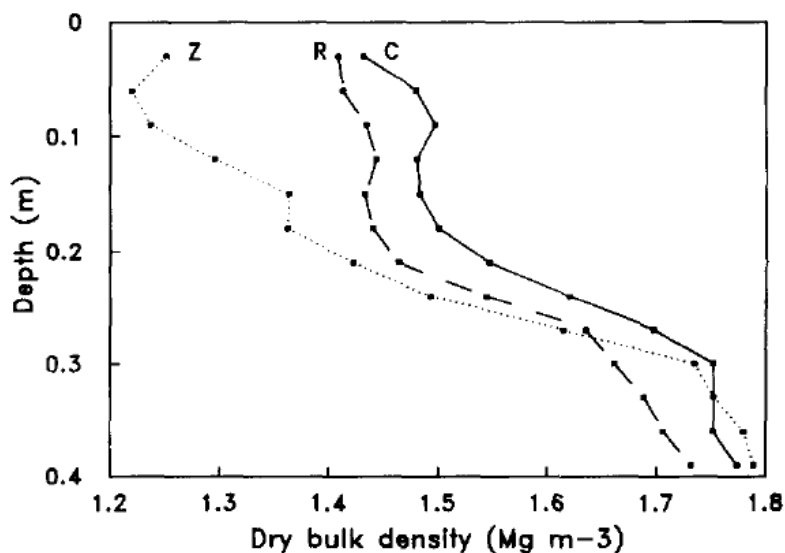
Fasta körspår ger många effekter

Förändrade markegenskaper

Användningen av fasta körspår leder till att matjordslagret får ökad porositet, lägre torrskrymdensitet och lägre penetrationsmotstånd i jämförelse med konventionella system där lågtryck- eller konventionella däck används. Andelen luftfyllda porer i matjordslagret är högre samtidigt som vattenhalten är generellt lägre när fasta körspår används (Dickson & Ritchie, 1996; Douglas et al., 1992; Dickson & Campbell, 1990; Vermeulen & Mosquera, 2009; Chamen, Vermeulen, et al., 1992)

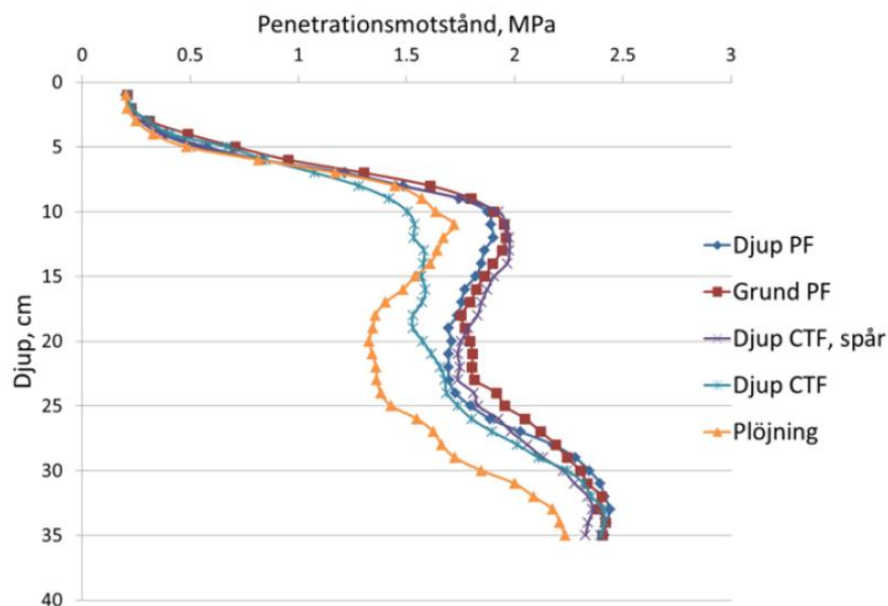


Figur 1. Resultat av olika marskikts innehåll av vatten mellan leden fasta körspår (Zero), reducerat däcktryck (Reduced), och konventionellt system (Conventional) (Douglas et al., 1992).



Figur 2. Skillnader i torr skrymdensitet efter tredje årets skörd mellan leden fasta körspår (Z), reducerat däcktryck (R), och konventionellt system (C) (Douglas et al., 1992).

Dickson & Campbell (1990) visade att penetrationsmotståndet var lägre för fasta körspår när direktsådd användes men tydliga skillnader uteblev vid användning av kiselplög. Försök i Sverige med fasta körspår som påbörjades 2010 har inte visat tydliga skillnader i resultaten. Försöken är placerade på Ultuna och Lönnstorp samt ett storruteförsök på gården Lydinge som tillämpat fasta körspår sedan 2006. Storruteförsöket i Lydinge samt försöket i Lönnstorp visade inga tydliga skillnader i penetrationsmotstånd mellan fasta körspår och slumpmässiga spår. Vid försöket på Ultuna 2011 uppmättes lägre penetrationsmotstånd för ledet med djup bearbetning i fasta körspår vilket vidare illustreras i figur 3. Skörden var också i medeltal 4 % högre för det konventionella systemet än det med fasta körspår (Arvidsson, 2013).



Figur 3. Resultat från penetrationsmätningar vid olika markskikt på Ultuna 2011. Grafen visar skillnader mellan plöjningsfri odling (PF), fasta körspår (CTF) samt plöjning (Arvidsson, 2013).

Fasta körspår påverkar jordens bördighet

I Edinburgh, Scotland genomfördes försök med vårkorn, höstkorn, vårraps och potatis mellan åren 1990 och 1994. Försöket anlades på jordarten "clay loam" och innehåller därmed ca 25-40% ler, områdets årsmedelnederbörd var ca 845 mm. Skörden för vår- och höstkorn var signifikant högre för leden med fasta körspår i jämförelse med led där lågtryck- eller konventionella däck användes. Ökningen av höstkornskörden var 15 % respektive 19 % för vårkorn jämfört med konventionella däck. Skörden av vårraps och säljbar potatis var också signifikant högre i leden med fasta körspår, 25 % för vårraps samt 4 % för säljbar potatis (Dickson & Ritchie, 1996). Ett annat försök som genomfördes i närheten av samma plats visade att fasta körspår ökade skörden av engelskt rajgräs. Över fyra år ökade skörden totalt med 15 % och 16 % för ledet med fasta körspår jämfört med konventionellt system respektive led med lågtrycksdäck (Douglas et al., 1992). Ett bearbetningsförsök i samma område gav också högre höstkornskörd när fasta körspår användes (Dickson & Campbell, 1990).

I Nederländerna ökade skörden 0-10 % för växter med relativt svagt rotsystem som potatis och spannmål på jordarten "sandy clay loam" som hade alvluckrats innan försöket påbörjades (Lamers et al., 1986). Chamen, Watts, et al. (1992) visade att skördepåverkan varierade med årsförhållanden, där torra år gav lite packning och därmed låg skördeökning av fasta körspår. Under 1989 gav fasta körspår en genomsnittlig ökning av veteskörden med 18 % jämfört med konventionellt system. Året efter odlades havre som efter torra förhållanden gav något lägre skörd för ledet som plöjdes med fasta körspår jämfört med det konventionella dito. Totalt i Tyskland, Scotland, Nederländerna och England har försök med korn och höstvetet givit en skördeökning som varierar mellan -9 % och +21 % (Chamen, et al., 1992).

Har skörden i spåren betydelse?

Vid nyttjande av fasta körspår i Australien används oftast spåren endast som körstråk, spåren brukas eller sås därför inte (Tullberg et al., 2007). Ett examensarbete som genomfördes för svenska förhållanden visar dock på betydelsen av spåren som bidrag till den totala skörden och för det ekonomiska resultatet (Gustafsson, 2010). I försöken som har genomförts i Sverige har även skörden fastställts i spåren, under försökens två år har skörden varit högre i dessa än mellan spåren. Skillnaderna i skörd i och mellan spår var högst för försöket på Ultuna som under 2011 drabbades av försommartorka. En tänkbar förklaring var det ökade återpackningsbehovet vid torra förhållanden. Under 2012 var nederbörden betydligt större men skillnaden kvarstod fortfarande (Arvidsson, 2013). På Lydinge har spåren i försöket trafikerats sedan 2006 i ett 8 meters modulsystem (Pedersen, 2012), skörden i dessa uppvisade

under 2011 en genomsnittlig skördesänkning på 21 % i jämförelse med skörden mellan spåren (Arvidsson, 2012). I Nederländerna visade körspåren högt penetrationsmotstånd även i djupa markskikt. Andelen rötter som kunde identifieras under spåren var låg och syrehaltsmätningar visade skadligt låg syrehalt även utanför spårens bredd till följd av packningens spridning (Lamers et al., 1986).

Diskussion

I det här arbetet har några av de effekter som jordpackning åstadkommer översiktligt beskrivits. Flera för växten viktiga förutsättningar förändras med jordpackning däribland jordmotstånd, gasutbyte, vatten- och näringstillgänglighet. Stark jordpackning försämrar odlingsförutsättningarna då dessa tidigare nämnda faktorerers status förvärras. Generellt behövs dock en viss packning för att för växten optimera dessa faktorer.

Skördeskillnaden mellan fasta körspår och konventionella system har stor variation mellan olika undersökningar och år i klimat liknande Sveriges. I studierna som undersökts ger fasta körspår generellt ökad skörd jämfört med ett konventionellt system. Förutom ökad skörd leder fasta körspår till att matjorden får ökad porositet, lägre torr skrymdensitet och lägre penetrationsmotstånd. Flera undersökningar, bland annat i Sverige, har dock visat på lägre skörd under år med låg nederbörds mängd. För den totala ekonomin vid omställning till fasta körspår är skörden i spåren en viktig parameter att beakta.

Det lägre penetrationsmotståndet som skapas till följd av fasta körspår leder till bättre förutsättningar för rottillväxt och därmed att rötterna snabbare och effektivare når alvvatten som är en viktig parameter för en hög skörd. Detta kan vara speciellt viktigt under år eller i områden med låg nederbörd. För vårsäd är det också ofta viktigt med ett rotsystem som snabbt kan nå djupare marskikt för att säkra vattentillgången. Större rotutbredning till följd av lägre penetrationsmotstånd leder till större näringsupptag vilket är grundläggande för en hög skörd.

Användningen av fasta körspår leder till större andel makroporer i matjorden och dessa har sämre förmåga att hålla kvar vatten vid ett specifikt undertryck. I flera fall minskade vatteninnehållet i matjorden, vilket därför kan påverka skörden om vatten är en begränsande faktor. Li et al. (2007) kom även i Australien fram till att vattenhalten minskade i matjorden vid användning av fasta körspår. Den ökade vattenmängden för leden med hjultrafik var dock störst under vissningsgränsen, mängden växttillgängligt vatten i försöket föreslogs därför vara högre i systemet med fasta körspår. Flera studier i det här arbetet visar emellertid att system med fasta körspår klarar sig sämre än konventionella system under torra förhållanden. Detta kan indikera på ett ökat återpackningsbehov. Att återpackningsbehovet ökar vid lägre nederbörds mängd bekräftas från andra undersökningar med återpackningsbehov under olika nederbörds mängder (Håkansson, 2000). Betydelsen av återpackning vid fasta körspår är särskilt påfallande i de svenska försöken där skörden i spåren var högre än mellan dessa även under relativt nederbördsrika förhållanden.

Högre andel makroporer är viktig vid kraftiga regn då stora nederbörds mängder behöver kunna infiltrera marken för att inte skapa anaeroba förhållanden vilket reducerar rottillväxten. Kan inte marken infiltrera vattenmängderna finns risk för yterosion med förlust av jordpartiklar till vattendrag som följd, vilket är ett miljöproblem då dessa kan bära fosfor och bekämpningsmedel. Att fasta körspår leder till ökad infiltration och därmed tydlig minskning av ytavrinningen stöds av australiensiska resultat (Li et al., 2007).

De flesta studierna visar förändringar som sker i huvudsak i matjordslagret, även skördeförändringar blir tydligast på kraftiga matjordförändringar. Alvpackningen är ett mer trögt system där förändringar är svårare att mäta, speciellt i skördeförsök. Många av fördelarna med fasta körspår är att de tunga maskinernas i många fall permanenta skador centreras till fasta körspår. Denna fördel av fasta körspår blir därför inte så tydlig men bör

beaktas. Några få studier som presenterats i det här arbetet har dock visat att det är viktigt att även undvika långsiktig minskning av bördigheten i körspåren.

Det är stor skördevariation mellan studierna och även mellan år inom studierna. Det finns även stor variation i vilka grödor som studerats och försökens upplägg vilket försvårar jämförelser och slutsatser. De komplexa markförändringarna som sker vid försök med fasta körspår avspeglas i variationerna och indikerar att många försök behövs för att underbygga tydliga slutsatser. För att ha välgrundade slutsatser kring fast körspårs påverkan på skörd och markegenskaper i Sverige behövs fler försök.

Slutsatser

Användningen av fasta körspår i klimat liknande Sveriges leder generellt till ökade skördar, underlaget till slutsatserna är dock inte stort. Försöken i Sverige visar att skörden även kan vara lägre och indikationer finns också att det förekommer ett ökat återpackningsbehov för system med fasta körspår. Det har även dokumenterats många positiva markeffekter efter övergången till fasta körspår som är grundläggande för en gynnsam växtplats och för minimal miljöpåverkan. Stor variation och få försök i Norden gör att fler försök behövs för att på ett mer utförligt sätt reda ut förändringarna vid användningen av fasta körspår.

Tackord

Tack till professor Johan Arvidsson på institutionen för mark och miljö som varit handledare för detta arbete.

Referenser

- Alakukku L and Elonen P (1995) Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. *Soil and Tillage Research*. 36 (3–4), 141–152.
- Arvidsson J (2012) *Jordbearbetningens årsrapport 2011*. Uppsala: institutionen för mark och miljö Available at: <http://www.slu.se/Global/externwebben/nl-fak/mark-och-miljo/jbhy/dokument/rapport121.pdf>.
- Arvidsson J (2013) *Jordbearbetningens årsrapport 2012*. Uppsala: institutionen för mark och miljö Available at: [http://www.slu.se/Global/externwebben/nl-fak/mark-och-miljo/jbhy/dokument/rapport125\(2\).pdf](http://www.slu.se/Global/externwebben/nl-fak/mark-och-miljo/jbhy/dokument/rapport125(2).pdf).
- Arvidsson J (1999) Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. *Plant and Soil*. 208 (1), 9–19.
- Bouwman L. and Arts WB. (2000) Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties. *Applied Soil Ecology*. 14 (3), 213–222.
- Chamen WCT, Watts CW, Leede PR and Longstaff DJ (1992) Assessment of a wide span vehicle (gantry), and soil and cereal crop responses to its use in a zero traffic regime. *Soil and Tillage Research*. 24 (4), 359–380.
- Chamen WCT, Vermeulen GD, Campbell DJ and Sommer C (1992) Reduction of traffic-induced soil compaction: a synthesis. *Soil and Tillage Research*. 24 (4), 303–318.
- Clark LJ and Barraclough PB (1999) Do dicotyledons generate greater maximum axial root growth pressures than monocotyledons? *Journal of Experimental Botany*. 50 (336), 1263–1266.
- Clark LJ, Bengough AG, Whalley WR, Dexter AR and Barraclough PB (1999) Maximum axial root growth pressure in pea seedlings: effects of measurement techniques and cultivars. *Plant and Soil*. 209 (1), 101–109.

- Czyż EA (2004) Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil and Tillage Research*. 79 (2), 153–166.
- Dickson JW and Campbell DJ (1990) Soil and crop responses to zero- and conventional-traffic systems for winter barley in Scotland, 1982–1986. *Soil and Tillage Research*. 18 (1), 1–26.
- Dickson JW and Ritchie RM (1996) Zero and reduced ground pressure traffic systems in an arable rotation 2. Soil and crop responses. *Soil and Tillage Research*. 38 (1–2), 89–113.
- Dieter Kutzbach H (2000) Trends in Power and Machinery. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 76 (3), 237–247.
- Douglas JT, Campbell DJ and Crawford CE (1992) Soil and crop responses to conventional, reduced ground pressure and zero traffic systems for grass silage production. *Soil and Tillage Research*. 24 (4), 421–439.
- Edling P and Fergedal L (1972) Modellförsök med jordpackning 1968-69.
- Ehlers W, Köpke U, Hesse F and Böhm W (1983) Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil and Tillage Research*. 3 (3), 261–275.
- Eriksson J (2011) *Marklära*. Lund: Studentlitteratur
- Gao W, Watts CW, Ren T and Whalley WR (2012) The effects of compaction and soil drying on penetrometer resistance. *Soil and Tillage Research*. 125, 14–22.
- Grip H and Rodhe A (2000) *Vattnets väg från regn till bäck*. Uppsala: Hallgren & Fallgren
- Gustafsson K (2010) *Controlled Traffic Farming i skånsk växtodling*. Alnarp: Sveriges lantbruksuniversitet. Available at: <http://stud.epsilon.slu.se/1297/>.
- Haak E (1994) Rotens morfologi och fysiologi i relation till alvens funktion. *Kungliga skogs-och Lantbruksakademin*. 1994 (133:5).
- Håkansson I (2000) *Packning av åkermark vid maskindrift*. Uppsala: Institutionen för markvetenskap
- Jahre JA, Grace WJ, Greenbaum DM and Sarg MJ Jr (1975) Medical approach to the hypotensive patient and the patient in shock. *Heart & lung: the journal of critical care*. 4 (4), 577–587.
- Jarvis NJ (2007) A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*. 58 (3), 523–546.
- Kuhlmann H (1990) Importance of the subsoil for the K nutrition of crops. *Plant and Soil*. 127 (1), 129–136.
- Kuhlmann H and Baumgärtel G (1991) Potential importance of the subsoil for the P and Mg nutrition of wheat. *Plant and Soil*. 137 (2), 259–266.
- Lamers JG, Perdok UD, Lumkes LM and Klooster JJ (1986) Controlled traffic farming systems in the Netherlands. *Soil and Tillage Research*. 8, 65–76.
- Li YX, Tullberg JN and Freebairn DM (2007) Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. *Soil and Tillage Research*. 97 (2), 282–292.
- Pedersen HH (2012) *Lydinge farm, south of Sweden*. [Online] Available at: <http://ctfeurope.com/2012/lydinge/> (accessed 14/05/13).
- Radford B., Yule D., McGarry D and Playford C (2001) Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil and Tillage Research*. 61 (3–4), 157–166.
- Rex M, Harrach T and Németh K (1985) The influence of rooting density in the soil on P removal by cereals on soils with different yield potential. *Plant and Soil*. 83 (1), 127–132.
- Soane BD and van Ouwerkerk C (1995) Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil and Tillage Research*. 35 (1–2), 5–22.
- Theodore Thomas Kozłowski (1978) *Water deficits and plant growth. Vol. 5, Water and plant disease*. New York: Academic P
- Tracy SR, Black CR, Roberts JA and Mooney SJ (2011) Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 91 (9), 1528–1537.

- Tullberg JN, Yule DF and McGarry D (2007) Controlled traffic farming—From research to adoption in Australia. *Soil and Tillage Research*. 97 (2), 272–281.
- Vermeulen G. and Chamen WC. (2010) *Controlled traffic farming to improve soil structure and crop productivity*. York: International Fertiliser Society
- Vermeulen GD and Mosquera J (2009) Soil, crop and emission responses to seasonal-controlled traffic in organic vegetable farming on loam soil. *Soil and Tillage Research*. 102 (1), 126–134.