



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för mark och miljö

Markpackning & rötter som en möjlig strukturförbättrare

Soil compaction & roots as a potential structure improver

Elizabeth Lövstaf

Kandidatuppsats i biologi
Agronomprogrammet – inriktning mark/växt

Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU
2018:14

Uppsala 2018

Markpackning & rötter som en möjlig strukturförbättrare

Soil compaction & roots as a potential structure improver

Elizabeth Lövstaf

Handledare: Thomas Keller, institutionen för mark och miljö, SLU

Biträdande handledare: Tino Colombi, institutionen för mark och miljö, SLU

Examinator: Holger Kirchmann, institutionen för mark och miljö, SLU

Omfattning: 15 hp

Nivå och fördjupning: Grundnivå, G2E

Kurstitel: Självständigt arbete i biologi – kandidatarbete

Kurskod: EX0689

Program/utbildning: Agronomprogrammet – mark/växt 270 hp

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2018

Serietitel: Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU

Delnummer i serien: 2018:14

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

Nyckelord: markpackning, rötter, markstruktur

Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för mark och miljö

Sammanfattning

Markstrukturen är av avgörande betydelse för en grödas tillväxt och funktion. I marken sker upptaget av vatten- och näring för rötterna och en god miljö är en viktig faktor för att en växt ska utvecklas väl. Dagens jordbruk med tyngre och ökad användning av maskiner innebär större påfrestningar på marken. Markpackning är en konsekvens av det intensiva jordbruket och innebär en degradering av markstrukturen. En packad mark inverkar på alla processer i marken och rötterna får begränsad tillväxt på grund av ökat mekaniskt motstånd, minskad syretillgång och försämrat näringsupptag. Rötterna har dock också en påverkan på markstrukturen och kan gynna den. Genom tillväxten i marken skapas porer i jorden som förbättrar strukturen. De kan även ha en god effekt på strukturen genom utsöndring av exsudat som kan öka aggregering av markpartiklar. Rötterna bidrar dessutom indirekt till en förbättrad markstruktur genom att fungera som föda åt markdjur vilka kan gynna strukturen när de utsöndrar exsudat samt har en uppluckrande effekt på marken. Det är ett komplext samspel mellan markstrukturen och rötterna där varje process har en inverkan på varandra.

Syftet med uppsatsen var att undersöka huruvida rötter påverkas av markpackning och hur de kan användas för att regenerera en packad mark. Arbetet är en litteraturstudie som baseras på den mest relevanta forskningen som finns i dagsläget.

Nyckelord: Markpackning, rötter, markstruktur

Abstract

Soil structure is crucial for the growth and function of a plant. The water and nutrition uptake by plants occur in the soil via roots, and a good soil environment is an important factor for the growth of a plant. Today's farming with heavier and increased use of machinery causes greater loads on the soil. Soil compaction is a consequence of intensive farming and involves a degradation of the soil structure. When a soil becomes compacted it affects all processes in the soil with consequences for plant growth. The root growths become limited because of increased mechanical impedance, reduced oxygen supply and impaired nutrient uptake. On the other hand, roots influence soil structure and can potentially improve it. Roots create new pore spaces by growing through the soil, and excretion of exudates from the roots can increase aggregation of soil particles. The roots also indirectly contribute to improved soil structure as they are a food source for soil organisms that can benefit the structure through their burrowing activity or excretion of exudates.

The purpose of the paper was to investigate whether roots can be used to regenerate a compacted soil. The work is a literature study based on the research currently available in the field.

Key words: Soil compaction, roots, soil structure

Innehållsförteckning

1	Inledning	5
2	Syfte och metod	6
3	Bakgrund	7
3.1	Markstruktur	7
3.2	God markstruktur	8
3.3	Markpackning	8
3.4	Rötter	9
3.4.1	Arkitektur	9
3.4.2	Fysiologiska rotegenskaper	9
3.4.3	Biotiska rotegenskaper	10
3.4.4	Morfologiska egenskaper	10
3.4.5	Rhizosfären	10
4	Markpackningens påverkan på rötter	12
4.1	Mekaniskt motstånd	12
4.2	Syrebrist; Hypoxia, anoxia	13
4.3	Hur markpackning påverkar tillgänglighet, vattenstress	14
5	Rötters inverkan på marken	15
5.1	Kan rötter förbättra markstrukturen?	15
5.2	Hur rötter modifierar marken	15
5.3	Feedbacks mellan rottillväxt och markstruktur	16
	Sammanfattning och slutsats	18
	Referenslista	20
	Tack	23

1 Inledning

Markpackning är ett ökande problem i världen till följd av de tunga maskiner och redskap som används i högre utsträckning i dagens jordbruk. Den försämrar markstrukturen och har generellt en negativ inverkan på fysikaliska, kemiska och biologiska processer i marken (Håkansson 2000). Rötterna blir negativt påverkade då det mekaniska motståndet ökar, syretillgången minskar och vattenstress blir mer påtaglig (Bengough 2011). Markstrukturen har därmed en avgörande roll för grödans tillväxt eftersom den tar upp vatten och näringsämnen från marken via rötterna. För jordbruket innebär markpackning en begränsad rotutveckling och lägre avkastning till följd av försämrade markförhållanden för grödorna. För att upprätthålla ett effektivt jordbruk som klarar av framtida utmaningar behövs kunskap och lösningar som kan motverka och regenerera markpackning.

Att studera rötterna för med sig större svårigheter än att titta på grödorna ovan mark vilket har lett till mindre forskning inom området. Det har framförallt varit svårt att kunna studera rötternas tillväxtsätt, beteende och interaktion med marken då äldre metoder är mycket arbetskrävande. Ofta har rottvättning använts där rötter separeras från marken, tvättats och torkats vilket endast visar hur rötterna ser ut efter att ha befunnit sig i marken. Men med dagens teknik som bland annat datortomografi, neutronradiografi, röntgen och magnetresonanstomografi ökar möjligheterna att studera markens påverkan på rötterna när de växer i marken utan att skada eller inverka på några processer. Med de mer avancerade teknikerna går det även att mäta markprofilernas vatteninnehåll och struktur kring rötterna. Detta ger nya möjligheter till en bättre förståelse hur rötter fungerar. Syftet med uppsatsen har varit att undersöka hur markpackning påverkar rotutveckling och att se om rötter kan användas i framtiden för att regenerera en skadad markstruktur. Genom att öka kunskapen om hur rötter interagerar med marken kan förhoppningsvis nya sätt att stabilisera skördar genom att förbättra vatten- och näringsupptaget till rötterna identifieras.

2 Syfte och metod

Studien utfördes som en litteraturstudie baserad på relevant forskning inom området. Syftet med uppsatsen är att se hur rötter kan användas för att regenerera markstrukturen. Detta görs genom att belysa markpackningens inverkan på rötter samt rötternas inverkan på marken.

3 Bakgrund

3.1 Markstruktur

För att förstå hur markpackningen påverkar rötterna behövs en förståelse för markstrukturen, hur markpackning uppstår och hur markpackningen förändrar strukturen. Marken består av fast material, vatten och luft. I marken finns lerpartiklar, mineralämnen, organiska och oorganiska ämnen som tillsammans bildar aggregat (Oades 1984). Markstrukturen beskriver storlek, form och den rumsliga ordningen av det fasta materialet (partiklar, aggregat) och de hålrum, kanaler och sprickor som existerar mellan det fasta materialet (porer) (Brady & Weil 2008). Porer förekommer i olika storlekar som uppdelas i makro-, meso- och mikroporer. Makroporer är de stora porerna som förekommer mellan aggregaten och är ofta luftfyllda, mesoporer är de biologiskt mest aktiva porer som innehåller växttillgängligt vatten samt rötter och mikroporer som finns inuti aggregaten ofta vattenfyllda som dock inte är växttillgängligt. Tillsammans utgör dessa porvolymen i marken. I den här uppsatsen kommer mesoporer att slås samman med makroporer och benämnas därefter. Porvolymen av den totala volymen i marken benämns porositet (Eriksson et al 2011). Porerna möjliggör utbyte av vatten, gaser och näringsämnen för växterna. Det är även porer som möjliggör framkomst för rötterna och därmed bidrar till grödans utveckling (Lal 1991).

Markstrukturen är dynamisk och föränderlig vid inre och yttre påfrestningar. En viktig egenskap för markstrukturen är hållfastheten som leder till stabilitet i marken. Hållfastheten avser markens förmåga att bevara sin struktur vid mekanisk stress och den påverkas av jordens sammansättning och vattenhalt. Ett högt tryck som överstiger hållfastheten leder till en deformation av marken och därmed en försämrad markstruktur (Håkansson 2000).

Vilken markstruktur som uppkommer på en plats beror på bergarter, mineraler och texturen som finns. Även biologisk aktivitet, mullhalt och typ av vegetation har betydelse för strukturen. Det förekommer flera processer som inverkar på markstrukturen: Mineraler vittrar sönder, organiskt material bryts ned och mängden rötter som bildas beror delvis på årsmånsvariationer. Andra faktorer som klimat och topografin i landskapet har också betydelse för markstrukturen (Bronick & Lal 2005). Strukturen kan degraderas, stabiliseras eller förbättras av processerna.

Ett förlopp som påverkar markstrukturen är cykler av svällning och krympning under året som reaktion på regn och torka eller frost och tining. Jordar som innehåller ler och organiskt material har en förmåga att expandera och krympa mer eller mindre när de utsätts för väta och torka. När detta sker bildas sprickor i aggregaten. Det är dock inte bara väderförhållanden som orsakar detta utan även rötternas vattenupptag kan bidra till cykler av krympning och svällning, fast då på en lokal skala vid rotzonen (Oades 1993).

3.2 God markstruktur

En god markstruktur kan definieras på olika sätt beroende på vad marken ska användas till. Ur ett jordbruksperspektiv innebär det en jord som kan brukas, tillåter rottillväxt och mekanisk påfrestning samtidigt som stabiliteten och strukturen vidhålls (Dexter 1988). För grödor innebär det att jorden kan förse rötter tillräckligt med vatten och syre samt att rötter inte utsätts för ett högt mekaniskt motstånd.

För grödorna innebär en god struktur tillräckligt med mesoporor som innehåller växttillgängligt vatten, makroporer som främjar genomsläppligheten av luft och vatten samt mikroporer i aggregaten som livsutrymmen för mikrober. Stora och mesoporor främjar rötternas tillväxt. En hög mikrobiell aktivitet innebär en dynamisk omsättning av näringsämnen och främjar stabiliseringen av aggregat. Detta beror dels på att näringsämnen frigörs när mikroorganismerna själva bryts ned samt att deras nedbrytning av växtrester bidrar till större andel organiskt material i jorden (Eriksson et al 2011).

3.3 Markpackning

Markpackning uppkommer av en mekanisk påfrestning utifrån som leder till att porutrymmen och jordpartiklar packas tätare till följd av det ökade trycket (Défossez & Richard 2002). Det är en process i marken där luften pressas ut ur porerna och leder till lägre porvolym medan skrymdensiteten ökar. För att markpackning ska uppstå krävs att trycket överstiger markens bärförmåga samt att det finns luftfyllda porer. På jordbruksmark är det främst tunga maskiner och betesdjur som orsakar detta i

matjord och övre alv. Det kan ta lång tid för en deformerad markstruktur att regenereras vilket kan ha negativa konsekvenser för grödor (Håkansson 2000).

Markpackning innebär en degradering av markens struktur och därmed markens användningsområde (Oades 1993). Markpackningens omfattning påverkas av jordart, vattenhalt, hållfastheten på aggregaten, tryckets storlek och antal överfarer. En jord med större porvolym tenderar att packas lättare än en redan packad jord som inte har lika mycket porer att komprimera. Har jorden redan blivit packad är den mer motståndskraftig för ytterligare packning. Fler antal överkörningar med maskiner leder till packning även i alven och nästan icke reversibla skador på sikt (Håkansson 2000). I en jord med hög vattenhalt avtar packningen tidigare än i samma jord med lägre vattenhalt då det finns färre luftfyllda porer att pressa samman. Körning på blöta jordar minskar emellertid inte risken för strukturskada utan tenderar att ta större skada då aggregatstrukturen förstörs lättare. Undantagsfall förekommer då marken är helt vattenmättad då packning inte kan uppkomma (Håkansson 2000).

3.4 Rötter

Rötternas funktion är att ta upp näring, vatten och förankra sig i marken som stöd för hela grödan. En grödas tillväxt och utveckling ovanför marken påverkas till stor del av hur rötternas miljö ser ut (Kochian 2016). Beroende på vilket förhållande det är i marken kommer rötterna utvecklas lite olika. Rötterna har flera olika egenskaper och i det här avsnittet kommer bakgrund till de egenskaper som har störst betydelse vid markpackning att tas upp.

3.4.1 Arkitektur

Grödans spatials utbredning för rotsystemet kallas för rotens arkitektur och innefattar vanligen rotsystemet i helhet och inte finare strukturer som rothår eller enskilda rötter (Lynch 1995). Egenskaper som ingår till rotens arkitektur är bland annat rot djup och förgreningen av rötterna. Rötternas arkitektur i marken har visat sig vara en viktig faktor för en grödas vatten- och näringsupptag (Kochian 2016). Rotarkitekturen anpassar sig efter hur näring och vatten fördelar sig i marken och hur rötter kan komma åt de områden där näringen och vatten finns (Lynch 1995).

3.4.2 Fysiologiska rotegenskaper

Fysiologiska rotegenskaper innefattar rotens förmåga att ta upp näring, kinetik (hur snabbt och på vilket sätt kemiska processer sker i roten), rotrespiration (rötternas

sätt att tillhandahålla energi för att upprätthålla metabolismen i roten) och utsöndring av exsudat. Exsudatet är ett växtslem som gör bland annat att friktionen minskar för rötterna vid framkomst i marken. Exsudatet består till stor del av polysackarider vilka är en grupp molekyler som visat sig indirekt kunna förbättra markstrukturen då det anses fungera som ett lim som förstärker aggregatstabiliteten (Oades 1985).

3.4.3 Biotiska rotegenskaper

Biotiska egenskaper definieras som interaktioner mellan markbiota och rötter samt hur dessa påverkar rötternas näringsupptag. Markbiota innefattar mikroorganismer såsom svampar och bakterier samt mikro- och makrodjur i marken. Bland annat har mykorrhiza-svampar visat sig ha en viss betydelse för aggregering (Tisdall & Oades 1982). Mykorrhiza får föda i form av kolhydrater från växten medan växten får ett ökat näringsupptag och bättre motståndskraft gentemot sjukdomar och torka i utbyte (Bardgett, Mommer & De Vries 2014).

3.4.4 Morfologiska egenskaper

Till morfologiska egenskaper räknas rot diameter som syftar på rotens tjocklek, rotlängd, rothår, rotvävnadsdensitet, rotens torrsubstanshalt och strukturen av rotspetsen. Förutsättningarna att klara av att växa i en packad jord skiljer sig mellan grödor. Framförallt har det visat sig att grödor generellt har betydelse för markens stabilitet (Bardgett, Mommer & De Vries 2014; Lynch 1995). Grödor har en stor förmåga att anpassa sig utifrån miljöförhållanden. Hur föränderliga de kan vara är beroende av histologin (vilken typ av celler den har).

3.4.5 Rhizosfären

Rhizosfären definieras som den volym av marken som påverkas av rotaktivitet. I rhizosfären sker närings- och vattenupptag vilket har en direkt avgörande betydelse för rotutvecklingen. Rhizosfären har ett lägre eller högre pH-värde än bulkjorden som innebär att näringsämnen löses upp i högre grad och kan tas upp. Bulkjorden definieras som den jord som befinner sig utanför rhizosfären. Det förändrade pH-värdet är en följd av rötternas proton resp. hydroxylutsöndring. Rötter tar upp näringsämnen i form av joner vilket leder till en obalans i upptaget av kat- eller anjoner. Då rötter tar upp ett överskott av katjoner framför anjoner kompenserar grödans rötter genom att frigöra överskott av positiva laddningar i form av protoner, vilket leder till en försurning i rhizosfären. Likaså kommer det ske en alkanisering i rhizosfären när ett överskott av anjoner tas upp och negativt laddade hydroxyljoner frigörs istället för att balansen i roten ska upprätthållas. Genom att förändra pH-

värdet i rhizosfären underlättas rotupptaget av flera näringsämnen som blir mer tillgängliga vid lägre och högre pH (Hinsinger 1998).

4 Markpackningens påverkan på rötter

De främsta orsakerna till en begränsad rottillväxt och rotutveckling är mekaniskt motstånd i marken (rötterna kan inte penetrera en för hård jord), syrebrist (hypoxiska eller anoxiska förhållanden, vävnaderna får för lite syre eller inget syre alls) och vattenstress (för lite vatten). Rötterna begränsas på olika sätt av dessa faktorer, som diskuteras nedan.

4.1 Mekaniskt motstånd

Markpackning leder till lägre porositet i jorden vilket innebär ett ökat mekaniskt motstånd för rötterna som begränsar deras utveckling. För att rötter ska kunna penetrera jorden behöver deras tillväxtkraft överstiga motståndet från jorden. Tillväxtkraft syftar på stressen som rotytan utsätts för när den pressar igenom jorden (Dexter 1987). I en alltför kompakt jord kan rottillväxten upphöra helt. Rotförlängningen begränsas markant vid ett mekaniskt motstånd över 2 MPa men redan vid ett lägre motstånd minskar tillväxten. Det här värdet används ofta som ett gränsvärde eftersom rottillväxten vid detta motstånd är bara hälften av vad den skulle varit om inget motstånd förekommit alls (Bengough et al 2011). I en styv jord som är väldigt kompakt kan inte rötterna penetrera jorden om diametern på porerna och sprickorna inte är minst lika stora som rötternas diameter. I de flesta fall är porerna mindre än rötternas diameter men jorden är tillräckligt lös för att rötterna ska klara av att övervinna motståndet och pressa undan hinder som förekommer (Wiersum 1957).

Rotförlängningen utgör ett samspel mellan roten och dess miljö och hur cellerna reagerar på miljön. När det uppkommer stress som mekaniskt motstånd från exempelvis markpackning kommer cellerna sträva efter att upprätthålla en jämvikt mellan de inre och yttre påfrestningarna. Om denna balans rubbas påverkar det huruvida rötterna kan växa till. Vid rottillväxt utvidgas cellväggarna och turgortrycket i cellväggarna överstiger det yttre mekaniska motståndet. När den externa stressen i form av mekaniskt motstånd ökar på rotens celler minskar cellernas tillväxthastighet

(Dexter 1987). Det mekaniska motståndet som motverkar rotpenetration är summan av friktionsmotståndet mellan rot och jord samt trycket som behövs för utvidgning av jorden för att roten ska få plats (kavitetsutvidgning) (Bengough et al 2011). När rötterna stöter på högt penetrationsmotstånd från exempelvis markpackning kommer cellerna i roten börja sträva efter att reglera föregående faktorer på olika sätt för att underlätta framkomsten. Olika grödor har mer eller mindre förutsättningar för att göra histologiska förändringar.

För att minska friktionsmotståndet från en kompakt jord kan en gröda svara med att förändra den geometriska formen på rotspetsen. Detta sker genom att öka diametern på roten dvs skapa en kraftigare cellstruktur omkring rotens yttre och bromsa tillväxten av axiala celler i roten (rötternas längd). Roten får en förtjockning som klarar av ett högt tryck mellan partiklar. En tjockare rot med större diameter är också mer motståndskraftig mot att böjas i kompakta jordar (Kirby & Bengough 2002; Chimungu et al. 2015). Försök har visat att förhållandet mellan radien på rotspetsen och dess längd är ett mått på friktionsmotståndet. En tunn och spetsig rotspets visar på låg penetrationskraft och låg axial stress (den stress som sker längs med roten) (Colombi et al 2017; Kirby & Bengough, A. G. 2002; Veen 1982).

4.2 Syrebrist; Hypoxia, anoxia

Mängden luft i marken styrs bland annat av markens porositet och porstorleksfördelning. Större andel makroporer i marken ökar gasdiffusionen och luftpermabiliteten i jorden (Colombi et al. 2017; Kuncoro et al. 2014). Markpackning kan leda till syrebrist för rötterna till följd av en försämrad luftpermabilitet och minskad gasdiffusion i marken. Luftpermabiliteten avgör markens förmåga till gasutbyte, som drivs av gasdiffusion, (transport av gaser från områden med hög koncentration till lägre i marken). När luftpermabiliteten minskar innebär detta att gasutbytet mellan marken och atmosfären avtar. När gasutbytet minskar kan syretillförseln till rötterna bli för låg och grödan skadas. För att växter och dess rötter ska kunna växa och ta upp näring krävs det att det finns tillräckligt med syre i marken för att rötterna ska kunna andas. När syretillförseln till rötter inte är tillräckligt riskeras hypoxi (McAfee et al. 1989), rotceller får inte tillräckligt med syre. När växter utsätts för hypoxi under kortare perioder svarar rötterna med att avta i tillväxt. Finns det ingen syretillgång alls i marken utsätts rötterna för anoxi som innebär total avsaknad av syre till celler, tillväxten avstannar helt och tillslut dör rötter. En viss del av markens porer behöver därför vara fyllda med luft. En tumregel är att 10 % av porerna bör vara luftfyllda för att växterna ska kunna tillväxa (Dexter 1988). Hur länge en växt klarar av hypoxi varierar mellan olika arter (Dresboll et al 2013; Morard & Silvestre 1996). Vid syrebrist klarar exempelvis vissa arter, bland annat ris, av att bilda en luftfylld,

svampartad vävnad (aerenkym), som underlättar syrediffusionen till rötter (Zhang 2015).

Makroporer har även en viktig betydelse för en god vattenledningsförmåga i marken. De porer som påverkas till följd av markpackning är meso- och makroporer vars antal reduceras medan antalet mikroporer inte inverkas lika mycket (Kuncoro et al 2014). När andelen större porer minskar leder det till försämrade vatteninfiltration i marken, något som också kan påverka syretillgången. I en packad jord kan vid kraftiga regnskuror och våta väderförhållanden vattenmättade förhållanden uppkommer i det översta jordlagret, som inte dräneras bort. Vattenfyllda porer ger upphov till lägre gasdiffusion och förhindrar syretransporten ner till rhizosfären (Kuncoro et al. 2014). Rötter kan reagera med långsammare tillväxt redan några timmar efter att vattenmättningen har tillkommit (Dressboll et al. 2013).

4.3 Hur markpackning påverkar tillgänglighet, vattenstress

Markpackning begränsar rötternas förmåga att breda ut sig i marken för att nå näring och vatten. Även om näringen finns i marken kan motståndet för rötterna vara så stort att de inte kan nå de områden där näringen finns. En växts rotutveckling och tillväxt speglas till stor del av dess vatten- och näringstillgång. Grödan bildar rötter för att nå vatten och näring som kan användas för att den ska kunna växa och utvecklas. Rötternas längd och tillväxt avgörs av markmiljön de växer i. Marken har dock sällan helt optimala förhållanden för växter och rötter är flexibla och anpassar sig efter rådande miljö de befinner sig i. Även om rötterna har en god förmåga att förändra sitt tillväxtsätt räcker det inte alltid till om den rådande miljön inte är tillräckligt gynnsam. Vid markpackning i djupare skikt växer rötter utbildas totalt mindre rötter och fler laterala rötter eftersom de inte kan penetrera djupare. Den uteslutande rottillväxt i matjord minskar förmågan att nå vatten- och näringstillgången i alven. Vattenupptaget i matjorden ökar, som ytterligare kan förorsaka ett högre penetrationsmotstånd i det övre lagret och framkomsten till alven (Colombi et al. 2018; Veen 1982).

5 Rötters inverkan på marken

5.1 Kan rötter förbättra markstrukturen?

Marken påverkar hur rötter växer men rötter har i sin tur en inverkan på marken och dess struktur genom sin tillväxt. Några mekanismer som påverkar marken på ett eller annat sätt är: rotpenetration som skapar porer; utsöndring av exsudat; och tillförsel av organiskt material. Mekanismerna är en ett resultat av rötternas tillväxt som kan nyttjas för att förbättra en dålig markstruktur, bland annat packad mark.

5.2 Hur rötter modifierar marken

Rötter har förmågan att modifiera marken på olika sätt genom sin tillväxt. Rötternas vattenupptag bidrar till cykler av svällning och krympning marken, som gynnar aggregatbildning. När marken torkar upp bildas sprickor vilka tillsammans med rotpenetrationen skapar zoner i marken som försvagas och leder till att den tänjs, bryts upp och kan forma aggregat. Den här processen kan förstärka bildningen av små aggregat framförallt. Vid rottillväxten skapar växten nya rotgångar vilket skapar nya porer (Angers & Caron 1998; Dexter 1988).

Rötter kan även inverka positivt på strukturen genom tillförsel av organiskt material. Organiskt material är en viktig faktor för stabilisering av aggregat (Bardgett, Mommer & De Vries 2014; Jin et al 2017). Tillförseln av organiskt material till jordbruksmark sker enbart genom rötter om alla ovanjordiska växtdelar (skörd och skörderester) forslas bort. Det organiska materialet som tillförs genom rötter utgörs av rotmassan och rottillväxten men även av att rötter utsöndrar organiska substrat i form av växtslem i rhizosfären. Detta sker hos levande rötter men frigörs även vid nedbrytning av döda rötter. Rötter utgör också substrat för mikroorganismer genom att bryta ned döda rötter produceras ämnen som aggregerar jordpartiklar och gynnar stabiliseringen av aggregat (Tisdall & Oades 1979; Gale et al

2000). En stor del av exsudatet från både rötter och mikroorganismer består av polysackarider. Polysackarider bindar aggregat som är mindre än 50 μm i diameter och har en stor inverkan på jordar med låga halter organiskt material. Mängden exsudat som frigörs från rötterna varierar mellan olika grödor, däremot producerar rötter med större rotlängd mer exsudat oavsett vilken gröda det handlar om (Tisdall & Oades 1982).

5.3 Feedbacks mellan rottillväxt och markstruktur

Rötters tillväxt och utveckling påverkar markstrukturen samtidigt som markstrukturen har en inverkan på hur rötters tillväxt och utveckling. Det är ett komplext samspel vars interaktioner leder till olika feedbacks.

Rötter bidrar till mer organiskt material och mat till markorganismer. En högre andel rötter i marken har resulterat i en ökning av dagmask och mesofauna eftersom de lever av organiskt material. Markdjur har i sin tur en positiv påverkan på markens struktur (Low 1955). Särskilt dagmaskar har visat en förmåga att öka aggregatstabiliteten till följd av att de förtär jord som sedan blandas med humifierat organiskt material i deras mage (Swaby 1950). På flera års sikt förändrar dagmaskar porsystemet i marken när de penetrerar marken och skapar gångar vilket underlättar lagring av vatten och näring, men även framkomsten av rötter. För en packad mark innebär det en uppluckrande effekt med liknande inverkan som svällning och krympning har på marken (Larink et al 2001). För en packad mark spelar dagmaskar som användes för regenerering en stor roll (Capowiez et al 2012) då det visades att dagmaskarna ökade andelen makroporer och infiltrationshastigheten i marken. En tydlig förändring konstaterades redan efter ett par månader men för att marken skulle bli helt återställd gällande maskgångar och infiltration krävdes ett antal år. Porositeten i den tidigare packade marken fortsatte att vara låg även efter försöket. Detta är ett exempel på en feedback där rötter indirekt förbättrat markstrukturen genom att gynna dagmaskar vilket i sin tur kan leda till underlättad framkomst för rötter, ökad rottillväxt och därmed ännu större andel organiskt material i marken.

Tisdall & Oades (1978) utförde ett experiment med rajgräs och klöver och påvisade en ökning av aggregatstabilitet i korrelation med rottillväxten hos framförallt rajgräs. Den förbättrade stabiliteten verkade delvis bero på samarbetet mellan arbuskulär mykorrhiza (AM) och rötter. De rötter som var infekterade med en högre andel AM bidrog till en större stabilitet hos aggregaten. Detta beror på att rötter, rothår och svamphyferna bildar ett finförgrenat nät som kan bidra till att stabilisera mikroaggregat (<250 μm) genom att binda finare partiklar till makroaggregat (>250 μm) i jorden. Enskilda hyfer och rötter kan inte hålla samman aggregat enskilt, men

när de utvecklas till stora nät som täcker aggregatet på alla håll blir det en sammanhållande kraft som gör aggregaten mer motståndskraftiga mot yttre påfrestningar. Den aggregerade effekten genom rotnät och hyfer är dock tillfällig eftersom de bryts ned inom ett par år. Men de byggs upp på kort tid som ett par månader och kan bibehållas i månader, ibland till och med ett par år även efter rötterna dött. En bidragande faktor till den sammanhållande effekten är även exsudat som finns på ytan hos hyfer fungerar som ett klister och håller samman jordpartiklarna precis som växtslem på rotytan gör (Tisdall & Oades 1982). Interaktionen mellan rötter, svamphyfer och aggregat leder till en förbättrad markstruktur som kan vara gynnsam för rottillväxten. Detta är ännu ett exempel på en feedback som sker mellan rottillväxt och markstrukturen.

Sammanfattning och slutsats

Vi vet att interaktionen mellan marken och rötter har en påverkan på varandra men hur rötter kan användas för att förbättra markstrukturen är fortfarande inte helt utforskat. Markpackning tar lång tid att regenerera och med de miljöutmaningar som finns och en växande befolkning krävs hållbara metoder för att upprätthålla samt återskapa en god struktur i marken som ska bevaras till framtiden. Rötter kan ha en betydande roll för att regenerera en packad mark på ett hållbart sätt, då det fungerar både som koltillförsel genom organiskt material, luckrar upp jorden, gynnar markdjur som också kan ha en strukturförbättrande inverkan, skapar porer och har en aggregerande effekt. Rötter modifierar markstrukturen vid deras tillväxt. Rötters bidrag till markstrukturen kan också jämföras med andra positiva effekter, t.ex. koldioxidsänka.

Men även om rötter har en positiv inverkan på markstrukturen så kan det ta tid att återställa en packad mark och det finns begränsningar. För att kunna använda rötter för att förbättra en packad jord krävs det att rötter klarar av de påfrestningar och förändringar som markpackningen utsätter dem för. Svårigheterna ligger just i markpackningens negativa inverkan på rötter som försvårar deras tillväxt och utveckling. Ska rötter kunna bidra till att återskapa en bra markstruktur krävs det grödor som är toleranta gentemot mekaniskt motstånd, syrebrist och försämrat näringsupptag. Det behövs rötter som är genetiskt lämpade för att hantera det mekaniska motståndet som följer med markpackning och därmed klarar av att nå djupare. Eftersom markpackning kan innebära både syre, vatten- och näringsbrist för en gröda måste en strukturförbättrande gröda tåla dessa miljöförhållanden.

Många av de egenskaper som gynnar strukturen erhålls inte från en och samma gröda utan kan vara artberoende. Exempelvis kan ett kraftigare rotsystem med tjockare rötter i diameter ha lättare att pressa sig fram i en packad mark och medföra större porer. Däremot är det sällan dessa rotsystem som har större effekt på aggregatbildningen. Det går inte att uppnå alla aggregatfrämjande faktorer med en gröda

men genom växtföljden kan olika grödors effekt utnyttjas. Specifika regenerationsblandningar av olika arter skulle också kunna användas för att optimera de gynnsamma faktorerna och möjligtvis få ett snabbare resultat. Det ligger en problematik i att de grödor vars rötter som är mest gynnsamma för en god markstruktur inte nödvändigtvis ger högst avkastning. Detta skapar ett ekonomiskt dilemma särskilt då det tar lång tid att reparera en packad mark och vinsten som följer med en förbättrad mark därmed är en långsiktig investering. Därför är inte alltid möjligt att motivera en lantbrukare till strukturförbättringar.

Slutsats

Det finns möjligheter att använda rötter som strukturförbättrare och det kan även vara lönsamt. Framtida forskning skulle kunna innefatta målsättningen att förädla de mest lönsamma grödor med egenskaper som möjliggör regenerering av packad mark. Det finns kunskapsluckor kring användningen av rötter som markstrukturförbättrare och det är ett spännande forskningsområde.

Referenslista

- Arvidsson, J. & Håkansson, I. (2014). Response of different crops to soil compaction- Short-term effects in Swedish field experiments. *Soil & Tillage research*, vol 138, ss. 56-63.
- Ahmed, M. A., Kroener, E., Holz, M., Zarebanadkouki, M. & Carminati, A. (2014). Mucilage exudation facilitates root water uptake in dry soils. *Functional Plant Biology*, vol 41, ss. 1129-1137.
- Bardgett, R. D., Mommer, L. & De Vries, T. (2014). Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology and Evolution*, vol 29 (12), ss. 692-699.
- Bronick, C.J., Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, vol. 124(1-2), ss.3-22.
- Bengough, A. McKenzie, B.M. Hallet, P. D. Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, vol. 63 (1), ss 59-68.
- Capowiez, Y., Stéphane, S., Stéphane, C., Pierre, B., Guy, R. & Hubert, B. (2012). Role of earthworms in regenerating soil structure after compaction in reduced tillage systems. *Soil Biology & Biochemistry*, vol 55, ss. 99-103.
- Chimungu, J.G., Loades, K.W & Lynch, J. P. (2015). Root anatomical phenes predict root penetration ability and biochemical properties in maize (*Zea Mays*). *Journal of Experimental Botany*, vol, 66 (11), ss. 3151-3162.
- Colombi, T., Braun, S., Keller, T. & Walter, A. (2017). Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. *Science of the Total Environment*, vol 584, ss. 1283-1293.
- Colombi, T., Kirchgessner, N., Walter, A. & Keller, T. (2017). Root Tip Shape Governs Root Elongation Rate under Increased Soil Strength. *Plant Physiology*, vol 174, ss. 2289-2301.
- Colombi, T., Torres, L.C., Walter, A., Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth- A vicious circle. *Science of the Total Environment*, vol 626, ss. 1026-1035.
- Defossez, P. & Richard, G. (2002). Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil & Tillage Research*, vol. 67, ss. 41-64 REVIEW
- Dexter, A.R. (1987). Mechanics of root growth. *Plant and Soil*, vol 98, ss. 303-312.
- Dexter, A.R. (1988). Advances in Characterization of Soil Structure. *Soil & Tillage Research*, vol. 11 (3-4), ss. 198-238.
- Dresboll, D.B., Kristensen, K.T., McKenzie, B. M., Dupuy, L. X. & Bengough, A.G. (2013). Timelapse scanning reveals spatial variation in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) root elongation rates during partial waterlogging. *Plant Soil*, vol 369, ss. 467-477

- Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I., Magnusson, S. (2011). *Marklära*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Gale, W. J., Cambardella, C. A. & Bailey, T. B. (2000). Root-Derived Carbon and the Formation and Stabilization of Aggregates. *Soil Science of America Journal*, vol 64, ss. 201-207.
- Hingsinger, P. (1998). How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the Rhizosphere. *Advances in Agronomy*, vol 64, ss 225-265.
- Håkansson, I. (2000). *Packning av åkermark vid maskindrift*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet (Rapporter från jordbearbetningsavdelningen 2000:99).
- Jin, K., White, P.J., Whalley, W. R., Shen, J & Shi, L. (2017). Shaping an optimal soil by root-soil interaction. *Trends in Plant Science*, vol 22 (10), ss. 823.829.
- Kirby, J.M. & Bengough, A.G. (2002). Influence of soil strength on root growth: experiments and analysis using a critical-state model. *European Journal of Soil Science*, vol 53, ss. 119-128.
- Kochian, L.V. (2016). Root architecture. *Journal of Integrative Plant Biology*, vol. 58 (3), ss. 190-192.
- Kuncoro, P.H., Koga, K., Satta, N & Muto, Y. (2014). A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. *Soil & Tillage Research*, vol 143, ss. 180-187.
- Lal, R. (1991). Soil Structure and Sustainability. *Journal of Sustainable Agriculture*, vol. 1 (4), ss. 67-92.
- Larink, O., Werner, D., Langmaack, M. & Schrader, S. Regeneration of compacted soil aggregates by earthworm activity. (2001). *Biol Fertil Soils*, vol 33, ss. 396-401.
- Low, A. J. (1955). Improvement in the structural state of soils under leys. *Journal of Soil Science*, vol 6 (2)
- Lynch, J. (1995). Root Architecture and Plant Productivity. *Plant physiology*, 109(1), ss.7-13.
- McAffe, M., Lindström, J. & Johansson, W. Effects of pre-sowing compaction on soil physical properties, soil atmosphere and growth of oats on a clay soil. (1989). *Journal of Soil Science*, vol 40, ss. 707-717.
- Morard, P., Silvestre, J. (1996). Plant injury due to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: A review. *Plant and Soil*, vol. 184, ss. 243-253.
- Nyle, C. Brady & Ray R. Weil. (2008). *The Nature and Properties of Soils*, 14. uppl. New Jersey: Pearson Education.
- Oades, J.M. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, vol. 76, ss. 319-337.
- Oades, J.M. (1993). The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, vol. 56, ss. 377-400.
- Swaby, R. J. (1950). The influence of earthworms on soil aggregation. *Journal of Soil Science*, vol 1, ss. 195-197.
- Reid, J.B., Goss, M. J. (1981). Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of two arable soils. *Journal of Soil Science*, vol 32 (4), ss. 521-541.
- Tisdall, J.M & Oades, J.M. (1979). Stabilization of Soil Aggregates by the Root systems of Ryegrass. *Australian Journal of Soil Research*, vol 17 (3), ss. 429-441.
- Tisdall, J. M & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, vol 33, ss. 141-163.
- Veen, B.W.(1982). The influence of mechanical impedance on the growth of maize roots. *Plant and soil*, vol. 66, ss. 101-109.

Wiersum L.K. (1957) The relationship of the size and structural rigidity of pores and their penetration by roots. *Plant and Soil*, vol 9, ss. 75–85.

Tack

Jag vill tacka min handledare Thomas Keller som väglett mig och gett mig tips under uppsatsens gång. Jag vill även tacka mina vänner i Lords of the omtentor som kämpat, skrattat, gråtit och druckit kaffe i skrivandet med mig. Jag vill tacka Victor Ohlsson och Amanda Bäcklund som peppat mig när allt har känts omöjligt. Men jag vill framförallt tacka min syster Esmeralda Lövfäst som har gett mig råd, tips och ork till att slutföra den här uppsatsen.