

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



Sammanfattning

Körning med tunga fordon på åkermark kan hämma växtrötters genomträngningsförmåga och näringsupptag på grund av ökad jordstyrka och försämrade luft- och vattentransport. Skadad markstruktur kan leda till reducerad avkastning, vilken potentiellt kan kompenseras genom ökad gödsling, men detta ökar också risken för näringsläckage. Detta arbete omfattar ett fältförsök med syfte att studera markpackningens effekt på kväveupptag hos kornplantor (*Hordeum vulgare* L.), bland annat genom att jämföra utveckling, avkastning och avkastningskomponenter i förhållande till fyra olika kvävegivor (0, 7, 11 och 15 kg N daa⁻¹). Kvävegivan hade signifikant inverkan på antalet producerade skott, ax, korn per ax, hektolitervikt, 1000-kornvikt, höjd, avkastning samt protein, stärkelse och kvävemängd i kärnorna. Packningsbehandling var icke statistiskt signifikant. Men den tyngsta packningen gav genomsnittligt lägst avkastning på grund av färre antal korn per ax vid alla kvävegivor. En N-testermätning kunde avslöja att den låga avkastningen var en följd av reducerat kväveupptag, möjligtvis på grund av sämre utvecklat rotsystem. Ökad kvävegiva på det tyngst packade ledet gav ingen kompositionseffekt på avkastningen då övriga packningsbehandlingar oavsett gav större skörd.

Abstract

Using heavy machinery on arable soil can hamper nutrient uptake and penetrability of roots due to increased soil strength and impaired transport of water and air. Damaged soil structure can cause reduced yields which could be compensated by increased fertilization rates, but this would also increase the risk of nutrient leakage. This master thesis includes a field trial aiming to study the effect of soil compaction on nitrogen uptake by barley (*Hordeum vulgare* L.) by comparing development, yield and yield components in relation to four nitrogen fertilization rates (0, 7, 11 och 15 kg N daa⁻¹). Larger nitrogen fertilization rates significantly increased the number of tillers, spikes, kernels per spike, hectolitre weight, 1000-kernel weight, height, total yield and the contents of protein, starch and nitrogen in kernels. Compaction treatments were not significant, but the heaviest compaction gave the smallest yields due to few developed kernels per spike for all nitrogen fertilization rates. The reduced yield was according to an N-tester measurement a consequence of less nitrogen uptake, perhaps due to a less developed root system. The low yields of the heaviest compacted treatment could not catch up with the yields of the other treatments despite increased nitrogen fertilization rates.

Förord

Denna masteruppsats blev utförd vid Institutt for Plante- og Miljøvitenskap (IPM) på Universitetet for Miljø- og Biovitenskap. Uppsatsen är baserad på ett forskningsprojekt tillhörande Annbjørg Øverli Kristoffersen vid Bioforsk Øst Apelsvoll. Fältförsöket anlades på Apelsvoll och under sommaren 2011 utfördes alla observationer och provtagningar som denna uppsats är baserad på. I samband med detta fanns alltid Annbjørg Øverli Kristoffersen och även Bernt Olav Hoel samt ett flertal försökstekniker tillgängliga med värdefulla råd och hjälp som jag är oerhört tacksam för.

Laborationsarbetet och skrivandet utfördes under hösten 2011 och våren 2012. Under denna tid var min huvudhandledare, professor Trond Børresen och biträdande handledare professor Anne Kjersti Uhlen oundgängliga då de tveklöst ställde upp och gav mig full uppbackning i stort som smått. Jag önskar att rikta ett stort tack till dem.

Uppsatsen kunde berikas med ytterligare analyser och undersökningar tack vare ett stipendium utdelat av Yara Norge AS. Det var en stor ära att tilldelas detta och jag är mycket tacksam över möjligheterna som medföljde.

Slutligen vill jag uppmärksamma min familj och mina vänner och tacka för stöd och uppmuntrande ord. Särskilt tack till mamma, Anita Sundgren för flitig korrekturläsning.

Ås, den 14 maj 2012

Tove Kristina Sundgren

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
2	Litteraturstudie	3
2.1	Markpackningens effekt på jordfysiska förhållanden.....	3
2.1.1	Optimal packningsgrad	3
2.1.2	Strukturell påverkan	4
2.1.3	Porositet, porstorleksfördelning och skrymdensitet	5
2.1.4	Luftpermeabilitet.....	6
2.1.5	Hydraulisk konduktivitet.....	7
2.2	Markkväve och dess påverkan av packning	9
2.2.1	Mineralisering	9
2.2.2	Nitrifikation.....	9
2.2.3	Denitrifikation	10
2.2.4	Utlakning.....	11
2.3	Kväve i plantor	12
2.4	Utveckling av kornplantor och betydelsen av kväve	13
2.4.1	Vegetativ fas.....	13
2.4.2	Generativ fas	13
2.4.3	Kärnfyllning	15
2.5	Markpackningens inverkan på växtutveckling och dess avkastningskomponenter ..	16
3	Material och metod.....	18
3.1	Försöksområde.....	18
3.2	Försöksdesign	19
3.3	Anläggning av försöksfält	19
3.4	Bestämning av fenologisk utveckling.....	20
3.4.1	Yara N-tester®	20
3.4.2	Densitet och beståndshöjder	20

3.5	Skörd av fält och uttag av växtprover	21
3.6	Jordprovtagning	21
3.7	Förbehandling och kväveanalys av växtmaterial.....	22
3.7.1	Tröskning, rensning, räkning och beräkning av kärnor.....	22
3.7.2	Malning samt kväveanalys av halm och kärnor	22
3.8	Markfysiska- och kemiska analyser, mätningar och beräkningar	23
3.8.1	Vattenretentionsanalys	23
3.8.2	Aggregatstorleksfördelning	24
3.8.3	Luftinnehållsmätning	24
3.8.4	Luftpermeabilitet	24
3.8.5	Mineraliserbart kväve.....	25
3.9	Statistisk analys	25
4	Resultat.....	26
4.1	Markfysiska resultat	26
4.2	Markkemiska resultat	30
4.3	Växternas utveckling, kväveupptag och avkastning.....	32
5	Diskussion	38
5.1	Markfysiska resultat	38
5.1.1	Volymetriska och markfysiska egenskaper	38
5.1.2	Vattenretetionsegenskaper.....	42
5.1.3	Samlad bedömning av markfysiska resultat.....	43
5.2	Markkemiska resultat	44
5.3	Växternas utveckling, kväveupptag och avkastning.....	45
5.3.1	N-tester	45
5.3.2	Utveckling, avkastning och avkastningskomponenter, beståndshöjd och kvalitet – effekt av kvävegiva	46
5.3.3	Utveckling, avkastning och avkastningskomponenter, beståndshöjd och kvalitet – effekt av packning	48

5.3.4	Slutlig bedömning	50
6	Slutsats	52
7	Källförteckning.....	54

1 Inledning

I stortingsmelding nummer 9 (2011-2012) publicerad i december 2011 uttrycker den norska regeringen behovet av norskproducerad mat till dagens och kommande generationers befolkning. Regeringen önskar att trygg, varierad mat av god kvalitet ska produceras för att täcka nationens behov, samtidigt som produktionen ska vara hållbar och miljömässigt försvarbar. Regeringen önskar att uppnå detta bland annat genom ökad matjordskvalitet och ökad produktivitet per ytenhet.

Enligt Statistisk sentralbyrå (2010) ökade de norska spannmålsskördarna av korn, vete och havre per ytenhet mellan tidigt 60-tal fram till slutet av 70-talet, men har därefter stagnerat. Även vallskördarna tycks ha avtagit under senare år enligt Lunnan (2012) som tror att bristande dränering och markpackning är bakomliggande orsaker till trenden.

Trots ökad medvetenhet om markpackningens konsekvenser tycks problematiken kvarstå och är möjligtvis också ökande. I Norge och många andra länder bedrivs jordbruk av färre och färre utövare, medan varje utövare ansvarar för större areor (Statistisksentralbyrå, 2010). I takt med denna utveckling tenderar även investerade lantbruksmaskiner att öka i storlek och kapacitet, för att möta arbetsbehovet som skapas när lantbruksenheterna utökas (Håkansson, 2000). Körning med tunga jordbruksmaskiner, särskilt under olämpliga markförhållanden, kan orsaka mer eller mindre permanenta skador på jordstrukturen (Alakukku, 1996). Skadad jordstruktur försämrar näringsupptaget och enligt Soane & Oukwerkerk (1995) måste mer näring tillföras för att samma avkastningsnivå ska upprätthållas. Minskar avkastningsnivån hävdar Gregorich et. al (2011) och Riley (1994) att gödsel förbrukningen möjligtvis kan öka för att kompensera skadan. Men ökade gödslingsmängder ökar också den potentiella risken för näringsläckage och eutrofiering. Markpackning bidrar därmed starkt till att motarbeta regeringens mål om ökad produktivitet genom god matjordskvalitet. Markpackning är även oförenligt med ett miljömässigt hållbart jordbruk om gödselgivorna måste ökas för att produktiviteten ska upprätthållas.

I en undersökning av Carrow & Sills (1983) undersöktes rajgräsets (*Lolium perenne* L. 'Pennfine') respons på ökad kvävegiva i packad jord. Men någon kompenationseffekt kunde inte påvisas, istället hämmades rotväxten då kraftigt packad jord kombinerades med hög kvävegiva. Inte heller Riley (1994) kunde påvisa en undantagslös kompenationseffekt när ett normalgödslat led jämfördes med ett led övergödslat med kväve.

Detta arbete omfattar ett försök med syfte att undersöka om skadad jordstruktur orsakat av markpackning påverkar avkastningsnivån av korn (*Hordeum vulgare* L.) och om denna i så fall kan kompenseras med ökad kvävegiva. Om en avkastningsreduktion föreligger är det också av intresse att avslöja vilken avkastningskomponent som har drabbats.

2 Litteraturstudie

2.1 Markpackning och dess effekt på jordfysiska egenskaper

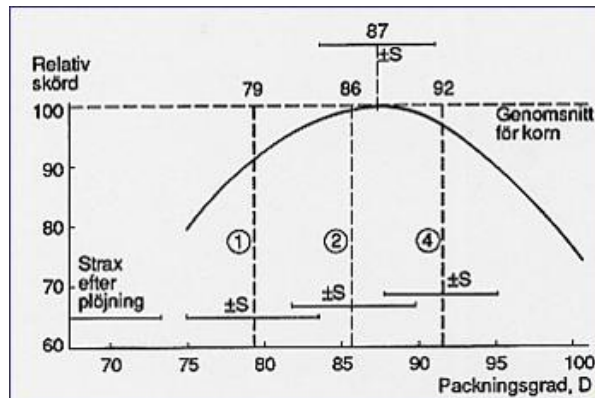
Markpackning definieras enligt Soil Science Society of America (2012) som den process där skrymdensiteten ökar och porvolymen därmed minskar på grund av mekanisk belastning. När den mekaniska belastningen överskrider markens bärförmåga, komprimeras markens volym och jorden övergår till ett mer massivt tillstånd (Harris, 1971; Hillel, 2004). Markporerna som komprimeras är antingen fyllda med luft eller vatten. Luften uppehåller sig vid fältkapacitet i den porstorleksfraktion som anses vara dränerbar, det vill säga porer som har en diameter på 30 μm och större och benämns makroporer. Vattnet uppehåller sig å andra sidan i de mindre porerna, varav det vatten som befinner sig i porer mellan 30-0,2 μm anses vara tillgängligt för växter att ta upp. Vattnet i porer <0,2 μm (mikroporer) anses dock vara otillgängligt för växter då jordpartiklarnas adsorptionskrafter håller vattnet hårt tillbaka.

När en mekanisk belastning påförs marken, är det de luftfyllda makroporerna som drabbas eftersom vattnet har en betydligt högre viskositet än luft (Hillel, 1980). Luftfyllda porer pressas fort ihop av detta skäl, medan de vattenfyllda porerna behålls mer intakta. Om belastningen bibehålls pressas även vatten ut till slut (Arvidsson, 1997). Men Arvidsson (1997) påpekar att belastning på åkermark oftast är så kortvarig att detta sällan sker. Istället sker en sammanpressning av jordpartiklar och därmed också en förändring av markens struktur. Sammanpressning, ändrad struktur och färre luftfyllda porer är konsekvenser av markpackning som går hand i hand. Tillsammans leder de till att markfysiska, markkemiska samt biologiska processer modifieras och skapar nya förutsättningar för växtodling (Arvidsson, 2007).

2.1.1 *Optimal packningsgrad*

Markpackning omtalas i de flesta fall som en negativ konsekvens av körning med tunga fordon vid fel markförhållanden. Men inte all packning är av negativ art anser Håkansson (2000). Jordbearbetning såsom plöjning och harvning, luckrar jorden och gör den porös. Porositeten leder i sin tur till mindre kontakt mellan frö, rötter och jord, vilket resulterar i undermålig tillförsel av vatten och näring samt groning (Arvidsson, 1999). Förutsättningarna för att vatten och näring ska tas upp ökar enligt Håkansson (2000) med en måttlig återpackning efter avslutat vårbruk. Figur 1 visar att den genomsnittligt största avkastningen

av vårkorn gavs med 87% återpackning i cirka 100 svenska försök. En sådan packningsgrad motsvarade aningen mer än en traktoröverfart med låg vikt och ringtryck (Håkansson, 2000).

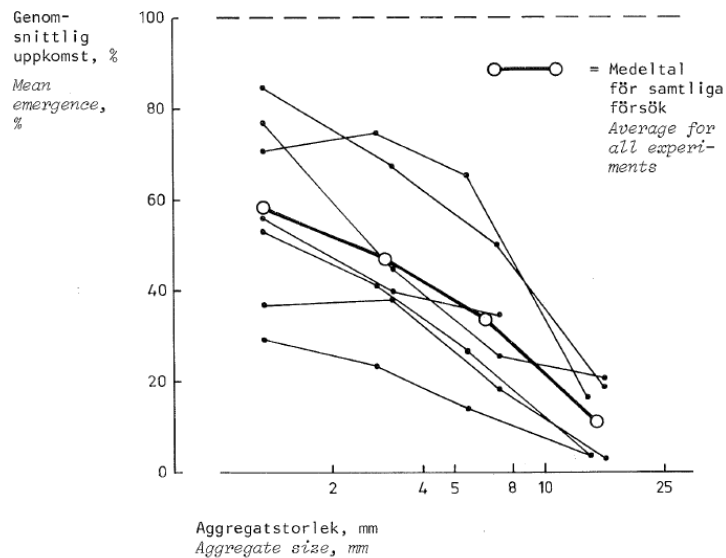


Figur 1. Respons på skörd av olika packningsgrader (Håkansson, 2000).

En viss grad av packning är därmed önskvärd, men i de flesta fall överskrids den optimala packningsgraden och en skadlig packning uppstår istället (Håkansson, 2000).

2.1.2 Strukturell påverkan

När packningen anses vara skadlig har markens struktur påverkats i den grad att vatten- och lufttransport inte längre uppfyller växternas behov. Markstrukturen, det vill säga organisering och sammansättning av jordpartiklar i förhållande till varandra, påverkas i stor grad av klimat, biologisk aktivitet och mänsklig behandling såsom jordbearbetning (Hillel, 1980). I agronomiska sammanhang är det dock önskvärdt att partiklarna är samlade i större enheter i form av aggregat (Hillel, 2004). Aggregaten bildas, förstörs och återuppbyggs genom en mängd biologiska och fysiska processer. Frostbildning och tining, uppblötning och uttorkning, levande organismer och kemiska bindningar bidrar till att aggregat byggs upp, ödeläggs och omformas (Hillel, 2004). Men trafikering och jordbearbetning har också en inverkan på strukturen och aggregatstorleksfördelningen. I ett försök av Bakken et. al (1987) gav packning av en lättlera med lätt traktor (1800 kg) en procentuell fördubbling av andelen stora aggregat (>20 mm) jämfört med ett opackat led. Detta gällde visserligen endast för rutor packade under våta, men ej torra förhållanden. Liknande utfall gav packningen i ett försök utfört av Marti (1983) på siltiga lättleror. Håkansson & von Polgár (1977) konstaterade att när korn såddes i växtmedium sammansatt av förbestämda aggregatstorlekar, grodde fler plantor ju mindre aggregaten var (figur 2).



Figur 2. Uppkomst av kornplantor som funktion av aggregatstorlek (mm). (Håkansson & von Polgár, 1977)

I välaggregerade jordar skapas hålutrymmen där vatten, luft, växtrötter och andra levande organismer håller till. Dessa porer är också sammanlänkade till ett nätverk som tillåter vatten- och luftflöde genom marken, från ytan till alven (Horn et al., 1995).

2.1.3 Porositet, porstorleksfördelning och skrymdensitet

Nätverket av porer benämns som markens porositet och är den egenskap tillsammans med det fasta materialet, som fastställer skrymdensiteten. Den torra skrymdensiteten definieras enligt Harris (1971) som andelen ugnstorkad jord per volymenhet (g cm^{-3} eller kg Mg^{-1}) och kan ge en indikation på markens packningstillstånd (Håkansson, 2000). Ska man jämföra packning med hjälp av skrymdensitet jordarter emellan är dock skrymdensiteten mindre användbart enligt Håkansson (2000). För grödor kan samma skrymdensitet i en lerjord som i en sandjord ge upphov till olika packningsförhållanden och generellt tolererar plantor en högre skrymdensitet med ökad partikelstorlek (Håkansson, 2000).

Då mark packas drabbas främst de luftfyllda makroporerna som komprimeras och deformeras. Detta medför en omfördelning av porstorlek där andelen mikroporer ökar på bekostnad av andelen makroporer (Richard et al., 2001). Den totala porositeten minskar också, men inte i samma utsträckning eftersom många makroporer endast övergår till att bli mikroporer (Kooistra & Tovey, 1994). När luft pressas ut och andelen mikroporer ökar uppstår också en omfördelning av markvattnet i profilen.

Mikroporernas betydligt mindre radie resulterar i större kapillär kraft som tillsammans med en vattenpotentialgradient fördelar vattnet i marken (Hillel, 2004). Eftersom andelen mikroporer blir större i en packad jord, kommer också vattnet att uppehålla sig i en större andel porer än i en lucker jord. Då vatten befinner sig i dessa porer kommer också luft att pressas ut till de resterande makroporerna eller ut i atmosfären. Detta tillstånd resulterar i en reduktion av potentiellt luftfylld porvolym som i stor grad påverkar levande organismer och dess aktivitet (Hillel, 2004).

I ett försök av Bleken (1990) i Sør Trøndelag gav ett packat led en reduktion av luftfylld porvolym jämfört med ett opackat led. Detta trots att man vid försökstillfället använde en traktor som med dagens mått är en lätt traktor (2800 kg). När den luftfyllda porvolymen minskar har detta bland annat inverkan på rötternas syretillgång och syrebrist kan därför uppstå. Syrebristen kan orsaka hämrad rotväxt och utveckling samt främja produktion av skadliga ämnen som etylen, samt påverka den slutliga avkastningen (Gaheen & Njøs, 1978; Stepniewski et al., 1994). Enligt Stepniewski et. al (1994) anses 25% eller mer luftfylld porvolym ge god lufttillgång för rötter, medan 10-25% anses kunna vara begränsande under vissa omständigheter. Luftvolym under 10% betraktas däremot som ett minimum. Förutom att syrebrist kan uppstå, försämras också rötternas framkomlighet. Framkomligheten hämmas eftersom antalet makroporer, vilka rötter gärna växer i, reduceras. Samtidigt som rötterna hänvisas till mikroporerna och av den anledningen hämmas, påverkas också rotväxten av den ökade jordstyrkan och dess penetrationsmotstånd (Taylor et al., 1966).

2.1.4 Luftpermeabilitet

För att en jord inte ska övergå till ett anaerobt tillstånd är gastransport in och ut ur marken oumbärlig. Koldioxid transporteras ut samtidigt som syre transporteras in. Denna transport sker via diffusion och massflöde, där diffusion sker på grund av en koncentrationsgradient och massflöde styrs av en tryckskillnad (Hillel, 2004). Gaserna kan transporteras både i löst form genom vatten samt i den luftfyllda porvolymen (Hillel, 1980). Transport genom luft är dock många gånger snabbare än genom vatten och därför är den luftfyllda porvolymen så väsentlig för markens totala gasutbyte (Hillel, 1980). Stepniewski et. al (1994) tillägger att antalet, kontinuiteten och storleksfördelningen av luftfyllda porer har betydelse i sammanhanget. För att kvantifiera markens förmåga att transportera luft genom massflöde är luftpermeabilitetsmätning av jordprover med intakt struktur mycket lämplig (Stepniewski et al., 1994; Tang et al., 2011). I en studie av Tang et. al (2011) kunde man påvisa att permeabiliteten avtog med minskad luftfylld porvolym och ökad andel vattenfyllda porer.

Samma effekt på permeabiliteten kunde ses av ökande skrymdensitet (Stepniewski, 1994). Eftersom skrymdensitet och luftfylld porvolym i stor grad påverkas av markpackning är det därmed också rimligt att anta att packning indirekt hämmar gasutbytet.

2.1.5 *Hydraulisk konduktivitet*

Precis som markens luftflöde påverkas också vattenflödet och dess infiltration utav packning. Markens infiltration, det vill säga vatten som släppts igenom jordytan och som flödar vidare ner i profilen kan uppskattas genom markens infiltrationshastighet. Denna definieras enligt Havlin (2004) som den volym vatten som flödar ner i profilen per ytenhet. Vattnet som väl passerar markytan får olika flödesegenskaper beroende på markens aktuella vattenhalt, det vill säga antingen mättat eller omättat flöde. Mättat flöde förutsätter vattenfyllda porer i markprofilen och beskrivs av Darcy's lag. Enligt Darcy's lag beror vattenflödet på markens hydrauliska konduktivitet, porernas geometriska egenskaper samt en hydraulisk gradient, som också är vattenflödets drivkraft (Havlin, 2004). På norsk åkermark är mättade tillstånd inte önskvärt. Det förekommer huvudsakligen periodvis under snösmältning eller andra nederbördsrika perioder. Det är snarare omättat vattenflöde som dominerar, där somliga porer är fyllda med luft och andra med vatten. Till skillnad från mättad och nära mättad jord drivs vattenflödet i en omättad jord av en negativ tryckpotential (matrixpotential eller vattensug), som i sin tur beror på kapillärkrafter samt vattnets dragningskraft till jordpartiklar (Havlin, 2004).

När en mättad jord dräneras och matrixpotentialen ökar, kommer vattnet att flöda från en lägre till högre matrixpotential för att utjämna differensen (Hillel, 2004). Samtidigt förändras också markens konduktiva egenskaper eftersom de stora, mest konduktiva porerna töms på vatten och de mindre porerna får stå för vattenledningen. Den totala konduktiviteten beror ju på antalet porer, dess storlek och kontinuitet, och avtar när mättningen minskar (Espeby & Gustafsson, 1997). Detta sker på grund av Poiseuilles lag (Hillel, 2004) som hävdar att flödets hastighet genom ett rör beror på rörets radie upphöjt i fyra. Halveras porstorleken kommer detta minska flödet med en faktor på 16 (Hillel, 2004; Warkentin, 1971)

Eftersom konduktiviteten är så beroende av makroporer, det vill säga den dränerbara porvolymen, resulterar även packning i minskad konduktivitet. Den minskade konduktivitet leder då till en reduktion av det mättade vattenflödet som kan märkas av särskilt under nederbördsrika perioder (Kemper et al., 1971). Samtidigt har packning motsatt effekt på det omättade flödet, som istället ökar när den dränerbara porvolymen blir mindre. Detta sker

därför att sammanpressning av makroporer till mikroporer sammanfogar dem och skapar tätare kontakt porerna emellan. Vattnet i dessa porer kommer på grund av en skillnad i vattenpotential att fördelas jämt emellan de porer som sammanlänkas med en vattenfilm (Børresen, pers. medd., 2012; Kemper et al., 1971). Sammanlänkningen av porer och den jämna fördelningen av vattnet resulterar då i en kontinuitet av vattenfilmer som ökar möjligheten för kapillär transport.

För att bedöma en jords kapillära egenskaper och på så vis undersöka effekten av packad gentemot lucker jord kan markens vattenretentionsegenskaper undersökas (Hillel, 2004). I en sådan analys påförs jordprover med intakt struktur ett sug som leder vatten ut ur proverna. När suget påförs är det först de stora, konduktiva porerna som töms och så länge inte suget gradvis ökar kommer jämvikt mellan sug och matrixpotential att uppstå. Vid jämvikt töms inte fler porer förrän suget ökas igen. Allteftersom suget ökar kommer dock mindre och mindre porer att tömmas för vatten. Hillel (2004) menar att relativt små sug framför allt påverkas av kapillära egenskaper och porstorlek. Det är i detta område som också effekten av packning blir som tydligast. Vid mycket stora sug, som -1500 kPa är de allra flesta porer tömda för vatten och de enda krafter som håller vatten tillbaka är jordpartiklarnas egna adsorptionskrafter (Hillel, 2004). Därför är det jordart och textur snarare än struktur som har inflytande på retentionsegenskaperna vid stora sug.

I vattenflödet genom marken transporteras lösta ämnen såsom bekämpningsmedel, näringsämnen och andra kemiska föreningar. Till växtrötterna transporteras dessa via massflöde eller diffusion, varav massflöde svarar till en vattenpotentialgradient och står för transport av de flesta essentiella näringsämnena, däribland kväve (Lipiec & Stepniewski, 1995). De ämnen som transporteras via diffusion, transporteras snarare på grund av en koncentrationsgradient (Hillel, 2004). Eftersom packning ökar det omättade flödet menar Arvidsson (1997) att även massflödet och transporten av näringsämnen ökar. Detta kan potentiellt också leda till ökad näringsförsörjning.

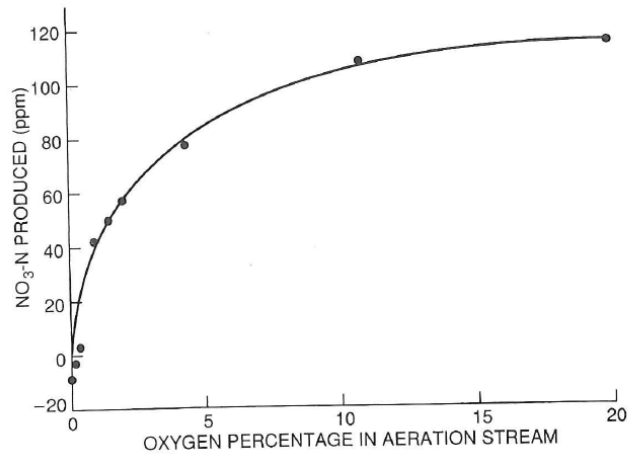
2.2 Markkväve och dess påverkan av packning

2.2.1 Mineralisering

Liksom många biologiska och kemiska processer, påverkas markkvävet tillstånd och omvandling utav markens syresättning (Arvidsson, 1997). Kvävet förekommer i både organiska och oorganiska former, varav det organiska kvävet utgör runt 95 % av det totala markkvävet (Havlin et. al, 2005). Det organiska kvävet består av aminosyror, proteiner och andra kväverika föreningar som härstammar från den biologiska aktiviteten i och i anslutning till marken (Havlin et. al, 2005). Nedbrytning av organiskt material till oorganiska ämnen kallas mineralisering och sker under både aeroba och anaeroba förhållanden. Dock sker den med en betydligt större hastighet i en syresatt jord (Brady & Weil, 2004). Eftersom packning orsakar en ökad skrymdensitet och därmed också en minskning av luftfylld porvolym, kan det antas att markpackning potentiellt kan hämma mineraliseringen. En mineraliseringsstudie utförd av Arvidsson (1999) bekräftar att kvävemineraliseringen avtog med ökad skrymdensitet då jorden var våt och kraftigt packad. Samtidigt ökade mineraliseringen då den kraftigt packade jorden torkades, i likhet med jord som var lös och endast lite packad. Mineraliseringsförsök av Breland & Hansen (1996) visade liknande resultat, men deras studie visar också att mineraliseringen i stor grad hämmades av ett fysiskt skydd. Organiskt material skyddades då från nedbrytningsorganismer genom att materialet inkapslades i mycket små porer, otillgängliga för mikroorganismer.

2.2.2 Nitrifikation

Det mineraliserade kvävet har i sin tur, beroende på markförhållandena flera möjliga öden. Dels kan det tas upp direkt av plantor, det kan immobiliseras, avges som ammoniak, bindas till lermineraler, nitrifieras och lakas ut (Havlin et al., 2005). Nitrifikation, det vill säga omvandling av ammonium (NH_4^+) genom oxidation till nitrat (NO_3^-), är en aerob process utförd av bakteriesläktena Nitrosomonas och Nitrobacter. Syretillgångens betydelse för nitrifikationen illustreras av figur 3, där kurvan visar att total syrebrist avstannar nitratomvandlingen helt. Enligt Havlin et. al (2005) uppnås maximal nitrifikation då syretillgången är jämförbar med ovan mark, vilket också motsvarar 20 % syre (Hillel, 2004). Men inte sällan är syrehalten betydligt lägre i jorden på grund av respiration av mikroorganismer och rötter (Hillel, 2004). Respirationen ökar också vid höga temperaturer vilket fort kan leda till syrebrist om inte luftutbytet sker i tillfredsställande utsträckning (Håkansson, 2000).



Figur 3. Mineraliseringens respons på syretillgång (Havlin, 2005).

Eftersom markpackning ofta reducerar den luftfyllda porvolymen kan det tänkas att nitrifikationen avstannar vid höga skrymdensiteter. Bakken et. al (1987) kunde ana en trend med högre nitratkoncentrationer än ammonium i packade led jämfört med opackade. Gaheen & Njøs (1978) hänvisar till en äldre studie av Njøs (1976) där man återfann högre nitrat- än ammoniumkoncentration i aggregat som hade packats under våta förhållanden. Njøs (1976) tolkade detta som dels en inkapslingseffekt, men också på grund av ett mindre kväveupptag av rötter i detta försöksled.

2.2.3 Denitrifikation

Det av nitrifikationen bildade, eller via gödsling tillförda nitraten kan sedan tas upp av planter. Alternativt kan nitraten vid anaeroba tillstånd tjänstgöra som elektronacceptor för denitrifierande mikroorganismer. Mikroorganismerna utviner då syrgas ur nitratomolekylen, varvid nitraten reduceras till lust- (N_2O) och/eller kvävgas (N_2) (Havlin, 2005). Dessa former av kväve avges i atmosfären och blir därmed otillgängliga för planter att ta upp med rötterna. Denitrifikation innebär alltså en ren förlust av det tillförda kvävet i marken och är en icke önskvärd utveckling. Lustgas är dessutom en mycket kraftfull växthusgas som av endast denna anledning bör undvikas (Mosier et al., 1996). I vilken utsträckning denitrifikation förekommer beror som nämnts i stor utsträckning på markens syretillgång, men också vattenhalt eftersom denna i sin tur avgör andelen luftfylld porvolym (Havlin, 2004). Marktemperatur är annars en faktor viktig för denitrifikationshastigheten samt pH eftersom denitrifierande mikroorganismer är känsliga för låga pH-värden (Havlin, 2005). Grödans beståndsdensitet kan inverka på denitrifikationen i både positiv och negativ bemärkning

menar Havlin (2005). När syrgas konsumeras i samband med rötternas respiration kan mer och mer reducerande förhållanden uppstå om inte marken återigen blir syresatt från atmosfären. Ju tätare bestånd desto snabbare bör då denna utveckling ske. Samtidigt kan denitrifikationen avta med ökat bestånd eftersom växterna tar upp både det denitrifierbara kvävet, men också vatten som hindrar luft från att fylla porerna (Havlin, 2005). Soane & Van Ouwerkerk (1995) påpekar att marken inte nödvändigtvis måste vara i ett anaerobt tillstånd för att denitrifikation ska förekomma. Det kan räcka med att avgränsade mikroporer blir anaeroba, och att det i dessa uppstår en syrefri miljö med denitrifikation som följd. Denitrifikation kan alltså uppstå parallellt med nitrifikation.

Eftersom både nitrifikation och denitrifikation är processer som styrs av markens syretillgång är det naturligt att tro att markpackning kan påverka båda dessa företeelser. Men i det tidigare nämnda mineraliseringsförsöket av Breland & Hansen (1996), kunde till skillnad från mineraliseringen, ingen förändring av nitrifikation påvisas. Inte heller kunde anaerobt tillstånd detekteras trots att luftvolymen var 37,5 % som mest och 10,8 % som lägst. Inte heller De Neve & Hofman (2000) kunde iaktta någon märkbar minskning av nitrifikationen vid en skrymdensitet på $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$. I De Neve & Hofman (2000) försök antog man att detta berodde på låg vattenhalt och lätt textur hos den aktuella jorden. Bakken et. al (1987) kunde däremot påvisa en mycket stor skillnad mellan fuktig, packad mark jämfört med ett kontrollerad. Både kalkade och okalkade rutor gav en ökning i denitrifikation med packningsbehandling under våta förhållanden. Samma behandling under torrare förhållanden gav dock inte samma utslag.

2.2.4 Utlakning

Det nitrat som inte omedelbart tas upp av plantor och dessutom besparas från denitrifikation av mikroorganismer, kan bindas till positiva bindningsplatser på lermineraler och organiskt material. Dock är anjonbyteskapaciteten förhållandevis liten jämfört med katjonsbyteskapaciteten på vanlig norsk åkermark. Nitratet förblir därför ofta löst i markvätskan och kan lätt strömma ut med ytavrundet och dränerat vatten till sjöar och hav. Väl ute i sjön är nitrat en betydande bidragsgivare till eutrofiering (Brady & Weil, 2004). Vad gäller markpackningsammanhang föreslår både Lipiec & Stepniewski (1995) och Wolkowski (1990) att utlakning av nitrat kan vara en konsekvens av packning. Arvidsson (1997) tillägger att den ökade utlakningen är en följd av att det mättade vattenflödet tilltar. Men ett flertal studier visar också att packning av sandjordar minskar utlakning, vilket visar att packningens effekt på utlakning är högst jordartsberoende (Agrawal, 1991). Soane & Van Ouwerkerk

(1995) hävdar också att ytavrinningen tenderar att öka med packning eftersom infiltrationskapaciteten avtar.

2.3 Kväve i plantor

Kväve är det överlägset viktigaste näringsämnet för växter. En undermålig kvävetillgång begränsar både tillväxt och avkastning för sädesslag såväl som andra växter (Baethgen et al., 1995). Kvävet tas upp av plantor som antingen nitrat (NO_3^-) eller ammonium (NH_4^+). Men i plantan måste kvävet föreligga som ammonium för att kunna inkorporeras i proteiner (Aasen, 1997). Därför reduceras alltid upptaget nitrat till ammonium vid ett första steg. Därefter kan kvävet ingå som byggstenar i framför allt proteiner, men också i nukleinsyror, fria aminosyror, hormoner och klorofyll (Aasen, 1997; Hopkins & Hüner, 2008). Växternas proteiner kan delas upp i enzymprotein, strukturprotein och lagerprotein, varav lagerproteinet utgör cirka 80% av det totala proteinet i vetekärnor (Gooding, 2009). Vid otillräcklig kvävetillgång blir äldre blad klorotiska på grund av en klorofyllnedbrytning och istället omfördelas kvävet till unga, växande blad (Aasen, 1997). Låga kvävehalter orsakar också dålig tillväxt och ett begränsat rotsystem (Aasen, 1997). För att kvävet som rötterna tar upp i största mån ska kunna utnyttjas, måste fotosyntesprodukten sukros finnas tillgänglig i ett balanserat förhållande enligt Mengel (1992). Vid ett överskott av aminosyror i förhållande till sukros, hopas aminosyrorna upp och kan göra växten mer mottaglig för svampangrepp (Mengel, 1992). Kväveöverskottet orsakar också en ökning av vätskefylld cytoplasma som gör plantan mjuk och flexibel. Den ökade flexibiliteten kan i sädesslag orsaka liggsäd (Havlin et al., 2005). Vid ett motsatt tillfälle där kvävetillgången är knapp, lagras sukrosen som stärkelse i plantan, på bekostnad av mängden protein (Hopkins & Hüner, 2008; Mengel, 1992).

Kvävet är som nämnts starkt kopplat till klorofyllmängden i plantan då det är en essentiell byggsten i själva klorofyllmolekylen. På grund av detta kan en plantas kväveinnehåll skattas genom att mängden klorofyll mäts med hjälp av en sensor, exempelvis en Yara N-tester®. I själva verket mäter sensorn absorbansen av en utsänd ljusstråle, som sedan omvandlas till ett värde. Vid hög absorbans återges ett högt värde och tvärtom vid låg absorbans (Yara, 2011). Verkyget är mycket användbart för att bedöma kvävegödslingsbehovet, optimalisera givan och eventuellt också förutse proteinhalten efter skörd (Hoel, 2002; Matsunaka et al., 1997).

2.4 Utveckling av kornplantor och betydelsen av kväve

Kvävet spelar alltså en betydande roll för stråsådesplantans tillväxt och utveckling under hela säsongen (Delogu et al., 1998). Enligt del Moral et al. (2002) delas utvecklingen av en stråsådesplanta upp i tre faser: vegetativ-, reproduktiv- och kärnfyllningsfasen.

2.4.1 Vegetativ fas

Den vegetativa fasen omfattar groning, framväxt av koleoptil och en påbörjande utveckling av de i embryot redan initierade bladanlagen (del Moral et al., 2002). Groning inträffar först då fuktighet-, och temperaturförhållandena samt syretillgången är den rätta. En primärrot och därefter koleoptil bildas och utvecklas genom hastig celledelning (Hopkins & Hüner, 2008). Utvecklingshastigheten styrs av många faktorer, däribland näringstillgång, hormoner och miljömässiga förhållanden (Hopkins & Hüner, 2008). Redan då koleoptilen bryter jordytan, finns på förhand initierade bladanlag hos sädesslagen. Korn har vid det laget normalt 5-7 bladanlag som utvecklas och kan efterföljas av fler om odlingsbetingelserna och den genetiska bakgrunden tillåter (del Moral et al., 2002). Temperatur (Slafer & Rawson, 1994) är bortsett från genetisk förutsättning den faktor som bestämmer fyllokronen, det vill säga bladutvecklingens hastighet (del Moral et al., 2002). Men försök av Prystupa et al. (2003) och Arisnabarreta & Miralles (2004) visade också att kvävegiva kunde påverka fyllokronen. Båda författarna registrerade en hämmande effekt, vilket innebar att tiden fram till stråskjutningen förlängdes vid låga kvävegivor. Detsamma bekräftas av del Moral et al. (2003) som konstaterar att fyllokronens varaktighet är avgörande för inom vilket tidsperspektiv stråskjutningen påbörjas, eftersom axet kommer ut genom bladslidan tillhörande flaggbladet.

2.4.2 Generativ fas

När det sista bladanlaget har initierats i den vegetativa fasen övergår plantan till den generativa fasen. Fasskiftet kallas för ”collar stage” och följs av ”double ridge stage” som är det första synliga tecknet på fasskiftet. Stadiet kallas ”double ridge stage” då växtpunkten vid det laget har två kragar runt sig, varav den undre utgör ett bladanlag och det övre det första småaxet. Det är just under den generativa fasen som småax och sidoskott initieras, som i sin tur bestämmer antalet kärnor per ytenhet. Det är också denna variabel som till stor del avgör den slutliga avkastningen (del Moral et al., 2002).

Fasen inleds med att växtpunkten förlängs och övergår till att bilda småaxpromordium istället för bladprimordium (Gooding, 2009). Samtidigt startar blominitiering och inte långt senare definieras även agnen på småaxen. I korn initieras mellan 10 och 45 småax beroende på sort

och odlingsbetingelser. Själva initieringen avslutas vid samma tid då borst utvecklas på de äldsta småaxen och samtidigt inträffar en reduktion av antalet småax. Småaxreduktionen uppskattas till 30-40% redan innan axet har gått ur holk enligt källor angivna av del Moral et al (2002). Orsaken till bortgången och storleksordningen på denna kan enligt Gallagher et al (1976) bero på undermålig assimilations- och näringstillförsel inom axet självt. Hur många småax som bildas i vete från första början beror enligt Gooding (2009) på fotoperiod och temperatur. Arrisnabarreta & Miralles (2004) kunde dock ana en liten påverkan av hög, jämfört med låg kvävegiva. I samband med småaxreduktionen avgörs också antalet fertila blommor i axet. Arisnabarreta & Miralles (2004) utförde ett gödslingsförsök där antingen 4 eller 15 kg N daa⁻¹ tilldelades 2- och 6-radskorn under två år i rad. Båda år resulterade den höga kvävegivan i en 12 respektive 40% ökning av antal fertila blommor. Hur många av dessa som utvecklas och dessutom pollineras har betydelse för antalet kärnor som kan utvecklas per kvadratmeter och slutligen den potentiella avkastningen (Arisnabarreta & Miralles, 2008).

Parallellt med småaxinitieringen sker bestockningen (del Moral et al., 2002), varav höstkorn och tvåradskorn producerar generellt fler sidoskott än sexrads- och vårkorn (del Moral et al., 2002). Antalet sidoskott ökar kraftigt fram till strax efter att blomanlagen börjar bildas. Då sker istället en reduktion av sidoskott som då vissnar bort (Lauer & Simmons, 1989). Antalet sidoskott som plantan slutligen återstår med varierar enligt del Moral et al. (2002). För korn har man påvisat skillnad mellan sorter, där sorter som generellt producerar färre sidoskott också aborterar färre skott (del Moral & del Moral, 1995). Simmons & Lauer (1985) och del Moral & del Moral (1995) föreslår också att vissnandet kan bero på mängden tillgängliga assimilater. Är mängden otillräcklig omlokaliseras assimilaterna till äldre skott från de yngre skotten (del Moral & del Moral, 1995). Bristande tillgång på vatten, näring och utrymme tros också vara en viktiga faktorer som bidrar till produktion och bortgång (Baethgen et al., 1995; del Moral et al., 2002; Lauer & Simmons, 1989).

I ett gödslingsförsök av Baethgen et al. (2002) tilldelades malkorn 0-120 kg N ha⁻¹ för att bland annat bedöma kvävetts effekt på antalet sidoskott. Resultatet visade att höga kvävegivor stimulerade till sidoskottsproduktion, men också att detta inte var korrelerat till antalet axbärande skott senare i säsongen. Ramos et al. (1995) gjorde liknande upptäckter i ett försök där korn tilldelades olika mängder N ha⁻¹ vid olika tidpunkter. Resultatet visade att kvävegiva hade signifikant effekt med hänsyn till total avkastning, antalet ax per m² och antalet axbärande skott.

2.4.3 Kärnfyllning

Kärnfyllningen är den avslutande fasen då de bildade kärnorna ackumulerar torrsubstans utvunnen ur fotosyntesaktivitet som slutligen utgör kärnans vikt (del Moral et al., 2002; Sofield et al., 1977). Kärnans vikt tillsammans med antalet kärnor som produceras per ytenhet är de viktigaste komponenterna som slutligen bestämmer den totala skörden (Acreche & Slafer, 2006; Peltonen-Sainio, 1997).

När föregående pollinering är avslutad inleds kärnfyllningen med en utvidgning av kornet på både längden och bredden. Längdökningen avstannar dock efter en vecka medan bredden fortsätter att utvidgas (del Moral et al., 2002). Fyllningshastigheten i vete berodde i ett försök av Evans et al. (1972) på placering i själva axet, temperatur och sort. Kolhydraterna som utgör själva fyllningen hämtas enligt Ercoli et al. (2008) antingen direkt från pågående fotosyntesaktivitet, alternativt från redan lagrade källor i plantan. Kärnfyllningen är en fas som med hänsyn till avkastning, är känslig för yttre stressfaktorer såsom torka (Ercoli et al., 2008).

Kärnans fyllighet har betydelse för malningsutbytet inom industrin samt antalet foderenheter som kan utvinnas. Valfyllda korn är därför alltid önskvärt. För att bedöma fyllnadsgraden av ett spannmålsparti bestäms hektolitervikten. Detta är ett kvalitetsmått där spannmålsuppköparen sätter minimumsvärden och ett pristillägg för ökad hektolitervikt beroende på sädeslaget (Felleskjøpet, 2011; Norgesfôr, 2011).

Av de bildade kärnorna består dessa av huvudsakligen proteiner, stärkelse, fibrer och fett, varav mängdförhållandena varierar väldigt lite mellan 2- och 6-radskorn (Hesselman & Tilly, 1985). Proteinackumuleringen sker genom att kväve som lagrats i vegetativa växtdelar tidigare under säsongen omdistribueras till kärnorna under själva kärnfyllningen (Bulman & Smith, 1993; Oscarsson et al., 1998). Dessutom sker en omedelbar ackumulering av kväve som tas upp i samband med kärnfyllningsfasen (Bulman & Smith, 1993). Enligt Heitholt et al. (1990) utgör vetekärnans proteinhalt huvudsakligen av kväve upptaget innan blomning. Bulman & Smith (1993) konstaterade att kvävet i kornkärnor utgjordes till störst del av kväve upptaget innan stråskjutning. Kväveupptaget innan stråskjutningen kunde också stimuleras till att öka om kvävegivan ökades. Totalt sett påvisade också Oscarsson et al. (1998) en ökning i proteinhalt då kvävegivan ökades. Förutom kvävegödsling påverkas också proteinhalten av klimatförhållanden samt varierar mellan sorter (Oscarsson et al., 1998). Dessutom antyder

Bulamn & Smith (1993) att kornsorter med stor avkastningsförmåga generellt genererar lägre proteinhalter.

Stärkelset i kornkärnor utgör runt 60% av det totala innehållet och vid låga stärkelsehalter har kärnan ofta ett högre protein- och fiberinnehåll (Hesselman & Tilly, 1985). I ett försök av Hesselman & Tilly (1985) tenderade en ökning i stärkelsehalt vara på bekostnad av övriga huvudbeståndsdelar i kärnan, som istället gick ner. Vad gäller kvävet inverkan på stärkelsehalten, kunde Oscarsson et al. (1998) iakttä en minskning av denna då kvävegivan höjdes. Detta gällde i viss utsträckning även rymdvikten (g/l) medan tusenkornvikten inte responderade på kvävegivan.

2.5 Markpackningens inverkan på växtutveckling och dess avkastningskomponenter

Vad gäller markpackningens effekt på själva plantan är det i första hand rötterna som drabbas. På grund av ökad jordstyrka och minskad mängd makroporer att växa i genomrotas jorden sämre. Ett mindre utvecklat rotsystem begränsar därmed möjligheterna för växt- och vattenupptag till en mindre jordvolym och kan leda till en minskad mängd ovanjordisk torrsubstans (Gaheen & Njøs, 1978; Merotto & Mundstock, 1999; Shierlaw & Alston, 1984). Med begränsad näringstillgång under utvecklingsstadierna då näringsbehovet är stort, kan markpackning indirekt resultera i reducerad avkastning.

Om kvävetillgången i jorden begränsas av markpackning påverkar detta givetvis kvävehalten i plantan. Arvidsson (1999) utförde ett försök i korn där näringsupptaget undersöktes i förhållande till fem olika packningsbehandlingar. Vad gällde kväve kunde man åtminstone tidigt i säsongen (Zadoks 21) se en minskning av kvävehalt i växtmaterial med den största packningen (nio överfarter med 150 kPa ringtryck). Senare i säsongen (Zadoks 37 och 57) kunde dock inte samma effekt iakttas. Vid skörd analyserades dessutom kvävehalten i kärnor och halm. Effekten av packning på kvävehalten i kärnorna var inte signifikant, men en tydligt nedåtgående trend kunde ändå anas med ökad packning. Kuht & Reintam (2004) analyserade bland annat kvävehalten i torrsubstans av korn och vete, där jord hade packats med en 17,4 ton tung traktor 0, 2, 4 eller 6 gånger. Resultatet visade att kvävehalten i korn gradvis minskade med ökad packning, likaså i vete.

För att bedöma om markpackningen hade effekt redan i samband med groningen, utförde Rasmussen (1976) ett försök där antalet grodda kornplantor räknades tidigt på säsongen. Resultatet som baserades på fyra års försök på tre olika jordarter, visade små skillnader i packningsbehandling. Men en tendens till färre grodda plantor under våta och hårt packade

förhållanden kunde anas under ett par år. Houlbrooke et. al (1997) gick ett steg vidare och undersökte hur packning påverkade antalet producerade sidoskott samt total ovanjordisk torrsubstans i rajgräs (*Lolium perenne*). Även här kunde man påvisa att med ökat mekaniskt motstånd hämmades gräsets produktionsförmåga på två av tre sorter. Samma iakttagelse på antalet producerade sidoskott i vete gjordes av Ishaq et al. (2001) och Saqib et al. (2004). De kunde observera färre sidoskott med ökad packning.

När antalet sidoskott per ytenhet minskar, avtar naturligt nog också det potentiella antalet skott som kan producera ax och kärnor. Detta bekräftas av ett krukförsök på två vetesorter utfört av Saqib et al. (2004). Försöket omfattade bland annat ett packat och ett opackat led, varav det packade gav en minskning av antalet ax per planta på den ena sorten, jämfört med det opackade ledet. I samma försök gav också det packade ledet en minskning i antal småax per planta samt kortare axlängd på den ena sorten. Samma sort uppmätte dessutom kortare strålängd i det packade ledet. Även en minskning av total avkastning noterades för det packade jämfört med det opackade ledet.

3 Material och metod

3.1 Försöksområde

Försöksfältet var beläget på Bioforsk Apelsvolls försöksområden i Østre Toten kommun i Oppland fylke. Jordmånen var stagnosol med näringsrik morän som avlagringstyp (Nyborg & Solbakken, 2008; SkogogLandskap, 2012a). Jordarten var lättlera (se tabell 1) och fältet låg 264 meter över havet (Yr.no, 2012).

Tabell 1. Procentandel sand, silt, lera, glödförlust och bestämd jordart på tre lokaliteter på försöksfältet.

Sand	Silt	Lera	Glödförlust	Jordart
44	38	18	6,34	Lättlera
42	39	19	7,43	Lättlera
40	39	21	7,93	Lättlera

Tabell 2. Temperatur- och nederbördsdata för Apelsvoll, Østre Toten kommun för 2011 samt normalvärden 1961-1990.

	Temperatur (°C)		Nederbörd (mm)	
	2011	Normal (1961-1990)	2011	Normal (1961-1990)
April	8,3	2,3	40	32
Maj	9,7	9	72	44
Juni	14,6	13,7	87	60
Juli	15,8	14,8	115	77
Augusti	14,2	13,5	155	72
September	11,5	9,1	109	66

3.2 Försöksdesign

Försöket som anlades år 2010, var tvåfaktoriellt med packningsgrad och kvävegiva som ingående faktorer. De tillsammans 16 behandlingarna utgjordes av fyra olika kvävegödslingsgivor (0, 7, 11, 15 kg N/daa) samt fyra olika packningsgrader:

A: Ingen körning

B: 1 körning hjul-i-hjul med Massey Ferguson 362

C: 1 körning hjul-i-hjul med John Deere 6830

D: 2 körningar hjul-i-hjul med John Deere 6830

Försöksfältet omfattades av 16 rutor och tre repetitioner (se bilaga 2). Sårutorna var 1,6x8 meter vilket ger 12,8 m². Den totala fältstorleken uppmättes till 42x57,6 meter.

3.3 Anläggning av försöksfält

Hösten 2010 plöjdes fältet och under våren 2011 blev det harvat. Den 6 maj 2011 vattnades fältet med 25 millimeter då vädret dessförinnan hade varit mycket torrt. Den 10 maj bestämdes markens vattenhalt till 27 % (0-10 cm) och markpackningen utfördes då enligt försöksplanen. Traktorerna som användes hade egenskaper enligt tabell 3.

Tabell 3. Tekniska egenskaper hos de använda traktorerna och dess däck.

	Massey Ferguson 362		John Deere 6830	
Vikt	3040 kg		Cirka 6000 kg (5635 kg + frontlastare)	
Hjulavstånd från mitten av däckena	1,6 meter		1,8 meter	
Däckdimension	16,9R30		65R38	
Däckdiameter	42,3 cm		60 cm	
Luftryck vänster/höger bak	0,9	0,9	0,95	0,9

Den 11 maj harvades fältet grunt med en Ferraboli rotorharv, därefter såddes och gödslades (tabell 4) rutorna med en kombisåmaskin för fältförsök (radavstånd 12 cm) och prover för aggregatstorleksfördelning och N-min (kväveminerisering) togs ut. Fältets kanter såddes

och gödslades med en gårdsmaskin vars avstånd mellan såbillarna var 13,2 centimeter. Korn (*Hordeum vulgare* L.) av sorten Tiril såddes på både gränser och i försöksrutor.

Tabell 4. Gödseltyper och tillförda mängder (Kg daa⁻¹) av NPK och S på samtliga led och kantrutor.

Led	Gödselsort	N	P	K	S
1	PK		1.4	4.8	
2	19-4-12	7	1.43	4.6	0.8
3	22-3-10	11	1.43	5	1.3
4	21-3-8	15	1.86	5.9	2.6
Kant	22-3-10	11			

3.4 Bestämning av fenologisk utveckling

De ingående behandlingsfaktorerna orsakade ojämn växtutveckling rutorna mellan. Därför är de nedanstående Zadoks-stadierna baserade utifrån fältets kantrutor.

3.4.1 Yara N-tester®

I samband med Zadoks 31, 39 och 59 bestämdes klorofyllinnehållet i samtliga rutor med en Yara N-tester®. I varje ruta mättes klorofyllinnehållet på det senast fullt utvecklade bladet, på 30 stycken plantor.

3.4.2 Densitet och beståndshöjder

Under säsongens lopp räknades antal plantor, antal skott och antal axbärande skott manuellt. Detta gjordes på samma delyta vid varje tillfälle. Denna delyta definierades i samband med att antal plantor räknades i början av säsongen (Zadoks 12). Gula markeringspinnar sattes som startmärke på mitten av 4 sårader, en pinne för varje sårad. Därefter lades en 50 cm lång tumstock vid startmärket och plantorna räknades (se figur 4). Efter att första såraden var räknad, flyttades tumstocken till nästa sårad. På så sätt bildades rutan där samtliga räkningar utfördes. Storlek av ytan bestämdes till 0,26 m². När antal skott och axbärande skott (Zadoks 37 och 77) skulle räknas satt markeringspinnarna redan på plats. Men tumstocken användes vid varje tillfälle för att bestämma slutpunkterna.



Figur 4. Uppmätning utav småruta (se röd markering för avgränsning) Foto: T. Sundgren.

När gulmogning hade inträffat genomfördes en höjdmätning i samtliga rutor. Med hjälp av en tumstock beräknades en genomsnittlig höjd genom två mätningar per ruta.

3.5 Skörd av fält och uttag av växtprover

Plantorna i smårutorna blev den 2 maj 2011 klippta med hjälp av en trädgårdssax precis vid jordytan. Plantorna buntades sedan ihop till en kärve och lades i nätpåsar av plast. Kärvarna lades i torkskåp på 65°C i två dygn. Resterande växtmaterial skördades samma dag med en Wintersteiger försökströska.

3.6 Jordprovtagning

Den 16 juni 2011 togs jordprover ut till pF-analys. Proverna togs med 100 cm³ stålcylindrar på 4 cm och 15 cm djup. För att nå rätt djup användes en handspade och linjal. Tre cylindrar bankdes ned på vardera djup med hjälp av en gummislägga och en stämpel. Cylindrarna lirkades sedan upp och överflödig jord skars bort med en kniv. Plastlock sattes i båda öppningar på cylindrarna. Sammanlagt togs 72 cylindrar. Proverna förvarades kallt fram till analysdagen.

Jordprover till analys av mineraliserbart kväve togs i alla nollgödslade rutor, tre gånger under säsongen. Prover togs första gången precis före sådd den 10 maj. Därefter i samband med Zadoks 31 och 59. Proverna togs med en handhållen jordborr ner till 20 cm djup. I varje ruta gjordes 9 stick, där jorden överfördes till en plasthink för att sedan blandas om. Den blandade jorden hälldes sedan över i en plastpåse som sedan sattes i en 0,5 liter stor pappersask. Därefter sattes proverna på ett fryslager fram till analystillfället.

3.7 Förbehandling och kväveanalys av växtmaterial

Växtmaterialet som togs ut i smårutorna genomgick en rad förbehandlingar (tröskning, malning, rensning, räkning) och bildade grundval för beräkningar (1000-kornsvikt, antal kärnor/ax och m^2 , skördeindex) och kväveanalys.

3.7.1 Tröskning, rensning, räkning och beräkning av kärnor

De torkade kärvarna tröskades manuellt i ett tröskverk för försöksverksamhet (Kurt Peltz, Saatmeister). De framtröskade kärnorna hälldes över i papperspåsar och mellan varje kärve rengjordes tröskverket med dammsugare.

För att separera framförallt borst men även halmbitar från spannmålet behandlades proverna i en rensapparat (Perten Grain Cleaner, typ 5110, nr 2356) och därefter vägdes proverna. Med en Numigral seed counter räknades cirka 300 kärnor i varje prov som sedan vägdes. Med hjälp av de räknade kärnornas vikt kunde följande beräkningar utföras:

- (1) Vikt av en kärna = Antal räknade kärnor / Vikt av räknade kärnor
- (2) 1000-kornsvikt = Vikt av en kärna x 1000
- (3) Antal kärnor per småruta = 1000-kornsvikt / vikt av 1 kärna
- (4) Antal kärnor per ax = Antal kärnor per prov / antal axbärande skott
- (5) Skördeindex = Kärnskörd / Kärnskörd + halmskörd
- (6) Totalt antal kärnor per m^2 = Antalet kärnor per ax x antalet axbärande skott

3.7.2 Malning samt kväveanalys av halm och kärnor

Halm och borst som separerades från spannmålet i tröskningen samlades ihop och en stor näve av detta maldes ner i en Retsch Stein M-2 Mill. Den malda halmen överfördes till papperspåsar och kvarnen rengjordes mycket noggrant mellan proverna.

Kärnorna maldes sedan till mjöl i en Falling Number 3100 (Perten Instruments AB). Mjölet hälldes över i återförslutningsbara plastpåsar och kvarnen dammsögs noggrant mellan proverna.

Av både mjöl och halm vägdes det sedan upp cirka 1 gram i provrör till kväveanalys. Mjölet och halmen analyserades för kväveinnehåll enligt Dumas metod beskrivet av Bremmer & Mulvaney (1982) med ett Leco CHN 1000 instrument.

3.8 Markfysiska- och kemiska analyser, mätningar och beräkningar

3.8.1 Vattenretentionsanalys

Av de stålcyllindrar som togs ut under fältsäsongen bestämdes jordens retentionsegenskaper i två omgångar av sammanlagt 72 cylindrar. Den första omfattade 48 av cylindrarna och den andra 24 cylindrar. Metoden som användes baserades på bruk av dels keramiska plattor placerade i tryckkammare samt av sandboxmetoden. Båda omgångar innefattade -1, -5, -10 och -100 kPa. I den första omgången kördes även -1500 kPa.

Värden för -1 och -5 kPa erhöles med hjälp av sandboxmetoden (Eijkelkamp, 2007). Sandboxen som användes var av märket Eijkelkamp och konstruerad för att mäta 0-(-10) kPa. Sandboxen fungerade enligt ”hängande vatten-principen”, där höjdskillnaden mellan sugreglaget och mitten på cylindern utgjorde suget som påfördes jordproverna (Eijkelkamp, 2007). Suget resulterade i att vatten sögs ut ut proverna och leddes ut från sandboxen. Då jämvikt mellan sandboxens sug och jordens återhållande krafter uppstod, bestämdes vatteninnehållet genom vägning.

Mätningar av -10 och -100 kPa utfördes i tryckkammare med porösa, keramiska plattor av tillverkaren Soil moisture Equipment co., Santa Barbara, Californien (Eijkelkamp, 2012). I kammaren påfördes tryck motsvarande det aktuella suget, varav trycket tvingade vattnet ut ur jorden. Den porösa, keramiska plattan mottog vattnet och ledde det ut genom en ansluten slang. Efter att jämvikt uppstod, vägdes cylindrarna för att bestämma vatteninnehållet. Proverna torkades i värmeskåp (1 dygn i 105 °C), vägdes igen och siktades genom en 2 mm sikt.

För -1500 kPa användes också en tryckkammare av Soil moisture Equipment co, men konstruerad för högre tryck. Den torra, siktade jorden portionerades ut i små plastcyllindrar som var placerade på den keramiska plattan. Cirka 2 teskedar jord hälldes i varje cylinder som sedan mättades med vatten. Trycket påfördes därefter och vid jämvikt togs proverna ut, placerades i plastaskar och vägdes. Proverna torkades därefter ännu en gång (1 dygn i 105 °C) och torrvikten bestämdes.

Vattenhalten vid -1, -5, -10 och -100 kPa beräknades genom att subtrahera vikt av cylinder samt torr vikt från den totala vikten av en bestämd cylinder. Vattenhalten vid -1500 kPa beräknades genom att subtrahera ”råvikt” och torr vikt samt dividera med torr vikt och multiplicera med 100. Motsvarande pordiameter beräknades på följande vis:

(7) Pordiameter = 0,3 / cm vattenpelare

Formel 7 redogörs i detalj av Hillel (2004) och är en förenkling av författarens ursprungliga uttryck. Vidare utfördes även följande beräkningar:

(8) Skrymdensitet = Torrsvikt / 100

(9) Vattenvolym = Mättad jord – torrsvikt

(10) Porvolym = Vattenvolym vid -10 kPa + luftvolym vid -10 kPa

(11) Kompaktdensitet = Torrsvikt / materialvolym

(12) Växttillgängligt vatten = Vattenvolym vid -10 kPa – vattenvolym vid -1500 kPa

3.8.2 Aggregatstorleksfördelning

Aggregatstorleksfördelningen bestämdes enligt Njøs (1967). Aggregaten sorterades med hjälp av 5 stycken galler med olika maskvidd (>20, 6-20, 0,6-2, <0,6 mm). Den uppsamlade jorden för varje maskvidd vägdes för att på så vis beräkna en procentandel utav den totala vikten.

3.8.3 Luftinnehållsmätning

En luftinnehållsmätning utfördes med en luftpyknometer vid en vattenvolym motsvarande -10 kPa (Torstensson & Eriksson, 1936). Volymprocent luft beräknades utifrån en kalibreringskurva utarbetad med hjälp av stålskivor med olika volym.

3.8.4 Luftpermeabilitet

Vid -10 kPa genomfördes också en luftflödesmätning enligt metoden beskriven av Green & Fordham (1975). Permeabiliteten beräknades utifrån formeln:

$$(13) K=V * (l/A) * (N/P)$$

K= permeabilitet

V= luftflöde (cm³/sek)

l= cylinderhöjd (3,7 cm)

N = luftviskositet (0,00018, fuktig luft vid 15°C)

A= provets ytarea (27,03 cm)

P= Tryckskillnad, dyne/cm²

3.8.5 Mineraliserbart kväve

Mängd kväve i nitrat och ammonium i jordproverna bestämdes genom att 40 gram frusen jord först extraherades i 0,1 M KCl. Extraktionerna analyserades därefter genom spektrofotometri med en FIAstar 5000 Analyzer (Foss Analytical AB, 2002).

3.9 Statistisk analys

Rådata utvunnen av växtmaterialet, de jordfysiska mätningarna och markkväveanalysen analyserades med tvåvägs ANOVA i Minitab version 16.1.1. Signifikans uppges i resultatdelen enligt följande symboler (tabell 5).

Tabell 5. p-värden och deras korresponderande symbol använda i uppsatsens resultatdel.

p-värde	Symbol
0,01-0,1	+
0,05-0,01	*
0,01-0,001	**
<0,001	***

4 Resultat

4.1 Markfysiska resultat

De markfysiska egenskaperna som antingen mättes eller beräknades redovisas i tabell 6. Vad gäller total porositet gav det opackade ledet högst porositet på både 4 och 15 cm djup.

Porositeten var dessutom identisk på båda djupen. De övriga behandlingarna gav istället en större porositet i det övre skiktet än i det undre. På 4 cm djup var den relativt likartad och visade ingen statistisk signifikans. Ingen signifikant effekt kunde heller påvisas på 15 cm djup, men en reduktion av porositet kunde ändå anas mellan det opackade ledet, ledet packat en gång med lätt traktor samt ledet packat en gång med tung traktor. Då den tunga traktorn kördes två gånger ökade däremot porositeten.

Av den tillgängliga porositeten var 22-28 % tillägnat luftvolym vid -10 kPa på 4 cm djup. Volymen var förhållandevis lik på 4 cm djup för ledet packat en gång med lätt traktor samt lederna packade av tung traktor med en respektive två överfarter. Det opackade ledet hade högst luftvolym, men variansanalysen understödjer inte detta. Luftvolymen på 15 cm djup tyder däremot på en nedåtgående luftvolym med ökad packning, vilken också stöts av variansanalysen. Det bör dock påpekas att några av cylindrarna fick anmärkningar i samband med luftinnehållsmätningen. Cylindrarna med anmärkningar hade antingen en större mängd håligheter än andra, hade krympt eller hade på annat sätt en mindre jordvolym än övriga cylindrar. Dessa cylindrar var fördelade över samtliga behandlingar samt båda djup och tas därför inte i beaktande. Den mätta luftpermeabiliteten visade sig vara genomgående större i det övre än i det undre skiktet för samtliga packningsbehandlingar. På det opackade ledet var permeabiliteten betydligt större på både 4 och 15 cm djup jämfört med övriga behandlingar. I ledet packat en gång med lätt traktor var permeabiliteten slående liten i både skikt jämfört med övriga packningsbehandlingar. Packning med tung traktor och två körningar gav minst permeabilitet på 15 cm djup.

Skrymdensiteten var lägst i det opackade ledet och identisk för de övriga packningsbehandlingarna på både 4 och 15 cm djup. Den var också lägre i det övre än i det undre skiktet, men icke signifikant. Kompaktdensiteten i det övre skiktet var identiskt för det opackade ledet och de två leden packade en gång med lätt traktor och tung traktor på 4 cm djup. Ledet packat två gånger med tung traktor har gett 0,1 enhet större densitet. På 15 cm djup hade det opackade ledet störst kompaktdensitet och på ledet packat en gång med lätt

traktor hade 0,1 enhet större. Jorden packad en respektive två gånger med tung traktor hade likvärdig kompakt densitet.

Tabell 6. Några markfysiska egenskaper och volymetriska förhållanden för samtliga packningsbehandlingar på 4 och 15 cm djup.

	Packningsbehandling					
	Djup (cm)	A ¹	B ²	C ³	D ⁴	
Porositet (volymprocent)	4	60	59	57	59	is
	15	60	55	51	54	is
Luftvolym, -10 kPa (volymprocent)	4	28	22	23	23	is
	15	23	17	14	13	**
Vattenvolym (volymprocent)	4	54	55	54	55	is
	15	54	52	49	52	is
Luftpermeabilitet (μm^2)	4	120	18	60	53	*
	15	70	19	45	11	is
Torr skrymdensitet (Mg m^{-3})	4	1,1	1,2	1,2	1,2	is
	15	1,2	1,3	1,3	1,3	is
Kompaktdensitet (Mg m^{-3})	4	2,8	2,8	2,8	2,9	is
	15	2,9	2,8	2,7	2,7	+

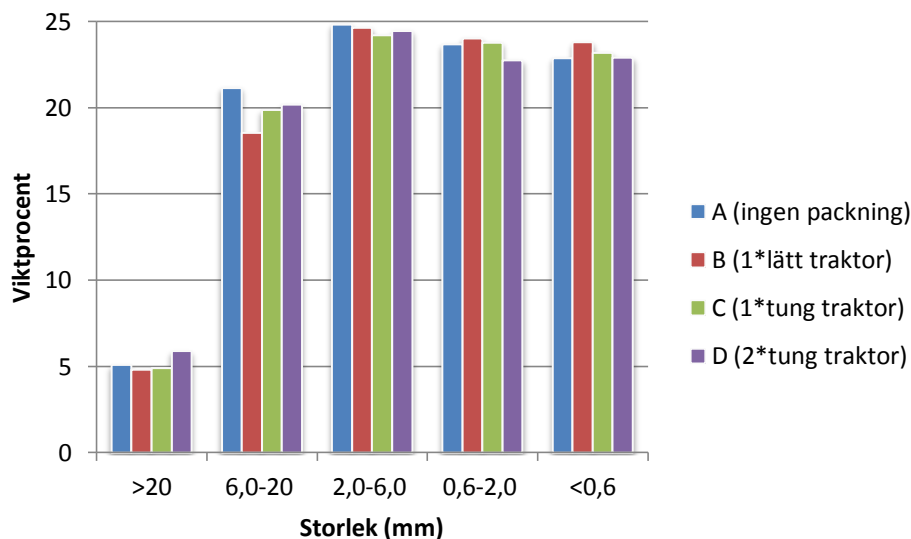
Aggregatstorleksfördelningen (figur 5) visade ingen statistisk signifikans med hänsyn till packningsbehandling. Som figuren också visar är skillnaderna mycket små. I vikprocent utgjorde aggregat i storlek >20 mm runt 5 % för samtliga behandlingar. Packning med tung traktor och två överfarter har till synes gett något större aggregat i denna storleksfraktion än övriga behandlingar. Storleksordning 6-20 mm utgjorde runt 20 % och det opackade ledet gav en något större andel av dessa aggregat än övriga behandlingar. Aggregat i de övriga storleksordningarna utgjorde vardera runt 22-25 % och skillnaderna i packningsbehandling var marginella.

¹ Ingen körning

² En körning hjul-i-hjul med Massey Ferguson 362 (3040 kg)

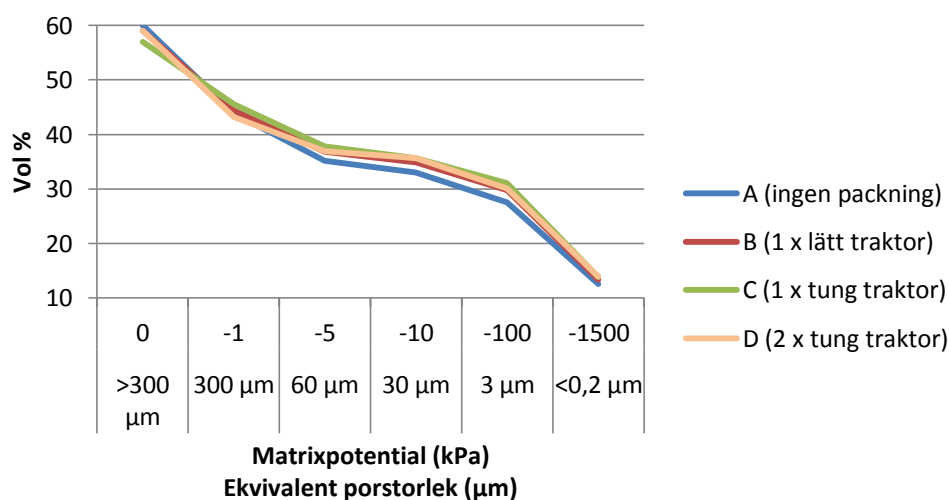
³ En körning hjul-i-hjul med John Deere 6830 (ca 6000 kg)

⁴ Två körningar hjul-i-hjul med John Deere 6830 (ca 6000 kg)



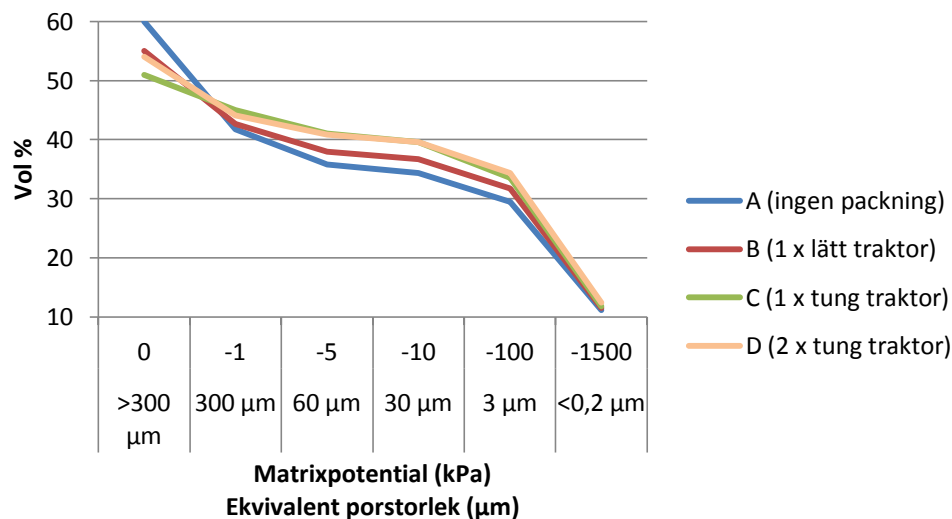
Figur 5. Aggregatstorleksfördelning (>20, 6-20, 2-6, 0,6-2, <0,6 mm) för samtliga packningsbehandlingar. Ingen statistisk signifikans påvisad.

Figur 6 och 7 representerar vattenretentionsegenskaperna för de olika packningsbehandlingarna på 4 och 15 cm djup. På 4 cm djup (figur 6) var retentionsegenskaperna mycket likartade, särskilt på de packade leden följer kurvorna varandra tätt från 0 till -1500 kPa. Det opackade ledet skiljer sig dock ut. Mellan -5 kPa och -100 kPa kan en minskning av återhållet vatten ses jämfört med övriga behandlingar. Figuren visar också att det opackade ledet hade en mindre mängd porer i storleksordning 3-60 μm . Skillnaden mellan opackad och packad behandling utjämnas emellertid vid -1500 kPa och kurvorna samlas igen.



Figur 6. Packningsbehandlingarnas effekt på vattenretentionsegenskaper vid 4 cm djup. Figuren visar mängd återhållet vatten vid olika sug, dess ekvivalenta porstorlek samt porvolym. Samtliga sug är statistisk icke signifikanta.

Jämfört med 4 cm djup skiljde sig packningsbehandlingarna mer på 15 cm djup (figur 7). Här kan effekten av packningsbehandling anas redan vid mättat tillstånd (0 kPa), även om den är icke statistiskt signifikant. Av figuren framgår det att det opackade ledet håller på mer vatten vid ett mättat tillstånd. Tillika har det opackade ledet en större andel stora porer än övriga led, vilket är orsaken till att jorden rymmer mer vatten. När det påfördes sug (-1 kPa) uppstod en plötslig omfördelning. Man kan av figuren ana att de två tyngst packade leden håller på aningen mer vatten än det opackade och det minst packade. När suget ökade till -5 och -10 kPa förstärktes uppdelningen ännu mer. De två tyngst packade leden var jämbördiga och höll på mer vatten, medan det opackade ledet höll minst vatten. Med andra ord hade de två tyngst packade leden en större andel porer mellan 30-60 μm än det opackade och lättaste packade ledet. När suget ökade till -100 kPa visar figuren att andelen porer på 3 μm inte skiljer sig så mycket emellan packningsbehandlingarna. Med ett sug på -1500 kPa sug skiljde de sig ännu mindre då kurvorna samlades igen och någon packningseffekt kunde ej ses.



Figur 7. Packningsbehandlingarnas effekt på vattenretentionsegenskaper vid 15 cm djup. Figuren visar mängd återhållt vatten vid olika sug, dess ekvivalenta porstorlek samt porvolym. Samtliga sug är statistisk icke signifikanta.

Den procentandel vatten tillgänglig för växter på 4 och 15 cm djup redovisas i tabell 7. I det övre skiktet varierade mängden mellan 12-15%, där ledet packat två gånger med tung traktor hade störst mängd och ledet packat en gång med lätt traktor minst mängd. Vattenmängden var generellt större på 15 cm djup och ledet packat en gång med lätt traktor hade störst mängd. Minst mängd hade istället ledet packat två gånger med tung traktor.

Tabell 7. Procent växttillgängligt vatten på 4 och 15 cm djup i samtliga packningsbehandlingar.

	Djup (cm)	Packningsbehandling				
		A	B	C	D	
Växttillgängligt vatten (volymprocent)	4	13	12	13	15	is
	15	16	19	17	15	is

4.2 Markkemiska resultat

Kvävehalterna i de analyserade jordproverna redovisas i tabell 8. Tabellen visar mängden kväve tillgängligt i $\mu\text{g}/100$ g torr jord. Men också markens aktuella nitrat- ($\text{NO}_3\text{-N}$), ammonium- ($\text{NH}_4\text{-N}$) och total N-minstatus i jorden som en procentandel av halten vid Zadoks 0. Procentandelen tar ej hänsyn till eventuella vinster och förluster av kväve genom kväveomvandlande processer, utan har endast som syfte att ge ett jämförbart värde mellan behandlingarna.

Vad beträffar nitralthalterna, var dessa genomgående högre än ammoniumhalterna vid försökets start (Zadoks 0). Mängden nitrat tillgänglig i början av säsongen varierade från 420-478 $\mu\text{g}/100$ g torr jord medan ammoniumhalterna låg på 110-149 $\mu\text{g}/100$ g torr jord. Vid Zadoks 31 hade mängden minskat och under 20 % av den ursprungliga mängden nitrat fanns tillgängligt vid samtliga packningsbehandlingar. Endast 2-3 % fanns tillgängligt vid Zadoks 59 och någon skillnad mellan packningsbehandling kunde inte påvisas.

Vad gäller ammonium varierade jordens eget bidrag vid säsongens begynnelse mellan 110-149 $\mu\text{g}/100$ g torr jord. Vid Zadoks 31 fanns mellan 69-86 % ammonium tillgängligt, med störst tillgänglig mängd i det tyngst packade ledet. Vid Zadoks 59 hade detta led istället minst ammonium tillgängligt (60%) och det näst tyngst packade ledet störst mängd (77%). Total N-min vid säsongens start låg på 542-626 $\mu\text{g}/100$ g torr jord. Vid Zadoks 31 hade det näst tyngst packade ledet resulterat i störst reduktion och det tyngst packade ledet minst reduktion. Vid Zadoks 59 var det istället behandling D som hade minst andel tillgängligt kväve och behandling B mest.

Tabell 8. Procent återstående samt $\mu\text{g}/100$ g nitrat, ammonium och total N-min vid Zadoks 0, 31 och 59 för samtliga packningsbehandlingar (prover tagna på 20 cm djup). Tabellen visar också statistisk signifikans för nitrat, ammonium och N-min vid samtliga Zadoksstadier.

	NO₃-N		NH₄-N		N-min	
	Aktuell NO ₃ -N status	$\mu\text{g}/100$ g torr jord	Aktuell NH ₄ -N status	$\mu\text{g}/100$ g torr jord	Aktuell N-min status	$\mu\text{g}/100$ g torr jord
A¹						
Zadoks 0	100	431	100	110	100	542
Zadoks 31	18	78	85	94	32	172
Zadoks 59	2	10	72	79	17	90
B²						
Zadoks 0	100	420	100	144	100	564
Zadoks 31	12	49	69	99	26	148
Zadoks 59	2	10	66	95	19	105
C³						
Zadoks 0	100	475	100	112	100	587
Zadoks 31	11	51	70	78	22	130
Zadoks 59	3	12	77	87	17	99
D⁴						
Zadoks 0	100	478	100	149	100	626
Zadoks 31	17	80	86	127	33	207
Zadoks 59	2	11	60	90	16	101
Signifikans	NO₃-N		NH₄-N		N-min	
Zadoks 0	is		+		is	
Zadoks 31	is		+		is	
Zadoks 59	is		Is		is	

¹ Ingen körning

² En körning hjul-i-hjul med Massey Ferguson 362 (3040 kg)

³ En körning hjul-i-hjul med John Deere 6830 (ca 6000 kg)

⁴ Två körningar hjul-i-hjul med John Deere 6830 (ca 6000 kg)

4.3 Växternas utveckling, kväveupptag och avkastning

Det genomsnittliga antalet plantor räknade vid Zadoks 12 med kvävegödsling som huvudeffekt framgår av tabell 9. Antalet varierar från 338-377 stycken per m² och ingen statistisk signifikans med hänsyn till kvävenivå kunde påvisas. I samband med Zadoks 37, då antalet sidoskott bestämdes har dock gödslingsnivå gett statistisk signifikans. Antalet sidoskott ökade kraftigt mellan 0 och 7 kg N daa⁻¹, för att sedan öka i moderat takt då 11 och 15 kg N daa⁻¹ tillfördes. Gödselnivå hade även inverkan på antalet skott som senare under säsongen övergick till att bli axbärande. Antalet axbärande skott ökade då stadigt med ökad kvävegödsling. Om man förutsätter att inga fler sidoskott producerades efter Zadoks 37 och att samtliga av dessa producerade ax, kan antalet vissnade sidoskott beräknas. I tabell 9 redovisas procentandelen vissnade sidoskott, där nollgödslingsledet gav det minsta antalet. De övriga kvävegivorna resulterade i ett liknande antal vissnade skott och någon statistisk signifikans påvisas ej. Vad gäller den genomsnittliga beståndshöjden, ökade den signifikant med ökad gödslingsgiva, från 42 cm upp till 79 cm. Skördeindex är ej statistiskt signifikant, men antyder ändå en liten ökning vid den högsta gödslingsnivån.

Efter skörd bestämdes antal korn per ax, hektolitervikt, 1000-kornvikt och total avkastning. Samtliga egenskaper påverkades signifikant av kvävenivån och en ökning inträffade då kvävegivan ökade. Antal korn per ax ökade stort då kvävegivan gick från 0 till 7 kg N daa⁻¹, medan övriga gödselnivåer gav en mindre markant ökning. En ökning i kvävegiva gav liknande respons på hektolitervikt, 1000-kornvikt och total avkastning. Skillnaderna i hektolitervikt, 1000-kornvikt och avkastning var som störst mellan nollgödslingsledet och ledet tilldelat 7 kg N daa⁻¹. Mellan 7 och 15 kg N daa⁻¹ var ökningen i hektolitervikt och 1000-kornvikt beskeden, medan total avkastning ökade desto mer. För den totala avkastningen gav nollgödslingsledet 138 kg daa⁻¹, medan 15 N daa⁻¹ gav hela 424 kg daa⁻¹.

Tabell 9. Plantornas respons på utveckling, avkastning och kvalitet i förhållande till gödslingsgiva.

	Kg N daa⁻¹				
	0	7	11	15	
Antal plantor vid Zadoks 12 (m ²)	364	349	377	338	is
Antal sidoskott vid Zadoks37 (m ²)	56	279	281	332	***
Totalt antal skott vid Zadoks 37	420	628	658	670	***
Antal axbärande skott vid Zadoks 77 (m ²)	342	373	416	423	***
Andel vissnade skott (%)	19	41	37	37	is
Höjd vid mogning (cm)	42	68	74	79	***
Antal kärnor per ax	13	25	25	27	***
Skördeindex	0,55	0,55	0,55	0,56	is
Hektoliter (kg hl ⁻¹)	59	62	63	64	***
1000-kornvikt (g)	31	34	35	36	***
Avkastning (kg daa ⁻¹)	138	323	364	424	***

Tabell 10 visar genomsnitt baserat på packningsbehandling som huvudeffekt. Resultaten var inte signifikanta i något tillfälle, men sämre resultat kan anas då packningen ökade och särskilt för det tyngst packade ledet. Genomsnittet visar ingen tydlig nedåtgående trend med ökad packning då det näst tyngst packade ledet gav goda resultat i de flesta avseenden. Men för samtliga egenskaper förutom höjd och tusenkornvikt gav den tyngsta packningen sämst resultat. Vad gäller den totala avkastningen handlar det om en reduktion på drygt 100 kg daa⁻¹ mellan det opackade ledet och det mest packade (A¹ och D⁴). Det bör också läggas märke till att den näst tyngsta packningen har gett flest antal sidoskott, totalt antal skott, total avkastning och delvis också axbärande skott.

Tabell 10. Plantornas respons på utveckling, avkastning och kvalitet i förhållande till packningsbehandling.

	Packningsbehandling				
	A ¹	B ²	C ³	D ⁴	
Antal sidoskott (m ²)	240	232	267	210	is
Totalt antal skott (m ²)	575	600	621	580	is
Antal axbärande skott (m ²)	375	397	397	385	is
Höjd vid mogning (cm)	69	67	69	59	is
Antal kärnor per ax	25	23	24	19	is
Totalt antal korn (m ²)	9375	9131	9528	7315	is
1000-kornvikt (g)	33	32	33	32	is
Hektoliter (kg hl ⁻¹)	62	62	62	61	is
Avkastning (kg daa ⁻¹)	355	360	371	267	is

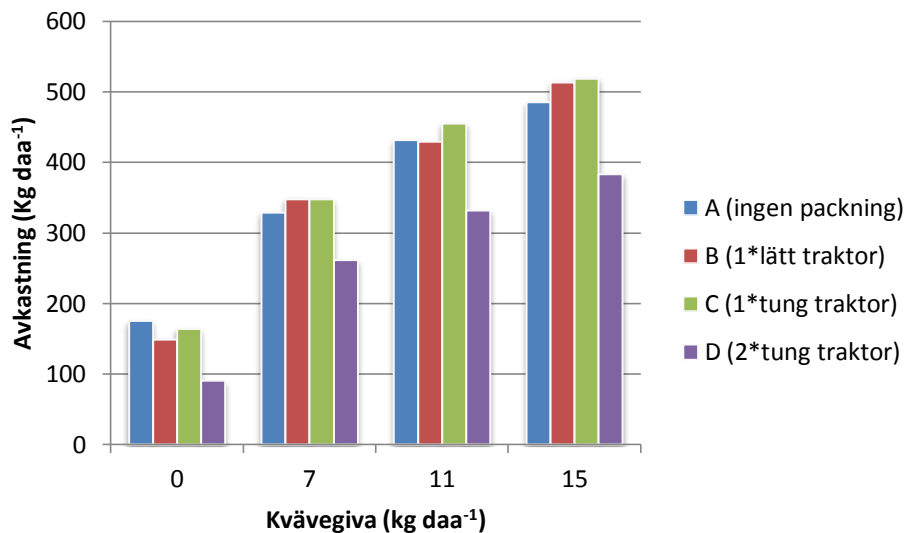
¹ Ingen körning

² 1 körning hjul-i-hjul med Massey Ferguson 362 (3040 kg)

³ 1 körning hjul-i-hjul med John Deere 6830 (ca 6000 kg)

⁴ 2 körningar hjul-i-hjul med John Deere 6830 (ca 6000 kg)

Samspelseffekten mellan kvävenivå och packningsbehandling på avkastning (icke signifikant) illustreras i figur 8. Opackat led, led packat med lätt traktor och led packat en gång med tung traktor gav likvärdig respons vid alla kvävegivor. Packning utförd med tung traktor och två körningar har däremot tydligt reducerat avkastningen. På nollgödslingsledet nästan halverade den tyngsta packningen avkastningen jämfört med det opackade ledet. När 11 och 15 kg N daa⁻¹ tilldelades var skillnaden i avkastning 120 respektive 130 kg N daa⁻¹.



Figur 8. Responsen av gödselgiva och packningsbehandling på avkastning.

Den genomsnittliga kvävehalten i det analyserade mjölet antydde en ökning med ökad kvävegiva (tabell 11). Det är dock anmärkningsvärt att kvävenivån var lika stor i både det ogödslade ledet och ledet tilldelat 7 kg N daa⁻¹. Vad gäller kvävehalten i halmen var denna icke statistiskt signifikant och varierade mellan 0,48% och 0,52 %. Då kvävet i mjöl och halm slogs ihop till N totalt, visade dock denna på en signifikant ökning med tilltagande kvävegiva.

Stärkelsehalten i kärnorna var mycket jämn, men med ett något större innehåll i nollgödslingsledet. Proteinhalten varierade mer och hade även här störst nivå i nollgödslingsledet medan lägst nivå uppmättes då 7 kg N daa⁻¹ tilldelades. I samband med att försöksfältet skördades mättes vattenhalterna i spannmålet. Högst halt hade nollgödslingsledet på 31,5 % och lägst halt uppmättes i rutor gödslade med 11 kg N daa⁻¹ (24,8 %).

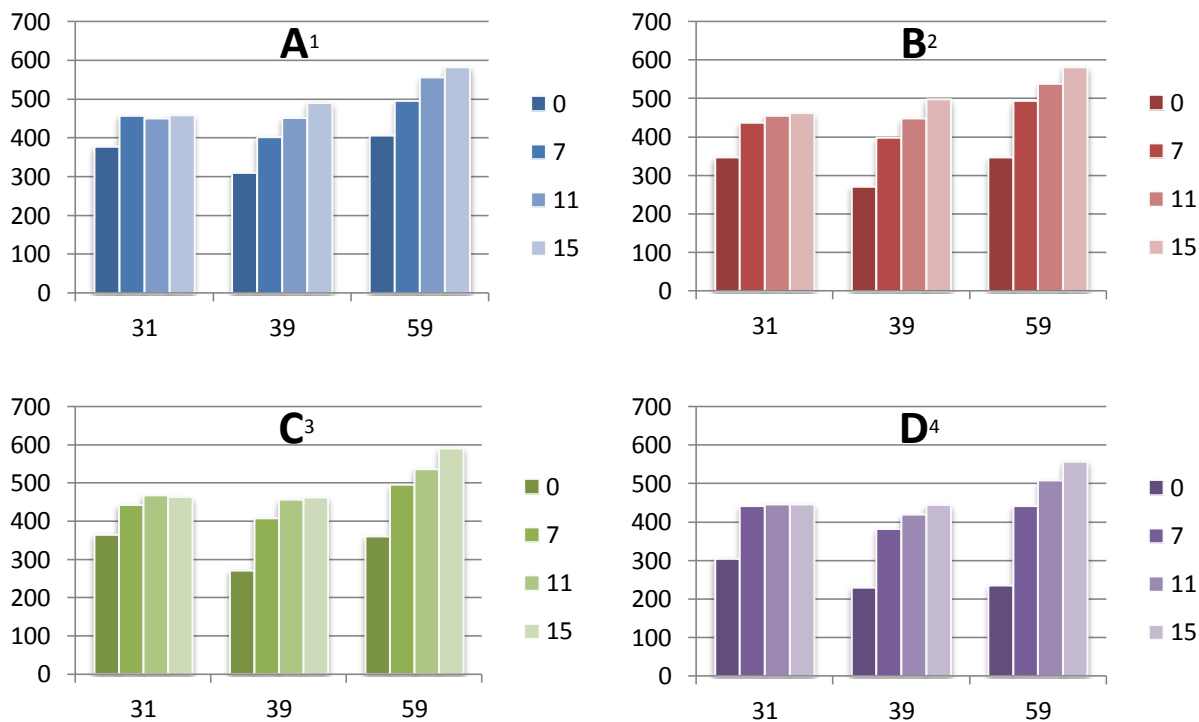
Tabell 11. Kemiskt innehåll i kärnor och halm i förhållande till gödselgiva.

	Kg N daa ⁻¹				
	0	7	11	15	
N i mjöl (%)	1,3	1,3	1,4	1,5	***
N i halm (%)	0,50	0,48	0,51	0,52	is
N totalt (%)	1,8	1,8	1,9	2,1	***
Stärkelsehalt (%)	55	54	54	54	**
Proteinhalt (%)	10,3	9,1	9,6	10,1	***
Vattenhalt vid skörd (%)	31,5	25,5	24,8	25,4	***

Figur 9 visar resultat från N-testermätningar vid Zadoks 31, 39 och 59 på samtliga packningsbehandlingar (A-D) och gödselgivor (0-15 kg N daa⁻¹). På samtliga packningsbehandlingar där 0 och 7 kg N daa⁻¹ tilldelades sjönk N-testervärdet mellan Zadoks 31 och Zadoks 39, för att sedan stiga till maxnivå vid Zadoks 59. Då 11 kg N daa⁻¹ tilldelades kunde samma mönster antydast, men ej lika markant jämfört med föregående gödselnivåer. Med 15 kg N daa⁻¹ var N-testervärdet i stort sett likt mellan Zadoks 31 och 39 på samtliga packningsbehandlingar. Vid Zadoks 59 steg dock värdet betydligt.

Vid Zadoks 31 var N-testervärdena förhållandevis likvärdiga med 7, 11 och 15 kg N daa⁻¹, medan nollgödselingsledet gav dock betydligt lägre värden. Skillnaden mellan gödselnivåerna utmärker sig ännu tydligare senare i säsongen vid Zadoks 39 och 59. Detta återspeglas också av variansanalysen (tabell 12) som indikerar statistisk signifikans för dessa stadier.

Variansanalysen pekar även på att packningsbehandling samt samspelet mellan packning och gödselnivå har påverkat utfallet. Av bilaga 2, tabell 13 framgår det också att packning med tung traktor och två körningar överlag har gett lägst N-testervärde. För Zadoks 59 bevisas även detta av variansanalysen.



Figur 9. N-testvärde vid Zadoks 31, 39 och 50 vid samtliga gödselgivor och packningsbehandlingar.

¹ Ingen körning

² 1 körning hjul-i-hjul med Massey Ferguson 362 (3040 kg)

³ 1 körning hjul-i-hjul med John Deere 6830 (ca 6000 kg)

⁴ 2 körningar hjul-i-hjul med John Deere 6830 (ca 6000 kg)

Tabell 12. Statistisk signifikans för N, packning och samspel mellan packning och kväve vid Zadoks 31, 39 och 59.

Zadoks	N	Packning	N*Packning
31	***	is	is
39	***	is	is
59	***	*	**

5 Diskussion

5.1 Markfysiska resultat

5.1.1 Volymetriska och markfysiska egenskaper

När mark övergår från ett poröst till ett packat tillstånd är det framför allt luftfylld porvolym och porstorleksfördelning som förändras. Den luftfyllda porvolymen förväntas vara mindre i djupare skikt än i grundare. Den förväntas också minska vid mer kompakta tillstånd och porstorleksfördelningen antas förskjutas från större porer till mindre porer. Denna förändring bedömdes i detta försök genom den torra skrymdensitet, luftfylld porvolym vid fältkapacitet, total porositet samt porstorleksfördelning.

Den totala porositeten beräknades utifrån en luftpyknometermätning vid -10 kPa och från vattenvolymen vid -10 kPa. I ett försök av Lipiec et. al (2012) orsakade ökad packning en minskning av luftfylld porvolym och ett liknande resultat var väntat även i detta försök. Resultatet visade också en avtagande porositet för de två lättaste packningsbehandlingarna jämfört med det opackade ledet. Den tyngsta packningen gav dock lika stor porositet som den lättaste packningsbehandlingen och motverkar därför den förväntade teorin. Resultatet kan kanske delvis förklaras med att porerna övergick från makrostorlek till mikrostorlek och att den totala porositeten faktiskt inte minskade så mycket. Men resultatet kan nog huvudsakligen förklaras av den luftfyllda porvolymen som porositeten är beräknad ifrån. Den luftfyllda porvolymen mättes med en luftpyknometer och misstänks i detta tillfälle ha överestimerat den luftfyllda porvolymen. Överestimeringen kan antingen bero på inkorrekt mätningsutförande eller oönskade håligheter i proverna.

En luftpyknometer mäter den luftfyllda porvolymen under ett visst fuktighetstillstånd. Denna kan lätt påverkas av eventuella håligheter, sprickor eller om jorden har krympt vid. Förutom krympningen kan dessa hål visserligen vara en naturlig del av strukturen, såsom mask- och rotkanaler. Men cylindrarna är endast 100 cm³ stora, vilket gör att håligheter ger en icke representativ bild av den aktuella jordstrukturen. Istället överestimeras den luftfyllda porvolymen och samtidigt sker även en underestimering av det fasta materialets volym. Volymen av det fasta materialet redovisas inte i detta arbete, men beräknas enkelt som 100 - porositeten. Volymen av det fasta materialet ligger dock som grund till kompaktdensitetsberäkningen och genom denna kan trovärdigheten av den uppmätta porvolymen bedömas. Om porvolymen genom luftpyknometermätningen överestimeras,

skattas därmed materialvolymen för lågt och ger utslag som hög kompaktdensitet. Det motsatta gäller också om porvolymen skattas för lågt.

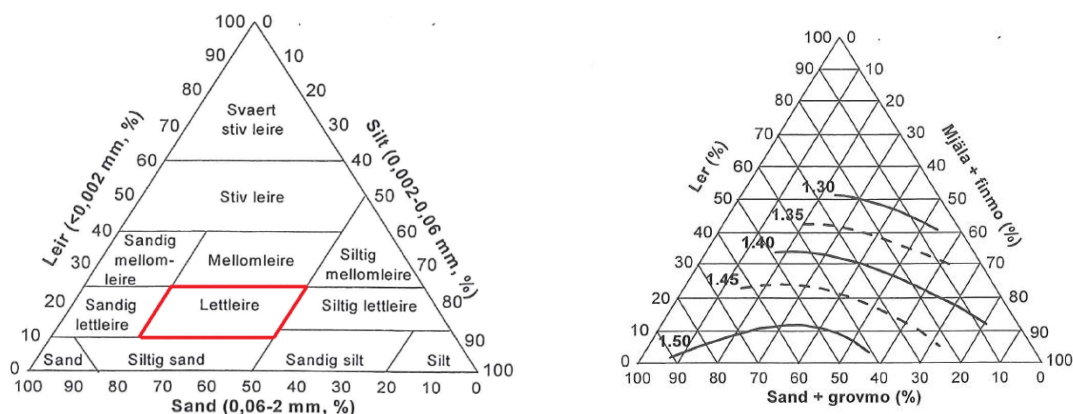
Kompaktdensiteten definieras som jordpartiklarnas massa per volymenhet och bestäms av mineralsammansättning och innehåll av organiskt material (Brady & Weil, 2004).

Kompaktdensiteten på försöksfältet förväntades vara densamma över hela området då det fasta materialet förutsätts vara av identisk sammansättning. Men den beräknade kompaktdensiteten i detta försök låg snarare mellan 2,7-2,9 Mg m⁻³. Brady & Weil (2004) uppger att kompaktdensiteten för de flesta mineraljordar ligger mellan 2,6-2,75 Mg m⁻³, vilket gör de beräknade värdena för höga i detta tillfälle. Således antas materialvolymen vara underestimerad och luftfylld porvolym samt porositet överestimerad i åtminstone de behandlingar vars kompaktdensitet beräknades till 2,9 Mg m⁻³. Detta gäller på det opackade ledet på 15 cm djup samt det tyngst packade ledet på 4 cm djup. Att dessa värden är överestimerade uppfattas som mycket sannolikt eftersom de också i stor grad förvränger den bild av porositeten som förväntades.

Vad gäller den luftfyllda porvolymen så uppfattas proportionerna mellan djupet som förnuftiga. Det vill säga att porvolymen var större i det övre skiktet än i det undre. I det undre skiktet uppfattas också proportionerna mellan packningsbehandlingarna som rimliga, i linje med vad som förväntades och är dessutom statistiskt signifikanta. I det övre skiktet fick de tre packade leden en mycket likartad luftfylld porvolym, vilket kan tyda på att packningen hade mindre effekt på skiktet nära ytan. Men värdena är också generellt höga om man jämför med exempelvis Njøs (1978) och Marti (1983) som uppmätte 12% respektive 9% luftfylld porvolym (-10 kPa) på opackade led (10-15 cm djup) på en siltiga mellanleror. Samtliga värden ligger över den tidigare nämnda 10%-gränsen definierad av Stepniewski et. al (1994). Men de befinner sig dock inom det intervall som anses kunna vara begränsande för rötternas respiration.

Vad beträffar skrymdensiteten beräknas den som vikt per volymenhet, där vikten avtar med ökad porvolym och ger lägre densitet. I detta försök var densiteterna mycket lika och ingen signifikant effekt av packning kunde påvisas. Generellt var densiteterna större på 15 cm djup än på 4 cm djup, vilket anses rimligt eftersom även porositeten var mindre på 15 cm djup. Lägst densitet återfanns på det opackade ledet, vilket var väntat eftersom jorden antagligen var mer lucker och därför att porositeten även var stor där. Porositeten var dock identisk på båda djup, vilket inte skrymdensiteten var.

Brady & Weil (2004) påstår att skrymdensiteten för kultiverade lättlorer och siltiga lättlorer befinner sig inom $0,9-1,5 \text{ Mg m}^{-3}$, vilket placerar densiteterna i detta försök ungefär i mitten av deras intervall. Huruvida densiteterna i detta försök är stora eller små och i jämförelse med andra undersökningar är svårt att anslå. En och samma skrymdensitet är inte jämförbar mellan olika jordarter då de inte nödvändigtvis har samma effekt på växterna. På figur 10 kan det avläsas att ju mer fint material en jord består av, desto lägre densitet är optimal för grödor. För att jämföra skrymdensiteter undersökningar emellan är det därmed nödvändigt att jordarten är förhållandevis lik. Jordarten i detta försök var en lättlera vilket enligt figur 10 motsvarar en optimal skrymdensitet på cirka $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$. Med hänsyn till det är skrymdensiteterna i detta försök knappast för stora, utan kunde med fördel ha varit större.



Figur 10 Jordartstriangel med försöksfältets aktuella jordart rödmarkerad samt motsvarande triangel för optimal skrymdensitet (Håkansson, 2000).

För underlätta jämförelser med skrymdensiteter från andra undersökningar, kunde ett referensvärde ha bestämts. Det kunde exempelvis ha blivit gjort genom en beräkning av den procentuella skrymdensiteten av densamma jordens skrymdensitet packat på laboratorie med 200 kPa tryck (Håkansson, 1990). Denna standardisering ger vad som kallas packningsgrad och tillåter likt andra standardiseringar, jämförelser mellan jordarter samt underlättar tolkning (Campbell, 1994; Riley, 1983).

Den uppmätta luftpermeabiliteten förväntades avta med ökad packning som Stepniewski (1994) hävdade. Men resultatet visade överaskande nog att den lättaste packningen gav minst luftpermeabilitet i det övre skiktet och en mycket låg permeabilitet i det undre. Samtidigt gav det opackade ledet störst permeabilitet, och denna var också betydligt större än övriga behandlingar. Luftpermeabiliteten beror som tidigare nämnt på luftfylld porvolym och kontinuitet utav dessa. Tang et. al (2011) bevisade också att permeabiliteten avtog då den

luftfyllda porvolymen minskade och antalet vattenfyllda porer ökade. Resultatena i detta försök visar inga tydliga paralleller mellan varken luftpermeabilitet, luftfylld porvolym eller vattenvolym. Huvudsakligen beror det på den mycket låga permeabiliteten i behandling B som inte kan relateras till varken låg luftfylld porvolym eller porositet. Skillnaderna i luftpermeabilitet mellan packningsbehandlingarna var också mycket större jämfört med skillnaderna av luftfylld porvolym och porositet. Eftersom den låga permeabiliteten i det lättast packade ledet inte kan förklaras utifrån varken luftfylld porvolym eller vattenvolym, kan det tänkas att den beror på dålig kontinuitet av porerna. Att bedöma kontinuiteten, och till stor del också jordens struktur är svårt utifrån endast denna mätning. Det bör också nämnas att permeabiliteten mättes vid samma tillfälle som den luftfyllda porvolymen. Därför kan man anta att håligheter som antagligen orsakade en överestimering av den luftfyllda porvolymen även har påverkat permeabiliteten. Återigen gäller detta det opackade på 15 cm djup samt det tyngst packade ledet på 4 cm djup.

Skillnaderna i aggregatstorleksfördelning var mycket små mellan packningsbehandlingarna. Men den tyngsta packningen gav ändå en lite större andel av aggregat >20 mm. Denna ökning var dock inte en lika stor som den Bakken et. al (1987) eller Marti (1983) observerade. Bakken et. al (1987) kunde notera en fördubbling av aggregat större än 20 mm när en lättlära packades under våta förhållanden (29 % vatteninnehåll) med både en lätt (1800 kg) och en tung traktor (4800 kg). Marti (1983) och Arvidsson & Håkansson (1996) såg också en ökning av stora aggregat och delvis även en minskning av små aggregat vid packning. Det kunde kanske ha förväntats att man med tyngre traktorer som i föreliggande försök, och med liknande vattenhalt och jordart, borde fått större eller liknande effekt som Bakken et. al (1987). Resultatet tyder därför på att jordens strukturstyrka var bättre i detta försök än i det tillhörande Bakken et. al (1987). Det bör också påpekas att försöket tillhörande Arvidsson & Håkansson (1996) och även Marti (1983) var långsiktiga fältförsök med data från flera år med upprepad packning. I övrigt var cirka tre fjärdedelar av aggregaten 2 mm eller mindre för alla behandlingar. Med hänsyn till resultat uppnådda av Håkansson & von Polgár (1977) bör en så pass stor andel små aggregat ha skapat goda förutsättningar för groningen och uppkomst av plantor.

5.1.2 Vattenretentionsegenskaper

Skillnaden i vattenretentionsegenskaper på 4 cm djup var mycket små mellan behandlingarna, vilket indikerar att packningen inte märkbart har påverkat porstorleksfördelningen. Detta stämmer överens med den luftfyllda porvolymen som inte heller varierade särskilt mycket mellan behandlingarna. Det opackade ledet tenderar dock att utmärka sig mellan -5 och -100 kPa genom att hålla mindre vatten. Det är också inom just detta område som packningseffekt kan detekteras bäst (Hillel, 2004). Därmed verkar det opackade ledet ha varit betydligt mer luckert än de packade och att de packade leden hade en större volym av porer inom 3-60 μm .

Effekten av packning utmärkte sig istället mer på 15 cm djup. Det är också i likhet med den luftfyllda porvolymen, där skillnaderna mellan behandlingar var större på 15 cm djup än på 4 cm djup. I mättat tillstånd hade det opackade ledet en större andel porer $>300 \mu\text{m}$ än övriga packningsbehandlingar. Det näst tyngst packade ledet hade istället minst antal porer i samma storleksordning. Det uppfattas som helt korrekt att det opackade ledet har fler stora porer än de packade eftersom ett flertal studier har bevisat att packning medför en reduktion av grova porer (Hofstra et al., 1986; Håkansson, 2000; Rasmussen, 1976). Håkansson (2000) menar också att makroporerna som krossas i packningen ofta övergår till att bli små och medelstora porer. Det har också inträffat i detta tillfälle, då man på figur 7 kan avläsa en större mängd medelstora porer på de två tyngst packade leden än på det opackade och lättast packade ledet. När suget ökade till -100 och särskilt till -1500 kPa avtog en synlig effekt av packning. Som Hillel (2004) påpekar, beror detta på att kapillära krafter inte längre har lika stort inflytande på retentionsegenskaperna. Det är snarare texturen som spelar roll, och i detta fall är jordarten densamma på samtliga behandlingar, vilket då inte ger utslag på vattenretentionen.

Vad gäller de två tyngsta packningsbehandlingarna, var det väntat att dessa skulle skilja sig mer från varandra då detta var intentionen med försöksupplägget. Men resultatet stämmer med de övriga markfysiska undersökningarna, som inte heller har påvisat någon stor skillnad dessa behandlingar emellan.

Av det växttillgängliga vattnet som beräknades verkar det som att en större andel vatten är tillgänglig på 15 cm djup än på 4 cm djup. Det anses vara helt riktigt eftersom andelen porer som kan erbjuda vatten till växter var större på 15 cm djup än på 4 cm djup.

5.1.3 *Samlad bedömning av markfysiska resultat*

Av de analyser och beräkningar som har utförts har väldigt få resultat pekats på signifikant effekt. Behandlingarna bedöms därmed som mycket osäkra och skapar inga goda bedömningsunderlag av de olika packningstillstånden. Det kan dock anas trender bland resultaten och detta gäller särskilt det opackade ledet. Det opackade ledet har fått störst porositet, luftfylld porvolym, luftpermeabilitet och lägst skrymdensitet. Det har dessutom en större andel makroporer på 15 cm djup än de packade behandlingarna. Samtliga av dessa egenskaper tyder på att detta led skiljer sig från de övriga behandlingarna, trots bristande signifikans. Det bör också påpekas att split plot-designen som detta försök är baserad på, består av storrutor (packning) och smårutor (gödsling), varav antalet storrutor var väldigt få i förhållande till smårutor. Det skapar därmed osäkerhet kring storrutorna som begränsar antalet frihetsgrader. Därför måste en mycket större skillnad mellan storrutorna existera för att den ska vara statistisk signifikant (Forkman, 2011).

För de tre packningsbehandlingarna framgår ingen tydlig effekt av packningen. Resultaten av porositet, luftfylld porvolym och luftpermeabilitet varierar mycket mellan behandlingarna och ingen behandling utmärker sig som den mest eller minst packade. Det kan möjligtvis bero på att jordstrukturen på det aktuella försöksområdet faktiskt var god och därmed motståndskraftig mot packning. Att jordstrukturen var god kan delvis antydast genom aggregatstorleksfördelningen. Packning ledde inte till någon stor förändring av aggregatstorleksfördelningen, vilket indikerar en viss styrka hos aggregaten. Vidare bör det påpekas att packningen efterföljdes av både harvning och sådd, vilket är operationer som luckrar jorden. Särskilt på 4 cm djup är detta en trolig orsak till att packningsbehandlingarna visar små och/eller inga skillnader. Håkansson (2000) nämner också att den första traktoröverfarten på en lucker jord är mest betydelsefull då den resulterar i en relativt stor volymförändring. Efterföljande överfarter ger inte samma volymminskning utan kräver en fördubbling av överfarter för att uppnå samma packningseffekt. Detta förhållande kan mycket väl vara orsaken till att packningen inte gav önskat utslag i detta försök. Särskilt mellan de två tyngsta packningarna kan det vara gällande. Dessa packades med samma traktor fast med enbart en respektive två överfarter.

5.2 Markkemiska resultat

Kväveanalysen som utfördes i jordproverna visar att mängden nitrat minskade kraftigt mellan Zadoks 0 och 31 på samtliga packningsbehandlingar. Antagligen beror detta huvudsakligen på plantornas upptag eftersom de har ett stort näringsbehov under denna period. Men en del av nitraten går oundvikligen andra öden till mötes, däribland denitrifikation och utlakning. Nederbörds mängden var stor under hela växetsäsongen och en del av nitraten har sannolikt läckt ut med dräneringsvatten. Hur stor andel det gäller är omöjligt att estimera eftersom man kan förutsätta en ständig nitrifikation och därav en påfyllning av nitrat. Men utlakningen stod troligtvis för en större nitratförlust än vad eventuellt denitrifikation gjorde. Denitrifikation kräver ett anaeroft tillstånd som skapas på grund av liten luftfylld porvolymen eller en ökande vattenhalt i marken. Trots mycket nederbörd så antyder de markfysiska analyserna att dräneringsförhållandena var goda i matjordslagret. Därför antas denitrifikationen i detta tillfälle vara obetydlig.

Mängden ammonium minskade också mellan Zadoks 0 och 31, men inte lika kraftigt som nitratmängden. Att ammoniumreduktionen var mindre berodde troligtvis på en kontinuerlig mineralisering som möjligtvis också föregick hastigare än nitrifikationen. Men den huvudsakliga orsaken tros vara att ammonium binder till jordpartiklar i större utsträckning än nitrat, vilket gör det mindre utsatt för utlakning.

Vid Zadoks 59 hade både ammonium- och nitrathalten minskat ytterligare, men precis som föregående period minskade nitraten mer än ammoniumet. Nitralthalten var vid Zadoks 59 mycket låga och var antagligen inte den primära kvävekällan för plantorna längre. Enligt Havlin et. al (2005) är en blandning av både nitrat och ammonium optimalt för att stimulera till upptag, vilket innebär att upptaget vid denna period kan ha begränsats. Vad gäller ammoniumreduktionen så minskade denna för alla led förutom det näst tyngst packade. Där steg istället ammoniumhalten vilket kan tyda på en netto mineralisering vid denna tidpunkt, men beror mer sannolikt på en tillfällighet.

Vad gäller den totala mängden mineraliserbart kväve var skillnaderna mellan packningsbehandling icke signifikant för samtliga utvecklingsstadier. Zadoks 0 motsvarade anläggning och sådd av fältet och upptag av växtrötter hade ännu inte startat vid det laget. Zadoks 0 med dess tillhörande kvävekoncentrationer kan därför betraktas som helt beroende av alla tänkbara kväveomvandlande processer. Packningsbehandling hade därmed ingen inverkan på dessa processer vid Zadoks 0 och de markfysiska analyserna och beräkningarna

bekräftar också detta. Vid Zadoks 31 och 59 påverkades kvävekoncentrationen av både kväveomvandlande processer, men även av växtrötternas upptag vilket gör resultatet mer svårbedömt. Enligt den statistiska analysen hade inte packning effekt på kvävekoncentrationen. Men på grund av att växternas upptag inverkar på koncentrationen kamoufleras packningseffekten på de kväveomvandlande processerna. Det kan därför inte uteslutas att packningen var effektlös. Men samtidigt tyder de markfysiska analyserna och beräkningarna på att en sådan effekt inte förlåg.

Om man förutsätter att de kväveomvandlande processerna var lik för samtliga packningsbehandlingar, kan man därför också utgå ifrån att rötternas upptag var likvärdigt. Det innebär i så fall att packningsbehandlingarna inte hämmade rotutvecklingen och näringsupptag som påvisat av Gaheen & Njøs (1978). Men det bör nämnas att jordproverna i denna undersökning togs på endast 0-20 cm djup, vilket antagligen bara visar delar av kvävesituationen i jorden. Nitrat är så pass rörligt i marken att stora mängder kan påträffas längre ner i profilen. Soper et. al (1971) fann att nitratkoncentrationen på 61 cm djup korrelerade bäst med avkastningen i deras försök. Samma djup är också vanligt att ta jordprover på i samband med kvävekartering (Eurofins, 2012)

5.3 Växternas utveckling, kväveupptag och avkastning

5.3.1 N-tester

Plantornas klorofyllnivå mättes med en N-tester vid Zadoks 31, 39 och 59. Resultatet visar att N-testervärdet minskade i alla packningsbehandlingar mellan Zadoks 31 och 39 för nollgödslingsledet och delvis även ledet gödslat med 7 kg N daa⁻¹. Vid Zadoks 59 ökade värdet i nollgödslingsrutorna för samtliga packningsbehandlingar förutom det tyngsta. Den tyngsta packningsbehandlingen gav i nollgödslingsledet nästan identiska N-testervärden mellan Zadoks 39 och 59, som dessutom var lägre än för de andra packningsbehandlingarna. Det verkar därmed som att den tyngsta packningen förstärkte effekten av kvävebrist, som inte de andra packningsbehandlingarna gjorde. Enligt N-minanalysen fanns dock lika mycket kväve tillgängligt i det tyngst packade ledet som på de andra. Men kvävereduktionen var betydligt större för den tyngsta packningsbehandlingen (106 µg/100 g) än för de andra behandlingarna mellan Zadoks 31 och 59 (82, 43 och 31 µg/100 g). Med hänsyn till det och till att klorofyllnivån i plantorna ändå var så låg i detta led misstänks kvävereduktionen (N-min) ha berott mer på denitrifikation eller utlakning, än på upptag av rötter.

Klorofyllnivån var relativt likvärdig vid Zadoks 31 för alla de led som tilldelades gödsel, även vad gäller packningsbehandling emellan. Först vid Zadoks 39 kan en effekt av kvävegiva urskiljas genom att högre giva resulterade i större klorofyllnivå. På det opackade ledet och det lättast packade ledet inträffade en ökning i N-testervärde för varje Zadoksstadie där 15 kg N daa⁻¹ tilldelades. Antagligen på grund av att god kvävetillgång under icke packade förhållanden stimulerade till kväveupptag och klorofyllbildning. Den effekten var inte lika tydlig för de två tyngst packade leden. Dessa hade förhållandevis lika stora N-testervärden under både Zadoks 31 och 39. N-testervärdena indikerar därmed att packning hämmade klorofyllbildningen, möjligtvis på grund av hämmat kväveupptag och att denna inte kunde höjas genom att öka kvävegiva från 11 till 15 kg N daa⁻¹. Men vid Zadoks 59 hade dock N-testervärdet ökat även för de tyngst packade behandlingarna. Där var skillnaderna också signifikanta vad gäller kvävegiva, packning och dessutom samspelet mellan kvävegiva och packning. Vid Zadoks 59 var responsen på kvävegiva relativt likvärdig för samtliga packningsbehandlingar. En ökning i kvävegiva höjde N-testervärdet, men ökningen var inte lika kraftig mellan 11 och 15 kg N daa⁻¹ som mellan de andra givorna.

Det tyngst packade ledet har vid samtliga utvecklingsstadier och kvävegivor genererat lägst klorofyllnivåer. Vid Zadoks 59 blev också effekten så stor att den kunde påvisas statistiskt. Det verkar därmed som att packningseffekten tydliggjordes en bit in i säsongen, men att effekten ändå kunde skyntas i tidigare utvecklingsstadier. Hade ännu en N-testermätning utförts vid ett senare stadie är det sannolikt att effekten hade förstärkts ytterligare.

5.3.2 Utveckling, avkastning och avkastningskomponenter, beståndshöjd och kvalitet – effekt av kvävegiva

Den första observationen som gjordes under växtsäsongen var antalet grodda plantor vid Zadoks 12. Resultatet visar tydligt att varken gödsling eller packning hade effekt på kärnornas förmåga att gro i detta tillfälle, vilket också tycks rimligt. Groning förutsätter enligt Hopkins & Hüner (2008) endast vatten- och syretillgång i en lämplig temperatur. Näringsstillgång i marken och därmed kvävegivan i detta försök är därför obetydlig eftersom näringsbehovet täcks av kärnans lagrade reserver i endospermen. Syretillgången kunde av packningen potentiellt ha strypts på grund av hög skrymdensitet och/eller hög vattenalt i marken. Men de markfysiska undersökningarna tyder inte på det. Inte heller Rasmussen (1976) kunde observera någon påtaglig skillnad i groning mellan torr och våt jord packad 0-4 gånger under sammanlagt fyra år.

Till skillnad från antalet plantor, påverkades antalet sidoskott i mycket stor grad av kvävegödsling i detta försök. Resultatet var väntat eftersom vegetativ växt och däribland framväxt av sidoskott stimuleras av kvävegödsling. I försök av Baethgen et al. (2002) och Ramos et al. (1995) observerades också liknande resultat. Kvävegivan påverkade också antalet axbärande skott i detta försök, vilket stämmer väl överens med resultat av Ramos et al. (1995). Effekten av gödsling på antalet vissnade skott var dock obetydlig. Men det är tydligt att nollgödsningsledet har lyckats behålla flest av de de producerade skotten. Det beror möjligtvis på att konkurrensen om vatten, näring och solljus var mindre på grund av att färre producerade skott. Beståndshöjden ökade också signifikant med ökad kvävegiva. Även det var väntat eftersom höjden, precis som antalet sidoskott är exempel på vegetativ tillväxt som stimuleras av kvävetillgång.

Antalet kärnor per ax ökade kraftigt när 7 kg N daa^{-1} tilldelades jämfört med nollgödsningsledet. Med de högre givorna blev ökningen mer beskeden, men skillnaden var ändå signifikant. Antalet kärnor per ax styrs ju utav småaxinitiering, reduktion av dessa samt antalet fertila blommor. Men i vilken utsträckning kvävegivan påverkade dessa händelser är svårt att uppskatta. Gooding (2009) hävdar att temperatur och fotoperiod är de viktigaste omständigheterna som påverkar småaxinitieringen, medan småaxreduktionen å andra sidan påverkades av kvävegiva i ett försök av Arisnabarreta & Miralles (2004). Även blomanlag och andelen fertila blommor som producerades påverkades av kvävegiva i deras undersökning. Därmed är det mer sannolikt att småaxreduktionen hämmades och/eller att fertiliteten stärktes av ökad kvävegiva i detta försök. Pollinering har har givetvis också betydelse för antalet kärnor som utvecklas. Men i detta försök styrdes pollineringen troligtvis av endast väderomständigheterna.

Antalet kärnor per ax och antal ax per m^2 utgör tillsammans antalet kärnor per m^2 . Antalet kärnor per m^2 tillsammans med vikten av dessa kärnor (1000-kornvikt) ger tillslut den totala avkastningen. Avkastningen påverkades signifikant av kvävegiva, vilket är ett resultat av ökning i 1000-kornvikten och antalet kärnor per m^2 . Kärnornas fyllighet bestämdes i detta försök genom hektolitervikt. Hektolitervikten tilltog något med ökad kvävegiva, men endast 15 kg N daa^{-1} kunde uppfylla det minimumskrav (64 kg hl^{-1}) som ställs av åtminstone Felleskjøpet för säsongen 2011-2012 (Felleskjøpet, 2011). Kärnans vikt utgörs till stor del utav de kolhydrater som ackumuleras tack vare fotosyntesaktivitet. Proteiner är den näst största beståndsdelen och styrs direkt utav kvävetillgång och upptag.

Proteinhalten i kärnorna var statistiskt signifikant med hänsyn till kvävegiva. Men det förväntades att denna skulle stiga med ökad kvävegiva och att stärkelsehalten samtidigt skulle minska. Ett sådant samband har åtminstone påvisats förr (Oscarsson et al., 1998). Några direkta paralleller till resultatet av Oscarsson et al. (1998) kunde inte ses i detta försök eftersom nollgödslingsledet har gett både störst stärkelsehalt och proteinhalt. Samtidigt var det väntat att proteinhalten skulle avta med ökad avkastning som hävdats av Bulman & Smith (1993). Men ett sådant samband kunde inte heller påvisas eftersom avkastningen var lägst på nollgödslingsledet.

Den totala kvävehalten i plantorna visade en tydlig ökning med ökad kvävegiva. Fördelat på kärnor och halm fanns en större andel kväve i kärnorna än i halmen. Resultatet var i allra högsta grad väntat både vad gäller responsen på kvävegiva och mängdfördelningen mellan halm och kärnor. Under kärnfyllningen omfördelas kväve lagrat i blad och stjälk till kärnorna som istället samlar och lagrar kvävet.

5.3.3 Utveckling, avkastning och avkastningskomponenter, beståndshöjd och kvalitet – effekt av packning

Som tidigare nämnt bidrog försöksdesignen till att stora skillnader mellan packningsbehandlingarna var nödvändiga för att resultatet skulle bli signifikant. Men trots bristande signifikans på växternas utveckling och avkastning tenderade den tyngsta packningen att ha negativ inverkan på ett flertal egenskaper. Antal sidoskott, beståndshöjd, antal kärnor per ax, avkastning och till viss del också hektolitervikt påverkades samtliga mycket negativt utav den tyngsta packningen. Däremot gav den näst tyngsta packningen flest antal sidoskott, avkastning och dessutom höga plantor med många axbärande skott.

Antalet kärnor per ax, det totala antalet kärnor per m², beståndshöjd och antalet sidoskott var de egenskaper som påverkades mest av packningen i detta försök. Beståndshöjd och antal sidoskott är egenskaper som också påverkas starkt utav kväveupptag, vilket kan tyda på att kväveupptaget i det tyngst packade ledet hämmades och därmed begränsades höjden och antalet sidoskott. N-testermätningen styrker också denna antagelse eftersom nivåerna var lägre i detta led än i övriga.

Antalet kärnor per ax är dels beroende av småaxbildningen men också utav antalet fertila blommor och pollinering av dessa. I ett försök av Saqib et al. (2004) noterades en minskning av antalet småax med ökad packning. Men något packningsförsök där antalet fertila blommor undersöktes har hittills inte påträffats. Därmed antas upptäckten av Saqib et al. (2004) kunna

gälla även i detta försök och att antalet kärnor per ax i det tyngst packade ledet var få på grund av färre existerande småax.

Antalet axbärande skott påverkades inte drastiskt utav packningen, men på grund av det låga antalet kärnor per ax blev det totala antalet kärnor per m^2 mycket lågt för den tyngsta packningen jämfört med de andra packningsbehandlingarna. Antalet kärnor per m^2 tillsammans med 1000-kornvikten utgör den totala avkastningen. Men i detta försök påverkades inte 1000-kornvikten avsevärt av packningen. Det gjorde inte heller hektolitervikten, som tillsammans med 1000-kornvikten beskriver kärnornas vikt och fyllighet. Hektolitervikten beror i stor grad av kärnfyllningshastigheten och varaktigheten av kärnfyllningsfasen men har också genetiska begränsningar (del Moral et al., 2002). Vikten däremot beror på näringsreserver som tidigare lagrats och som omfördelas från andra växtdelar, samt av pågående fotosyntesaktivitet. Klorofyllet som ansvarar för fotosyntesen, förekom i lägst nivåer i det tyngst packade ledet från Zadoks 0-59. Därför kunde ett större utslag på 1000-kornvikten och möjligtvis också hektolitervikten ha varit väntad eftersom den låga klorofyllnivån borde ha genererat färre assimilater till lagring. Saqib et al. (2004) kunde också i sitt krukförsök påvisa en minskning i 1000-kornvikt under packade förhållanden. Att 1000-kornvikten blev så pass stor trots låg klorofyllnivå kan möjligtvis förklaras av att antalet kärnor i axet var så få. Plantorna hade därmed färre kärnor att fylla och de lagrade reserverna räckte till.

Trots att 1000-kornvikten i det tyngst packade ledet var jämlik med de andra packningsbehandlingarna blev den totala avkastningen betydligt lägre på grund av få antal korn per m^2 . Det tyngst packade ledet gav en drygt 100 kg lägre avkastning än det näst tyngst packade ledet, som faktiskt gav störst avkastning. Det opackade ledet tillsammans med de två lättast packade leden gav för övrigt relativt lika avkastningar.

Vad gäller samspelet mellan packning och kvävegiva på avkastningen (figur 8) så är det tydligt att det tyngst packade ledet urskiljer sig även här. Av figuren framgår det att den tyngsta packningen har inverkat negativt på avkastningen vid samtliga gödselgivor. När 11 och 15 kg N daa^{-1} tilldelades minskade avkastningen med drygt 120 respektive 130 kg daa^{-1} . På nollgödslingsledet gav den tyngst packade behandlingen nästan en halvering i avkastning. Det opackade ledet tillsammans med de två lättast packade leden var för övrigt mycket jämbördiga.

Figuren och även den statistiska analysen visar en tydlig positiv respons på kvävegiva på samtliga packningsled. Det tyngsta packningsledet gav nedsatt avkastning för alla kvävegivor, men en ökning i avkastning inträffade ändå då givan höjdes. Den ökningen ser dock ut att mattas av mellan 11 och 15 kg N daa⁻¹ och tros stagnera ytterligare vid ännu högre kvävegiva. Samma tendens syns för de andra packningsleden, men för det lättast och näst tyngst packade ledet var stigningen brantare mellan 11 och 15 kg N daa⁻¹. Resultatet indikerar att plantornas förmåga att utnyttja kväve i förhållande till kvävegiva har försämrats utav den tyngsta packningen. Den näst tyngsta packningen har däremot utnyttjat det tilldelade kvävet mycket bättre och därmed tillåtit mindre kväve att läcka ut i naturen. Resultatet visar också att högre avkastning kan uppnås på packad mark genom större kvävegiva, men utnyttjandet av kväve förbättras ändå inte. Högre kvävegiva kan heller inte sägas kompensera för packningsskadan eftersom de mindre packade leden ändå gav större avkastning.

5.3.4 Slutlig bedömning

Av de tre packade leden har den tyngsta packningen resulterat i sämst avkastning och kväveupptag i detta försök. De andra två packningsbehandlingarna har gett likvärdiga avkastningsresultat och skiljer sig marginellt från varandra och från det opackade ledet. Detta har observerats trots att de markfysiska undersökningarna inte entydigt visar på större packningsskada på det tyngst packade ledet. Dem visar snarare att de tre packade leden var relativt lika jämfört med det opackade ledet. Även om de markfysiska undersökningarna inte tydde på några packningsskador, är det möjligt att skadan ändå befann sig längre ner i profilen. De jordprover som togs var ner till 20 cm då man antog att matjordlagret var mest relevant. Men i efterhand är det uppenbart att även den övre alven hade varit nyttig att undersöka.

Trots att de markfysiska undersökningarna är motsägelsefulla, talar avkastningsdatan tillsammans med N-testermätningen ett tydligt språk. Den tyngsta packningen har gett ett mycket sämre resultat än övriga behandlingar. Men i vilken utsträckning detta beror på packningen är däremot svårt att bedöma. Det är mycket sannolikt att inte enbart packningen stod för avkastningsskillnaden, utan var endast en av flera bidragande orsaker. En annan orsak kan vara den aktuella jordmånen som försöksfältet var anlagt på. Jordmånen var Stagnosol som karaktäriseras av ett skikt, ofta inom en meter, som är mycket tätare än i resten av profilen. Detta skikt har tendenser till att stoppa vattenflöde på grund av finare textur och leder lätt till att vatten blir stående under nederbördsrika perioder (SkogogLandskap, 2012b). Just eftersom hela växtsäsongen präglades av mycket nederbörd är det troligt att packningen

förstärkte denna jordegenskap. Marken kan därför ha blivit vattensjuk under matjordslagret utan att detta detekterades. Även om jordmånen var en bidragande faktor borde den ändå ha gett utslag på de andra packningsbehandlingarna. Därför antas resultatet bero på flera orsaker som inte har påvisats i detta försök.

Bortsett från det tyngst packade ledet, gav det opackade ledet lägst avkastning. Det resultatet kan relateras till vad Håkansson (2000) menar med skadlig och icke skadlig packning. En måttlig återpackning är normalt nödvändig efter plöjning och annan jordbearbetning för att rötter och frön ska få god kontakt med jorden. På det opackade ledet var antagligen denna kontakt sämre och vatten- och näringsupptaget försämrades därför.

6 Slutsats

Packningsbehandlingarna i detta försök resulterade inte i definitiva skillnader mellan skrymdensitet, porositet, luftfylld porvolym, luftpermeabilitet och aggregatstorleksfördelning. Vattenretentionsegenskaperna antydde att packningseffekten var mer framträdande på 15 cm djup än på 4 cm, vilket också anses rimligt eftersom de övre 4 cm troligtvis var mer luckra på grund av sådd och harvning. Resultaten var huvudsakligen icke signifikanta och skapar därmed osäkerhet kring bedömningen av de faktiska packningsförhållandena. För att uppnå större distinktioner och tydligare effekt hade behandlingarna antagligen behövt skiljas åt med fler antal överfarter.

Det mineraliserbara kvävet visade ingen skillnad mellan packningsbehandlingar, men sjönk för varje Zadoksstadie. Det är dock svårt att uppskatta omfattningen av rötternas upptag, kväveomvandlande processer samt utlakning eftersom dessa samverkar om reduktionen. På grund av stora nederbördsmängder under säsongen och betydande. Eftersom N-testervärdet var genomgående lägst på det tyngst packade ledet tyder det på ett hämmat näringsupptag. Den tyngsta packningen kan därmed ha orsakat hämmad rotutveckling, alternativt ökat omfattningen av kväveomvandlande processer eller utlakning. För att avgöra växternas rotutveckling kunde en penetrationsmotståndsmätning ha varit intressant att utföra.

Den tyngsta packningsbehandlingen gav också lägst avkastning för samtliga kvävegivor på grund av få antal producerade korn per ax och m^2 . Resultatet antyder att småaxbildningen har påverkats negativt utav packningen på grund av en begränsad kvävetillgång. En höjning av kvävegivan gav större avkastning inom alla packningsbehandlingar. Men för det tyngst packade ledet kunde inte en höjd kvävegiva kompensera skördeförlusten som packningen skapade. Anmärkningsvärt är dock att den tyngsta packningen skiljer sig mycket från den näst tyngsta packningen. Den näst tyngsta packningen har gett störst total avkastning för samtliga kvävegivor trots att de markfysiska analyserna inte tyder på att detta led skiljer sig från det mest packade. Det är därför stor sannolikhet att avkastningen på det tyngst packade ledet inte enbart är ett resultat utav packning. En markfysisk undersökning av den övre alven kunde ha avslöjat eventuella skador längre ner i alven.

Resultaten i detta försök var mycket tvetydiga då de markfysiska undersökningarna inte antydde någon utpräglad packningsskada, men växterna responderade ändå kraftigt på den tyngsta packningsbehandlingen. Växternas respons verkar därmed vara viktig att ta i

beaktning när packningsförsök ska bedömas. Åtminstone i detta försök såg den ut att vara en känsligare indikator på packning än de fysiska tillstånden.

7 Källförteckning

- Aasen, I. (1997). *Mangelsjukdomar og andre ernæringsforstyringer hos kulturplanter*. 2nd utg. Otta: Landbruksforlaget. 95 s. ISBN: 82-529-2258-9
- Acreche, M. M. & Slafer, G. A. (2006). Grain weight response to increases in number of grains in wheat in a Mediterranean area. *Field Crops Research*, 98 (1): 52-59.
- Agrawal, R. (1991). Water and nutrient management in sandy soils by compaction. *Soil and Tillage Research*, 19 (2-3): 121-130.
- Alakukku, L. (1996). Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. II. Long-term effects on the properties of fine-textured and organic soils. *Soil and Tillage Research*, 37 (4): 223-238.
- America, S. S. S. o. (2012). Tilgjengelig fra: <https://www.soils.org/publications/soils-glossary#> (lest 200212).
- Arisnabarreta, S. & Miralles, D. J. (2004). The influence of fertiliser nitrogen application on development and number of reproductive primordia in field-grown two- and six-rowed barleys. *Australian journal of agricultural research*, 55 (3): 357-366.
- Arisnabarreta, S. & Miralles, D. J. (2008). Radiation effects on potential number of grains per spike and biomass partitioning in two- and six-rowed near isogenic barley lines. *Field Crops Research*, 107 (3): 203-210.
- Arvidsson, J. & Håkansson, I. (1996). Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil and Tillage Research*, 39 (3): 175-197.
- Arvidsson, J. (1997). *Soil compaction in agriculture: from soil stress to plant stress*. Doctoral thesis. Uppsala: Swedish University of Agricultural Science, Department of Soil Science.
- Arvidsson, J. (1999). Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. *Plant and Soil*, 208 (1): 9-19.
- Baethgen, W. E., Christianson, C. B. & Lamothe, A. G. (1995). Nitrogen fertilizer effects on growth, grain yield, and yield components of malting barley. *Field Crops Research*, 43 (2-3): 87-99.
- Bakken, L. R., Børresen, T. & Njøs, A. (1987). Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science*, 38 (3): 541-552.
- Bleken, M. A. (1990). *The effects of sowing date and tractor wheeling on the pore-size distribution and on the moisture content of two ploughed soils*. Doctoral Thesis. Ås: Norges Landbrukshøgskole, Department of Soil Sciences.
- Brady, N. & Weil, R. (2004). *Elements of nature and properties of soil*. Second edition utg. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall. 606 s. ISBN: 0-13-048038-X
- Breland, T. A. & Hansen, S. (1996). Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. *Soil Biology and Biochemistry*, 28 (4-5): 655-663.
- Bremner, J. M. & Mulvaney, C. S. (1982). *Methods of Soil Analysis Part 2 Agronomy 9*. 2nd utg. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc. 1159 s
- Bulman, P. & Smith, D. L. (1993). Accumulation and redistribution of dry matter and nitrogen by spring barley. *Agronomy Journal*, 85 (6): 1114-1121.
- Campbell, D. J. (1994). Determination and Use of Soil Bulk Density in Relation to Soil Compaction. I: Soane, B. D. & van Ouwerkerk, C. (red.) *Soil compaction in crop production*, s. 113-141. Amsterdam: Elsevier Science B.V. ISBN: 0-444-88286-3
- Carrow, R. & Sills, M. (1983). Turfgrass growth, N use, and water use under soil compaction and N fertilization. *Agronomy Journal*, 75 (3): 488-492.

- De Neve, S. & Hofman, G. (2000). Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. *Biology and Fertility of Soils*, 30 (5): 544-549.
- del Moral, L. F., Miralles, D. J. & Slafer, G. A. (2002). Initiation and appearance of vegetative and reproductive structures throughout barley development. I: Slafer, G. A., Molina-Cano, J. L., Savin, R., Araus, J. L. & Romagosa, I. (red.) *Barley science: recent advances from molecular biology to agronomy of yield and quality*, s. 565. New York: The Haworth Press, Inc. ISBN: 1-56022-910-1
- del Moral, M. & del Moral, L. (1995). Tiller production and survival in relation to grain yield in winter and spring barley. *Field Crops Research*, 44 (2-3): 85-93.
- Delogu, G., Cattivelli, L., Pecchioni, N., De Falcis, D., Maggiore, T. & Stanca, A. (1998). Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 9 (1): 11-20.
- Eijkelkamp. (2007). *Operating instructions - 08.01 sandbox*: Eijkelkamp Agrisearch Equipment BV. Tilgjengelig fra: <http://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/EN/m1-0801esandbox.pdf> (lest 022812).
- Eijkelkamp. (2012). *pF-curve determination (ceramic plates)*. Tilgjengelig fra: <http://pkd.eijkelkamp.com/Portals/2/Eijkelkamp/Files/P1-81e.pdf> (lest 280212).
- Ercoli, L., Lulli, L., Mariotti, M., Masoni, A. & Arduini, I. (2008). Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability. *European Journal of Agronomy*, 28 (2): 138-147.
- Espeby, B. & Gustafsson, J. (1997). *Vatten-och ämnestransport i den omättade zonen*. TRITA AMI Rapport 3038. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan, Institution för anläggning och miljö. Tilgjengelig fra: http://www2.lwr.kth.se/Forskargrupper/EGC/Trita_Ami_3038.pdf (lest 030412).
- Eurofins. (2012). *Kväveanalys*. Tilgjengelig fra: <http://www.eurofins.se/tjanster/lantbruk/jord/n-min.aspx> (lest 290412).
- Evans, L., Bingham, J. & Roskams, M. (1972). The pattern of grain set within ears of wheat. *Australian Journal of Biological Sciences*, 25 (1): 1-8.
- Felleskjøpet. (2011). *Kornguiden sesongen 2011/2012*. Tilgjengelig fra: http://www.felleskjopet.no/landbruk/Documents/Eksterne/Diverse/Kornhandel/Kornguiden_2011_12.pdf (lest 090412).
- Forkman, J. (2011). *Handbok i statistik för fältförsök*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, SLU. Tilgjengelig fra: http://www.slu.se/PageFiles/37382/Fhandbok/Handbok_Statistik_v3.pdf (lest 220412).
- Foss Analytical AB. (2002). *Application Note 5232 Determination of Nitrate-N in KCl soil extracts by FIAstar 5000*. 8 s.
- Gaheen, S. & Njøs, A. (1978). Effect of tractor traffic on timothy (*Phleum pratense* L.) root system in an experiment on a loam soil. *Scientific Reports of the Agricultural University of Norway*, 57 (11): 2-11.
- Gallagher, J., Biscoe, P. & Scott, R. (1976). Barley and its Environment: VI. Growth and Development in Relation to Yield. *Journal of Applied Ecology*: 563-583.
- Gooding, M. J. (2009). The Wheat Crop. I: Khan, K. & Shewry, P. R. (red.) *Wheat: chemistry and technology*, s. 19-49. St. Paul, Minnesota American Association of Cereal Chemists, International. ISBN: 978-1-891127-55-7
- Green, R. & Fordham, S. (1975). A field method for determining air permeability in soil. *Technical Bulletin, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food*.

- Gregorich, E., McLaughlin, N., VandenBygaart, A., Ma, B. & Lapen, D. (2011). Soil and crop response to varying levels of compaction, nitrogen fertilization, and clay content. *Soil Science Society of America Journal*, 75 (4): 1483-1492.
- Harris, W. L. (1971). The Soil Compaction Process. I: Basselman, J. A. (red.) *Compaction of Agricultural Soils*, s. 471. St Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers
- Havlin, J., Tisdale, S. L., Beaton, J. D. & Nelson, W. L. (2005). *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*. Seventh utg. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall. 502 s. ISBN: 0-13-027824-6
- Heitholt, J. J., Croy, L., Maness, N. & Nguyen, H. (1990). Nitrogen partitioning in genotypes of winter wheat differing in grain N concentration. *Field Crops Research*, 23 (2): 133-144.
- Hesselman, K. & Tilly, A. C. (1985). The variation in chemical composition of Swedish barleys. *Journal of Cereal Science*, 3 (1): 73-77.
- Hillel, D. (1980). *Introduction to Soil Physics*. San Diego, California: Academic Press Inc. . 364 s. ISBN: 0-12-348520-7
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. San Diego, California: Elsevier Academic Press. 494 s. ISBN: 0-12-348655-6
- Hoel, B. O. (2002). Chlorophyll meter readings in winter wheat: cultivar differences and prediction of grain protein content. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science*, 52 (4): 147-157.
- Hofstra, S., Marti, M., Børresen, T. & Njøs, A. (1986). Effects of tractor traffic and liming on yields and soil physical properties in three field experiments in S.E.-Norway. *Scientific Reports of the Agricultural University of Norway*. Ås, Norge: Department of Soil Fertility and Management. 2-23 s.
- Hopkins, W. G. & Hüner, N. P. A. (2008). *Introduction to plant physiology*. 4th utg.: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-470-24766-2
- Horn, R., Domzzal, H., Slowinska-Jurkiewicz, A. & Van Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research*, 35 (1-2): 23-36.
- Houlbrooke, D., Thom, E., Chapman, R. & McLay, C. (1997). A study of the effects of soil bulk density on root and shoot growth of different ryegrass lines. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 40 (4): 429-435.
- Håkansson, I. & von Polgár, J. (1977). Modellförsök med såbäddens funktion. II. Försök med skiktade och oskiktade såbäddar. *Rapport från jordbearbetningsavdelningen. SLU, Uppsala*, 46.
- Håkansson, I. (1990). A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research*, 16 (1-2): 105-120.
- Håkansson, I. (2000). Packning av åkermark vid maskindrift. Omfattning - effekter - motåtgärder. *Rapporter från jordbearbetningsavdelningen*, ISSN: 0348-0976. Uppsala, Sverige: Institutionen för markvetenskap, SLU. 123 s.
- Ishaq, M., Hassan, A., Saeed, M., Ibrahim, M. & Lal, R. (2001). Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan:: I. Soil physical properties and crop yield. *Soil and Tillage Research*, 59 (1-2): 57-65.
- Kemper, W. D., B.A, S. & Porter, L. K. (1971). Effects of compaction on soil nutrient status. I: Barnes, K. K., Carleton, W. M., Taylor, H. M., Throckmorton, R. I. & Vanden Berg, G. E. (red.) *Compaction of Agricultural Soils*, s. 178-189. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers

- Kooistra, M. & Tovey, N. K. (1994). Effects of Compaction on Microstructure. I: Soane, B. D. & van Ouwerkerk, C. (red.) *Soil compaction in crop production*, s. 662. Amsterdam: Elsevier Science B.V. ISBN: 0-444-88286-3
- Kuht, J. & Reintam, E. (2004). Soil compaction effect on soil physical properties and the content of nutrients in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) and spring wheat (*Triticum aestivum* LO). *Agronomy research*, 35: 3149-3158.
- Lauer, J. G. & Simmons, S. R. (1989). Canopy light and tiller mortality in spring barley. *Crop Sci*, 29: 420-424.
- Lipiec, J. & Stepniewski, W. (1995). Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil and Tillage Research*, 35 (1): 37-52.
- Lipiec, J., Hajnos, M. & Świeboda, R. (2012). Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. *Geoderma*, 179: 20-27.
- Lunnan, T. (2012). Avlingsutvikling i engdyrkinga. *Bioforsk Fokus*, 7 (2): 141-142.
- Marti, M. (1983). Effects of soil compaction and lime on yield and soil parameters on three silty clay loam soils in south eastern Norway. *Scientific Reports of the Agricultural University of Norway*, 62 (24): 2-28.
- matdepartementet, L. o. (2011-2012). *Landbruks- og matpolitikken. Velkommen til bords.:* Landbruks og matdepartementet. Tilgjengelig fra: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/lmd/dok/regpubl/stmeld/2011-2012/meld-st-9-20112012.html?id=664980> (lest 040512).
- Matsunaka, T., Watanabe, Y., Miyawaki, T. & Ichikawa, N. (1997). Prediction of grain protein content in winter wheat through leaf color measurements using a chlorophyll meter. *Soil Science and Plant Nutrition*, 43 (1): 127-134.
- Mengel, K. (1992). Nitrogen: agricultural productivity and environmental problems. I: Mengel, K. & Pilbeam, D. J. (red.) *Nitrogen metabolism of plants*, s. 282. New York: Oxford University Press. ISBN: 0-19-857752-4
- Merotto, A. & Mundstock, C. (1999). Wheat root growth as affected by soil strength. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23: 197-202.
- Mosier, A., Duxbury, J., Freney, J., Heinemeyer, O. & Minami, K. (1996). Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil*, 181 (1): 95-108.
- Njøs, A. (1967). Dry sieving. *West-European Methods for Soil Structure Determination. State Faculty of Agricultural Sciences, Ghent, Belgium*, 43.
- Njøs, A. (1976). Long term effects of tractor traffic in two field experiments in Norway: Div. Soil Management, Swedish Univ. Agric. Sci, Uppsala 1-7 s.
- Njøs, A. (1978). Effects of tractor traffic and liming on yields and soil physical properties of a silty clay loam soil. *Scientific Reports of the Agricultural University of Norway*, 57 (24): 2-26.
- Norgesfôr. (2011). *Endring i kornavregning. Korn til mat og fôr*. Tilgjengelig fra: <http://www.norgesfor.no/Om-norgesfor/Aktuelt-Nyhetsarkiv/Endring-i-kornavregning/> (lest 090412).
- Nyborg, Å. & Solbakken, E. (2008). Norsk referansesystem for jordsmonn. Feltguide - jordsmonnkartlegging. *Håndbokfra Skog og landskap* (04): 235.
- Oscarsson, M., Andersson, R., Åman, P., Olofsson, S. & Jonsson, A. (1998). Effects of cultivar, nitrogen fertilization rate and environment on yield and grain quality of barley. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 78 (3): 359-366.
- Peltonen-Sainio, P. (1997). Nitrogen fertilizer and foliar application of cytokinin affect spikelet and floret set and survival in oat. *Field Crops Research*, 49 (2-3): 169-176.

- Prystupa, P., Slafer, G. A. & Savin, R. (2003). Leaf appearance, tillering and their coordination in response to NxP fertilization in barley. *Plant and Soil*, 255 (2): 587-594.
- Ramos, J., De la Morena, I. & Garcia Del Moral, L. (1995). Barley response to nitrogen rate and timing in a Mediterranean environment. *Journal of agricultural science, Cambridge* 125: 175-175.
- Rasmussen, K. (1976). Jordpakning ved færdsel om foråret. Vækstbetingelser og kærneudbytter af byg. *Tidsskrift for planteavl*, 80 (1317): 821-834.
- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J., Bruand, A. & Guérif, J. (2001). Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52 (1): 49-58.
- Riley, H. (1983). Forholdet mellom jordtetthet og kornavling. *Forskning og forsøk i landbruket*, 34: 1-11.
- Riley, H. (1994). The effect of traffic at high axle load on crop yields on a loam soil in Norway. *Soil and Tillage Research*, 29 (2): 211-214.
- Saqib, M., Akhtar, J. & Qureshi, R. H. (2004). Pot study on wheat growth in saline and waterlogged compacted soil: I. Grain yield and yield components. *Soil and Tillage Research*, 77 (2): 169-177.
- Shierlaw, J. & Alston, A. (1984). Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant and Soil*, 77 (1): 15-28.
- Simmons, S. R. & Lauer, J. G. (1985). Photoassimilate partitioning of main shoot leaves in field-grown spring barley. *Crop science*, 25 (5): 851-855.
- SkogogLandskap. (2012a). *Kilden til arealinformasjon*. Tilgjengelig fra: <http://kilden.skogoglandskap.no/map/kilden/index.jsp?theme=JORDSMONN> (lest 010312).
- SkogogLandskap. (2012b). *WRB-grupper*. Tilgjengelig fra: http://www.skogoglandskap.no/kart/temakart_wrb (lest 020512).
- Slafer, G. A. & Rawson, H. (1994). Does temperature affect final numbers of primordia in wheat? *Field Crops Research*, 39 (2-3): 111-117.
- Soane, B. & Van Ouwerkerk, C. (1995). Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil and Tillage Research*, 35 (1): 5-22.
- Sofield, I., Evans, L., Cook, M. & Wardlaw, I. F. (1977). Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Functional Plant Biology*, 4 (5): 785-797.
- Soper, R., Racz, G. & Fehr, P. (1971). Nitrate nitrogen in the soil as a means of predicting the fertilizer nitrogen requirements of barley. *Canadian Journal of Soil Science*, 51 (1): 45-49.
- Statistisk sentralbyrå. (2010). *Landbruket i Norge 2009, Jordbruk – Skogbruk – Jakt*: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: http://www.ssb.no/emner/10/04/sa_landbruk/sa116/sa116.pdf (lest 040512).
- Stepniewski, W., Glinski, J. & Ball, B. (1994). Effects of Compaction on Soil Aeration Properties. I: Soane, B. D. & van Ouwerkerk, C. (red.) *Soil compaction in crop production*, s. 167-191. Amsterdam: Elsevier Science B.V. ISBN: 0-444-88286-3
- Tang, A. M., Cui, Y. J., Richard, G. & Defossez, P. (2011). A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. *Geoderma*, 162 (1-2): 171-181.
- Taylor, H. M., Roberson, G. M. & Parker Jr, J. J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. *Soil Sci*, 102 (1): 18-22.
- Torstensson, G. & Eriksson, S. (1936). A new method for determining the porosity of the soil. *Soil Science*, 42 (6): 405.

- Warkentin. (1971). Effects of compaction and transmission of water in soils. I: Basselman, J. A. (red.) *Compaction of Agricultural Soils*, s. 471. St Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers
- Wolkowski, R. (1990). Relationship between wheel-traffic-induced soil compaction, nutrient availability, and crop growth: a review. *Journal of production agriculture*, 3 (4): 460-469.
- Yara. (2011). *Tekniken bakom Yara N-Tester*. Tilgjengelig fra:
http://www.yara.se/fertilizer/facilities/yara_n_tester/function/index.aspx (lest 100412).
- Yr.no. (2012). *Værvarsel for Apelsvoll, Østre Toten (Oppland)*. Tilgjengelig fra:
http://www.yr.no/sted/Norge/Oppland/Østre_Toten/Østre_Toten_målestasjon/ (lest 010312).

Bilagor

Bilaga 1

Tabell 13. N-testervärden uppmätta vid samtliga packnings- och gödslingsbehandlingar vid Zadoks 31, 39 och 59.

		Kg N daa⁻¹			
A		0	7	11	15
	31	377	457	450	459
	39	310	403	452	491
	59	406	496	557	582
B					
	31	347	438	456	462
	39	272	399	448	498
	59	348	494	539	582
C					
	31	365	442	468	463
	39	271	408	456	462
	59	360	496	536	591
D					
	31	305	442	446	446
	39	230	382	419	444
	59	235	442	508	556

Bilaga 2

Jordarbeiding

A: Ingen kjøring

B: 1 tur hjul-i-hjul med Massey Ferguson 362

C: 1 tur hjul-i-hjul med John Deere 6830

D: 2 turer hjul-i-hjul med John Deere 6830

Lufttrykk:

VF	HF	VB	HB

N-gjødsling: 0, 7, 11 og 15 kg N pr. daa

Sårute: $1.6 \cdot 8 \text{ m} = 12.8 \text{ m}^2$

Feltstørrelse: 42×57.6

Pakke dato:

Så dato:

Høstdato: 2/8

Vekst:

Forgrøde:

Nordpil:

0	1,6	3,2	4,8	6,4	8	9,6	11,2	23,2	24,8	26,4	28,0	29,6	31,2	32,8	34,4	46,4	48,0	49,6	51,2	52,8	54,4	56,0	57,6
	7 x 1.6 = 11.2							12	11,2				12	11,2									

Jordpakking

0,0	A	→	1	101	5	102	103	104	9
			K	0	K	7	11	15	K
10,5	B	→	2	105	6	106	107	108	10
			K	0	K	11	15	7	K
21,0	C	→	3	109	7	110	111	112	11
			K	0	K	15	7	11	K
31,5	D	→	4	113	8	114	115	116	12
42,0			K	0	K	15	11	7	K

D	→	13	201	17	202	203	204	21
		K	0	K	7	15	11	K
C	→	14	205	18	206	207	208	22
		K	0	K	11	7	15	K
B	→	15	209	19	210	211	212	23
		K	0	K	15	11	7	K
A	→	16	213	20	214	215	216	24
		K	0	K	11	7	15	K

B	→	25	301	302	303	29	304	33
		K	15	11	7	K	0	K
D	→	26	305	306	307	30	308	34
		K	7	15	11	K	0	K
A	→	27	309	310	311	31	312	35
		K	15	7	11	K	0	K
C	→	28	313	314	315	32	316	36
		K	11	7	15	K	0	K

54,9

68,70

81,75

70,20

