



www.emu.ee

Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Mullateaduse ja agrokeemia osakond

Mihkel Are

**Mulla tallamise järelmõju karjamaa raiheina (*Lolium perenne L.*) ja hariliku
lutserni (*Medicago sativa*) saagikusele ja mulla omadustele.**

Magistritöö

Juhendajad: PhD Endla Reintam;
MSc Kadri Krebstein

Tartu 2014



www.emu.ee

Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Institute of Agricultural and Environmental Sciences

Department of Soil Science and Agrochemistry

Mihkel Are

The aftereffect of soil compaction on yield of perennial ryegrass (*Lolium perenne L.*) and alfalfa (*Medicago sativa*) and soil properties.

MSc. Thesis

Supervisors: PhD Endla Reintam;
MSc Kadri Krebstein

Tartu 2014

Sisukord

Sisukord	4
1. Sissejuhatus.....	5
2. Kirjanduse ülevaade.....	6
2.1. Mulla tallamise probleem	6
2.2. Tallamise (järel)mõju mulla organismidele.....	7
2.3. Liikurmasinaga ülesõitudest tingitud mulla tallamine.....	8
2.4. Liikurmasina rehvide mõju mulla tallamisele.....	10
2.5. Loomade karjatamise (järel)mõju mulla tallamisele.....	11
2.6. Tallatud mulla taastamine/taastamine.....	11
2.7. Tallamise mõju saagikusele	13
2.8. Tallamise mõju taimedele	13
2.9. Tallamise mõju mullale.....	15
2.10. Väetamise mõju tallamisel.....	17
2.11. Tallamise positiivsed küljed	18
2.12. Tallamise vältimine.....	18
3. Metoodika	19
3.1. Katse kirjeldus	19
3.2. Proovide võtmine.....	20
3.3. Laboratoorne töötlemine	21
3.4. Mullastiku andmed.....	23
3.5. Statistiline andmetöötlus	24
3.6. Ilmastiku andmed.....	25
4. Uurimistöö tulemused ja arutelu.....	26
4.1. Lasuvustihedus.....	26
4.2. Üldpoorsus	31
4.3. Aeratsioonipoorsus	34
4.4. Veeläbilaskvus	37
4.5. Kultuuride maapealne biomass	40
4.6. Penetromeetriline takistus ja mahuline niiskus.....	42
5. Kokkuvõte.....	53
Summary	56
Kasutatud kirjandus	57

1. Sissejuhatus

Tänapäeval põllumajanduses on praegune trend see, ette haritaval maal tehakse järjest rohkem ülesõite, mille tulemusel suureneb mulla tallamise oht. Eriti suureks probleemiks on see mitmeaastastel rohumaaadel, kus puudub võimalus mulla kobestamiseks (Glab, 2007). Mulla tallamist rohumaaadel peetakse suurimaks faktoriks, mis võib heintaimede saaki vähendada (Glab, 2008). Põllumajanduses, kus kasutatakse järjest võimsamaid traktoreid, mis on ka massi poolest raskemad, muutub tallamine järjest aktuaalsemaks probleemiks (Alakukku, 1999). See probleem ei ole ainult traktoritega, vaid ka järelveetavad haagised muutuvad suuremaks ja raskemaks. Näiteks lägalaoturid mis mahutavad endasse üle 25 Mg läga, mille mass tekitab rohumaaade muldade tihenemist seda nii künnikihi ulatuses (<25 cm), kui ka künnikihist allapoole jäävasse mulda (>25 cm). Liikurmasin sillakoormusega 10 Mg põhjustab lasuvustiheduse suurenemist isegi 50 cm sügavusel (Hakansson *et al.*, 1994). Eriti suureks probleemiks on tallamine põllumajandustehnika poolt siis, kui tallamine tehakse märjal mullal, nagu näiteks varajasel kevadel või hilissügisel (Radford *et al.*, 2000).

Enamus mulla tihendamise seotud uuringud on seotud eelkõige põldude muldadega ja rohumaaade tallamist on uuritud palju vähem (Krebstein *et al.*, 2013). Kuna 2004.a moodustasid Euroopa Liidus põllumajanduslikust maafondist 35% rohumaaad, siis on selge, et rohumaaade muldade kaitsele tuleb rohkem rõhku panna (Kacorzyk *et al.*, 2009).

Vaatamata sellele, et rohumaa tallamise otsemõju on erinevates riikides uuritud, ei ole piisavalt uuritud rohumaaade tallamise järelmõju ning järelmõju.

Antud uurimistöo hüpoteesiks on, et tallamine mõjutab pikaajaliselt muldade omadusi ning sellega koos ka rohumaaakultuuride saaki, vaatamata rohumaaakultuuride ulatuslikule juurekavale ja mulda parandavale toimele. Hüpoteesi kinnitamiseks/ümberlükkamiseks seati eesmärgiks uurida tallamise järelmõju.

1. Karjamaa raiheina (*Lolium perenne L.*) ja hariliku lutserni (*Medicago sativa*) kuivaine saagile;
2. Mulla penetromeetrilisele takistusele takistust;
3. Mulla 1) aeratsioonipoorsusele, 2) üldpoorsusele, 3) lasuvustihedusele, 4) mahulisele niiskusele ja 5) veeläbilaskvusele.

2. Kirjanduse ülevaade

2.1. Mulla tallamise probleem

Rohumaadel on üks suurimaid probleeme masintallamisest põhjustatud muldade tihenemine. See on probleem, mida esineb kõikidel mullaliikidel, kuid eriti terav probleem on see madala huumusesisaldusega ja kõrge niiskuse sisaldusega muldadel (Hamza *et al.*, 2005). Rohumaadel on palju tallamist, näiteks saagi koristamiseks on rohumaa liiklustihedus 110-186 Mg km ha⁻¹, samas kui põllumajanduse kultuuridel see näitaja on 32-88 Mg km ha⁻¹ (Douglas, 1995). Frost (1985, artiklist Frame *et al.*, 1996) on välja arvanud, et silotegemisel kolme niite puhul läbitakse vastavalt masinapargis olevale tehnikale 21 kuni 61 km/ha⁻¹, mis on võrdväärne sellele, et kogu maapind tallatakse 3 kuni 9 korda. Silotegemisel sõltub tallamisest palju sellest missuguseid agregate kasutati (Frame *et al.*, 1996). Randomiseeritud liiklus rohumaa võib põhjustada tõsist mulla tallamist, mille tulemusena on häiritud veeläbilaskvus, juurte areng kui ka suurendab ilmaasjata energia kulu, mis tähendab ka majanduslikku kahju, sest läbitakse rohkem maad, kui kindlate tehnoradade olemasolul (Carter *et al.*, 1991).

Mulla tallamist saab defineerida kui protsessi, kus osakeste ümberpaigutamise läbi vähendatakse tühimikkude ruumi, tuues mulla osakesi teineteisele lähemale, mille tulemusel suureneb mulla lasuvustihedus (Diaz-Zorita *et al.*, 1996). Laiaslaastus mulla tallamine jaotub kaheks: 1) mulla ülemises kihis ehk epipedonis (st künnikihis) ja 2) alusmullas (Creamer *et al.*, 2010). Alusmuldadest on Euroopa muldade andmete põhjal teada, et ca 32-% haritava maade

alusmullad on tugevasti tallatud ja ca 18-% on mõõdukalt tallatud. Tihenenud alusmulla leevendamine on äärmiselt raske ja rahaliselt kulukas (Horn et al., 2009). Sügavamates kihtides tihenenud muld võib põhjustada ka probleeme drenaažisüsteemidele, kus tihenenud muld vähendab drenaažide vee läbilaskevõimet ja sellest tingituna püsib märjematel perioodidel pinnas liigniiskem, kuivab aeglasemalt ja üleüldiselt vähendab päevi, millal masinaga peal sõita kannatab (Fullen, 1985). Uuringutega on leitud, et kui rohu- ja toidainete omastamine tundub madalam, kui optimaalse niiskuse juures (Brereton *et al.*, 1986). Lisaks sellele liigniiskuse käes hakkavad makropoorides domineerima anaeroobsed protsessid, mis takistavad juurte kasvu ja põhjustavad denitrifikatsiooni, mis on eelkõige probleemiks niiske kliimaga piirkondades nagu Eestis (Ball *et al.*, 1997).

Visuaalselt on tallatud mulda tuvastada ilma mõõtmisi tegemata raske, sest maapinnal puuduvad spetsiifilised sümptomid ja ning halva taimede kasvu kui ka halva veeläbilaskvuse taga võivad olla ka muud faktorid peale tallamise (Pillai *et al.*, 1999). Üldiselt on mulla tihenemise mõju seda nii taimedele kui ka eelkõige mulla omadustele vägagi keeruline protsess, kus tuleb jälgida paljusid erinevaid faktoreid (Bailey *et al.*, 1986). Tallamise tulemusel toimuvad mullas erinevad muutused: 1) suureneb lasuvustihedus, 2) mulla struktuursuses suureneb agregaatide tihedus, 3) väheneb õhuga täidetud poorsus ja 4) väheneb õhuläbilaskvus (Schäfer-Landefeld *et al.*, 2004).

2.2. Tallamise (järel)mõju mulla organismidele

Tallatud mullal on ka negatiivne mõju mulla elustikule, eelkõige endogeilistele vihmaussidele (Chan *et al.*, 2007). Vihmaussid on mullas tähtsad orgaanilise aine lagundajad, nende sisaldus mullas sõltub väga palju peale tallamise ka mulla orgaanilise sisalduse kogusest (Dominguez *et al.*, 2010). Vihmaussid on mulla tallamise suhtes kõige tundlikumad mulla organismid (Althoff *et al.*, 2009). Ühes vihmusside tallamise järelmõju uuringus leiti, et mulla tihendamise tingitud lasuvustiheduse suurenemisel $1,46 \text{ g cm}^{-3} \rightarrow 1,57 \text{ g cm}^{-3}$ vihmausside arvukus vähenes 40-70-%. Seal katses vihmausside taastumine oli kiire, juba peale kolme kuud ei olnud statistilist olulist

erinevust tallatud ja tallamata piirkondades (Yvan *et al.*, 2012). Tallamine mõjutab vihmausse kahte moodi: 1) vihmausside otsene surm tallamise tõttu ja 2) emigreerumine eluks sobilikumatesse mulla kihtidesse (Yvan *et al.*, 2012). Uuringutega on leitud, et nad suudavad emigreeruda parematesse elupaikadesse väga kiirelt, mida on uuringutes tähele pandud pestitsiidide pritsimise puhul (Christensen *et al.*, 2004). Teised uuringud on näidanud, et vihmausside taastasustamine on palju aeglasem protsess (Radford *et al.*, 2001). Kuigi vihmaussid taastasustasid peale kolme kuud, siis vihmausside puudumisest tingitud mulla makropooride ja veeläbilaskvuse taastumine võttis 1-2.a aega ja mulla lasuvustiheduse taastumine võttis üle 4.a aega. Sellest järeldati, et vihmaussid aitavad küll tihendatud mulla taastamisele kaasa, kuid see on suhteliselt aeglane protsess (Yvan *et al.*, 2012). Lutserni kasvatamisel on leitud, et see mõjub vihmausside (*Lumbricus terrestris* L) arvukuse tõusule kaasa, mis võib-olla tingitud lutserni mulla kobestusvõimest (Gallagher *et al.*, 1997).

Mullas elavate nematoodide arv olenemata tallamisest on vägagi stabiilne. Tallamine põhjustab küll aga muutust nende toitumisel. Näiteks tugevalt tallatud mullal domineerivad eelkõige herbivoorsed bakterid (*Paratylenchus*) ja tallamata/kergelt tallatud mullas eelkõige bakterivoorid (*Cephalobidae* et al) ja fungifoorid (*Tylenchidae* ja *Aphelenchoide*) (Bouwman *et al.*, 2000). Selline muutus on taimede seisukohast halb, sest leitud herbivoorsed bakterid, kontsentratsiooniga 30-90 tk g⁻¹ mulla kuivaine kohta võivad tõsiselt kahjustada rohumaataimede juurestiku (Weischer, 1959 artiklis Bouwman *et al.*, 2000).

2.3. Liikurmasinaga ülesõitudest tingitud mulla tallamine

Erinevad uuringud on näidanud, et esimene ülesõit on see, mis kõige rohkem tallab mulda (Bakker *et al.*, 1995; Allamaras *et al.*, 1969). Lisaks on tõestatud, et mida intensiivsemalt mulda tallatakse, seda rohkem muutuvad mullas erineva suurusega poorid (Horn *et al.*, 2003).

Rohumaade tallamise peamiseks probleemiks peetakse suuri ja võimsaid põllumajandusmasinaid ja järelveetavaid agregate, mida põllumajandustootjad eelistavad, sest need võimaldavad kokkuhoida tööaega ja kulutusi tööjõule. Vaatamata sellele, et suurematel masinatel

on ka laiemad ja suuremad rehvid, siis rehvide poolt põhjustatud rõhk mullale on ikkagi suurem, kui kergematel ja mõnevõrra kitsamate ratastega traktoritel (Schäfer-Landefeld *et al.*, 2004). Tallamises ei või süüdistada alati raskeid liikurmasinaid. Näiteks on leitud, et kergekaalulised traktorid (massiga 2,3 Mg) võivad põhjustada samasugust mulla tallamist, nagu rasked traktorid (massiga 4,1 Mg), seda eriti siis, kui on rehvides liiga suur rõhk. Kui sama paljude ülesõitude korral on mulla kahjustus ja rohumaal saagikadu suurem raskemate traktorite puhul, siis reaalses tootmises on nende mõlemi poolt tekitatud kahju võrdväärne. Põhjus peitub selles, et samasuguse töö tegemiseks peavad kergemakaalulised traktorid rohkem üle rohumaal liikuma, kui suured ja tootlikumad traktorid. On leitud on, et 10-kordsel ülesõidul (st tallamisel) oli sügavusel 0-15 cm lasuvustihedus kergekaalulise traktori puhul 0,845 g cm⁻³ ja raskekaalulisel 0,744 g cm⁻³, ning sügavusel 30-60 cm olid need näitajad 1,323 g cm⁻³ ja 1,494 g cm⁻³. Mõlemi traktori puhul olid samaväärsed tulemused sügavusel 0-30 cm (1,094 g cm⁻³ ja 1,13 g cm⁻³). Peale selle leiti, et rohumaade saaki ei vähenenud (52-76 %) ainult rataste alla jäänud alal, vaid ka jälgede vahetus ümbruses oleval pinnal 7-25-% (Jorajuria *et al.*, 1997).

Håkansson *et al.*, (1988) on leidnud, et mõningal juhtumil võib tallamine ulatuda ka >1 m sügavusele liikurmasinaga, mille rehvide rõhk on kõigest 100 kPa, kuid silla koormus on väga kõrge. Håkansson *et al.*, (1988) on leidnud ka, et kui tallamine toimub sügavamal kui 50 cm, aga teljekoormusega rohkem kui 10 Mg, siis muld võib seal tiheneduks jääda üle seitsme aasta ja soovib maksimaalseks teljekoormuseks 6 Mg, et tallamine ei ulatuks > 40 cm.

Mulla tallamist rohumaadel ei esine ainult karjatamise ja rohusööda tootmisel. Näiteks on uuritud ka Argentiina rohtlas, et kuidas metsavedu mööda rohumaad mõjutab sealset mulda. Sealset looduslikku rohumaad kattis üheaastane raihein (*Lolium multiflorum Lamb.*) ja valge ristik (*Trifolium repens L.*). Argentiinlaste uurimise käigus selgus, et mida rohkem ülesõite tehti, seda suuremalt sügavuselt penetromeetrilise takistuse väärtused hakkasid usutavalt erinema. Kuivaine saagikuse poolest leiti, et peale ühte tallamist 4,2 Mg raske traktoriga (sillakoormused: ees 2,8 Mg, taga 1,4 Mg), millel oli külgemonteeritud 2,75 Mg raske haagis, liikudes kiirusel 1,5 m s⁻¹ vähenes kuivaine saak 40,3-%, peale viiete tallamist 43,5-% ja peale kümme tallamise korda 58,4-% (Balbuena *et al.*, 2001).

2.4. Liikurmasina rehvide mõju mulla tallamisele

Rehvide kontaktpinna suurendamisega mulla pinnal kaasnevad peale tallamise vähendamise ka muud eelised. Väheneb veeremise takistus, sest traktor ja/või haagis vajub vähem pinnasesse sisse, mis omakorda tähendab kokkuhoidu kütusekulus. Seda efekti on võimalik saavutada rehvirõhu vähendamisega kui ka kasutades laiemaid ja/või topelt rattaid (Döll, 1999). Sama rõhujuures on kontaktpind mullaga suurem pehmel pinnasel ning väga põuastel perioodidel võib esineda olukord, kus mullaga puutuvad kokku ainult põllumajandusrehvide „kalasaba“ klotsid (Diserens, 2009). Tsehhi põllumajanduse ülikoolis leiti, et kõige optimaalsem rattajälje pikkuse ja laiuse suhe normaalse niiskusega rohumaal peaks olema 0,8-0,9 mis on kompromiss mulla seisukohast, kui ka rehvide kulumise poolest (Grecenko, 1995).

Leitud on ka, et mulla tihendamisele omab rohkem või vähem mõju veorataste läbilibisemine ja traktori üldine vibratsioon, mis läbi rataste kantakse mulda (Alakukku, 1999). Varasemad laboratoorsed katsed 1970.ndatest aastatest on näidanud, et kuni 50-% künnikihi tallamisest võib olla tingitud veorataste läbilibisemisest. Selleks, et vältida läbilibisemisest tingitud mulla tihendamist künnikihis, ei tohi läbilibisemine olla suurem kui 10-%. Leiti ka, et mulla sügavamaid kihte selline tallamine ei ohusta, sest läbilibisemise mõju on ainult künnikihis. (Davies *et al* 1973, Raghaven ja McKyes 1977 artiklis Alakukku, 1999).

Peale rõhu on erinevad uurijad leidnud, et tallamisel on mõju ka rehvi ehitusel. Eelkõige on see tingitud rehvide külgede jäikusest, sest sama mõõtmelised, kuid erineva jäikusega rehvid põhjustavad erinevat kaalu jaotumist maapinnale. Näiteks madalal rõhu korral jäigemate külgeintegreeritud rehvidel on kaalujaotus maapinnale ebahüütlasem, sest neil jaotub peamine rõhk maapinnale. (Placett, 1984). Sellest hoolimata on erinevate rehvide kaalujaotumist mullatallamisele vähe uuritud (Alakukku, 1999).

Tallamise puhul mängib olulist rolli ka liikurmasina sõidukiirus. Mida suurem on sõidukiirus, seda vähemat aega jääb muld rataste tallamise alla. Suurem sõidukiirus vähendab tallamist eelkõige kobedal pinnasel (Bolling, 1987). Samas on leitud ka, et kui rohumaa pind on

ebäühtlane, siis suurem sõidukiirus põhjustab rohkem traktori ja haagise õõtsumist, mis omakorda tekitab mullale suuremat rõhku (Danfors, 1974 artiklis Alakukku, 1999).

2.5. Loomade karjatamise (järel)mõju mulla tallamisele

Alati ei ole rohumaa muldade tallamises süüdi liikurmasinad, vaid ka liiga intensiivne rohumaa karjatamine loomade poolt aitab sellele kaasa. Erinevad uuringud on näidanud, et loomade poolt mulla tihendamine on eelkõige probleemiks sellistes kliimaatilistes piirkondades, kus on hõre rohtkate ja kõrbestumise oht. Sest esiteks loomade poolt tallamine vähendab veeimbumist mulda ja teiseks rohukate eemaldumisel väheneb ka veeimbumise võime mulda (Castellano *et al.*, 2007). Loomade poolt tallamine olenevalt looma massist ja mulla niiskusest ulatub sügavusele 5-20 cm (Kacorzyk *et al.*, 2009). Samas teised uuringud on leidnud, et üldjuhul mõjutab kõigest sügavust 2,5-5 cm (Warren *et al.*, 1986). Ühes Iirimaal läbiviidud karjamaa tallamise katsel leiti, et kui tallasid karjamaad rasked veised (545 ± 20 kg), siis selle penetromaatriline takistus erines statistiliselt oluliselt ($p < 0,05$), nii keskmiste (478 ± 20 kg), kui ka kergete (389 ± 20 kg) veiste tallamisest. Samas statistiliselt olulisust ($p < 0,05$) veiste massil mulla veesisalduse kui ka lasuvustiheduse kohta ei leitud. Mulla struktuuri uuriti ka 10 nädalat peale karjatamist, kus leiti, et muld on jätkuvalt tallatud ja järeldati, et tallamise kahjustus on eelkõige suur, kui alustada karjatamise hooaega liiga varakult, kus taimed on väiksed ja muld liiga niiske (Herbin *et al.*, 2011).

2.6. Tallatud mulla taastumine/taastamine

Loomulikul viisil 0-30 cm (st künnikihi) sügavusel tallatud mulda kobestavad jäätumine/sulamine, märgumine/kuivamine ja bioloogiline aktiivsus, näiteks vihmausside elutegevus ja taimede juured. Tallamise järelmõju suhtes on leitud põllumuldadel, et peale tallamist taastub muld loomulikul teel 1-5.aasta jooksul. Tugevama tallamise ja raskemate

lõimiste korral on see 3-5. aastat (Alakukku, 1996). Ühe pealiskaudse rohumaatallamise järelmõju katse puhul, mis tehti Šotimaal kasutades karjamaa raiheina leiti, et peale tallamist kahe aasta pärast hakkas mulla struktuur sügavuses 0-10 cm näitama paranemise märke, selle põhjuseks toodi jäätumist ja põuatsükleid, kui ka taime juurte mõju (Douglas *et al.*, 1998). Tallamise järelmõju vähendamiseks tuleb kasutada rohumaades õigeid rohumaakultuure. Monroe (*et al.*, 1987) poolt läbiviidud uuring näitas, et kaunviljalistest sobib mulla kobestamiseks eelkõige eelistatud lupiin (*Lupinus spp*). Ka lutserni kasvatamine on mulla seisukohast hea, tänu oma tugevale juurestikule. Aga vaatamata sellele, et lutsern on hea universaalne rohumaakultuur, mida kasutatakse nii karjatamisel, heinategemisel kui ka silotootmisel ja mis lisaks veel on suuteline tihendatud mulda oma tugeva juurestikuga taastada, on tegemist tallamise suhtes ühe väga tundliku kultuuriga, kus tallamise ehk ülesõitmise käigus võidakse väga tõsiselt kahjustada lutserni noori varsti (Caporali *et al.*, 1992). Sammasjuurestikuga taimed (kaheidulehelised), tänu oma tugevale peajuurele on suutelised paremini kasvama tihendatud muldadel, kui narmasjuurestikuga taimed (üheidulehelistel) ja seega sellisesse keskkonda sobilikumad (Ishaq *et al.*, 2001). Katsete põhjal puuvillaga on leitud, et mulla lupjamine ehk mulla kaltsiumiga (Ca) rikastamine, aitab kaasa tihenunud mullas juurtel paremini areneda, sest on leitud, et kui taimel on piisavalt kaltsiumi, siis on juurte diameeter suurem (Rosolem *et al.*, 1998).

Tehislikult saab rohumaade tihenemist mõnevõrra leevendada ka teatud tüüpi sügavkobesti piikultivaatoriga, mis õhustab mulda, lõigates pinnasesse sisse sügavaid sooni. Selle kohta on tehtud põldkatse Uus-Meremaal, kus pinnase kobestamiseks kasutati erinevat tüüpi õhutajaid, kuid kõik baseerusid pinnasesse surutud piide põhjal. Katsete tulemusel leiti, et alusmullas makropooride hulk suurenes keskmiselt 27%. Pinnase kobestamise tulemusel moodustunud kanalid võimaldasid kiiret õhu ja vee vahetust. Õhutamisel oli ka 2,5.a statistiliselt usutav järelmõju sügavusel 18-24 cm, ülemistes kihtides see-eest toimus lammaste karjatamise tõttu (tihedusega 1800 lammas ha⁻¹) taas tallamine. Õhutamisel leiti, et kui muld on liiga kuiv, siis ei toimu õhutamine korralikult. Loodetud efekti ehk statistiliselt usutavat saagi kasvu ei tulnud, seda põhjendati põua ja juurte kahjustusega (Drewry *et al.*, 2010).

Palju uuringuid on tehtud minimeerimisel mulla harimisel, eelkõige on uuritud, kas seal künnist loobumine põhjustab mulla tallamist. Üldiselt on leitud, et õige külvikorruga, kasutades vahekultuuridena tugeva juurestikuga taimi nagu lutserni (*Medicago sativa*), siis üldjuhul mullatallamisega probleeme ei tohiks esineda (Logsdon *et al.*, 2004). Ühe minimeeritud mullaharimise katse tulemusel on leitud, et keskmiselt tihendatud mullastruktuur paraneb kolme aasta jooksul (Ball *et al.*, 1997).

2.7. Tallamise mõju saagikusele

Saagikus üksi ei näita alati mulla tallamise kahjuliku külge, näiteks on leitud erinevatel kultuuridel, et taimede lämmastiku omastamine on tallamise suhtes palju tundlikum. Ühes katses rohusilo tootmise nelja aasta perioodil oli keskmiselt tallatud katselappidel keskmine saagikus 13-% väiksem ja lämmastiku omandamine koguni 18-% väiksem võrreldes tavalise tallamisega (Douglas *et al.*, 1995). Põllukultuuridest maisipuhul on leitud, et põlluharimisest tingitud tallamisel väheneb saak 10-22% (Phillips *et al.*, 1962). Tallatud mulla sügavamate kihtide mõju saagikusele on erinevate uuringute kohta väga vastuoluline. Näiteks köögiviljade aedsalati (*Lactuca sativa* 'Classic') ja brokkoli (*Brassica oleracea L. Italica* 'Bushido') puhul leiti, et kuigi peale tallamist oli sügavusel 17-30 cm küll taimede juurte tihedus 60-75% madalam, kui tallamata variandis, kuid seni kuni taimed olid piisavalt vee ja toitainetega varustatud saagikuse vahet polnud. Sellega näidati, et seni kuni taimed ei pea vett hankima sügavamatest mulla kihtidest, ei ole mulla tihenemine sügavamates kihtides probleemiks (Montaga *et al.*, 1998).

2.8. Tallamise mõju taimedele

Mulla tallamine mõjutab ka taimede juurte asetust ja morfoloogiat. Näiteks aruheina puhul on leitud, et tallatud rohumaal on juured jämedamad kui tallamata variandil. Näiteks neljakordsest ülesõidust põhjustatud tallamisel oli keskmine juurte diameeter 0,44 mm, samas kui tallamata variandil oli see keskmiselt 0,31 mm (Glab, 2007). Eelkõige peened juured on need, mis

omastavad vees lahustunud toitained (Jackson *et al.*, 1997). Juurte sügavus ja tihedus on oluline mulla struktuuri säilitamiseks (Tasser *et al.*, 2003). Tallamine on eriti kriitiline siis, kui seemned on alles idanemas ja juured pole korralikult arenenud. See on kinnitust leidnud Longdoni (*et al.*, 2004) uuringus, kus ta järeldas, et selles kasvufaasis vajavad taime nõrgad juured eriti vett ja toitained. Seda, et suurema lasuvustihedusega mullas taimede tärkamine on aeglasem, on ka leitud teistes uuringutes (Bartholomew *et al.*, 2010). Peale aeglasema tärkamise on ka tihedamas mullas tärkamise protsent madalam. Näiteks nisukatse puhul oli tallamata variandes tärkamine 93% ning tallatud variandis 72% (Radford *et al.*, 2000). Tallamine mitte ainult ei mõju negatiivselt mullale ja rohumassi saagikusele, vaid ka lämmastiku denitrifikatsioon on kordades suurem, kui tallamata rohumaadel. Leitud on, et N₂O emissioon sõltub suuresti ka sellest mis vormis lämmastik mulda antakse ning kõige vähem N₂O emissiooni esineb siis, kui viia lämmastikväetis mineraalväetisena mulda (Bhandral *et al.*, 2007). Leidud on ka, et tallatud rohumaal rohttaimed omastavad lägast lämmastiku halvemini, kui tallamata rohumaal, mis on tingitud halvemast vee läbilaskevõimest (Douglas *et al.*, 1998).

Karjamaa raiheinaga (*Lolium perenne*) on tehtud sisetingimustes katse, kus simuleeriti 7 mm paksuse vahakettaga takistust, mille penetromeetiline takistus on 1,6 MPa. Katse tulemusel selgus, et juured mis ületasid vahakettast, nende diameeter oli keskmisel 0,6 mm paksem, seda nii vahaketta sees, kui ka paar millimeetrit enne kettasse tungimist. Peale takistuse läbimist muutus juurte diameeter samasuguseks, nagu oli see takistuseta piirkonnas (Crush *et al.*, 2002).

Tallamine mõjutab taimi erineval moel, neid näitajaid on eelkõige uuritud laialt levinud ja otseselt inimtoiduks kasutatavatel teraviljadel. Näiteks on tehtud Austraalias odra puhul tallamise katse ja katsete tulemusel selgus, et tallamisel suurenenud lasuvustiheduse mõjul muutus odra ksüleemi vedeliku keemiline koostis, kus kaltsiumi (Ca) ja magneesiumi (Mg) kontsentratsioon suurenes, aga kaaliumi (K) kontsentratsioon hoopis vähenes. Kuna kaalium on otseselt seotud õhulõhede avamisega, siis see häirib otseselt taime gaasivahetust (Mulholland *et al.*, 1999).

Lutserni puhul on tehtud mitmeaastane tallamise katse aastatel 2003-2006, kus igal aastal kolm korda teostati tallamist neljas variandis. Olenevalt variandist tehti traktoriga (kaaluga 20,1 kN)

tallamist ehk ülesõite 0 (kontroll), 2, 4 ja 6 korda. Leiti, et mida intensiivsemalt tallati, seda kõrgemad olid lasuvustiheduse ja penetromeetrilise takistuse väärtused. Ka see katse kinnitas, et tallatud pinnases on juured tunduvalt jämedamad kui ka et kõige suurem juurte sisaldus on 0-10 cm sügavusel. Selle 4-aastase katsetulemuste põhjal järeldati, et lutserni juured suudavad muuta paremaks mullastruktuuri juba peale teist aastat, kuid need muutused ei pruugi ainult olla tingitud juurtest, vaid ka vihmausside elutegevusest ja ka külmumisest. 2003.a ilma tallamiseta olid mulla näitajad järgmised: lasuvustihedus $1,29 \text{ g cm}^{-3}$, penetromeetriline takistus $1,89 \text{ MPa}$ ja üldpoorsus $49,6\%$ ja kolme niitmise peale keskmine kuivaine saak $3,14 \text{ t/ha}^{-1}$. Samal aastal (2003), kuid variandis kus teostati 6 ülesõitu olid need näitajad: $1,43 \text{ g cm}^{-3}$; $3,18 \text{ MPa}$; $44,2\%$ ja $2,93 \text{ t ha}^{-1}$. Neli aastat hiljem (2006) olid ilma tallamiseta mulla näitajad: $1,28 \text{ g cm}^{-3}$; $1,74 \text{ MPa}$; $50,1\%$ ja $4,17 \text{ t ha}^{-1}$ ja variandis kus teostati 6. ülesõitu: $1,39 \text{ g cm}^{-3}$; $2,69 \text{ MPa}$; $45,7\%$ ja $3,51 \text{ t ha}^{-1}$ (Glab, 2008).

2.9. Tallamise mõju mullale

Mulla kõvadusest sõltub see, kui kergesti suudavad juured mullast läbitungida. Mulla kõvadust ehk penetromeetrilist takistust mõõdetakse penetromeetriga. See, et millise penetromeetrilise väärtuse juures taimede juured on suutelised mulda läbima, ilma et toimuks saagi langust ja taime kasvu pärssimist ei ole täpselt teada (Mari *et al.*, 2008). Kaera puhul on kriitiliseks penetromeetriliseks väärtuseks leitud $3,6 \text{ MPa}$ millest enam juured edasi tungida ei suuda (Ehlers *et al.*, 1983). Päevalille puhul jällegi on leitud, et takistus $2,0 \text{ MPa}$ on juurte tegevust pärssiv ja $3,0 \text{ MPa}$ on juurtele juba ületamatuks barjääriks. Samas tsitruste puhul on leitud, et kõigest $1,5 \text{ MPa}$ takistus on piisav, mis peatab juurte kasvu (Sotjka *et al.*, 1990). Brasiilia uurijad leidsid, et penetromeetriline takistus $>2,0 \text{ MPa}$ pärsib tugevalt juurte arengut (Tormena *et al.*, 2002). Ühes uuringus karjatamisel (loomad massiga $300\text{-}500 \text{ kg}$) on leitud, et olenevalt pinnase niiskusest sai rohi kannatada juba siis, kui penetromeetriline takistus oli isegi $0,6\text{-}0,8 \text{ MPa}$ (Scholz *et al.*, 1995). Eraldi karjamaa raiheina kohta on erialases kirjanduses väljatoodud, et juurte pikenemist hakkab häirima juba madal penetromeetriline takistus väärtusega $0,5\text{-}1,0 \text{ MPa}$ (Cook *et al.*, 1996). Mõningate uurijate järgi on ka taime juured suutelised $5,0 \text{ MPa}$ takistuse juures kasvama

(Bengough *et al.*, 1990). Kui mulla niiskus on kõrge, siis penetromeetrilise takistuse erinevus tallatud ja tallamata variandil on väike ja üldjuhul allapoole kriitilist piiri (> 2 MPa). Kui muld kuivab, tuleb tallatud ja tallamata mullal erinevus silmnähtavalt välja (Silva *et al.*, 2000). Karjamaa raiheina puhul on tehtud ka katseid potis, kus selgus, et lasuvustiheduse kasv väärtusel $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ kuni $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ põhjustas peaaegu 30% penetromeetrilise takistuse tõusu, mis tõi kaasa, et juurte pikkus vähenes 50%, mis oli tingitud eelkõige suurest põuast (Houlbrooke *et al.*, 2013).

See, millise lasuvustiheduse juures taime juurte areng on häiritud, sõltub palju mulla lõimisest. Näiteks teraviljadel on leitud, et kriitiline piir on: raske liivsavi puhul $1,55 \text{ g cm}^{-3}$, tolmla liivsavi puhul $1,65 \text{ g cm}^{-3}$, kerge liivsavi puhul $1,80 \text{ g cm}^{-3}$, saviliiv puhul $1,85 \text{ g cm}^{-3}$ (Bowen, 1981). Siiski tuleb tähelepanna, et need eelnevalt nimetatud väärtused on vägagi umbkaudsed ja erinevatel uuringutel leitakse erinevaid väärtusi. Näiteks riisi puhul on leitud, et raske liivsavi puhul kui on lasuvustihedus suurem kui $1,20 \text{ g cm}^{-3}$ on riisi juurte areng tugevasti häiritud (Kar *et al.*, 1976). Teised uuringud on näidanud, et maksimaalne lasuvustihedus olenemata lõimisest, kus taim üldse kasvada suudab on väärtusega $2,1 \text{ g cm}^{-3}$ (Singh *et al.*, 1992). Uuringutega on leitud, et lasuvustihedus erinevates sügavustest erineb ja suureneb väiksemalt määral, kui penetromeetriline takistus. Sellest järeldati, et tallamise suhtes penetromeetriline takistus on palju tundlikum parameeter kui lasuvustihedus (Balbuena *et al.*, 2001). Näiteks sojaoa kasvatamise katsel on leitud, et juurte kasv vähenes 10%, kui penetromeetriline takistus oli 0,52 MPa ja lasuvustihedus $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ ning juurte kasv vähenes 50 % kui takistus oli 1,45 MPa ja lasuvustihedus $1,69 \text{ g cm}^{-3}$ (Rosolem *et al.*, 1996 artiklist Mari *et al.*, 2008). Lasuvustihedusel on ka ühe uuringuga leitud, et lasuvustihedus on negatiivses korrelatsioonis lehtede pindala kui ka lehtede arvuga (Mapfumo *et al.*, 1998).

Inglismaal ühe põldkatse põhjal erinevate raiheina sortidega tehtud tulemustel järeldati, tallamise tulemusel väheneb õhuga täidetud pooride hulk, mis halvendab juurde õhuvahetust. Lisaks sellele suurenes ka lasuvustihedus, mis tähendab, et juurte areng ja funktsioneerimine oli raskendatud. See põhjustab omakorda halvenenud vee ja toitainete omastamist taimepoolt, mille tulemusena lõpuks vähenes ka kuivaine saak. Toitainetest leiti, et N, Ca ja Mg kontsentratsioon

taimedes vähenes tallamisega statistiliselt oluliselt, samas P ja K kontsentratsioon oli vähem mõjutatud, seda tõenäoselt see tõttu, et kasutati NPK väetist peale igat niidet (Frame *et al.*, 1996).

2.10. Väetamise mõju tallamisel

Erinevate väetiste mõju rohumaaadel on uurinud põhjalikult Glab (*et al.*, 2011), kes leidis oma katsetulemuste põhjal, et väetamine (100 kg N ha^{-1}) tõstab küll saagikust, kuid vähendab juurestiku kuivaine massi sügavusel 0-10 cm ja seega muudab juuri nõrgemaks, mis nõlvadel asuvatel rohumaaadel tähendab suurenenud erosiooni ohtu. Lisaks leiti, et lämmastikuga väetamine muudab ka taimede botaanilist koosseisu. Leiti, et N väetise lisamisega jäi protsentuaalselt vähemaks liblikõielisi ja suurenes kõrgekasvuliste heintaimede osakaal. Paraku selles uuringus ei võetud arvesse tallamist (Glab *et al.*, 2011).

Ühel teisel põldkatsel, kus kasutati heintaimede (sh karjamaa raihein) ja liblikõielise segu (*Trifolium pratense*) ja analüüsiti N väetamise mõju, leiti, et liigne väetamine (160 kg N ha^{-1}) vähendab juurestiku kuivaine massi, mis tähendab, et juurestik on peenem, lühem ja üleüldse nõrgem. See omakorda tähendab, et kui kasutatakse suuremas koguses N väetist, siis juurte kobestamisvõime tihendatud mullal on väiksem. Juurte kui ka saagikuse seisukohast, loeti kõige optimaalsemaks väetise koguseks 50 kg N ha^{-1} . Selle uuringu käigus leiti, et erinevate väetamisnormide mõju juurtel esines sügavusel 5-15 cm ja mulla ülemise kihis (0-5 cm) olevaid juuri ei mõjutanud tallamine ega erinevad väetise kogused. Leiti lisaks, et väetamine ei mõjutanud kuidagi statistiliselt usutavalt ($p < 0,05$) lasuvustihedust ega penetromeetrilist takistust (Glab, 2013). Samas on ka üks teine uurimus leidnud, et N väetise lisamine tugevdab juuri, kuid seda ainult väga madala huumuse sisaldusega muldades (Morell *et al.*, 2011).

2.11. Tallamise positiivsed küljed

Samas on mulla tallamise suhtes leitud ka positiivseid aspekte, näiteks vähene tallamine (tallamata $1,142 \text{ g cm}^{-3}$, tallatud $1,310 \text{ g cm}^{-3}$) mõjub mulla süsinikusisaldusele. Täpsemalt tallatud pinnasel on süsiniku leostumine mõnevõrra madalam (Deurer *et al.*, 2012). Lisaks sellele on leitud, et kui muld on liiga kobe, siis taime juurtel on halb kontakt mullaga ja sellest tulenevalt on saagikus madalam. Kuid teatud piirini kerge tallamise puhul, on parem kontakt mulla ja juure vahel ning saagikus suurem (Bouwman *et al.*, 2000).

2.12. Tallamise vältimine

Selleks, et rohumaa tallamist oluliselt vähendada või lausa vältida, tuleb kinnipidada järgmistest agrotehnilistest võtetest: 1) vähendada liikurmasina sildade koormust, 2) suurendada rehvide ja/või lintide mullaga kokkupuutuvad kontaktpinda, 3) vähendada rohumaa ülesõitude kordi ja/või vähendada karjatamise intensiivsust, 4) kasutada rohkem orgaanilist väetist mulla struktuuri tugevdamiseks, 5) liikuda ja karjatada ainult siis, kui on muld kuiv või väga kuiv (Hamza *et al.*, 2005), 6) vähendada liikurmaina rehvide rõhku (Diserens, 2009) ja kasutada liikumiseks kindlaid tehnoradasid (ingl: *Controlled Traffic Farming*) (Hamza *et al.*, 2005). Eelkõige tuleks rohumaa sõita siis, kui on muld piisavalt kuiv, et võimalikult minimeerida tallamist, sest tallatud muld mitte ainult ei vähenda rohumaa tootlikust, vaid ka vähendab väetiste efektiivsust (Campbell *et al.*, 1997). Veest küllastumata mullal niiskuse sisalduse suurenedes väheneb järsult mulla vastupanu võime tallamisele. Veest küllastunud mulda ei ole võimalik kokku suruda, ilma et sealt vett välja surutakse. Kõige kergemini on muld tallatav siis, kui ta on oma väliveemahu tasemel. Seega on tallamise vältimise seisukohast õige minna rohumaa ainult siis, kui muld on kuiv (Guerif, 1990).

3. Metoodika

3.1. Katse kirjeldus

Põldkatse viidi läbi Eesti Maaülikooli (EMÜ) Rõhu katsejaamas, mis asub Tartumaal Tähtvere vallas. Katsepõllu täpsemad WGS-84 koordinaadid on järgmised: N:58°21'31.81"; E:26°31'27.16". Katse, uurimaks tallamise mõju rohumaakultuuridele, rajati 2008. aastal.

Karjamaaraihein „Raidi“ (*Lolium perenne L.*) külvati normiga 40 kg ha⁻¹ 2008.a 8ndal septembril. Raiheina väetama hakati 2010.a mai algusest enne kasvu algust normiga 200 N kg ha⁻¹ ning jätkati veel kahel korral peale niidet, kus üks katseplokk jäeti ilma väetiseta (N0) ja teist väetati ammoniumsalpeetriga normiga N200.

Hübriidlutsern (*Medicago sativa*) sort „Karlu“ külvati 2009.a juunis külvisenormiga 18 kg ha⁻¹, kus liblikõielisele kultuurile kohaselt, täiendavat väetist ei antud.

Tallamise otsemõju taimikule ja mullale uuriti aastatel 2010-2011. Tallamine teostati pärast iga niidet (3-niiteline). Tallamisvariantidest olid katses tallamata (kontrollvariant) ja tallatud variant. Tallamiseks kasutati traktorit T-40 kaaluga 24,5 kN, millel oli külge ühendatud üheteljeline veega täidetud tsisternhaagis, mis kaalus 29,5 kN. Traktori ja haagise poolt põhjustatud rõhk pinnaühikule oli 118 kPa. Tallatud katsevariantidel sõideti kaks korda katselapp ühtlaselt üle, ehk sõideti jälg-jälje kõrval.

Antud töös uuriti tallamise järelmõju mullale ja taimikule 2012. aastal ning mullale 2013. aastal. 2012. aastal otsest tallamist ja väetamist ei teostatud, kuid taimikut niideti 3-l korral. Põld künti 2013. aasta kevadel ning sinna külvati raps.

3.2. Proovide võtmine

Mullaproovid koguti 2012. aastal 4-l korral: 27.04.2012, 06.06.2012, 30.07.2012 ja 11.10.2012. Esimene proovivõtt toimus pärast maa sulamist ning enne kasvuperioodi algust, ülejäänud 3-l korral võeti proovid pärast taimiku niitmist. 2013. aasta kevadel teostati ainult penetromeetrilise takistuse ja mulla mahulise veesisalduse määramine.

Mullaproovid koguti järgmiste näitajate määramiseks: 1) aeratsioonipoorsus e. õhuga täidetud poorsus, 2) üldpoorsus, 3) veesisaldus, 4) lasuvustihedus ja 5) veeläbilaskvus.

Kolmel esimesel korral võeti proovid terassilindritega sügavuselt 0-5 cm ja 20-25 cm, ning neljandal korral võeti proovid terassilindritega sügavuselt 0-30 cm iga 5 cm tagant. Proove võeti seest õõnsa terassilindritega, mille mahutavus oli $88,20 \text{ cm}^3$ ehk sisemõõtmelt diameeteriga 53 mm ja kõrgusega 40 mm. Proovid võeti 4-s korduses.

06.05.2013. kasutati mulla mahulise niiskuse (mahu %-des) mõõtmiseks percomeetrit, kus veesisalduse määramine baseerub mulla dielektrilisel läbitavusel. Mulla mahulist niiskust mõõdeti 6-s korduses igalt katsevariandilt.

Penetromeetrilised mõõtmised teostati kahel kuupäeval: 12.10.2012 ja 06.05.2013. Mõlemal aastal mõõdeti penetromeetrilist takistust 6-s korduses igalt katsevariandilt. Penetromeetrilist takistust mõõdeti sügavuseni 65 cm, kasutades 1 cm intervalli. Penetromeetrilise mõõtmise tegemiseks kasutati „Eijkelkamp“ PenetroLoggerit, mille koonuse nurk oli 60° ja pindala $1,0 \text{ cm}^2$ ning pinnasesse surumise kiirus oli 2 cm s^{-1} .

Taimeproove võeti katse jooksul 3 korda järgmistel kuupäevadel: 06.06.2012, 30.07.2012 ja 11.10.2012. Taimeproove koguti $0,25 \text{ m}^2$ metallraamist 4-s korduses. Seejärel lasti taimeproovidel kuivada. Iga mõõdetud taimeproovi mass korrutati hiljem neljaga saada tulemus g m^{-2} . Seejärel peale taimeproovide võtmist tehti katselappidel niitmine kergekaalulise niidukiga „Stiga Park“.

3.3. Laboratoorne töötlemine

Laboratoorsed analüüsid teostati Eesti Maaülikooli mullateaduse ja agrokeemia osakonna laboratooriumis. Laborisse viidud silinderproovide väliskülg puhastati üleliigsest mullast ja neid kaaluti. Peale seda asetati silindrites mullaproovid veevannile milles oli filterpaber, kus viidi proovide veesisaldus ühtsele tasemele ja kus pF 1,8 juures määrati aeratsioonipoorsus. Veevannile jäeti proovid üheks ööpäevaks. Veega küllastatud proovid asetati imamisplaatidele, kasutades EcoTech poorsuse määramise aparati ning kasutati imamisrõhku 60 hPa, kuhu jäeti proovid 10neks päevaks ehk seniks kuni proovidest rohkem vett välja ei tulnud. Seejärel imamisplaatidelt võetud proovid kaaluti uuesti üle ning asetati ööpäevaks termostaati kuivama temperatuuril 105,5°C. Kuivanud proovid jahutati kaaluti uuesti koos silindritega ja seejärel puhastatud silinder kaaluti omakorda.

Laboratoorse töötlemise käigus saadud andmete põhjal arvutati järgmised mulla näitajad (Leeduks, 2013):

1. Lasuvustihedus

$$Dm(g/cm^3) = \frac{p}{V}$$

Dm – lasuvustihedus, g/cm^3 ;

V – proovisilindri maht, cm^3 ;

p – proovi silindrisse mahtuva kuivamulla mass, g.

2. Üldpoorsus

$$Pü(\%) = \frac{De - Dm}{De} \times 100$$

$Pü$ – üldine poorsus, %;

De – tahke faasi tihedus, g/cm^3 ;

Dm – lasuvustihedus, g/cm^3 .

Tahke faasi tihedus

$$De = 2,67 - 0,03x$$

De – tahke faasi tihedus, g/cm³;

x – mulla huumusesisaldus, %.

3. Mahuline niiskus

$$Vw(\%) = \frac{Ww - Dw}{Dw} \times 100 \times Dm$$

Vw – mulla veesisaldus 60 hPa rõhu juures, %;

Ww – märja mulla mass proovi võtmisel, g;

Dw – absoluutkuiva mulla mass, g.

4. Aeratsioonipoorsus

$$Paer(\%) = Pü - pF_{1,8}$$

Paer – õhuga täidetud poorid, %;

Pü – üldine poorsus, %;

pF 1,8 – mulla veesisaldus 60 hPa rõhu juures, %;

Mulla veesisalduse (%) arvutamine 60 hPa rõhu juures

$$pF_{1,8}(\%) = \frac{W_{1,8} - Dw}{Dw} \times 100 \times Dm$$

W_{1,8} – märja mulla kaal 60 hPa, g;

Dw – absoluutkuiva mulla mass, g;

Dm – lasuvustihedus, g/cm³.

Veeläbilaskvuse puhul kasutati langeva veesamba ehk Hartge meetodit, mille tulemuste põhjal saadi mullaproovide veeläbilaskvus ühikus sendimeetrit/päevas ehk cm d⁻¹.Maapealse taimse biomassi teadasaamiseks lasti proovid õhu käes ära kuivada ja seejärel, kuna igat proovi võeti 0,25 m² pinnalt, siis korrutati 4ga, et saada ekvivalent grammi kuivainet ruutmeetri kohta (g m⁻²).

Käesolevas töös kasutatakse mulla penetromeetrilise takistuse ning mulla üldpoorsuse ja aeratsiooni poorsuse hindamiseks tabelleid 1 ja 2.

Tabel 1. Mulla tihenemise orienteeriv hinnang kõvaduste (MPa) kaudu mulla niiskusseisundil 0,8 väliveemahutavusest. Allikas: (Nugis *et al.*, 1991)

	Kobe muld	Tihenunud muld	Tihe muld	Väga tihe muld	Ülitihe muld	Surnuks tallatud muld	
Künnikiht	< 0,3	0,3...1,2	1,2...2,0	2,0...3,0	3,0...5,0	> 5,0	
Künnikihihialune kiht	Kerged mullad (l, sl, ls ₁)	< 1,2	1,2...2,0	2,0...3,0	3,0...5,0	5,0...8,0	> 8,0
	Rasked mullad (ls ₂ , ls ₃ , s)	< 0,8	0,8...1,6	1,6...2,6	2,6...4,0	4,0...6,0	> 6,0

Tabel 2. Mineraalmuldade erinevate poorsuste võrdlustabel. Allikas: (Altermann *et al.*, 2005)

Kirjeldus	Mulla üldpoorsus, %	Mulla aeratsiooni poorsus, %	Väliveemahutavus, %
Väga madal	< 30	< 2	< 21
Madal	30 kuni < 38	2 kuni < 5	21 kuni < 30
Keskmine	38 kuni < 46	5 kuni < 13	30 kuni < 39
Kõrge	46 kuni < 54	13 kuni < 26	39 kuni < 48
Väga kõrge	≥ 54	≥ 26	≥ 48

3.4. Mullastiku andmed

Mulla füüsikalised ja keemilised analüüsid on tehtud juba aastal 2007. Mulla analüüse on käsitlenud täpsemalt Janar Leeduks oma 2013.a magistritöös „Tallamise mõju mõningatele mulla füüsikalistele omadustele lutserni kasvatamisel“. J.Leeduksi magistritöö põhjal on ka teada, et katsepõllu mullaks on keskmise liivsavi lõimisega leetjas muld (*Haplic Luvisol*), kus künnikihis

on liiva 51,5%, tolmu osakesi 37,4% ja savi 11,1%. Täpsed füüsilised-keemilised mullaanalüüsi tulemused on välja toodud tabelis 3.

Tabel 3. 2007.a võetud ja mõõdetud mulla füüsilised ja keemilised omadused. Allikas: (Leeduks, 2013)

Horisont	A	El	Bt	C
Tüsedus (cm)	20	17	53	60+
Huumus (g kg ⁻¹)	13	3	2	-
Lämmastik (g kg ⁻¹)	14	6	4	-
Kaalium (mg kg ⁻¹)	108	77	92	61
Fosfor (mg kg ⁻¹)	292	-	-	-
Kaltsium (mg kg ⁻¹)	730	408	734	743
Magneesium (mg kg ⁻¹)	335	274	434	486
pH KCl	5,6	5,2	4,4	6,2
Liiv (0,063-2 mm) %	51,5	57,3	49,2	52,7
Tolm (0,002-0,063 mm) %	37,4	33	31,2	29,2
Savi (<0,002 mm) %	11,1	9,8	19,6	18,2
Lasuvustihedus (mg m ⁻³)	1,63	1,58	-	-

3.5. Statistiline andmetöötlus

Kõigepealt teostati toorandmete töötlemist sobilikule kujule, kus lisaks arvatati aritmeetilised keskmised, standardvead ja standardhälbed. Andmete statistilise usutavuse määramiseks tehti mitmefaktorilisi dispersioonanalüüse (ANOVA) ja tulemuste statistilist olulisust määrati Tukey HSD testiga. Mõlema näitaja puhul loeti usutavaks/oluliseks sellist tulemust kus $p \leq 0,05$, sest lähtuti 95% usutavuse/olulisuse tasemest, millest lubatud viga on maksimaalselt 5%.

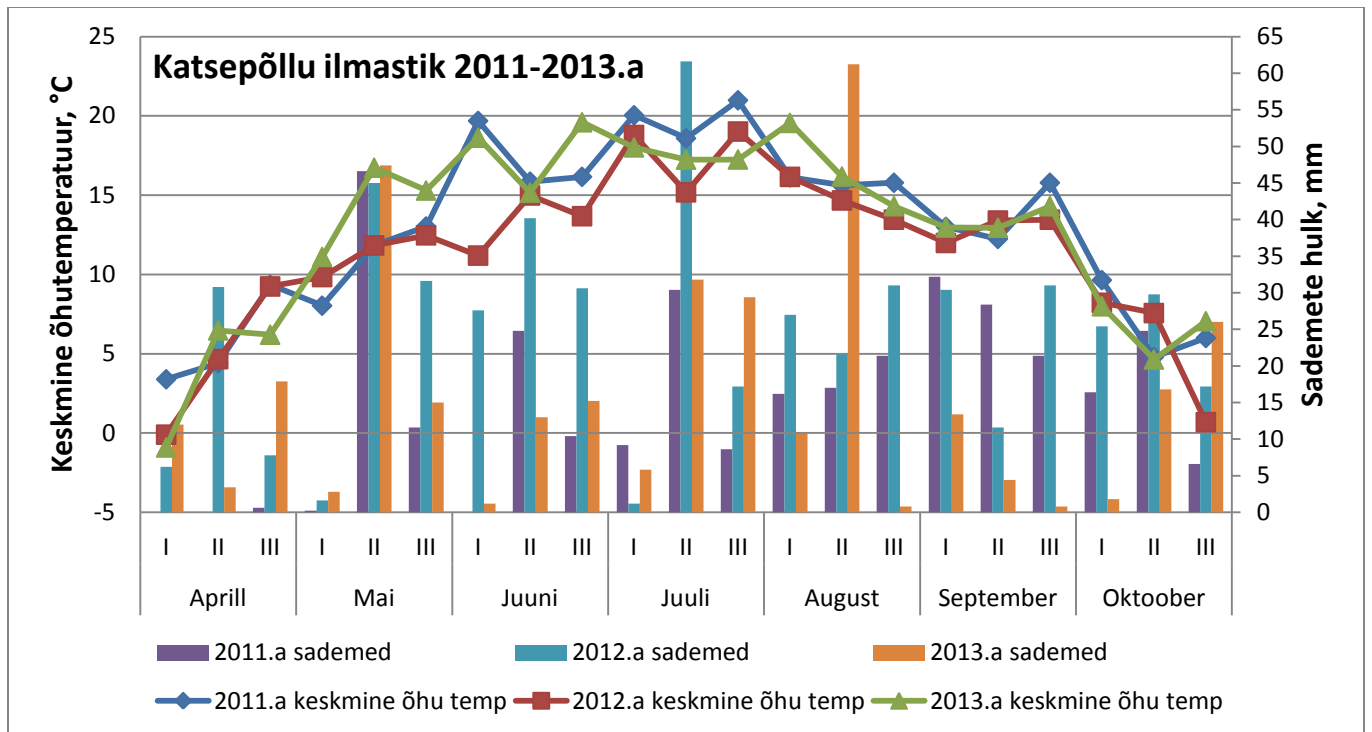
Katsetulemuste töötlemisel ja analüüsimisel kasutati kahte järgmist programmi: 1) Microsoft Excel 2007 – millega teostati kirjeldav statistika ja tabelid/joonised ja 2) StatSoft STATISTICA 8.0. – millega seostati ANOVA ja Tukey HSD test.

3.6. Ilmastiku andmed

Ilmastiku andmed pärinevad Eesti Maaülikooli (EMÜ) Rõhu katsejaamas paiknevast (koordinaadid: N: 58°21'27.16"; E: 26°31'21.41") ilmajaamast „*METOS compact*“. Perioodidel 08.02.2010 kuni 14.02.2010 ja 01.11.2012 kuni 07.05.2013 kasutati EMHI (Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi) Tõravere ilmajaama õhutemperatuuri ja sademete andmeid, sest siis ei olnud tehnilistel põhjustel Rõhu ilmajaama andmed kätte saadavad. Joonisel nr 1 on välja toodud katsepõllu ilmastiku kolme aasta (2011, 2012, 2013.a) vältel, kus on kuud jaotatud kolme dekaadi.

Seoses sellega, et Eestis on kuid, kus õhutemperatuur ja maapinna temperatuur on alla nulli, siis antud töö puhul võeti arvesse sellised kuud, kus kuu dekaadi keskmine õhutemperatuur üle nulli (eranditeks esimesed dekaadid 2012.a ja 2013.a aprillis väärtustega $-0,10^{\circ}\text{C}$ ja $-0,91^{\circ}\text{C}$), eesmärgiga vaadata perioodi, kus vesi on vedelas olekus ja kus toimub taimede kasv.

Temperatuur antud perioodil on kolme aasta vältel olnud vägagi stabiilne. Kõige soojem periood (st perioodi kuudekaadide aritmeetiline keskmine) on olnud 2013.a $12,89^{\circ}\text{C}$ ja 2011.a $12,81^{\circ}\text{C}$. Jahedam on olnud 2012.a väärtusega $11,44^{\circ}\text{C}$. Sademetega on olukord palju ebastabiilsem vaatamata sellele, et valitud perioodi aastatel oli sademeid summaarselt 2013.a 330,9 mm, 2012.a 526,4 mm ja 2011.a 326,8 mm, siis sademete jaotus igal aastal oli väga erinev. Võrdväärselt sademeid oli ainult kõigil 3.aastal mai 2.dekaadil (11,83-16,73 mm), ülejäänud aegadel oli erinevatel aastatel sademete paiknemine väga ebauhtlane. Näiteks 2011.a aprilli kuu oli väga põuane.



Joonis 1. Katsepõllu ilmastiku andmed dekaadide lõikes aprillist oktoobrini perioodil 2011-2013Rõhu ja Tõravere ilmajaama andmetel.

4. Uurimistöö tulemused ja arutelu

4.1. Lasuvustihedus

Dispersioonanalüüsi tulemused (Tabel 4), mis teostati mulla lasuvustiheduse kohta näitavad, et tulemused on sõltuvalt proovide võtmise kuupäevast väga muutlikud. Ainukene, mis oli kolmanda niite ajal konstantne, oli lutserni puhul tallavuse ja sügavuse koosmõju, kus ei esinenud statistilist usutavust. Sellest hoolimata oli mõlemal kasvatatud kultuuril ka usutav mõju enamusel proovivõtu kordadel ka tallavusel, väetusel ja sügavusel. Lutserni puhul mängis mulla sügavus vähem rolli, kui raiheinal, mis võib olla tingitud, et lutserni juurestik on tugevam ja ulatus sügavamale. Üldpildis oli lasuvustihedus kasvuperioodi algusest, kuni kolmanda niiteni

langenud (Joonis 2). See langus oli eelkõige suurem tallamata variantidel. Viimasel ehk kolmandal niitel (Joonis 3), toimub peaaegu igal variandil lasuvustiheduse tõus, sest sügiseks oli taimede kasv aeglustunud ning kuna sellel ajal oli mulla niiskus kõige suurem, siis katselapil teostatud niitmise kui ka proovide võtmisega tehti täiendavat tallamist. Lasuvustihedus kasvas tallatud variantidel rohkem kui tallamata. Tulemuste puhul leiti, et väetatud raiheinal lasuvustihedus tallatud ja tallamata variantidel statistiliselt oluliselt ei erinenud.

Tabel 4. Mulla lasuvustiheduse mitmefaktoriline dispersioonanalüüs (ANOVA).

Variant	<i>p</i> -väärtus (95 % usutavuse juures)							
	Lasuvustihedus, g/cm ³							
	Raihein, 27.04.12	Raihein, 06.06.12	Raihein, 30.07.12	Raihein, 11.10.12	Lutsern, 27.04.12	Lutsern, 06.06.12	Lutsern, 30.07.12	Lutsern, 11.10.12
Väetus (A)	0,002*	0,000*	0,250	0,000*	-	-	-	-
Tallavus (B)	0,000*	0,509	0,000*	0,000*	0,000*	0,025*	0,091	0,000*
Sügavus (C)	0,070	0,001*	0,003*	0,025*	0,491	0,037*	0,877	0,000*
A+B	0,004*	0,164	0,032*	0,003*	-	-	-	-
A+C	0,305	0,750	0,409	0,001*	-	-	-	-
B+C	0,373	0,012*	0,001*	0,914	0,702	0,156	0,877	0,434
A+B+C	0,052	0,360	0,102	0,034*	-	-	-	-

*usutav 95% usutavusnivoo juures

Uurimistöö ajal katselappide lasuvustihedus (Joonis 2; Joonis 3) ei ületanud kordagi taimedele kriitilist lasuvustihedust 1,84 g cm⁻³. See on väärtust, mille juures katkeb taimede areng ja nad hukuvad, see on väärtusega 1,84 g cm⁻³ (Nugis *et al.*, 1991). Ka taimede eelkriitilist lasuvustihedust, mille juures katkeb taime juure areng ning mis oli väärtusega 1,73 g cm⁻³ ei ületanud üksi proov, kuid sellest hoolimata olid mõned korrad selle piirile lähedal. Näiteks kuupäeval 27.04.2012 tallatud lutserni variant sügavusel 20-25 cm oli 1,68 g cm⁻³ ja kuupäeval 11.10.2012 väetamata tallatud raiheinal oli sügavustes 5-10,10-15,15-20 ja 20-25 cm märkimisväärselt suur lasuvustihedus (> 1,60 g cm⁻³) võrreldes tallamata variantidel, kus need erinesid ka statistiliselt oluliselt. Samal kuupäeval väetatud raiheina variandil oli vahe tallatud ja tallamata variantidel väike, kus lasuvustihedus jäi valdavalt < 1,50 g/cm⁻³ ning ainus statistiliselt oluline erinevus esines sügavusel 25-30 cm. Lutserni puhul on kuupäeval 11.10.2012 analoogne olukord väetamata raiheinaga, kus on tallatud variantidel selgelt suurem lasuvustihedus, kui tallamata variantidel ja lisaks esineb kõikides sügavustest (v.a 0-5 cm) statistiliselt usutav erinevus. Hoopis teine lugu on mullale kriitilise lasuvustihedusega, mis antud lõimise juures jääb

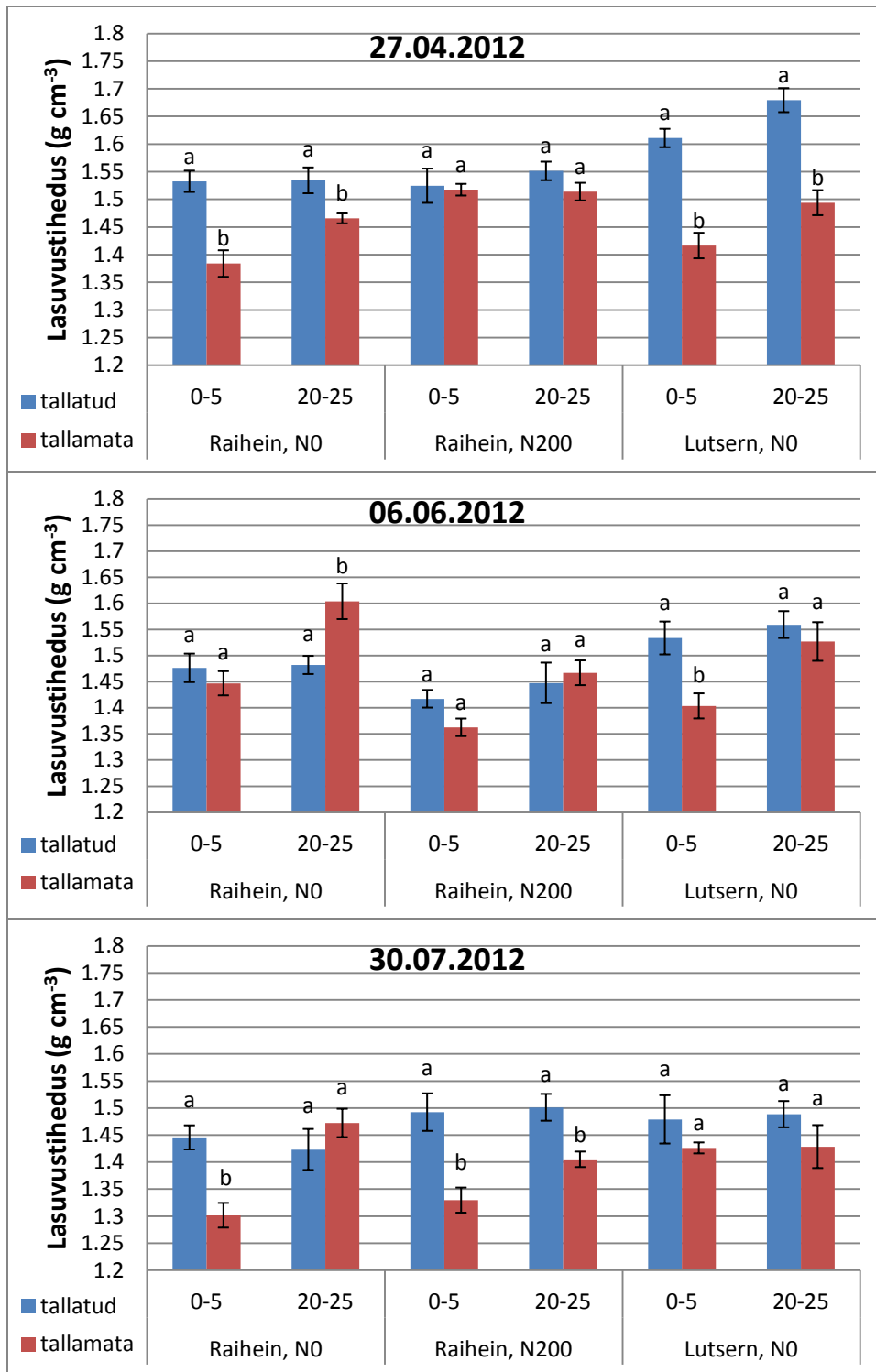
vahemiku $1,40-1,67 \text{ cm}^{-3}$. See näitaja on seotud otseselt mulla iseenesliku kobestusega, sest selle taseme ületamisel ei toimu 3-5 aasta jooksul iseenesliku mulla kobestust (Nugis *et al.*, 1991). Olenevalt sellest, et kuivõrd rangelt seda vahemikku jälgida, on tallatud variantidel see kriitiline piir ületatud ja enamusel tallamata variantidest (eelkõige kuupäevadel 06.06.2012 ja 30.07.2012) on selle kriitilise piiri alumine väärtus ka ületatud.

Tulemustes esinenud suurem lasuvutihedus sügavamates mullaproovidest on tõenäoliselt tingitud sellest, et seal on huumuse sisaldus väiksem, sest on teada, et mida väiksem on mulla veesisaldus ja huumuse protsent, seda suurem on mulla lasuvutihedus (Roostalu *et al.*, 2013). Peale selle on leitud, et suurim juurte sisaldus asub sügavusel 0-10 cm ja allapoole toimub kiire juurte sisalduse langus (Glab, 2008). Kuna juured on olulised mulla kobestajad, võib sellest järeldada, et sügavamates kihtides on juurte kobestusvõime nõrgem. Kuigi antud töös vihmausside mõju tallamise taastumises ei uuritud, võib spekuloida, et ka vihmaussid mängisid tõsiselt võetavat rolli koos juurtega kobestamise protsessis, sest teistes uuringutes on leitud, et mulla tihendamise tingitud lasuvutiheduse suurenemisel $1,46 \text{ g cm}^{-3} \rightarrow 1,57 \text{ g cm}^{-3}$ vihmausside arvukus vähenes 40-70%. Lisaks leiti veel seal katses, et vihausside taastumine oli kiire, juba peale kolme kuud ei olnud statistilist olulist erinevust tallatud ja tallamata piirkondades (Yvan *et al.*, 2012).

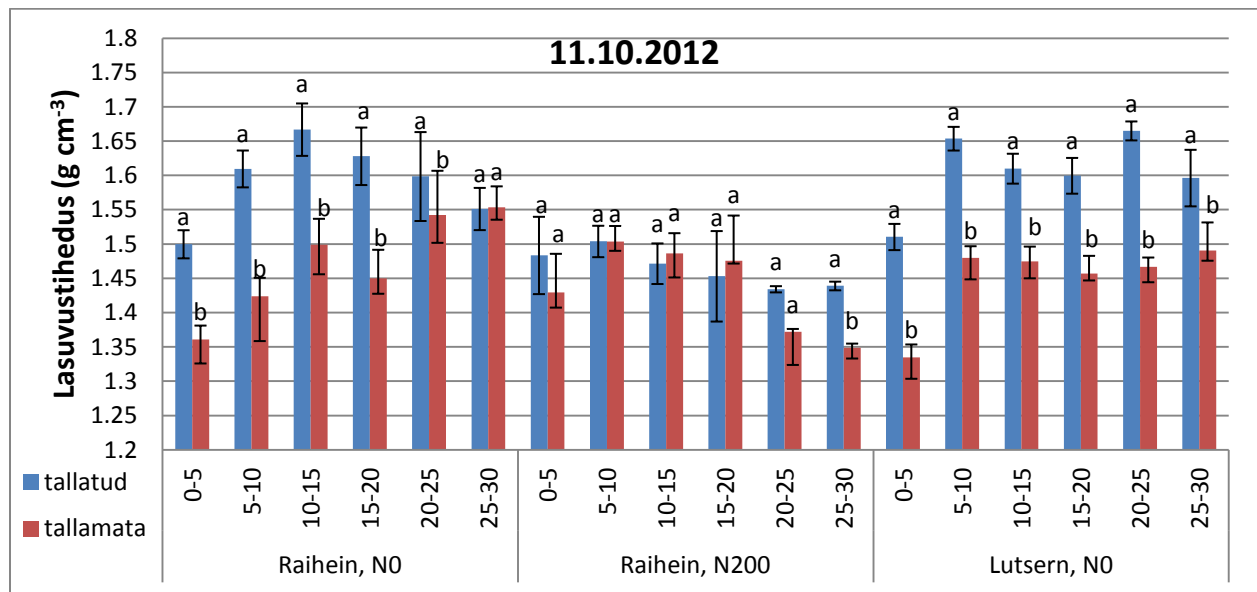
Antud katses esines väetatud ja väetamata raiheina variantidel mõnevõrra erinevus, kus täpsemalt väetatud variantidest oli lasuvutihedus mõnevõrra madalam, võrreldes väetamata variantides. See on natukene vastuoluline kahe teise samalaadse lasuvutiheduse uuringuga, kus leiti et karjamaa raiheina (*Lolium perenne*) väetamine normiga 100 kg N ha^{-1} , kui 160 kg N ha^{-1} , vähendas juurestiku kuivaine massi, seda eelkõige sügavusel 0-15 cm, mis muutis juurestiku nõrgemaks (Glab, 2011; 2013). Lisaks ühes uuringus leidnud, et väetamine, ei mõjuta kuidagi statistiliselt usutavalt ($p < 0,05$) lasuvutihedust ega penetromeetrilist takistust (Glab, 2013). Samas üks teine uuring on leidnud hoopis, et kui taim paneb tallamisest tekitatud stressi tulemusel rohkem rõhku roma juurestiku arendamisele, siis seoses piiratud saadaolevate toitainete tõttu võib kannatada taime maapealne biomass saagikus (Crush *et al.*, 2002). Seega antud juhul võib järeldada, et väetatud variandis suutis raihein mõnevõrra rohkem arendada oma

juurestikku ja seoses tihedama ja tugevama juurestikuga mõnevõrra rohkem kobestada mulda, kui see oli väetamata raiheina puhul. Teine võimalik seletus selle kohta on, et kasvuperioodil oli põud ja väetatud taimel oli rohkem ressursse, et arendada oma juurestiku, mis suutis sügavamatest kihtidest ja/või tänu tihedamale juurestikule paremini niiskust omastada. Kolmas põhjus võib peituda selles, et lämmastikväetis mida anti 2010.a suvel kaks korda normiga 200 kg ha⁻¹, mis oli käesoleva uurimistöo ajaks suuresti ammendunud, kuid sellegi poolest omas veel olulist järelmõju. Näiteks otsemõju uuringutega karjamaa raiheinal (*Lolium perenne* L) on leitud, et juurte ja saagikuse seisukohast on kõige ideaalsem väetise kogus 50 kg N ha⁻¹ (Glab, 2013). Seda omakorda kinnitab üks teine uuring mis on leidnud, et N väetise lisamine tugevdab juuri, kuid seda ainult väga madala huumuse sisaldusega muldades (Morell *et al.*, 2011).

Ideaalseks mullaks nimetatakse sellist mulda mille moodustavad 50% erinevad poorid ja 50% tahke aine ning omaks lasuvustihedust ~1,30 g/cm⁻³ (Chancellor, 1977). Kuigi kõikides käesolevates mullaproovides oli lasuvustihedus suurem, kui eelnevalt nimetatud „ideaalses mullas“, siis sellest hoolimata nii tallatud, kui ka tallamata variandid jäid taimede seisukohast sobilikku piirkonda, mis tähendab, et lasuvustihedus on taimedele sobilik ja kuigi mulla iseeneslik kobestus on aeglustatud, suudavad sellele kaasa aidada taime juured. Vaatamata mõningasele lasuvustiheduse taastumisele, eelkõige väetatud raiheina puhul, selgus, et tallamisest põhjustatud lasuvustiheduse suurenemise taastumine on pikaajaline protsess, kui seda lastakse teha loomulikul teel, milleks on bioloogilised faktorid (st taimed juurestik, vihmaussid) kui ka abiootilised faktorid (nt külmumine ja põua/niiskuse tsüklid). Taimede seisukohast ei tohi vaadata ainult lasuvustihedust, sest see ei anna täielikku ülevaadet. Paremaid tallamisest tingitud muutuseid mulla omaduste kohta annavad erinevad vee ja õhu näitajad (Carter, 1990).



Joonis 2. Mulla lasuvustiheidus (g cm^{-3}) kevadel kasvuperioodi alguses (27.04.2012), pärast I niidet (06.06.2012) ja pärast II niidet (30.07.2012) sõltuvalt tallamise järelmõjust ja kultuurist erinevates sügavustes. Vertikaaljooned näitavad standardviga. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe sügavuse piires Tukey testi alusel.



Joonis 3. Mulla lasuvustihedus (g cm^{-3}) pärast III niidet (11.10.2012) sõltuvalt tallamise järelmõjust ja kultuurist erinevates sügavustes. Vertikaaljooned näitavad standardviga. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe sügavuse piires Tukey testi alusel.

4.2. Üldpoorsus

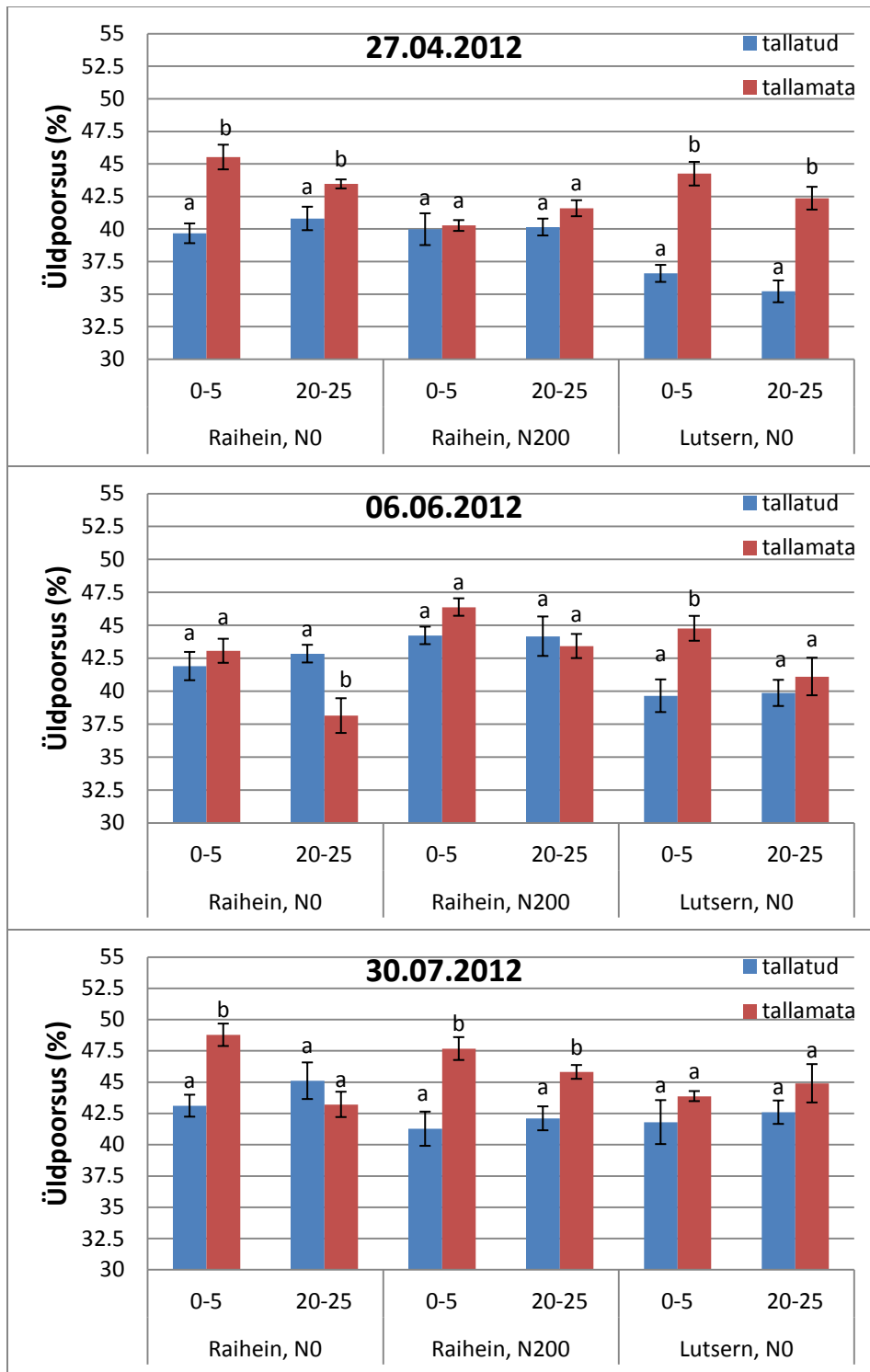
Kuna üldpoorsuse ja lasuvustiheduse vahel on tihed seos, siis nii üldpoorsuse dispersioonanalüüs (Tabel 7), kui ka joonised (Joonis 6; Joonis 7) on omavahel sarnased lasuvustiheduse näitajatele. Võrreldes lasuvustihedusega on üldpoorsuste tulemused pöördvõrdelised, st et mida madalam lasuvustihedus, seda kõrgem üldpoorsuse % ja vastupidi. Üldpoorsus nelja mullaproovi tulemusel näitas, et muld muutus poorsemaks ning mõningate eranditega, eelkõige kolmanda niite ajal, kus oli palju sademeid, vähenes erinevus tallatud ja tallamata variantide puhul. Tallamise puhul on teada, et muudab mulla üldist poorsust, kus vähenevad suured poorsused ja tuleb juurde väikseid poore (Shestak *et al.*, 2005). Ning mida intensiivsemalt ratastega mulda tallatakse, seda rohkem muutuvad mullas erineva suurusega poorsused (Horn *et al.*, 2003). Vähenevad just makropoorsused suuruses ($>30 \mu\text{m}$) (Alakukku, 1999). Üldpoorsuse puhul on märkimisväärsed tulemused kolmanda niite korral, mis oli tänu sademetele ka kõige märjem. Seal oli väetatud raihein ka ainukene kultuur sellel proovide võtmise korral, kus puudus kuni

sügavuseni 25 cm statistiliselt usutav mõju tallatud ja tallamata variantidel. See iseärasus on tõenäoliselt tingitud sellest, et väetamise järelmõjul mulda jäänud lämmastik muutis taimede juurestiku tihedamaks ja tugevamaks. Lisaks sellele oli kolmanda niiteajal väetatud raihein ka ainukene kultuur, kus olenemata tallamisest üldpoorsus oli keskmisel tasemel ehk >38%, mõlemal teisel kultuuril oli tallatud variandi madala üldpoorsuse tasemega ehk < 38% (Tabel 2).

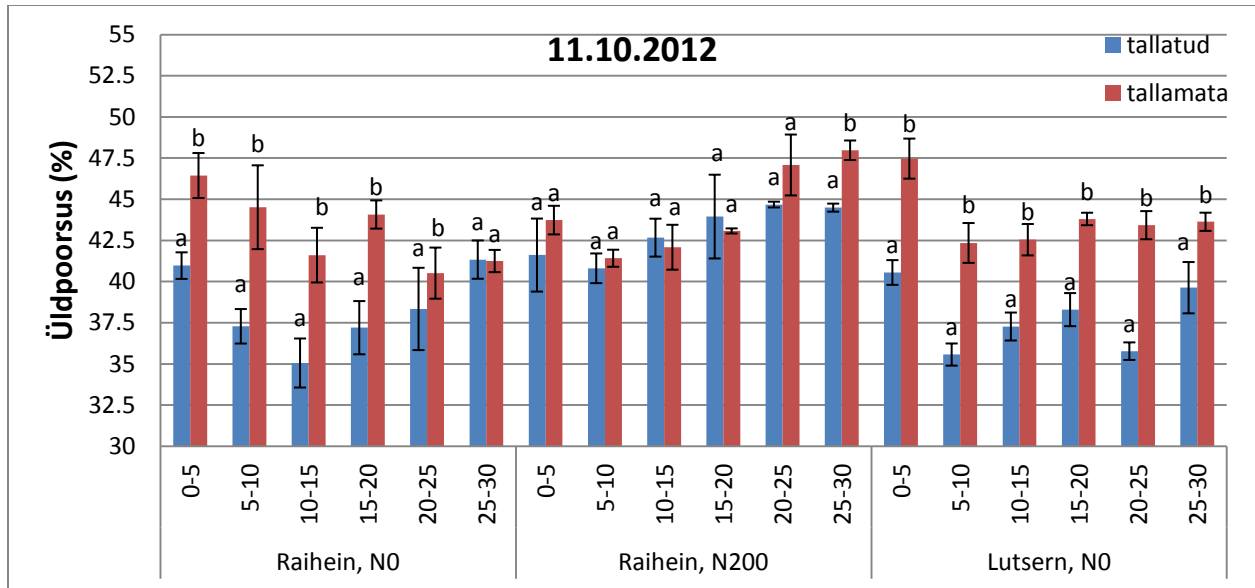
Tabel 5. Mulla üldpoorsuse mitmefaktoriline dispersioonanalüüs (ANOVA).

Variant	<i>p</i> -väärtus (95 % usutavuse juures)							
	Üldpoorsus, %							
	Raihein, 27.04.12	Raihein, 06.06.12	Raihein, 30.07.12	Raihein, 11.10.12	Lutsern, 27.04.12	Lutsern, 06.06.12	Lutsern, 30.07.12	Lutsern, 11.10.12
Väetus (A)	0,001*	0,000*	0,261	0,000*	-	-	-	-
Tallavus (B)	0,000*	0,535	0,000*	0,000*	0,000*	0,022*	0,092	0,000*
Sügavus (C)	0,787	0,043*	0,122	0,009*	0,065	0,202	0,478	0,000*
A+B	0,004*	0,150	0,034*	0,003*	-	-	-	-
A+C	0,286	0,774	0,387	0,003*	-	-	-	-
B+C	0,354	0,012*	0,001*	0,879	0,765	0,150	0,937	0,425
A+B+C	0,057	0,383	0,103	0,035*	-	-	-	-

*usutav 95% usutavusnivoo juures



Joonis 4. Mulla üldpoorsus (%) kevadel kasvuperioodi alguses (27.04.2012), pärast I niidet (06.06.2012) ja pärast II niidet (30.07.2012) sõltuvalt tallamise järelmõjust ja kultuurist erinevates sügavustes. Vertikaaljooned näitavad standardviga. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe sügavuse piires Tukey testi alusel.



Joonis 5. Mulla üldpoorsus (%) pärast III niidet (11.10.2012) sõltuvalt tallamise järelmõjust ja kultuurist erinevates sügavustes. Vertikaaljooned näitavad standardviga. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutatavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe sügavuse piires Tukey testi alusel.

4.3. Aeratsioonipoorsus

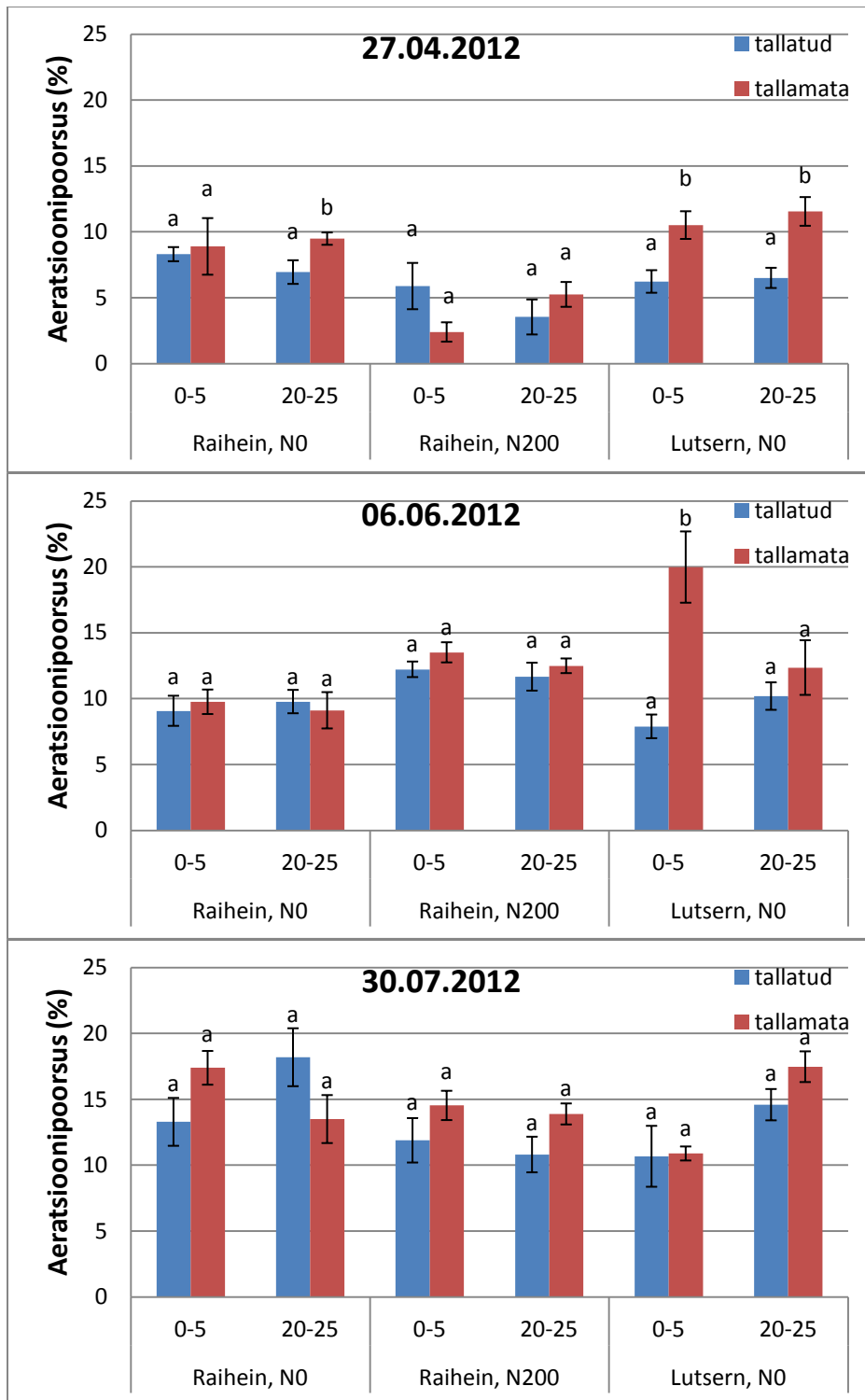
Väetamine igal raiheina proovide võtmise korral (Tabel 6) mõjutas mulla aeratsioonipoorsust statistiliselt usutatavalt. Raiheina puhul märkimisväärne tulemus oli ka see, et peale eelnevalt nimetatud esines statistilist usutatavat mõju aeratsioonipoorsusele veel tallavusel, sügavusel, nende mõlema koosmõjul ning väetavuse ja sügavuse koosmõjul just viimaselt proovi võtmise korral. Lutserni puhul see-eest oli statistiliselt usutatav mõju tallavusel ja sügavusel peaaegu igal proovide võtmise kuupäeval. Vaadates tulemusi visuaalselt (Joonis 6; Joonis 7), siis üldises pildis kasvuperioodi algusest kuni pärast teist niidet, toimus aeratsioonipoorsuse kasv ning kolmanda niite ajal tulemused erinesid selle poolest, et poorsuste erinevus tallamata ja tallatud variantide puhul oli kõige suurem, kus enamus juhtudel esines ka statistiliselt oluline erinevus. Lisaks sellele oli peale kolmandat niidet ka poorsus raiheinal kõige madalam. Selle põhjuse taga võib pidada eelkõige suurt niiskust, mis sügisel oli kõige suurem ja täitis poorid veega. Kuna aeratsioonipoorsus sõltub palju üldpoorsusest ja veesisaldusest, siis see näitaja on ka muutlik

väga suurtes piirides (Roostalu *et al.*, 2012). Ka antud uurimise käigus selgus, et proovide varieeruvus erinevatel kuupäevadel oli suur. Mulla õhustatusel on oluline roll mulla elusorganismidele. Sellest, kui hästi on muld õhustatud, sõltub ka see, mis toidulised nematoodid seal elavad. Näiteks halvasti õhustatud tingimustes hakkab mullas domineerima herbivoorsed bakterid, kes võivad kahjustada taimede juurestikku (Weischer, 1959 artiklis Bouwman *et al.*, 2000). Aeratsioonipoorsusel on tihe positiivne korrelatsioon veeläbilaskevõimel, mis tähendab, et mida parem on õhustatus mullal, seda paremini ja kiiremini pääseb vesi mulda, mis omakorda tagab taimedele parema keskkonna ja tõstab väetamise puhul ka väetise efektiivsust (Sveistrup *et al.*, 1997). Üldpilt mulla aeratsioonipoorsusel oli hea, sest poorsus varieerus keskmise ja kõrge taseme juures. Eranditeks olid väetatud tallamata raihein kuupäeval 27.04.2012 ja tallatud raihein kuupäeval 11.10.2012, kus aeratsiooni poorsus oli <5%, mis Altermann *et al.*, (2005) tabelis 2 tähendab madalat ja väga madalat aeratsioonipoorsust. Selle põhjus võib olla tingitud sellest, et sel perioodil oli taimede kasv aeglustunud ja juurestik nõrgem, kui tallamata variantidel. Märkimisväärne tulemus on see, et neljandal ehk viimasel proovide võtmise korral selgus, et väetatud raiheinal olid tallamata ja tallatud variantide poorsuste väärtus võrdne ja puudus igasugune statistiliselt oluline mõju (v.a sügavus 25-30 cm). Võib olla oli see põhjustatud sellest, et väetamise käigus muutus juurestik tihedamaks ja peenemaks mis suutis paremini mulda õhustada (Glab, 2013). Kõige sügavamale ehk 25-30 cm sügavusele, aga see tihe ja peen juurestik ei suutnud tungida. Selle põhjal järeldati, et mõõdukas väetamine suudab aidata mulla õhutamisele kaasa, seda just künnikihis.

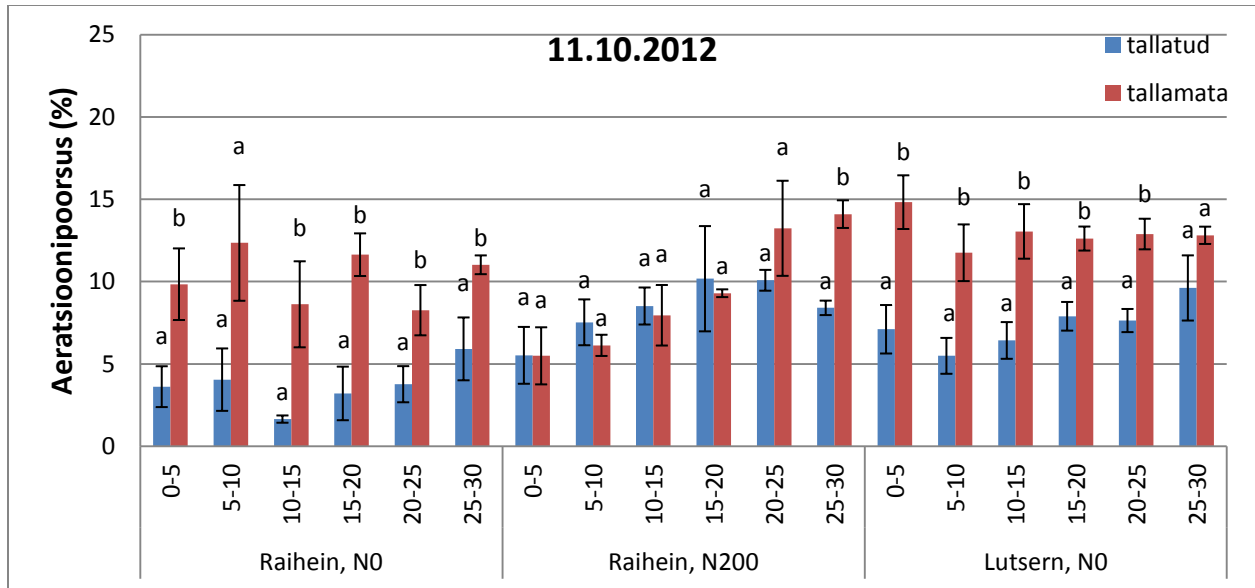
Tabel 6. Mulla aeratsioonipoorsuse mitmefaktoriline dispersioonanalüüs (ANOVA).

Variant	<i>p</i> -väärtus (95 % usutavuse juures)							
	Aeratsioonipoorsus, %							
	Raihein, 27.04.12	Raihein, 06.06.12	Raihein, 30.07.12	Raihein, 11.10.12	Lutsern, 27.04.12	Lutsern, 06.06.12	Lutsern, 30.07.12	Lutsern, 11.10.12
Väetus (A)	0,000*	0,000*	0,013*	0,010*	-	-	-	-
Tallavus (B)	0,694	0,524	0,253	0,000*	0,000*	0,000*	0,294	0,000*
Sügavus (C)	0,950	0,642	0,877	0,032*	0,491	0,094*	0,001*	0,000*
A+B	0,169	0,544	0,156	0,000*	-	-	-	-
A+C	0,720	0,631	0,546	0,046*	-	-	-	-
B+C	0,047*	0,584	0,064	0,948	0,702	0,003*	0,364	0,434
A+B+C	0,362	0,793	0,041*	0,209	-	-	-	-

*usutav 95% usutavusnivoo juures



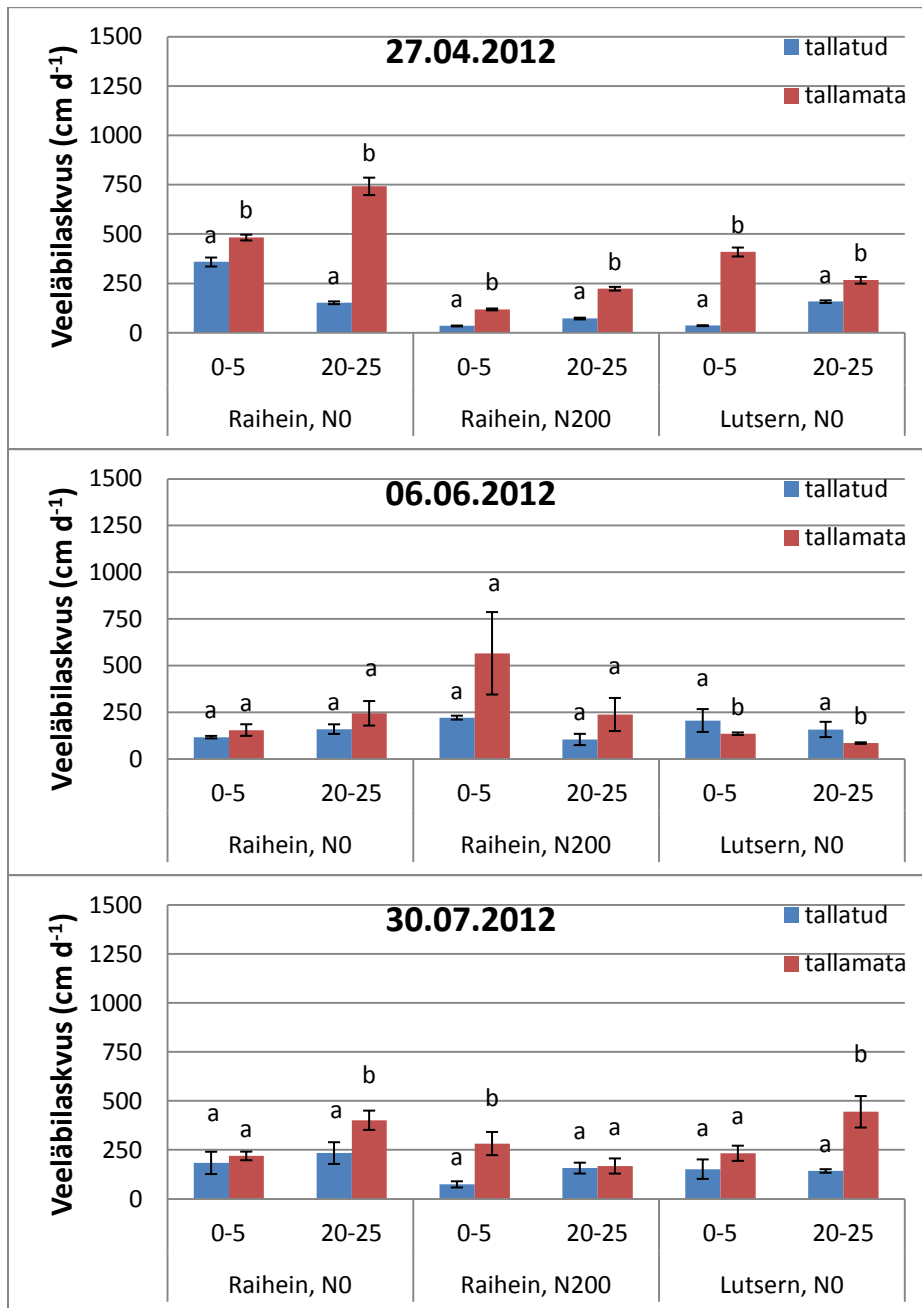
Joonis 6. Mulla aeratsioonipoorsus (%) kevadel kasvuperioodi alguses (27.04.2012), pärast I niidet (06.06.2012) ja pärast II niidet (30.07.2012) sõltuvalt tallamise järelmõjust ja kultuurist erinevates sügavustes. Vertikaaljooned näitavad standarddviaga. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe sügavuse piires Tukey testi alusel.



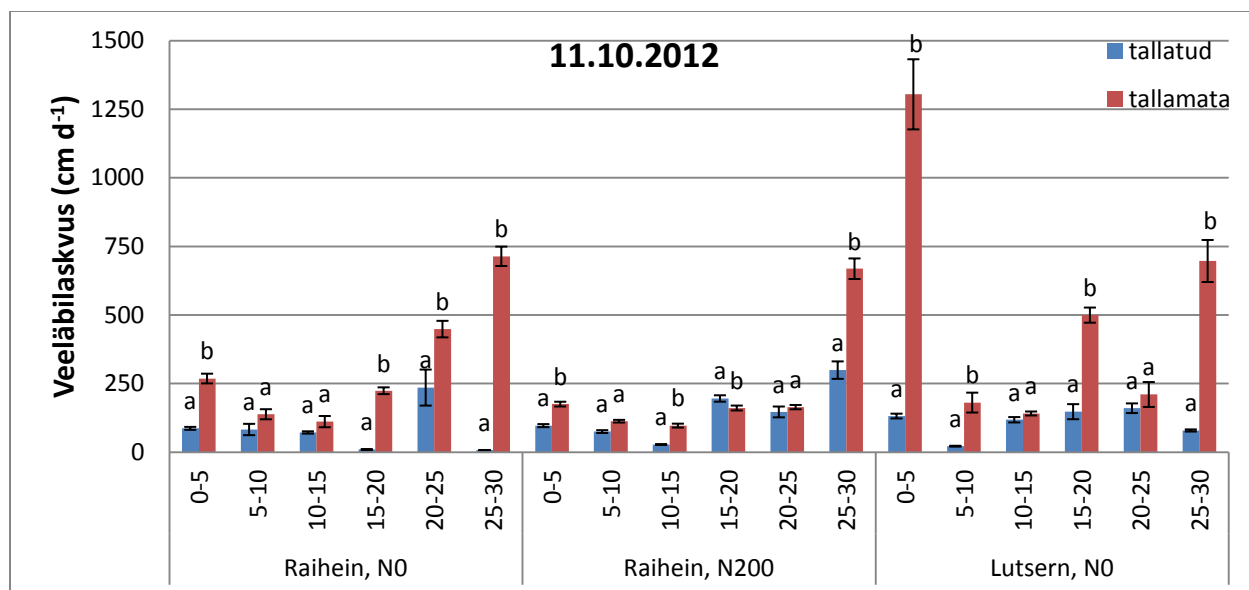
Joonis 7. Mulla aeratsioonipoorsus (%) pärast III niidet (11.10.2012) sõltuvalt tallamise järelmõjust ja kultuurist erinevates sügavustes. Vertikaaljooned näitavad standardviga. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe sügavuse piires Tukey testi alusel.

4.4. Veeläbilaskvus

Veeläbilaskvus ehk antud juhul veeläbilaskvuse kiirus sentimeetrit päevas sõltus statistiliselt usutavalt (Tabel 7) nii raiheina kui lutserni puhul tallatusest. Sügavus mängis ka nii raiheinal, kui ka lutsernil usutavat rolli pooltel proovivõtmiste kordadel. Ka raiheina väetamisel oli usutav mõju mulla veeläbilaskvusele, kuna antud juhul oli dispersioonanalüüsis lubatud eksimus 5%, seda lävendit täitis kaks proovivõtu kuupäeva ja ülejäänud kaks proovivõttu jäid napilt sellest välja. Sellest hoolimata võib väetamist pidada oluliseks faktoriks veeläbilaskvusel. Erinevate faktorite koosmõjul leidis usutavat mõju veeläbilaskvusele seda nii raiheinal kui lutsernil, kuid seda mitte kõikidel kuupäevadel, mis võib tingitud olla erinevatel põhjustel nagu mullaniiskus ja proovide võtmisel tehtud tallamine.



Joonis 8. Mulla veeläbilaskvus (cm d^{-1}) kevadel kasvuperioodi alguses (27.04.2012), pärast I niidet (06.06.2012) ja pärast II niidet (30.07.2012) sõltuvalt tallamise järelmõjust ja kultuurist erinevates sügavustes. Vertikaaljooned näitavad standardviga. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe sügavuse piires Tukey testi alusel.



Joonis 9. Mulla veeläbilaskvus (cm d^{-1}) pärast III niidet (11.10.2012) sõltuvalt tallamise järelmõjust ja kultuurist erinevates sügavustes. Vertikaaljooned näitavad standardviga. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe sügavuse piires Tukey testi alusel.

Tabel 7. Mulla veeläbilaskvus mitmefaktoriline dispersioonanalüüs (ANOVA).

Variant	<i>p</i> -väärtus (95 % usutavuse juures)							
	Veeäbilaskvus, Kf [cm/d]							
	Raihein, 27.04.12	Raihein, 06.06.12	Raihein, 30.07.12	Raihein, 11.10.12	Lutsern, 27.04.12	Lutsern, 06.06.12	Lutsern, 30.07.12	Lutsern, 11.10.12
Väetus (A)	0,000*	0,081	0,006*	0,102	-	-	-	-
Tallavus (B)	0,000*	0,022*	0,001*	0,000*	0,000*	0,203	0,001*	0,000*
Sügavus (C)	0,002*	0,226	0,112	0,000*	0,479	0,378	0,062	0,000*
A+B	0,000*	0,169	0,897	0,000*	-	-	-	-
A+C	0,113	0,027*	0,038*	0,000*	-	-	-	-
B+C	0,000*	0,522	0,597	0,000*	0,000*	0,983	0,043*	0,000*
A+B+C	0,000*	0,316	0,010*	0,000*	-	-	-	-

*usutav 95% usutavusnivoo juures

Veeläbilaskvus on olnud suhteliselt stabiilne kõigil neljal kuupäeval (Joonis 8; Joonis 9), kuigi samades sügavustes erinevatel kuupäevadel on veeläbilaskvuse muutlikus suhteliselt suur. Sellest hoolimata on peale mõne erandi olnud tallamata variantides veeläbilaskvus suurem kui tallatud variantides ja paljudel juhtumitel on ka statistiliselt oluliselt erinevad. Viimasel niitel, mis teostati 11.10.2012, on näha, et teatud sügavustes esines väga suur kontrastsus tallatud ja

tallamata variantide puhul. See võib olla tingitud sellest, et mulla proovidesse sattusid erandkorras väga tihedad ja kobedad proovid ja/või sattusid proovi keskele suur vihmaussikäik.

Üks väga oluline faktor, mis mõjutas veeläbilaskvust oli taimede juurestik, kus mida tihedam on taimkate ja tugevam juurestik, seda suurem ja parem on ka mulla veeläbilaskvus (Castellano et al., 2007). Peale taimede juurte on veeläbilaskvusel tähtis roll vihmausside elutegevusel, seda just tallamise järelmõju suhtes ning on pikemaajalised. Näiteks on uuringutega on leitud, et vihmaussidest tingitud mulla taastumine võtab 1-2 aastat aega (Yvan et al., 2012). Veeläbilaskevõimet (cm d^{-1}) saab hinnata järgmise skaala põhisel: <1 väga halb, 1-10 halb, 10-40 keskmine, 40-100 hea, 100-300 väga hea ja 300 ülihea (Krebstein et al., 2013). Selle skaala järgi vaadates jääb enamus väärtuseid vahemikku 100-240, mis tähendab, et tegemist on väga hea veeläbilaskvusega, mis on suuresti tänu suhteliselt kergele mulla lõimisele. Veeläbilaskvus on väga hea nii tallatud, kui tallamata variantidel. Väetatud raiheina variandid olid võrdväärset väetamata variantidega. See mõningane erinevus väetamata variantide kasuks võib tulla sellest, et väetamine ei muuda otseselt mulla füüsilisi omadusi, vaid muudab juurte kasvu eelkõige nõrgemaks, mis omakorda mõjutab mulla struktuuri (Glab, 2013). Kuna veeläbilaskvust mõjutab eelkõige igasugune tallamine, siis joonistel kajastatud tulemustel võib kajastuda ka proovide võtmise ja niitmise käigus teostatud tallamine.

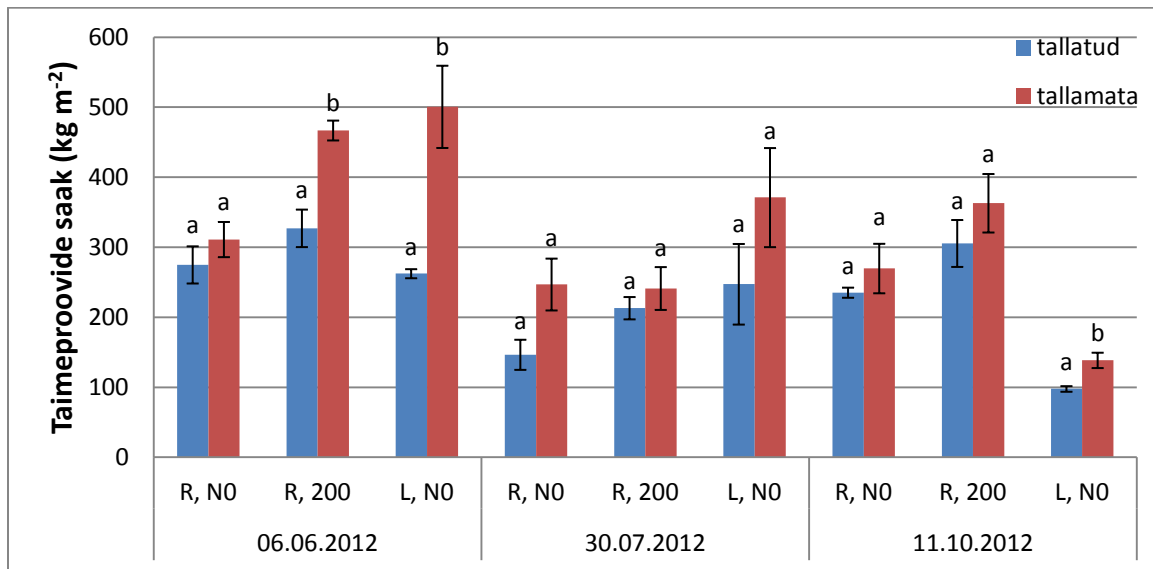
4.5. Kultuuride maapealne biomass

Väetamine on silmnähtavalt suurendanud (Joonis 12) raiheina maapealset saaki, seda nii tallatud, kui ka tallama variantide puhul. Mida rohkem aega möödus katse rajamisest, seda vähem erinevatel niidetel erines tallatud ja tallamata saak statistiliselt oluliselt. Väetamise ja tallamise järelmõju (Tabel 8) olid olulised faktorid, mis mõjutasid statistiliselt usutavalt raiheina ja lutserni saaki. Raiheina saak püsis võrdlemisi stabiilsena erinevate niidete ajal, kuid lutserni saaks oli olenemata tallamisest languses.

Tabel 8. Taimede maapealse taimemassi mitmefaktoriline dispersioonanalüüs (ANOVA).

Variant	<i>p</i> -väärtus (95 % usutavuse juures)					
	Saak g/m ²					
	Raihein, 06.06.12	Raihein, 30.07.12	Raihein, 11.10.12	Lutsern, 06.06.12	Lutsern, 30.07.12	Lutsern, 11.10.12
Väetus (A)	0,000*	0,289	0,026*	-	-	-
Tallavus (B)	0,003*	0,037*	0,180	0,000*	0,223	0,012*
A+B	0,049*	0,213	0,728	-	-	-

*usutav 95% usutavusnivoo juures



Joonis 10. Raiheina ja lutserni maapealse taimemassi saak (kg m⁻²) 2012.aastal sõltuvalt tallamise järelmõjust, kultuurist ja niitest. Vertikaal jooned näitavad standardviga. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe niite (tähistatud kuupäevadega) piires Tukey testi alusel. R, NO – väetamata raihein, R, 200 – raihein väetatud, N200 kg ha⁻¹; L, NO – lutsern.

Raiheina ja lutserni puhul on tallamise järelmõju tulemusel näha üldist saagi langust, mis võib-olla eelkõige tingitud sellest, et teise niitmise eelnev periood oli suhteliselt sademetevaene ja temperatuur oli mõnevõrra kõrgem, kui esimese niitmise eelsel perioodil. Mis viitab sellele, et taimed kannatasid vee defitsiidi all ja sellest tulenevalt oli ka kasv aeglasem. Lisaks sellele ei tohi ära unustada, et mida rohkem sügise poole liikus ilm, seda aeglasemaks muutus kultuuride kasv.

Kolmanda niitmise tulemusel oli lutserni saagikus kõige madalam olenemata tallatavusest, see võis olla tingitud sellest, et kuna lutsern on tallamise otsemõju suhtes väga tundlik, siis niitmise ja proovide kogumise käigus tallati lutserni varsi, mis neid püsivalt kahjustas (Caporali et al., 1992).

Teisel niitel (30.07.2012) oli väetatud raiheina tallatud ja tallamata variandi saagikuste varieeruvus väiksem kui peale esimest niidet. See võis olla tingitud sellest, et tallamise tõttu salvestus mulda suurem hulk vett kui lahutunud toitaineid, mis ei aurustu põuasel ilmal niivõrd kergelt, kui tallamata poorsematel mullal (Douglas, 1997). Analoogset nähtust võis ka näha lutserni puhul, kus standard viga kolmanda niite ajal mõlemas tallamise variandis oli kordades väiksem kui see oli teise niite ajal.

Põhjus, miks väetamata ja väetatud raiheina saagikuse erinevus jäi väiksemaks, on tingitud sellest, et 2010.a suvel lisatud lämmastikväetis hakkas ennast ammenduma ja väetise efekt saagikusele jäi pidevalt väiksemaks. Vaadates kolme niite põhjal saagikuse trendi on näha, et tallamise järelmõju iga järgmise saagiga on jäänud vähemaks. See tallatud ja tallamata saagi ühtlustumine ei pruugi olla seotud mulla omaduste paranemises, vaid ka selles, et taimed võisid veega olla ühtlaselt hästi varustatud. Näiteks teine tallamise otsemõjuga seotud uuring on leidnud, et mulla tallamine saagile ei ole seni probleemiks kuni taim on piisavalt hästi vee ja toitainetega varustatud (Montaga *et al.*, 1998).

4.6. Penetromeetriline takistus ja mahuline niiskus

Seoses sellega, et penetromeetrilise takistus sõltub suuresti mulla niiskusest, uuriti ka mulla kõvaduse hindamise raames mulla mahulist niiskus mahuprotsentides. 2012.a teostatud otseste mullaproovide analüüsi käigus selgus (Tabel 9), et statistilist usutavust mulla mahulisele niiskusele esines raiheinal väetuse ja sügavuse puhul kahel viimasel proovivõtmise korral. Sama leiti ka lutsernil, kus esines sügavusel usutav mõju kasvuperioodi alguses ja kolmanda niite ajal

proovil. 2013.aasta kevadel percomeetriga mõõdetud mulla niiskus (Tabel 10) oli võrdväärne 2012.a

tulemusega kuupäeval 27.04. Nii raiheina kui ka lutserni puhul oli kasvuperioodi alguses mõju tallamisel, mida rohkem enam ei esinenud. Mulla mahulise niiskuse üldpilt 2012 aastal (Joonis 11; Joonis 12) näitab, et peale kasvuperioodi algust, toimus kahe järgmise niite korral mahulise veesisalduse vähenemine, kus kohati tallatud variantides oli niiskuse protsent suurem, kui tallamata variantides. Kolmandal niitel sügisel oli niiskus kõige suurem, mis on eelkõige tingitud sademetest ja väiksest aurumisest.

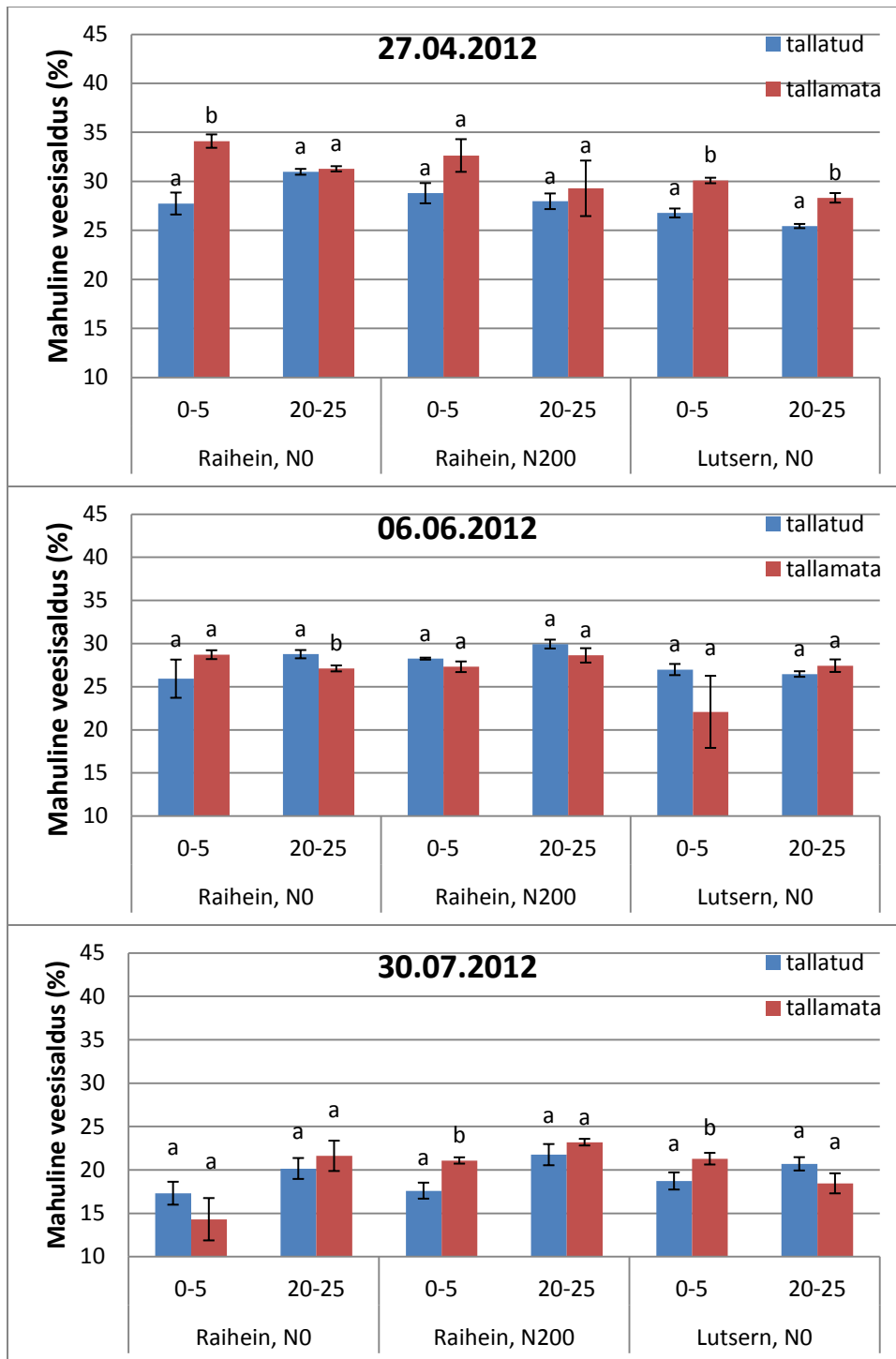
Tabel 9. Mulla mahulise niiskuse mitmefaktoriline dispersioonanalüüs (ANOVA).

Variant	<i>p</i> -väärtus (95 % usutavuse juures)							
	Mahuline niiskus, mahu-%							
	Raihein, 27.04.12	Raihein, 06.06.12	Raihein, 30.07.12	Raihein, 11.10.12	Lutsern, 27.04.12	Lutsern, 06.06.12	Lutsern, 30.07.12	Lutsern, 11.10.12
Väetus (A)	0,160	0,181	0,009*	0,000*	-	-	-	-
Tallavus (B)	0,003*	0,675	0,389	0,346	0,000*	0,203	0,860	0,076
Sügavus (C)	0,328	0,113	0,000*	0,000*	0,000*	0,128	0,646	0,000*
A+B	0,698	0,208	0,099	0,666	-	-	-	-
A+C	0,233	0,517	0,307	0,522	-	-	-	-
B+C	0,030*	0,075	0,533	0,056	0,568	0,066	0,013	0,232
A+B+C	0,359	0,132	0,097	0,310	-	-	-	-

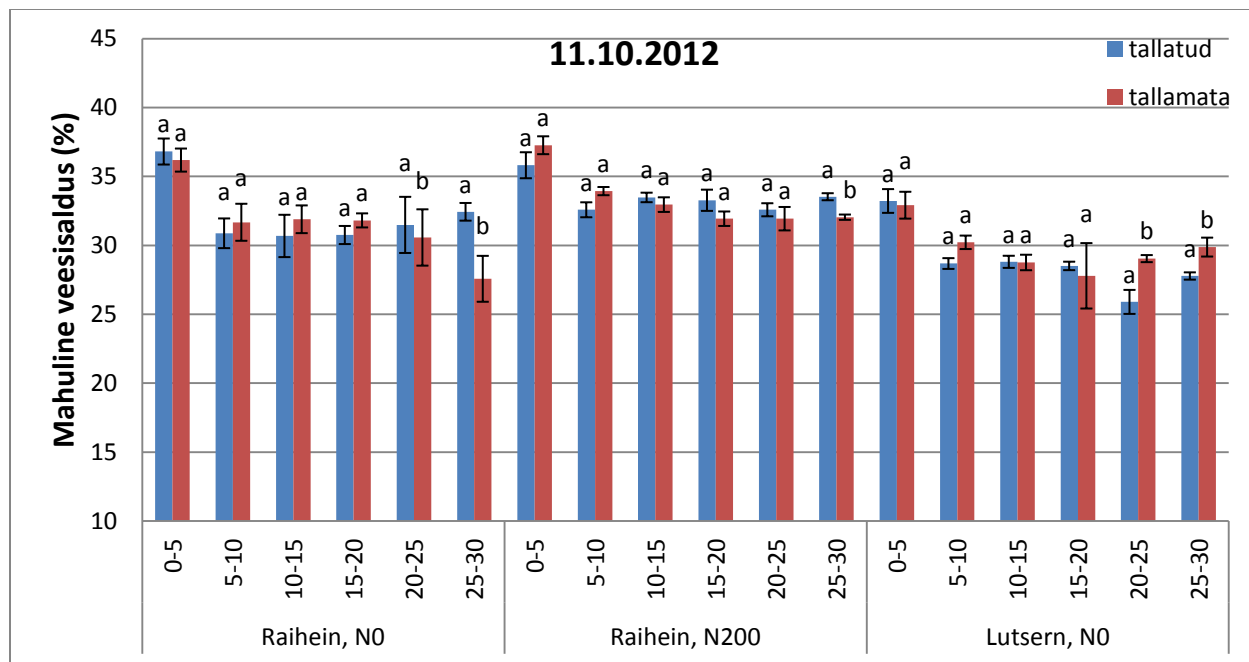
*usutav 95% usutavusnivoo juures

Tabel 10. Percomeetriga 2013.a mõõdetud mulla mahuline veesisaldus (mahu %-des).

	Aritmeetiline keskmine, %	Standard viga	Standard hälve
Raihein; N200; tallatud	30,249	0,916	3,174
Raihein; N200; tallamata	28,418	2,555	8,851
Raihein; N0; tallatud	26,083	2,538	8,793
Raihein; N0; tallamata	30,721	0,590	2,045
Lutsern; N0; tallatud	28,992	0,898	3,110
Lutsern; N0; tallamata	28,343	2,268	7,858



Joonis 11. Mulla mahuline veesisaldus (mahu-%) kevadel kasvuperioodi alguses (27.04.2012), pärast I niidet (06.06.2012) ja pärast II niidet (30.07.2012) sõltuvalt tallamise järelmõjust ja kultuurist erinevates sügavustes. Vertikaaljooned näitavad standardviga. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe sügavuse piires Tukey testi alusel.



Joonis 12. Mulla mahuline veesisaldus (mahu-%) pärast III niidet (11.10.2012) sõltuvalt tallamise järelmõjust ja kultuurist erinevates sügavustes. Vertikaaljooned näitavad standardvigat. Ühesugused tähed näitavad statistiliselt usutavate (95% nivoo) erinevuste puudumist tallamisvariantide vahel kultuuri ja ühe sügavuse piires Tukey testi alusel.

Mõlema kultuuri mõõtmise puhul selgus, et nii tallamise ja väetamise järelmõju, kui ka mulla sügavus mõjutasid mõlemal aastal penetromeetrilist takistust statistiliselt usutavalt (Tabel 11). Siiski erinevate faktorite koosmõju puhul leiti 2013.a kevad analüüsidel erinevusi võrreldes 2012.a sügise analüüsides. Näiteks 2013.a kevadel ei esinenud nii raiheina, kui lutserni puhul statistilist usutavust tallavuse ja sügavuse koosmõjul. Raiheina puhul, kus kasutati ka väetatud variante, 2013.a kevad analüüsi tulemustes leiti, et tallavuse ja väetavuse koosmõju ning nende kõigi kolme faktori koosmõjus ei esinenud statistilist olulisust, mis on vastupidine tulemus 2012.a sügisanalüüsides, mis tähendab penetromeetrilist takistust kevadel mõjutasid vähemad faktorid. See tähendab, et muld on mõnevõrra stabiilsemaks muutunud ja taastunud stressist.

Seoses sellega, et muld oli 2012.a palju kõvem, kui 2013.aastal, hakkas penetromeeter näitama juba praktiliselt mulla pinnalt mida on täpselt näha joonistelt (Joonis 13; Joonis 14; Joonis 15; Joonis 16; Joonis 17; Joonis 18). Raiheinadel (sh väetatud ja väetamata), kui ka lutsernil leiti, et kontrastsus tallatud ja tallamata variantide puhul muutus 2013.aastal väiksemaks võrreldes

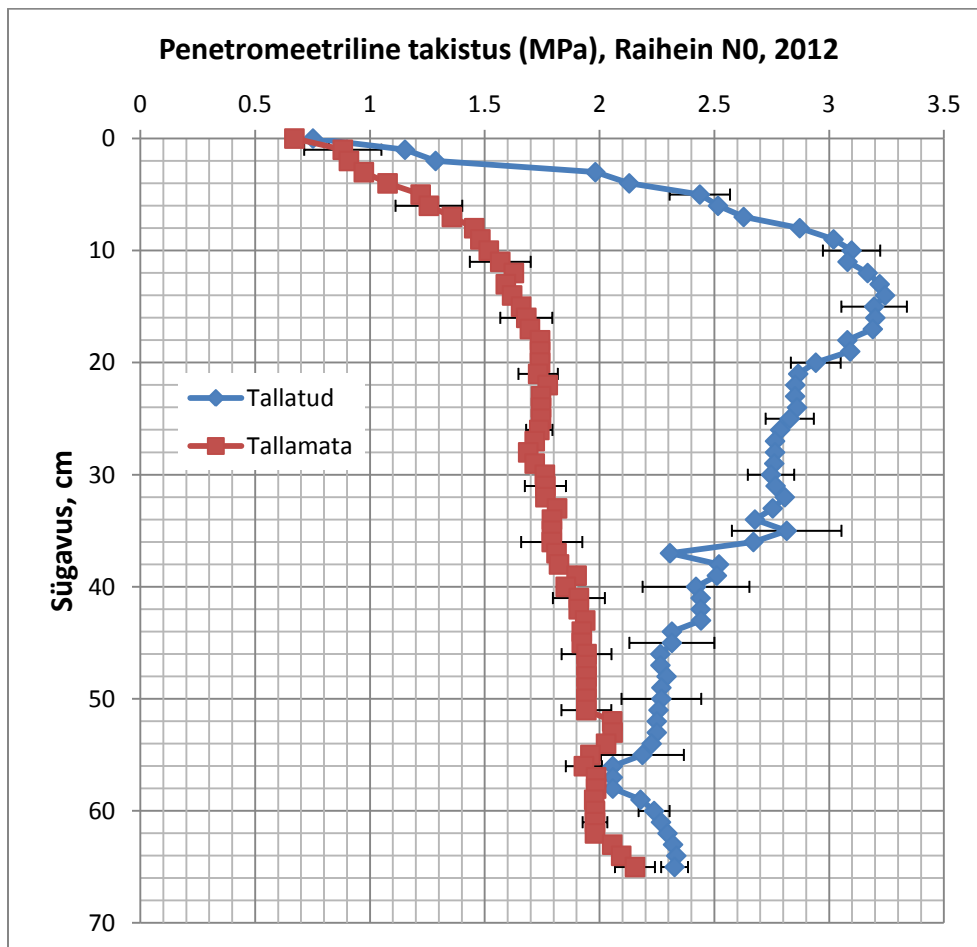
sellega, mis oli 2012.aastal. Mis tähendab, et muld muutus taimejuurtele palju lihtsamalt läbitungitavaks ja on märk mulla taastumisest. 2013.a on kobenemist (nii tallatud, kui tallamata variandil) on näha eelkõige sügavusel <30 cm, mis jääb nõ künnikihti kuhu ulatuvad taimede juured. Eriti tugev kobestus on toimunud sügavusel <15 cm, mis on tingitud ka suuresti värskest künnist. See on sügavus kus on taimejuurte konsentratsioon kõige suurem (Glab, 2008). Sellel sügavusel on tihenend muld eriti suurte tagajärgedega taimedele, sest teised uuringud raiheina puhul on leidnud, et 0-10 cm sügavusel penetromeetiline takistus väärtusega 0,5-1,0 MPa on piisav, et takistada taime juurte arengut (Cook et al., 1996). Künnikiht mulla kiht võib-olla mõne võrra suurema penetromeetrilise takistusega olla, ilma et see taimedele probleeme valmistaks, mille täpsed väärtused on välja toodud metoodikas paiknevas tabelis 1. Väga tugevasti tihendatud mullas juured levivad eelkõige läbi lõhede, pragude ja biopooride (Logsdon et al., 1992). Väga tugevalt tallatud muldi suudavad juured läbida üldjuhul läbi lõhede, pragude ja biopooride (vihmausside poolt tekitatud makropoorid) (Kristoffersen et al., 2005).

Võrreldes 2012 ja 2013.a juoniseid võib järeldada, et raiheina ja lutserni juurtel oli väga oluline roll mulla kobestamisel. Väetatud raiheinal leiti, et muld oli 2013.aastal kõvem, kui samal aastal väetamata variandil, sest väetamine eelkõige nii suure N väetise kogusega (200 kg N ha⁻¹), mis muudab juurestiku peenemaks ja lühemaks, mis tähendab, et juurestiku võime tungida läbi tihendatud mulla on raskendatud (Glab, 2013). Samas eelkõige peened juured on need, mis omastavad vees lahustunud toitained ja sobilikumas pinnases suudavad efektiivsemalt kasutada toiteaineid (Jackson et al., 1997). Tuleb meeles pidada, et penetromeetiline takistus on suhteliselt ebastabiilne, aga taime juurte seisukohast oluline näitaja, mis muutub hooajaliselt, näiteks suvel põuaga on see näitaja palju kõrgem, kui kevadel/sügisel niiskena (Bouwman et al., 2000). Kuigi penetromeetiline takistus sõltub mõnel määral lasuvustihedusest, sõltub see eelkõige suuresti mulla niiskuse sisaldusest (Bartholomew et al., 2010). See on üks põhjustest, milleks 2012.a oli see näitaja kõrgem, kui 2013.aasta, sest 2012.a oli proovide võtmise ajal niiskust mullas vähem. Mida väiksem on penetromeetiline takistus, seda kergemalt suudab taime juured mullast läbitungida. Mulla kõvenemise puhul taimed suurendavad oma vajaminevate juurte osades hüdrostaatilist rõhku ehk turgorit. Seni kuni see rõhk on suurem kui mulla takistus, seni suudavad taime juured mullas edasi areneda (Monroe et al., 1987).

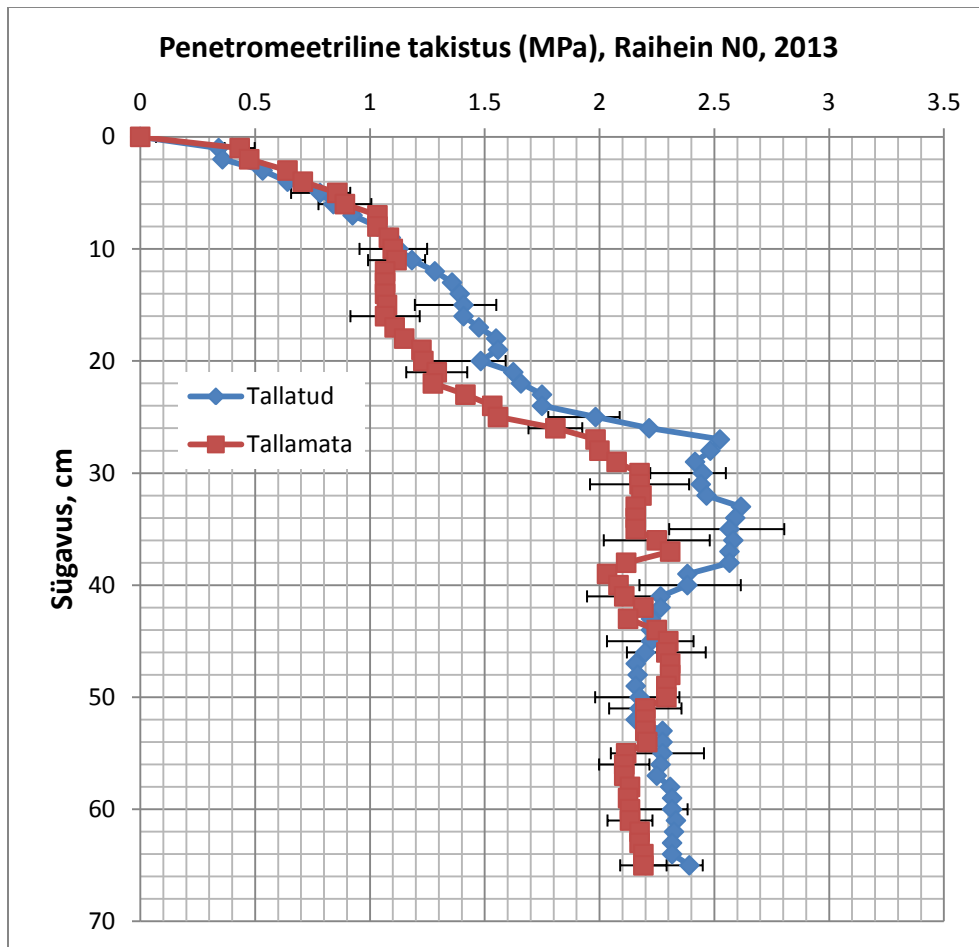
Tabel 11. Mulla penetromeetrilise takistuse mitmefaktoriline dispersioonanalüüs (ANOVA).

Variant	<i>p</i> -väärtus (95 % usutavuse juures)			
	Penetromeetriline takistus, MPa			
	Raihein, 2012.a sügis	Raihein, 2013.a kevad	Lutsern, 2012.a sügis	Lutsen, 2013.a kevad
Tallavus (A)	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
Väetus (B)	0,000*	0,000*	-	-
Sügavus (C)	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
A+B	0,000*	0,316	-	-
A+C	0,000*	0,999	0,010*	1,000
B+C	0,000*	0,005*	-	-
A+B+C	0,000*	0,975	-	-

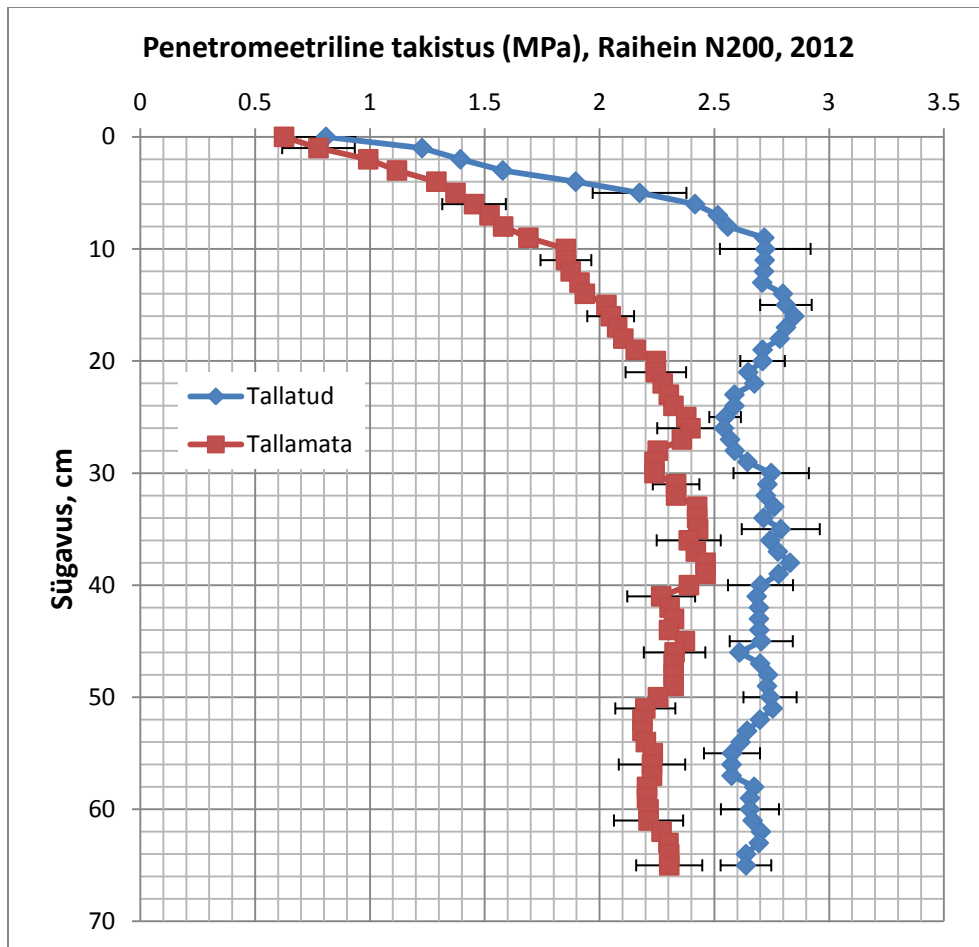
*usutav 95% usutavusnivoo juures



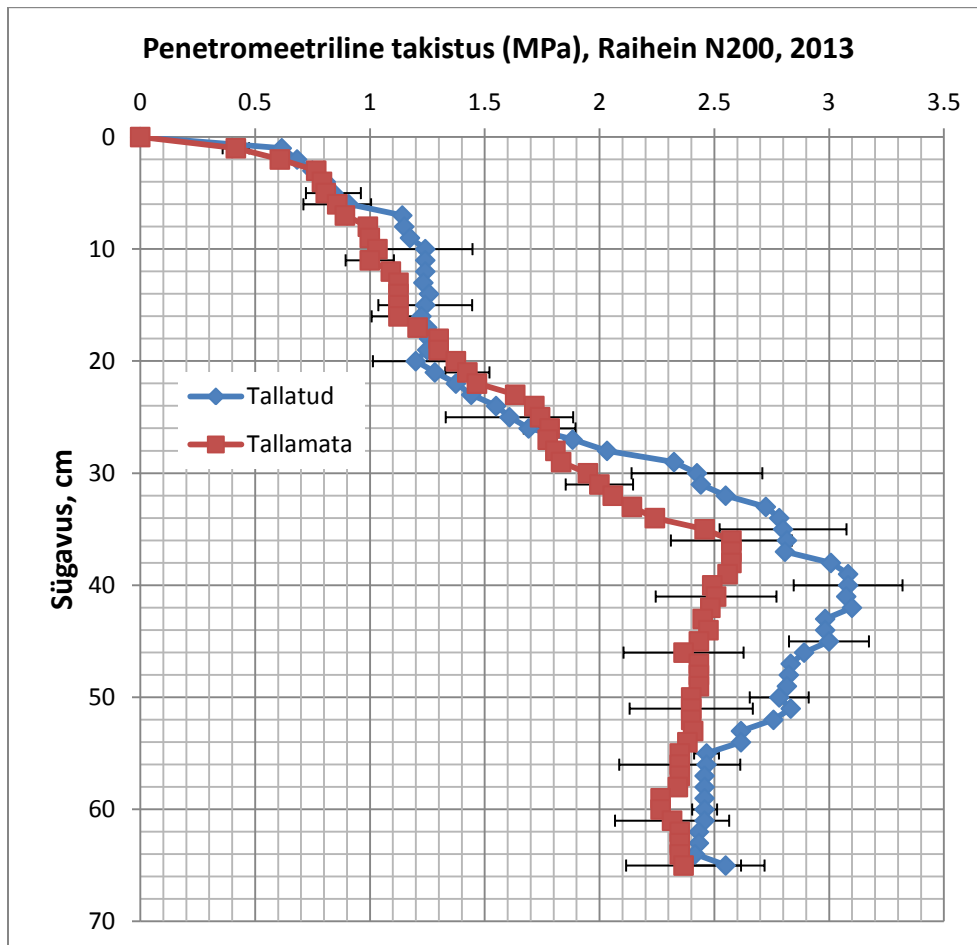
Joonis 13. Mulla penetromeetriline takistus (MPa) 2012.aastal sõltuvalt tallamise järelmõjust karjamaa raiheina (*Lolium perenne* L.) kasvatamisel. Mõõtmine teostati kuupäeval 12.10. Horisontaaljooned näitavad standardviga.



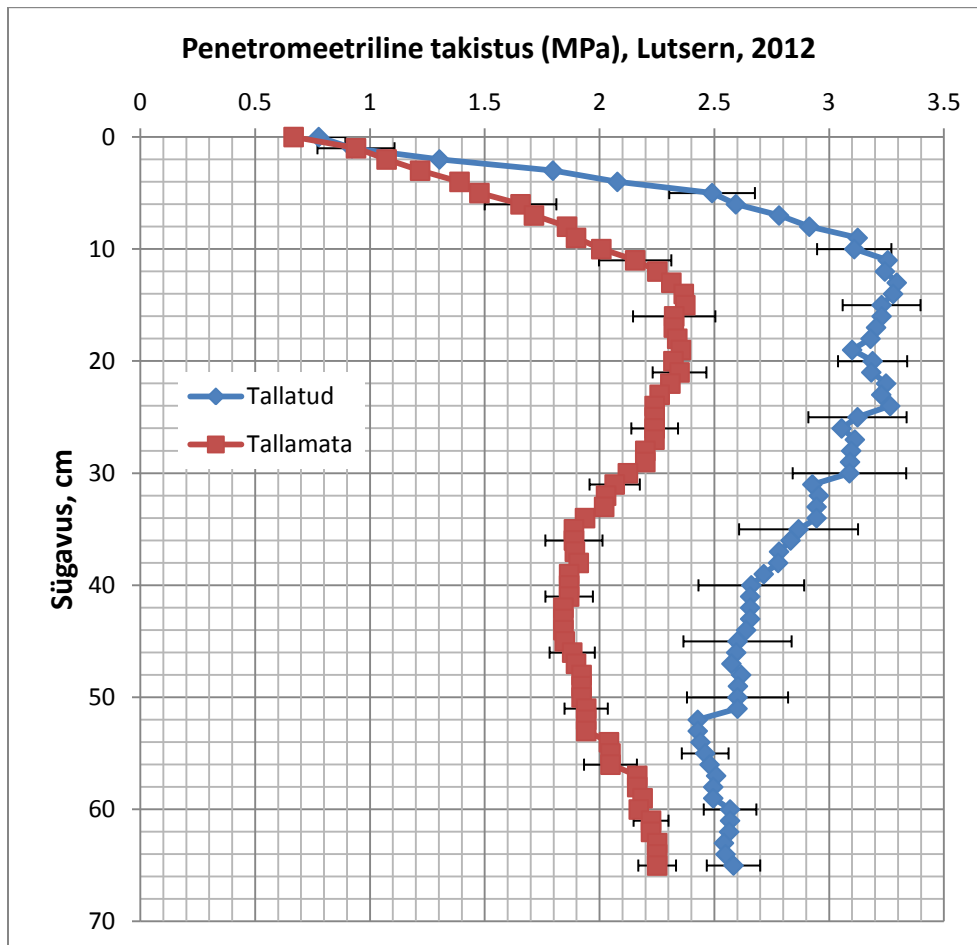
Joonis 14. Mulla penetromeetriline takistus (MPa) 2013.aastal sõltuvalt tallamise järelmõjust karjamaa raiheina (*Lolium perenne* L.) kasvatamisel. Mõõtmine teostati kuupäeval 06.05. Horisontaaljooned näitavad standardviga.



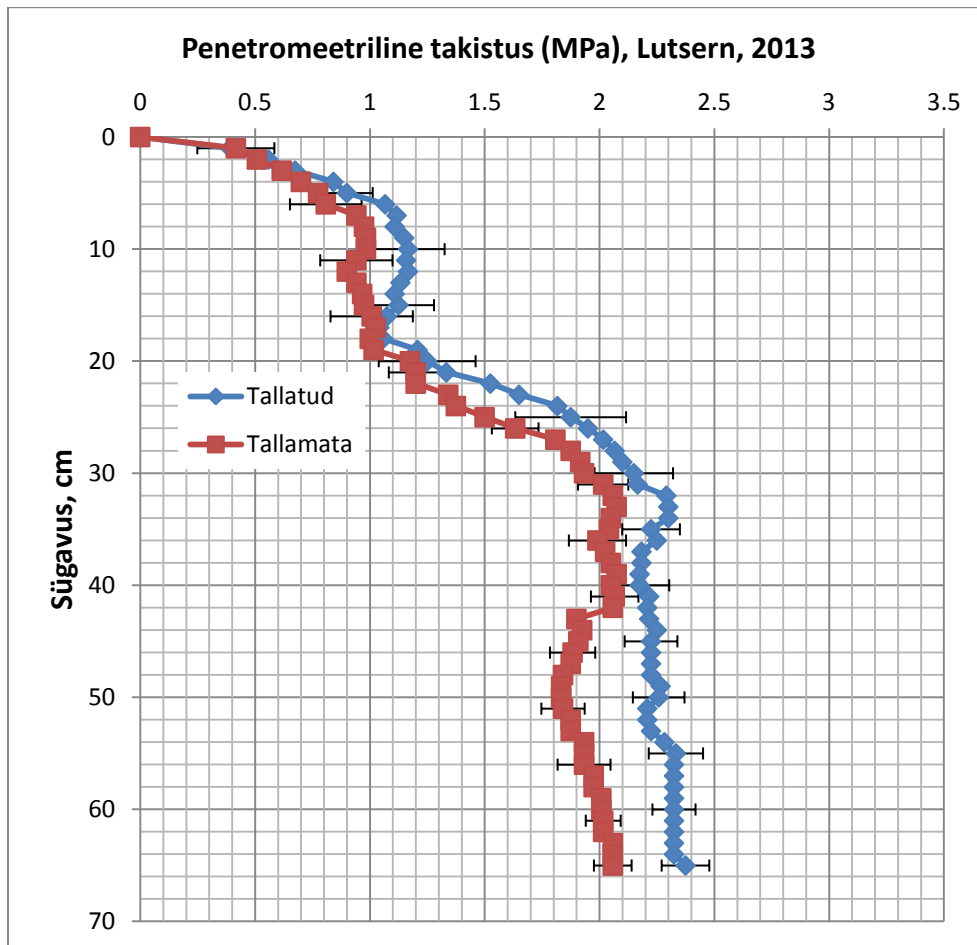
Joonis 15. Mulla penetromeetriline takistus (MPa) 2012.aastal sõltuvalt tallamise järelmõjust väetatud karjamaa raiheina (*Lolium perenne* L.) kasvatamisel. Mõõtmine teostati kuupäeval 12.10. Horisontaaljooned näitavad standardviga.



Joonis 16. Mulla penetromeetriline takistus (MPa) 2013.aastal sõltuvalt tallamise järelmõjust väetatud karjamaa raiheina (*Lolium perenne* L.) kasvatamisel. Mõõtmine teostati kuupäeval 06.05. Horisontaaljooned näitavad standardviga.



Joonis 17. Mulla penetromeetriline takistus (MPa) 2012.aastal sõltuvalt tallamise järelmõjust lutserni (*Medicago sativa*) kasvatamisel. Mõõtmine teostati kuupäeval 12.10. Horisontaaljooned näitavad standardviga.



Joonis 18. Mulla penetromeetriline takistus (MPa) 2013.aastal sõltuvalt tallamise järelmõjust lutserni (*Medicago sativa*) kasvatamisel. Mõõtmine teostati kuupäeval 06.05. Horisontaaljooned näitavad standardviga.

5. Kokkuvõte

Käesolevas töös uuriti, et milline on tallamise järelmõju mulla omadustele ja rohumaakultuuride saagile. Uurimistöö kõige olulisemad erinevate parameetrite tulemused ja järeldused on välja toodud allolevas loetelus:

1. Lasuvustiheduse tulemuse puhul leiti, et vaatamata mõningasele taastumisele, eelkõige väetatud raiheina puhul, kus tallatud ja tallamata variantide puhul puudus statistiliselt usutav erinevus, on tallamisest põhjustatud lasuvustiheduse suurenemise taastumine pikaajaline protsess, kui seda rohumaal lastakse teha loomulikult teel, milleks on bioloogilised faktorid (st taimed juurestik, vihmaussid) kui ka abiootilised faktorid (nt külmumine ja põua/niiskuse tsüklid).
2. Üldpoorsus oli tihedas seoses lasuvustihedusega, seega tulemused olid sarnased lasuvustihedusega. Üldpoorsuse kohta leiti, et väetamine aitab tallamise järelmõju suurel määral kõrvaldada, kuid see on pikaajaline protsess ja lihtsam on tallamist ennetada.
3. Mulla aeratsioonipoorsus ehk õhuga täidetud poorsus, sõltus väga palju mulla niiskusest. Põuasematel perioodidel oli varem veega täidetud poorsus asendatud õhuga ja sellest tulenevalt õhustus paranenud. Tallamise järelmõju andis kõige kontrastsemalt tunda kolmandat niidet, kus väetamata raiheinal ja lutsernil oli tallatud ja tallamata variantide erinevas sügavuses statistiliselt oluline erinevus. Sellel proovivõtmise korral oli ka mulla mahuline niiskus kõige suurem. Väetatud raiheinal olid näitajad paremad, mis võis olla tingitud tihedamast juurestikust, mis omakorda tekitab mulda palju rohkem peenikesi poore, mis tagas parema õhutatavuse. Uuringus leitud tulemuste põhjal leiti, et mulla tallamisel on ka pikaajaline mõju aeratsioonipoorsusele, kuid leiti ka, et seda näitajat saab väetamise teel parandada.
4. Veeläbilaskvus oli erinevatel proovide võtmiste korral suhteliselt stabiilne ja kuna enamuse variantide veeläbilaskvus jäi vahemiku 100-240 cm d⁻¹, siis on see näitaja väga hea tasemega. Kõikidel proovivõttude kordadel esines tulemusi, kus tallavus mõjutas statistiliselt oluliselt vee läbilaskvust. Ehk siis paljudel tallatud variantidel oli veeläbilaskvus madalam, kui tallamata

variantidel. See tulemus tähendab, et tallamine mõjutab pikaajaliselt ka vee läbilaskvust ning selle taastumine eelkõige rohumaaakultuuride poolt võtab kauem aega kui käesolev uuring kestis.

5. Taimede maapealne saak peale igat niidet oli langevas trendis. Eelkõige andis see just märku lutserni puhul, kus põhjuseks oli niitmise ja proovivõttudega seotud tallamine. Kuna raihein on tallamise suhtes vähemtundlikum kultuur, siis seal oli ka saagi vähemise kujul kahju väiksem. Raiheina puhul oli saak väetatud variandil, olenemata tallavusest, saak suurem. Võrreles esimese niitega kuupäeval (06.06.2012) oli teisel niitel (30.07.2012) saagi languse peamiseks põhjuseks põõd ja kolmandal ehk viimasel niitel (11.10.2012) oli ilm niivõrd sügisene, et taimede juurdekasv oli aeglustunud. Selle uurimistöö kolme niite tulemuste põhjal saab järeldada, et mulla tallamise mõju on jäänud vähemaks (st tallatud ja tallamata variantide erinevus vähenes), kuid tallamisest põhjustatud kahju annab saagile sellegi poolest jätkuvalt tunda, eelkõige suve sellel perioodil, kus on kiire ja jõuline taimede kasv ja areng.
6. Vaatamata sellele, et muld oli 2012 aastal kuivem, mis omakorda suurendas penetromeetrilist takistust, leiti 2013.a mai kuu mõõtmiste tulemuste põhjal, et penetromeetiline takistus oli tunduvalt vähenenud. Eelkõige toimus takistuse vähenemine sügavuses 0-30cm ja kontrastsus tallatud ja tallamata varianitel, mis 2012.a oktoobris teostatud mõõtmistel oli märkimisväärselt suur, oli muutunud väga väikeseks. Ka sügavamates mulla kihtides oli näha, et muld omas madalamat penetromeetrilist takistust kui 2012.a, kuid see muutus pole tõenäoliselt niivõrd taimejuurte tegevusest põhjustatud, vaid eelkõige kõrgemast mulla niiskusest. Penetromeetrilised mõõtmised näitasid ka seda, et lämmastikuga väetamine, kus antud juhul kasutati normi $N200 \text{ kg ha}^{-1}$, muutis taime juuri nõrgemaks, see omakorda vähendas mulla kobestamist eelkõige sügavamates kihtides, sest väetamise puhul taim ei pidanud juurtega toitained sügavale mulda omastama minema. Seoses sellega, et penetromeetiline takistus on vägagi muutlik näitaja, siis antud tulemuse puhul saab järeldada, et tallamine mõjutab penetromeetrilise takistuse tulemust eelkõige sügavamates kihtides, kuid künnikihis suutsid taimejuured tallamise järelmõju kõrvalda.

Tehtud uurimistöö käigus leiti kinnitust töö alguses esitatud küsimusele, mis tähendab, et mulla tallamine mõjutab pikaajaliselt muldade omadusi ja ka saaki, vaatamata sellele, et taimede ulatuslikule juurekavale on toimunud mulda parandav toime. Uurimistöös leiti, et väetamine lämmastikväetisega aitab tallamise järelmõju vähendada. Aga seda, milliste lämmastikväetise koguste juures tallatud muldade taastumine on kõige efektiivsem, tuleks edasi uurida tulevastes uuringutes. Lisaks tuleb teha täiendavaid järelmõju uuringuid, mis käsitleksid pikemat järelmõju uurimise perioodi kui see töö. Eelkõige tuleb rohumaade tallamist üldse ennetada, mida on võimalik suures ulatuses minimeerida, kui loobutakse randomiseeritud liiklusest ning üleliigselt põhjendamatutest ülesõitudest ja kasutada selleks spetsiaalseid tehnoradasid. Ja kui minnakse rohumaale, siis peaks muld olema kuiv.

Summary

Are, M. The aftereffect of soil compaction on yield of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and alfalfa (*Medicago sativa*) and soil properties. Tartu, 2014. 62 pages, 18 figures, 11 tables, 96 references. In Estonian.

Key words: soil compaction aftereffect; perennial ryegrass; alfalfa; bulk density; total porosity; air-filled porosity; water permeability; plant biomass; soil moisture content; penetration resistance.

The after-effects of soil compaction on grassland has not been studied before. To get a better knowledge of soil compaction after-effects this study was made in Estonia on an experimental station grassland located near Tartu in Rõhu. Perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) „Karlu“ was seeded in June 2009 and alfalfa (*Medicago sativa*) „Raidi“ in September 2008. In year 2010 Nitrogen fertilizer with a rate of 200 kg ha⁻¹ was applied three times to the fertilized ryegrass variant. The compaction was done after every cut 3 times in the years 2010-2011 with a tractor and trailer weight of 24,5 and 29,5 kN. In this study analysed the years 2012-2013. For taking soil samples metal cylinders with a displacement of 88,20 cm³ were used to take samples from a depth 0-5 to 20-25 cm or from 0-30 cm with a interval of 5 cm like it was used on the fourth soil sample taking date on 11.10. The soil samples were taken 4 times in the year 2012 on the following dates: 27.04, 06.06, 30.07 and 11.10. It was measured : 1) bulk density, 2) total porosity, 3) air-filled porosity, 4) water permeability and 5) soil moisture content. After the samples were treated in the laboratory. Soil moisture content was also measured in 06.05.2013 using, but in this time with a percometer. Cuts were made three times to measure the plant biomass in the year 2012 on the following dates: 6.06, 30.07 and 11.10 The penetration resistance was measured 2 times the first on in 12.10.2012 and the second one in 06.05.2013. The results were treated with multi-factorial analysis of variance and for *Post-hoc* was used a Tukey HSD test, in both a confidence level 95% was used. The results of this study showed that despite some recovery in soil properties and plant biomass compaction has an long-term impact for the soil. The major changes were found especially in the fertilized ryegrass where there was at last the sampling event, for most parameter no significant difference ($p < 0,05$) between compaction. The reason for this could be, that moderate amount of fertilizer strengthens the root system. Despite this loosening the soil naturally with biological factors (roots, earthworms) and abiotic factors (drought/wet cycles, freezing) is a long-term process. To get a better answer how different N fertilizer applies affect the recovery of compacted soils, further investigations are needed and also is needed more investigations that analyse the after-effects for a longer period than this study.

Kasutatud kirjandus

1. Glab, T. *Effects of tractor wheeling on root morphology and yield of lucerne (Medicago sativa L.)*. Grass and Forage Science, 63. 2008. 398–406 lk.
2. Glab, T., Kacorzyk, P. *Root distribution and herbage production under different management regimes of mountain grassland*. Elsevier. 2011. 99-104 lk.
3. Hamza, M.A., Andersonm, W.K. *Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions*. Elsevier. 2005. 121-145 lk.
4. Horn, R., Way, T., Rostek, J. *Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils*. Elsevier. 2003. 101-106 lk.
5. Kacorzyk, P., Glab, T., Zaleski, T. *Effect of land management in mountainous regions on physical quality of sandy loam Haplic Cambisol soil*. Elsevier. 2009. 298-304 lk.
6. Hakansson, I., Petelkau, H. *Benefits of Limited Axle Load*. Elsevier. 1994. 479-499 lk.
7. Douglas, J.T., Crawford, C.E. *Soil compaction effects on utilization of nitrogen from livestock slurry applied to grassland*. Grass and Forage Science, Vol 53. 1998. 31-40 lk.
8. Alakukku, L. *Subsoil compaction due to wheel traffic*. Agricultural and Food Science in Finland, Vol.8. 1999. 333-351 lk.
9. Frame, J., Merriless, D.W. *The effect of tractor wheel passes on herbage production from diploid and tetraploid ryegrass swards*. Grass and Forage Science, Vol 51. 1996. 13-20 lk.
10. Schäfer-Landefeld, L., Brandhuber, R., Fenner, S., Koch, H-J., Stockfisch, N. *Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields*. Elsevier. 2004. 75-80 lk.
11. Frost, J.P. *Some effects of machinery traffic on grass yield*. British Grassland Society. 1985. 18-25 lk
12. Chan, K.Y., Barchia, I. *Soil compaction controls the abundance, biomass and distribution of earthworms in a single dairy farm in south-eastern Australia*. Soil Tillage. 2007. 75-82 lk.
13. Jorajuria, D., Draghi, L. *The Distribution of Soil Compaction with Depth and the Response of a Perennial Forage Grop*. Journal of Agricultural Engineering Research, Vol 66,. 1997. 261-265 lk.
14. Horn, R., Fleige, H. *Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale*. Elsevier. 2009. 201-208 lk
15. Danfors, B. *Packing i alven. Summary: Compaction in the subsoil*. Swedish Institute of Agriculture Engineering.1974. 1-91 lk.
16. Radford, B.J., Bridge, B.J., Davis, R.J., McGarry, D., Pillai, U.P., Rickman, J.F., Walsh, P.A., Yule, D.F. *Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic*. Elsevier. 2000. 155-170 lk.

17. Bartholomew, R.W., Williams, R.D. *Effects of soil bulk density and strength on seedling growth of annual ryegrass and tall fescue in controlled environment*. Grass and Forage Science. 2010. 348-357 lk.
18. Ball, B.C., Campbell, Douglas, T., Henshall, J.K., O'Sullivan, M.F. *Soil structural quality, compaction and land management*. European Journal of Soil Science. 1997. 593-601 lk.
19. Balbuena, R., Donagh, R.M., Marquina, J., Jorajuria, D., Terminiello, A., Claveire, J. *Wheel Traffic Influence on Popular Regeneration and Grass Yield*. Biosystems Engineering. 2001. 379-384 lk.
20. Krestein, K., Von Janowsky, K., Reintam, E., Horn, R., Leeduks, J., Kuht, J. *Soil compaction in a Cambisol under grassland in Estonia*. Zemdirbyste-Agriculture. 2013. 33-38 lk.
21. Logsdon, S.D., Karlen, D.L. *Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage*. Elsevier. 2004. 143-149 lk.
22. Bhandral, R., Saggar, S., Bolan, N.S., Hedley, M.J. *Transformation of nitrogen and nitrous oxide emission from grassland soils as affected by compaction*. Elsevier. 2007. 482-492 lk.
23. Bouwman, L.A., Arts, W.B.M. *Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties*. Elsevier. 2000. 213-222 lk.
24. Creamer, R.E., Brennan, F., Fenton, O., Healy, M.G., Lalor, S.T.J., Lanigan, G.J., Regan, J.T., Griffiths, B.S. *Implications of the proposed Soil Framework Directive on agricultural systems in Atlantic Europe – a review*. Soil Use and Management. 2010. 198-211 lk.
25. Castellano, M.J., Valone, T.J. *Livestock, soil compaction and water infiltration rate: Evaluating a potential desertification recovery mechanism*. Elsevier. 2007. 97-108 lk.
26. Crush, J.R., Ouyang, L., Eerens, J.P.J., Stewart, A.V. *The growth of roots of perennial, italian, hybrid and annual ryegrasses through a high-strength root medium*. Grass and Forage Science. 2002. 322-328 lk.
27. Deurer, M., Müller, K., Kim, I., Huh, K.Y., Young, I., Jun, G.I., Clothier, B.E. *Can minor compaction increase soil carbon sequestration? A case study in soil under a wheel-track in an orchard*. Geoderma. 2012. 74-79 lk.
28. Diserens, E. *Calculating the contact area of trailer tyres in the field*. Elsevier. 2009. 302-309 lk.
29. Dominguez, A., Bedano, J.C., Becker, A.R. *Negative effects of no-till on soil macrofauna and litter decomposition in Argentina as compared with natural grasslands*. Elsevier. 2010. 51-59 lk.
30. Douglas, J.T. *Soil compaction effects on second-harvest yields of perennial ryegrass for silage*. Grass and Forage Science. 1997. 129-133 lk.
31. Drewry, J.J., Lowe, J.A.H., Paton, R.J. *Effect of subsoiling on soil physical properties and pasture production on a Pallic Soil in Southland, New Zealand*. New Zealand Journal of Agricultural Research. 2010. 269-277 lk.

32. Glab, T. *Effects of tractor traffic and N fertilization on the root morphology of grass/red clover mixture*. Elsevier. 2013. 163-171 lk.
33. Herbin, T., Hennessy, D., Richards, K.G., Piwowarczyk, A., Murphy, J.J., Holden, N.M. *The Effects of dairy cow weight on selected soil physical properties indicative of compaction*. Soil Use and Management. 2011. 36-44 lk.
34. Raghavan, G.S.V., McKyes, E. *Laboratory study to determine the effect of slip-generated shear on soil compaction*. Canadian Agricultural Engineering. 1977. 40-42 lk.
35. Houlbrooke, D.J., Thom, E.R., Chapman, R., McLay, C.D.A. *A study of the effects of soil bulk density on root and shoot growth of different ryegrass lines*. New Zealand Journal of Agricultural Research. 2013. 37-41 lk.
36. Longsdon, S.D., Karlen, D.L. *Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage*. Elsevier. 2004. 143-149 lk.
37. Rosolem, C.A., Schiochet, M.A., Souza, L.A., Whitacker, J.P.T. *Root growth and cotton nutrition as affected by liming and soil compaction*. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 1998. 169-177 lk.
38. Yvan, C., Stephane, S., Stephane, C., Pierre, B., Guy, R., Hubert, B. *Role of earthworms in regenerating soil structure after compaction in reduced tillage systems*. Elsevier. 2012. 93-103 lk.
39. Glab, T., *Effect of soil sompaction on root system development and yields of tall fescue*. International Agrophysics. 2007. 233-239 lk.
40. Mulholland, B.J., Black, C.R., Taylor, I.B., Roberts, J.A. *Influence of Soil Compaction on Xylem Sap Compostition in Barley (*Hordeum vulgare* L.)*. Journal of Plant Physiology. 1999. 503-508 lk.
41. Nugis, E., Lehtveer, R. 1991. *Eesti muldade masindegradatsiooni ulatustest*. Rmt.: Mullakaitse probleeme Eestis. Tallinn, lk 63-75.
42. Davies, D.B., Finney, J.B., Richardson, S.J. *Relative effects of tractor weigh and wheelslip in causing soil compaction*. Journal of Soil Science. 1973. 399-409 lk
43. Altermann, A., Blankenburg, J., Blume, H.-P., Bohne, B., Fleck, W., Geissen, V., Giani, L., Graefe, U., Gröngrof, A., Hennings, V., Höper, H., Jahn, R., Jochum, R., Krahmer, U., Milbert, G., Müller, U., Renger, M., Schad, P., Schäfer, W., Scheffer, B., Schrey, P., Stahr, K., Zeitz, J. 2005. *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Hannover. 438 lk.
44. Döll, H. *Lohnen Zwillingsräder an Mähdreschern? Landwirtschaft ohne Pflug Sonderaufgabe*. Agritechnica. 1999. lk 6-8.
45. Grecenko, A. *Tyre footprint area on hard ground computed from cataloque values*. Elsevier. 1995. 325-333 lk.

46. Douglas, J.T. *Responses of perennial forage crops to soil compaction*. Elsevier. 1995. 343-364 lk.
47. Guerig, J. *Factors influencing compaction-induced increases in soil strength*. Soil and Tillage Research. 1990. 167-178 lk.
48. Placett, C.W. The ground pressure of some agricultural tyres at low load and with zero sinkage. Journal of Agricultural Engineering Research. 1984. 159-166 lk
49. Bolling, I. *Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen : neue Mess- und Rechenmethoden*. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG. 1987. 1-274 lk.
50. Alakukku, L. *Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short-term effects on the properties of clay and organic soils*. Soil & Tillage Research. 1996. 223-238 lk.
51. Fullen, M.A. *Compaction, hydrological processes and soil erosion on loamy sands in east Shropshire, England*. Soil and Tillage Research. 1985. 17-29 lk.
52. Carter, M.R. *Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies of fine sandy loams*. Canadian Journal of Soil Science. 1990. 425-433 lk.
53. Montagu, K.D., Conroy, J.P., Francis, G.S. *Root and shoot response of field-grown lettuce and broccoli to a compact subsoil*. Australian Journal Of Agricultural Research. 1998. 89-97 lk.
54. Douglas, J.T., Crawford, C.E., Campbell, D.J. *Traffic Systems and Soil Aerator Effects on Grassland for Silage Production*. Journal of Agricultural Engineering Research. 1995. 261-270 lk.
55. Sveistrup, T.E., Haraldsen, T.K. *Effects of soil compaction on root development of perennial grass leys in northern Norway*. Grass and Forage Science. 1997. 381-387 lk.
56. Leeduks, J. *Tallamise mõju mõningatele mulla füüsikalistele omadustele lutserni kasvatamisel*. Magistritöö põllumajandussaaduste tootmise ja turustamise erialal. 2013. 46 lk.
57. Mari, G.R., Changying, Ji. *Influence of Agricultural Machinery Traffic on Soil Compaction Pattern, Root Development and Plant Growth, Overview*. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. 2008. 49-62 lk.
58. Håkansson, I., Voorhees, W.B., Riley, H. *Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes*. Elsevier. 1988. 239-282 lk.
59. Phillips, R.E., Kirkham, D. *Soil compaction in the field and corn growth*. Agronomy Journal. 1962. 29-34 lk.
60. Bowen, H.D. *Alleviating mechanical impedance. In Modifying the Root Environment to Reduce Crop Stress*. American Society of Agricultural Engineers. 1981. 21-57 lk.
61. Kar, S., Varade, S.B., Subramanyan, T.K., Childyal, B.P. *Soil Physical Conditions Affecting Rice Root Growth: Bulk Density and Submerged Soil Temperature Regime Effects*. Agronomy Journal. 1976. 23-26 lk.

62. Singh, K.K., Colvin, T.S., Erbach, D.C., Mughal, A.Q. *Tilth index: An approach to quantifying soil tilth*. Transactions of the ASEA. 1992. 1777-1785 lk.
63. Ehlers, W., Fopke, V., Hesse, F., Bohm, W. *Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil*. Soil & Tillage Research. 1983. 261-275 lk.
64. Sotjka, R.E., Busscher, W.J., Gooden, D.T., Morrison, W.H. *Sub soiling for sunflower production in the southeast Coastal Plains*. Soil Science Society of America journal. 1990. 1107-1112 lk.
65. Chancellor, W.J. *Compaction of Soil by Agricultural Equipment*. Bulletin 1881. Division of Agricultural Science. 1977. 58 lk.
66. Diaz-Zorita, M., Grobe, J.H., Perfect, E. *Laboratory Compaction of Soils using a Small Mold Procedure*. Soil Science Society of America Journal. 1996. 1593-1598 lk.
67. Pillai, U.P., McGarry, D. *Structure repair of a compacted Vertisol with wet-dry cycles and crops*. Soil Science Society of America Journal. 1999. 201-210 lk.
68. Bailey, A.C., Johnson, C.E., Schafer, R.L. *A model for agricultural soil compaction*. Elsevier. 1986. 257-262 lk.
69. Rosolem, C.A., Takahashi, M. *Soil Compaction and soybean root growth*. In: J.E Box, Editor, *Root Demographics and their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems*. Proceedings of the 5th Symposium of the International Society of Root Research Clemson. 1996. 295-304 lk.
70. Silva, V.R., Reinert, D.J., Reichert, J.M. *Soil strength as affected by combine wheel traffic and two soil tillage systems*. Ciência Rural. 2000. 795-801 lk.
71. Tormena, C.A., Barbosa, M.C., Costa A.C.S., Goncalves, A.C.A. *Soil bulk density, porosity and resistance to root penetration in an oxisol managed by different soil tillage systems*. Soil and Tillage Research. 2002. 795-801 lk.
72. Carter, L.M., Meek, B.D., Rechel, E.A. *Zone production system for cotton, soil response*. Transactions of the ASAE. 1991. 354-360 lk.
73. Bakker, D.M., Davis, R.J. *Soil deformation observations in a Vertisol under field traffic*. Australian Journal of Soil Research. 1995. 817-832 lk.
74. Allamaras, R.R., Burwell R.E., Holt, R.F. *Plow layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time*. Soil Science Society of America Proceedings. 1969. 550-556 lk.
75. Scholz, A., Hennings, H.H. *Bearing capacity for grazing in connection with the rewetting of fens*. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung. 1995. 162-164 lk.

76. Monroe, C.D., Kladvivko, E.J. *Aggregate stability of a silt loam as affected by roots of maize, soyabean and wheat*. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 1987. 1077-1087 lk.
77. Ishaq, M., Ibrahim, M., Hassan, A., Saeed, M., Lal, R. *Subsoil compaction effects on crops in Punjabi, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum*. Soil and Tillage Research. 2001. 153-161 lk.
78. Warren, S.D., Thurrow, T.L., Blackburn, W.H., Garza, N.E. *The influence of livestock trampling under intensive rotation grazing on soil hydrologic characteristics*. Journal of Range Management. 1986. 491-495 lk.
79. Mapfumo, E., Chanasyk, D.S., Naeth, M.A., Baron, V.S. *Forage growth and yield components as influenced by subsurface compaction*. Agronomy Journal. 1998. 805-812 lk.
80. Brereton, A.J., Hope-Cawdery, M. *Drumlin soils – the depression of herbage yield by shallow water table depth*. Irish Journal of Agricultural Research. 1986. 167-178 lk.
81. Cook, A., Marriott, C.A., Seel, W., Mullins, C.E. *Effects of soil mechanical impedance on root and shoot growth of Lolium perenne L., Agrostis capillaris and Trifolium repens L.* Journal of Experimental Botany. 1996. 1075-1084 lk.
82. Astover, A., Kölli, R., Roostalu, H., Reintam, E., Leedu, E. *Mullateadus – õpik kõrgkoolidele*. Eesti Maaülikool, põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Tartu. 2012. 486 lk.
83. Shestak, C.J., Busse, M.D. *Compaction alters physical but not biological indices of soil health*. Soil Science Society of America Journal. 2005. 236-246 lk.
84. Weischer, B. *Eine durch Nematoden verursachte Möhrenmüdigkeit*. Internationaler Pflanzenschutz-Kongreß. 1959. 583-585 lk.
85. Morell, F.J., Cantero-Martinez, C., Alvaro-Fuentes, J., Lampurlanes, J. *Root growth of barley as affected by tillage systems and nitrogen fertiliation in a semiarid Mediterranean agroecosystem*. Agronomy Journal. 2011. 1270-1275 lk.
86. Kristoffersen, A.R., Rile, H. *Effects of soil compaction and moisture regime on the root and shoot growth and phosphorus uptake of barley plants growing on soils with varying phosphorus status*. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2005. 135-146 lk.
87. Bengough, A.G., Mullins, E.C. *Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses*. Journal of soil science. 1990. 341-358 lk.
88. Jackson, R.B., Mooney, H.A., Sculze, E.D. *A global budget for fine root biomass surface area and nutrient contents*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A. 1997. 7362-7366 lk.
89. Tasser, E., Mader, M., Tappeiner, U. *Effects of land use in alpine grasslands on the probability of landslides*. Elsevier. 2003.

90. Althoff, P.S., Todd, T.C., Thien, S.J., Callham Jr, M.A. Response of microbial and invertebrate communities to tracked vehicle disturbance in tallgrass prairie. *Applied Soil Ecology*. 2009. 122-130 lk.
91. Christensen, O.M., Mather, J.G. *Pesticide-induced surface migration by lumbricid earthworms in grassland: life-stage and species difference*. *Pedobiologia*. 2004. 455-465 lk.
92. Radford, B.J., Wilson-Rummenie, A.C., Simpson, G.B., Bell, K.L., Ferguson, M.A. *Compacted soil affects soil macrofauna populations in a semi-arid environment in central Queensland*. *Soil Biology & Biochemistry*. 2001. 455-465 lk.
93. Logsdon, S.D., Linder, D.R. *Interactions of earthworms with soil physical conditions influencing plant growth*. *Soil Science*. 1992. 330-337 lk.
94. Caporali F., Onnis A. *Validity of rotation as an effective agro-ecological principle for a sustainable agriculture*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 1992. 101-113 lk.
95. Gallagher, A.V., Wollenhaupt, N.C. *Surface alfalfa residue removal by earthworms, Lumbricus terrestris L., in a non-till agro-ecosystem*. *Soil Biology and Biochemistry*. 1997. 477-479 lk.
96. Hartge, K.H., Horn, R. *Die physikalische Untersuchung von Böden*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2009. 454 lk.