

Põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Erika Lõhmuste

**BIOSÖE MÕJU MULLA FÜÜSIKALISTELE,
KEEMILISTELE NING BIOLOOGILISTELE
OMADUSTELE**

THE EFFECT OF BIOCHAR ON SOIL'S PHYSICAL,
CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES

Magistritöö

Põllumajandussaaduste tootmise ja turustamise õppekava

Juhendaja: Henn Raave, *PhD*

Priit Tammeorg, *DSc*

Tartu 2017

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Erika Lõhmuste		Õppekava: Põllumajandussaaduste tootmine ja turustamine (430)	
Pealkiri: Biosöe mõju mulla füüsikalistele, keemilistele ja bioloogilistele omadustele			
Lehekülgi: 62	Jooniseid: 21	Tabeleid: 5	Lisaid: 0
<p>Osakond: Taimekasvatuse ja rohumaa viljeluse osakond</p> <p>Uurimisvaldkond: B410 Mullateadus, põllumajanduslik hüdroloogia</p> <p>Juhendajad: Henn Raave PhD ja Priit Tammeorg DSc</p> <p>Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu 2017</p>			
<p>Biosüsi on heterogeenne materjal, mis on kõrge aromaatses süsiniku ning toitainetesisaldusega (EBC, 2012). Biosüsi on mullaparandusaine, mis parandab mulla füüsikalisi-keemilisi omadusi ning vähendab CO₂-e emissiooni atmosfääri. Käesoleva töö eesmärgiks on uurida biosöe mõju kahkja (<i>Fragi-Stagnic Albeluvisol</i>) mulla omadustele. Töö koostati põldkatse põhjal, mis on rajatud 2011. aastal Tartumaale Ahja valda Kosova külla tootmispõllule. Katse on koostatud kahes variandis ning neljas korduses, lehtpuust aeglasel pürolüüsil toodetud biosütti lisati normiga 50 Mg ha⁻¹. Töös analüüsiti mulla füüsikalisi-keemilisi omadusi ning vihmausside arvukust ja biomassi 5-aastase katseperioodi jooksul 3 aastaste intervallidena.</p> <p>Käesoleva töö tulemusel selgus, et biosüsi lisas mullas taimedele omastatava vee osakaalu, süsiniku- ja lämmastikusisaldust. Lühiajaliselt vähendas biosöe lisamine mulda lasuvustihedust, suurendas pH_{KCl}-d ning mulla fosfori- ja kaaliumisisaldust. Mulla eripinda, üldpoorsust, õhustatust, taimedele omastatava vee osakaalu, katioonide neelamismahutavust ning vihmausside arvukust ja biomassi biosüsi ei mõjutanud.</p> <p>Katsest järeldus, et biosöe mõju mulla omadustele sõltub suuresti biosöe liigist, selle omadustest, mulla liigist ning omadustest ning nende erinevuste suurusest. Mida suurem on erinevus mullas hinnatava näitaja ja biosöe omaduste vahel, seda suurem on biosöe efekt.</p>			
Märksõnad: biosüsi, vihmaussid, mulla omadused, põldkatse			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Erika Lõhmuste		Specialty: Production and marketing of agricultural products	
Title: The effect of biochar on soil's physical, chemical and biological properties			
Pages: 62	Figures: 21	Tables: 5	Appendixes: 0
Department: Department of Field Crop and Grassland Husbandry Field of research: B410 Soil Science, agricultural hydrology Supervisors: Henn Raave PhD, Priit Tammeorg DSc Place and date: Tartu 2017			
<p>Biochar is a heterogeneous material which has a high content of aromatic carbon (over 50 %) and nutrients, it is set apart from barbecue charcoal by its area of use (EBC 2012). Biochar is a soil amendment, which improves the soil physico-chemical properties, and reduces the CO₂ emission to atmosphere. Aim of this work is to study the impact of biochar on a <i>Fragi-Stagnic Albeluvisol</i>'s characteristics. The work was drawn up on the basis of the field experiments, set up in 2011 in Põlva county on a production field. The experiment is compiled of two variant and 4 repeats, where on half of the repeats slow-pyrolysis hardwood biochar was applied 50 Mg ha⁻¹. In present study soil's physical and chemical properties and earthworm density and biomass was analysed in 5 year test period in 3 year interval.</p> <p>The results showed that biochar had significant effect on plant available water, total carbon and total nitrogen content in the soil. In short-term period biochar significantly decreased soil bulk density, increased pH_{KCl} and soil's P and K content. Soil's surface area, porosity, aeration, cation exchange capacity, earthworms abundance and biomass was not affected by the application of biochar.</p> <p>In the present study we concluded that the effect of biochar on the soil properties depends on biochar feedstock, its properties and soil type and its properties. The greater the difference between biochar characteristics and soil characteristics were the bigger the biochar effect on the soil properties was.</p>			
Keywords: biochar, earthworms, soil properties, field study			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	8
1.1. Biosüsi ning selle tootmine	8
1.2. Biosöe mõju mulla omadustele	13
1.2.1. Biosöe mõju mulla füüsikalistele omadustele	13
1.2.2. Biosöe mõju mulla keemilistele omadustele	15
1.2.3. Biosöe mõju mulla bioloogilistele omadustele.....	17
2. MATERJAL JA METOODIKA	21
2.1. Põldkatse üldinformatsioon	21
2.2. Mullaharimine.....	22
2.3. Proovivõtmised, mõõtmised ja analüüsid	24
2.4. Andmetöötlus.....	25
2.5. Ilmastik	25
3. TULEMUSED	28
3.1. Mulla füüsikalised omadused	28
3.1.1. Mulla lasuvustihedus.....	28
3.1.2. Mulla eripind	29
3.1.3. Mulla üldpoorsus.....	30
3.1.4. Õhuga täidetud pooride osakaal mullas	31
3.1.5. Taimetele omastatava vee sisaldus mullas	32
3.1.6. Taimetele omastamatu vee sisaldus mullas.....	33
3.2. Mulla keemilised omadused	34
3.2.1. Mulla pH	34
3.2.2. Katioonide neelamismahutavus.....	36
3.2.2. Mulla toitainete sisaldused	37
3.3. Mulla bioloogilised omadused.....	41
3.3.1. Vihmausside arvukus	41

3.3.2. Vihmausside kogukaal	42
4. ARUTELU	45
4.1. Biosöe mõju mulla füüsikalistele omadustele.....	45
4.2. Bioöe mõju mulla keemilistele omadustele	47
4.3. Biosöe mõju mulla bioloogilistele omadustele	49
KOKKUVÕTE	52
KASUTATUD KIRJANDUS	54
THE EFFECT OF BIOCHAR ON SOIL'S PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES	61

SISSEJUHATUS

Biosüsi on heterogeenne materjal, mis on kõrge aromaatses struktuuriga süsiniku (üle 50 %) ning mineraalainete sisaldusega, grillsöest eristub see kasutusvaldkonna poolest (EBC 2012). Biosöe pikema ajaliste mõjutuste uurimine sai alguse Amazonase piirkonnas asuvate viljakate *terra preta de Indiano* (portugali k. *terra*- maa, pind; *preta*- must) muldade põhjal, mis tänu suurele süsinikusisaldusele on oluliselt tumedamad ning viljakamad kui ümberkaudsed suhteliselt vaesunud mullad (Laird *et al.* 2009). Süsinik on arvatavasti viidud mulda kuni 2000 aastat tagasi põliselanike poolt (Laird *et al.* 2009). Praeguseks on leitud, et *terra preta* mulla pH on võrreldes ümbritsevate muldadega oluliselt kõrgem, selles sisaldub oluliselt suuremal hulgal orgaanilist ainet ja taimedele olulisi toitaineid (N, P, K, Ca) ning taimede kasv on nendel võrreldes ümberkaudsete Oxisols'idega kolm korda kiirem (Sohi *et al.* 2009).

Biosöe väga pikaajalise järelmõju tõttu on selle kui mullaparandusaine vastu on viimastel aastatel tekkinud suur huvi. Leitakse, et biosüsi on üks väheseid materjale, mille abil on võimalik püsivat suurendada põllumajanduslike muldade stabiilset süsinikusisaldust atmosfääris leiduva süsiniku arvelt. Selle tulemusel väheneb kasvuhoonegaaside emissioon atmosfääri ning paraneb mullaviljakus (Laghari *et al.* 2016). Lisaks sellele on varasemate uurimuste käigus selgunud, et teatud biosüte lisamisel mulda võivad paraneda mulla füüsikalised ning keemilised omadused. Erinevate uurimistööde arv on viimastel aastatel oluliselt kasvanud, kuid vähem on uurimusi, mis oleks koostatud pikema ajalise põldkatsena ning uuriks nii laiahaardeliselt biosöe mõju. Enne biosüte massilisemat kasutuselevõttu tuleb kindlaks teha, et see ei mõjutaks negatiivselt mulla omadustele ning mulla elustikule.

Käesolev magistritöö on autori bakalaureusetöö (Biosöe mõju vihmaussidele) edasiarendus. Töö eesmärgiks on uurida biosöe mõju pikema ajalises katses kahkja (*Fragi-Stagnic Albeluvisol*) mulla omadustele.

Töö hüpoteesideks on:

- Biosüsi parandab mulla füüsikalis-keemilisi omadusi.
- Biosõega mullas on vihmausside biomass suurem.

Töö autor tänab oma juhendajaid Henn Raave't ja Priit Tammeorg'u kasulike nõuannete ning näpunäidete eest!

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Biosüsi ning selle tootmine

Biosüsi on heterogeenne materjal, mis on kõrge aromaatses struktuuriga süsiniku ning mineraalainete sisaldusega ning see erineb kasutusvaldkonna poolest grillsöest (EBC 2012). Biosüti saadakse naturaalse orgaanilise materjali (põhk, lehed, puit jne) kuumutamisel hapnikuvaeses keskkonnas (Lehmann, Joseph 2009; Beesley *et al.* 2011; Cao *et al.* 2013; Domene *et al.* 2013). Biosüsi koosneb orgaanilisest osast, lenduvatest ühenditest, tuhast (mineraalne osa) ning veest (Verheijen *et al.* 2010). Orgaanilise osa moodustavad aromaatsed ja alifaatsed struktuuriga ühendid (Lehmann, Joseph 2009; Purakayastha *et al.* 2014). Aromaatses struktuuriga ühendid on mullas suhteliselt püsivad, kuna ei allu mikroorganismide poolsele lagundamisele. Alifaatses struktuuriga ühendid on seevastu vähem vastupidavad, kuid nad on reaktiivsed ning seetõttu võivad enda külge siduda mullalahusest orgaanilisi ja anorgaanilisi ühendeid (Lehmann, Joseph 2009; Enders *et al.* 2012). Biosüti on võimalik toota väga erinevatest bioloogilist päritolu materjalidest, alates põllumajandusest ning metsandusest tekkivatest orgaanilistest jäätmetest kuni tööstuslike (näiteks toiduainetetööstus) jäätmeteni (Cao *et al.* 2013).

Biosöe tootmiseks kasutatavat protsessi nimetatakse pürolüüsiks. Pürolüüs on orgaanilise substraadi termokeemiline lagundamine hapnikuvaeses keskkonnas (Verheijen *et al.* 2010). Biosüti toodetakse peamiselt neljal erineval meetodil. Nendeks on aeglane pürolüüs, kiire pürolüüs, väik-pürolüüs ning gaasistamine. Olenevalt sellest, millist lõpp-produkti soovitakse kõige enam saada, varieeritakse söestamisprotsessi temperatuuri, rõhku ning tooraine osakeste kokkupuuteaega kõrge temperatuuriga (Hunt *et al.* 2010). Biosöe tootmisel eraldub protsessi käigus lisaks söele veel õli, gaas ning soojus, mida on võimalik kasutada, nt. energeetilistel eesmärkidel (Hunt *et al.* 2010; Laird *et al.* 2009). Biosöe energiasisalduseks on 18-35 MJ kg⁻¹, (Laird *et al.* 2009, Sohi *et al.* 2009), bioõlil ca 17 MJ kg⁻¹ (Laird *et al.* 2009) ning süngaasil ca 6 MJ kg⁻¹ (Laird *et al.* 2009).

Aeglase pürolüüsi käigus tõstetakse reaktoris orgaanilise materjali temperatuur aeglaselt üle 400°C. Aeglase pürolüüsi tulemusena saadakse ca 35 % biosütt, 30 % bio-õli ning 35 % biogaasi. (Laird *et al.* 2009)

Kiire pürolüüsi käigus tõstetakse orgaanilise materjali temperatuur umbes 1 sekundi jooksul üle 400°C. Sellise protsessi peamine eesmärk on toota bio-õli. Toormaterjali söestumise kiirendamiseks tuleb see eelnevalt kuivatada ning purustada alla 2 mm suurusteks osakesteks. Kiire pürolüüsi saadusteks on õli (50-70 %), biosüsi (10-30 %) ja gaas (15-20 %) (Laird *et al.* 2009).

Välk-pürolüüsi käigus tõstetakse orgaanilise materjali temperatuur mõõduka kuni kõrge rõhu juures ülikiiresti kuni 1000°C, selle meetodi peamiseks eesmärgiks on toota biosütt. Saadustest moodustab süsi 60 % ning õli ja gaas kokku ca 40 %. (Laird *et al.* 2009)

Gaasistamise käigus tõstetakse orgaanilise materjali temperatuur vähese ning kontrollitud hapniku lisamisega 800-1200°C. Sellise meetodi peamiseks eesmärgiks on toota gaasi, kuid kõrvalsaadusena saadakse ka väiksemal määral biosütt ja -õli (5-15 %). (Laird *et al.* 2009)

1.1.1. Biosöe omadused

Biosöe olulisemad näitajad, mille alusel selle kvaliteeti hinnatakse on C_{org} sisaldus, pH, poorsus, katioonide neelamismahutavus, lenduvate ühendite sisaldus, O/C_{kogu} ja H/C_{kogu} , eripind, tuhasisaldus, lämmastikuisaldus, elektrijuhtivus, osakeste suurus ning toksiliste ainete sisaldus (PAH, dioksiidid, kaadium, arseen, nikkel jne) (Beesley *et al.* 2010; Hunt *et al.* 2010).

Biosöe omadused ja kvaliteet sõltuvad nii söestamisprotsessi läbiviimise kiirusest, temperatuurist ja tootmisjärgsest töötlemisest kui ka orgaaniliste jäätmete liigist (põhk, puit, sõnnik jne) ning kvaliteedist (Beesley *et al.* 2010; Hunt *et al.* 2010; Spokas *et al.* 2011; Yargicoglu *et al.* 2014). Samuti sõltub biosöe stabiilsus mullas ning saagikus

oluliselt orgaanilise aine koostisest. Näiteks, mõjutavad orgaanilise materjali ligniini-, tselluloosi- ja hemitselluloosisisaldus pürolüüsi protsessis saadavate saaduste (biosüsi, bioõli, biogaas) sisaldust (Sohi *et al.* 2009). Demibras (2006) leidis, et kõrge ligniini sisaldusega materjalidest (metsapähkli kestad) saab aeglase pürolüüsiga (*ca* 500°C) toodetult rohkem biosütti kui põhust või puidust.

Pürolüüsi protsessi temperatuurist sõltub oluliselt biosöe saagikus ja süsinikusisaldus (Sohi *et al.* 2009). Pürolüüsi temperatuuri tõstmisel väheneb biosöe saagikus, kuid suureneb oluliselt mullas stabiilse süsiniku sisaldus (Sohi *et al.* 2009). Biosöe süsiniku sisaldus sõltub ka orgaanilisest materjalist, näiteks Purakayastha *et al.* (2014) uurimus näitas, et nelja põllumajanduskultuuri (mais, nisu, hirss, riis) jäätmetest samal temperatuuril toodetud biosütetes oli kõige suurema süsinikusisaldusega maisi biosüsi (69%). Euroopa biosöe sertifikaadi järgi peab biosüsi sisaldama 10 - 40 % aromaatsset süsinikku ning vähemalt 50 % orgaanilist süsinikku. Madalama orgaanilise süsinikusisalduse puhul liigitatakse toodang pürolüüsituhaks (EBC 2012). Puidust toodetud biosütetel on orgaanilise süsinikusisaldus *ca* 80 %, põllukultuuride biomassist on antud näitaja *ca* 40 %.

Biosütete pH sõltub nii tootmisprotsessist, tootmisprotsessi tingimustest kui ka orgaanilise materjali omadustest (Sohi *et al.* 2009). Erinevate biosütete pH võib olla nõrgalt happeline kuni aluseline. Valdavalt on biosütete pH neutraalse kuni aluselise reaktsiooniga ning püsib mullas viibimisaja jooksul suhteliselt konstantsena (Verheijen *et al.* 2010). Kõrgema pH-ga biosütti saab üldiselt sõnnikust ning madalama pH-ga rohtsetest materjalidest (Verheijen *et al.* 2010). Bochar *et al.* (2014) leidis oma uurimuses, et gaasistamisel teel saadud biosüsi oli aluselisema reaktsiooniga kui välk-pürolüüsil saadud süsi. Sohi *et al.* (2009) märkis oma uurimuses, et tootmisprotsessi temperatuuril on oluline mõju suhkruroost toodetud biosöe pH-le. Nimelt tõstes temperatuuri 310°C-lt 850°C-ni suurenes pH 7,6lt 9,7ni. Purakayastha *et al.* (2014) leidis, et maisivartest toodetud biosöe pH oli oluliselt kõrgem kui nisu-, hirsi- või riisivartest toodetud biosöel.

Katioonide neelamismahutavus erinevatest materjalidest toodetud biosütel on suhteliselt varieeruv ulatudes kuni 400 cmol kg⁻¹ (Verheijen *et al.* 2010). Samuti sõltub antud näitaja biosütete tootmistingimustest. Glaser *et al.* (2001) katses selgus, et kõige kõrgema katioonide neelamismahutavusega biosöe saab kõrgel temperatuuril, suure rõhu ning vähese hapniku olemasoluga tootmisel. Samuti võivad tootmisprotsessi temperatuurist sõltuda biosüte pinna omadused, mis mõjutavad biosüte võimet siduda anioone (madalam

temperatuur) või katioone (kõrgem temperatuur) (Asada *et al.* 2002; Kameyama *et al.* 2012). Katioonide neelamismahutavus mullas suureneb mullas viibimise aja jooksul, see võib olla tingitud biosüte algsest hüdrofoobsusest ning madalast ioone siduvate funktsionaalsete rühmade hulga olemasolust biosütete pinnal (Verheijen *et al.* 2010). Aja jooksul muutuvad enamus biosöed hüdrofiilseks (Sohi *et al.* 2009) ning funktsionaalsete rühmade arv erinevate biosüte pinnal suureneb. Funktsionaalsed rühmad tekivad keemiliste ühendite lagunemise ning ümberpaiknemisega biosüte viibimisel mullas (Verheijen *et al.* 2010). Funktsionaalsete rühmade arvu on võimalik biosöe pinnal suurendada kui asetada süsi mikrobioloogiliselt aktiivsesse keskkonda. Näiteks on katsed näidanud, et funktsionaalsete rühmade arv suureneb biosüte kompostimisega (Prost *et al.* 2013; Kammann *et al.* 2015).

Lenduvateks ühenditeks (ka labiilne süsinik) nimetatakse ühendeid, mis pürolüüsi protsessi või mikrobiaalse lagundamise käigus eralduvad biomassist lendumise teel. Lenduvate süsinikühendite sisaldus erinevates biosütes sõltub materjali viibeajast reaktoris ning protsessi temperatuurist. Pikema viibeajaga ning kõrgema temperatuuriga väheneb lenduvate süsinikühendite sisaldus biosütes. Madala temperatuuriga pürolüüsi puhul või lühikese viibeaja korral ei jõua biomassi osakesed täielikult karboniseeruda (Bruun *et al.* 2012). Lenduvate ühendite sisaldus erinevates biosütes on reeglina vahemikus 0-40 % (Verheijen *et al.* 2010).

H/C ning O/C suhe näitab biosütete vastupidavust keskkonnatingimuste muutustele ning toormaterjali söestumisastet (Sohi *et al.* 2009). Khodadad *et al.* (2011) uurimus näitas, et puidust toodetud biosüte bioloogiliselt labiilne osa väheneb pürolüüsi temperatuuri tõustes, kuna puidus sisaldub oluliselt enam aromaatsset-orgaanilist materjali kui rohtsetest jäätmetes. Pürolüüsi produkti saab käsitleda biosöena kui H/Corg suhe on kuni 0,7 ning O/Corg suhe on kuni 0,4 (EBC 2012).

Bioöe tuhasus sõltub peamiselt biomassi mineraalainete sisaldusest. Erinevate biosüte mineraalne osa (tuhk) sisaldab ühendeid nagu SiO₂, CaCO₃, KCl, CaSO₄ ja neile lisaks ka veel nitraate, oksiide ning hüdroksiide (Purakayastha *et al.* 2014). Suurema tuhasisaldusega on heinast, põhust ja sõnnikust toodetud biosöed. Sõnnikust toodetud biosüte kogumassist võib tuhk moodustada kuni 45% (Verheijen *et al.* 2010). Antud näitaja on madalam puidust toodetud sütes, kus tuhasisaldus on üldjuhul alla 2 %.

Erinevatest materjalidest toodetud teatud biosütel on erinev osakeste suurus (Bochard *et al.* 2014). Näiteks, suuremate osakestega ja mullas lagunemisele vastupidavama (stabiilsema) biosöed saab puidust (Verheijen *et al.* 2010). Väiksemate osakestega ning laguprotsessidele vähem vastupidavama (labiilsema) biosütt saab põhust, vetikatest ja sõnnikust (Winsley 2007; Verheijen *et al.* 2010). Osakeste suurus sõltub ka pürolüüsi temperatuurist ning kiirusest (Verheijen *et al.* 2010). Näiteks kõrgema temperatuuri ja lühema viibimisajaga reaktoris saadakse peenema ning vastupidistel tingimustel jämedama tekstuuriga biosütt.

Biosöe eripind sõltub oluliselt selle osakeste suurusest ning on seda suurem, mida väiksematest osakestega on biosüsi (Sohi *et al.* 2009). Suuresti sõltub biosüte eripind ka pürolüüsi temperatuurist ja suureneb temperatuuri kasvades (Sohi *et al.* 2009). Protsessi temperatuur suurendab biosüte eripinda lineaarselt kuni 800 °C, kõrgemal temperatuuril eripind langeb tänu sisepinna osalisele sulamisele (Lua *et al.* 2004). Sohi *et al.* (2009) leidis, et teatud biosüte eripind temperatuuridel 450-900°C varieerus 120-460 m² g⁻¹. Van Zwieten *et al.* (2009) mõõtis paberitehase jäätmetest aeglasel pürolüüsil toodetud biosöe eripinnaks 115 m² g⁻¹. Euroopa biosöe sertifikaadi järgi on enamustel juhtudel soovitatav biosöe eripind üle 150 m² g⁻¹ (EBC 2012).

Biosüte pooride ruumala on olulises seoses pürolüüsi temperatuuri ning protsessikestusega (Verheijen *et al.* 2010). Pürolüüsimise ajal eralduvad biomassist orgaanilised ühendid, mille asemele jäävad tühimikud moodustavad biosüte pooride võrgustiku (Verheijen *et al.* 2010). Biosüte poorsus jaotatakse vastavalt pooride sisediameetrile makro-, meso- ja mikropoorideks. Näiteks suurendades pürolüüsi temperatuuri ning tooraine reaktoris viibimisajaga suureneb orgaaniliste ühendite eraldumine ning mikropooride teke (Lua *et al.* 2004). Pooride suurus sõltub ka toorainest. Suurema pooride ruumalaga biosütt saadakse puidust (Verheijen *et al.* 2010). Biosüte poorsusest sõltub selle toitainete sidumis- ning veehoiuvõime (Atkinson *et al.* 2010). Makropoorid mõjutavad mulla õhustatust ning veerežiimi ja on elupaigaks mulla mikrobiaalsele elustikule, meso- ja makropoorid seevastu mõjutavad toitainete adsorbtsiooni (Atkinson *et al.* 2010).

Euroopa biosöe sertifikaadis on sätestatud toksiliste ühendite lubatud sisaldusteks biosöe kuivkaalust: plii (Pb) < 150 g t⁻¹, kaadium (Cd) < 1,5 g t⁻¹, vask (Cu) < 100 g t⁻¹, nikkel (Ni) < 50 g/t⁻¹, elavhõbe (Hg) < 1 g t⁻¹, tsink (Zn) < 400 g t⁻¹, kroom (Cr) < 90 g t⁻¹ ning arseen (As) < 13 g t⁻¹ (EBC 2012).

1.2. Biosöe mõju mulla omadustele

Biosöe omadused (keemiline koostis, biosöe pinnal olevad funktsionaalsed rühmad, osakeste ja pooride suurus), kui ka füüsikaline ja keemiline stabiilsus mullas määravad biosütete mõju mulla omadustele (Verheijen *et al.* 2010). Erinevad uurimused on näidanud, et biosütete lisamine mulda suurendab ekvatoriaal ja troopilises kliimavöötmes taimede produktiivsust (Hammond *et al.* 2013) samas kui parasvöötmes läbi viidud katsetes ei ole biosöel kultuuride produktiivsusele enamasti usutavat mõju olnud (Jeffrey *et al.* 2017). Biosüte lisamine mulda vähendab kasvuhoonegaaside (CO₂, N₂O, metaan, CH₄) emissiooni mullast (Kammann *et al.* 2011; Taghizadeh-Toosi *et al.* 2011, Liu *et al.* 2012; Case *et al.* 2013, Cayuela *et al.* 2013) ning NH₄-N (Lehmann *et al.* 2003) ning NO₃-N leostumist (Raave *et al.* 2014, Buecker *et al.* 2016) ja suurendab mulla mikrobiaalset aktiivsust ning liigilist koosseisu (Rutigliano *et al.* 2014)..

1.2.1. Biosöe mõju mulla füüsikalistele omadustele

Erinevates uurimustes on leitud, et biosüte kasutamine mullaparandusainena on mõjutanud olulisi mulla füüsikalisi omadusi, nt lasuvustihedust (Rogovska *et al.* 2015), poorsust (Du *et al.* 2016; Liu *et al.* 2012), eripinda ning mulla veehoiuvõimet (Ojeda *et al.* 2015; Paneque *et al.* 2016).

Mulla lasuvustihedus on üks olulisemaid mullaviljakuse tegureid, mis näitab mulla õhustatust ning pooride osatähtsust pinnaühikus (Astover 2006). Mulla lasuvustihedus on muutuv näitaja, mis sõltub maaharimise intensiivsusest ning aastaajast (kevadepoolne on madalam, sügisel kõrgem) (Astover 2006). Biosütel on väiksem lasuvustihedus kui mineraalmullal, seega biosüte lisamisega mulda on võimalik vähendada mulla lasuvustihedust, kuid võib ka esineda vastupidine efekt (Verheijen *et al.* 2010). Biosüsi võib mulla lasuvustihedust suurendada juhul kui tema mehaaniline tugevus on madal ning

ta laguneb mullas kiiresti. Sellisel juhul võivad biosüte väiksemad osakesed täita mulla poorid (Verheijen *et al.* 2010). Glaser *et al.* (2002) märkis, et mulla lasuvustiheduse langemine biosüte lisamisel mulda on seotud mulla poorsuse ja vee läbilaskevõime suurenemisega. Rogovska *et al.* (2015) leidis oma katse tulemusel, et biosöe lisamine mulda ega ka taimejäänuste eemaldamine põllult ei muutnud 2-aastase katse jooksul mulla lasuvustihedust oluliselt. Väga vähesel määral oli lasuvustihedus biosöega rikastatud mullas kõrgem (ca 0,01 g cm⁻³ kohta) (Rogovska *et al.* 2015). Seevastu Laghari *et al.* (2016) ja Du *et al.* (2016) uurimus näitas, et biosöe lisamisel mulda lasuvustihedus vähenes.

Erinevatest uuringutest on selgunud, et biosüsi suurendab mulla eripinda, mistõttu suureneb ka selle veehoiuvõime ning taimedele omastatava veekogus mullas (Verheijen *et al.* 2010; Liu *et al.* 2013). Veehoiuvõime on veel seotud pooride jaotusega, mis on mõjutatud mullaosakeste suurusest, agregatsioonist ning orgaanilise aine sisaldusest (Verheijen *et al.* 2010). Biosüsi mõjutab mullaagregaatide suurust ning kuju tänu vastastikusele toimele mulla orgaanilise aine, mineraalide ja mikroorganismidega (Liu *et al.* 2012). Mullaagregaatide suurus ja kuju mõjutab eelkõige mulla õhustatust ning veega varustatust. Suurema orgaanilise aine sisaldusega mullad on üldiselt parema veehoiuvõimega (Sohi *et al.* 2009). Mulla veehoiuvõime ning vee paiknemine mullas peaks biosöe mulda lisamisel paranema ka tänu mikropooride osakaalu suurenemisele, kuna mikropoorid täituvad veega kõige kiiremini ning mulla kuivamisel suudavad need vett säilitada kõige kauem (Sohi *et al.* 2009). Mulla veehoiuvõime võib suurenedä tänu biosöe peenematele osakestele, mis osaliselt või täielikult blokeerivad mulla poorid (Verheijen *et al.* 2010). Mida väiksema struktuursusega muld on, seda suurem on vee ja õhu vaheline antagonism mullas (Astover 2006). Selle tulemusel on muld põuakartlik või anaeroobne, mis omakorda avaldab mõju taimede kasvutingimustele ning produktiivsusele (Astover 2006). Võib arvata, et just sellistel muldadel võib biosöe lisamisest saadav tulu läbi mulla veemahutavuse suurenemise olla kõige suurem. Kahru *et al.* (2011) leidis oma uurimuses, et kasepuidust toodetud biosüsi suurendas mullaveehoiuvõimet 11 % võrreldes kontrollvariandiks olnud puhta mullaga. Sarnase tulemuseni jõudis ka Du *et al.* (2016), kelle uurimusest selgus, et mulla veehoiuvõime suurenes biosöe lisamisel 15,34 % ning taimedele omastatava vee sisaldus 25,87 % 0-20 cm mullakihis. Suliman *et al.* (2017) katse näitas, et värske ja oksüdeeritud biosöe kasutamise võrdluses oli oksüdeeritud biosöe lisamine mulda oluliselt suurema efektiga mulla veehoiuvõimele, mis võib olla põhjustatud

hapniku sisaldavate funktsionaalsete rühmade poolt biosöe pinnal. Ojeda *et al.* (2015) uurimusest selgus, et vaid aeglase pürolüüsiga toodetud biosüsi suurendas mõnevõrra mulla veehoiuvõimet, kuid teistel katses kasutatud biosöe liikidel sellist efekti ei esinenud või ei olnud tegemist statistiliselt olulise erinevusega. Samuti ei leidnud Ojeda *et al.* (2015), et taimedele omastatava veehulk mullas oleks oluliselt olnud biosöest mõjutatud. Sarnase tulemuseni jõudis ka Hardie *et al.* (2014), kelle poolt tehtud katses ei olnud biosöe lisamisel mulla veehoiuvõimele olulist mõju. Seevastu Carvalho *et al.* (2014) uurimus näitas, et biosöe mõju mulla ülemises kihis taimedele omastatava veehulgale on seotud biosöe normiga, st iga Mg ha⁻¹ kohta suurenes taimedele omastatava veehulk 0,8 % võrra.

1.2.2. Biosöe mõju mulla keemilistele omadustele

Erinevates uurimustes on leitud, et biosöe lisamine mulda on mõjutanud mulla keemilisi omadusi, nt. pH-d (Glaser *et al.* 2001; Jeffery *et al.* 2011; Domene *et al.* 2013; Cha *et al.* 2016; Paneque *et al.* 2016; Hansen *et al.* 2017), katioonide neelamismahutavust (Mengel 1993; Glaser *et al.* 2001; Cha *et al.* 2016; Raboin *et al.* 2016) ja toitainete sisaldust (Lehmann *et al.* 2007; Liu *et al.* 2012; Keith *et al.* 2016; Goa *et al.* 2016; Sanchez-Garcia *et al.* 2016).

Biosöe lisamine mulda tõstab stabiilse süsiniku sisaldust mullas, millest tulenevalt väheneb CO₂ emissioon orgaanilise aine lagundamisel (Liu *et al.* 2012). Lehmann *et al.* (2007) märgib oma uurimuses, et biomassi süsiniku pürolüüsimisel biosöeks seob see kuni 50 % biomassi süsinikust mulda, seevastu biomassi põletamine või bioloogiline lagundamine seob mulda vastavalt 3 % ja 10-20 % süsinikku 5-10 aasta jooksul. Mulla süsiniku varu pikaajaline suurenemine biosöe lisamisel sõltub peamiselt biosöe stabiilse süsiniku sisaldusest (Ojeda *et al.* 2015) Süsiniku talletamine põllumajanduslikes muldades on oluline, kuna see tõstab mullaviljakust (Lehmann 2007; Verheijen *et al.* 2010). Keith *et al.* (2016) leidis oma uurimuses, et biosöe lisamine mulda suurendas oluliselt süsinikusisaldust mullas. Goa *et al.* (2016) uurimus näitas, et biosöega rikastatud mullas oli mulla kogu süsinikusisaldus kontrollvariandiga võrreldes 32 % kõrgem, sarnasele tulemusele jõudis ka Sanchez-Garcia *et al.* (2016).

Biosöe pH on enamasti neutraalne kuni aluseline. Biosöe lisamisel mulda suureneb pH happelistel muldadel (Domene *et al.* 2013). Aluselisematel muldadel muutub pH vastavalt biosöe ja mulla algsele pH tasemele, st mida väiksem on biosöe ja mulla pH erinevus seda väiksem on biosöe mõju mulla pH-le (Paneque *et al.* 2016). Glaser *et al.* (2001) uurimus näitas, et lehtpuust toodetud biosöe mõju oli mulla pH-le suurem kui okaspuust toodetud biosöel, mis oli ilmselt tingitud lehtpuust toodetud biosöe kõrgemast tuha sisaldusest. Paneque *et al.* (2016) leidis, et tööstuslikest jäätmetest toodetud biosüte lisamisel aluselise reaktsiooniga mulda pH tase langes (8,54-lt 8,13-ni), seevastu puidust toodetud biosöe puhul antud näitaja vähesel määral tõusis (8,54-lt 8,74-ni). Hansen *et al.* (2017) koostatud uurimuses selgus, et gaasistamisel saadud teraviljapõhust biosöe kolmel järjestikusel aastal lisamisel mulda suurenes 2. ja 3. aastal pH tase mõlemal aastal 7 %.

Biosöel on fenoolsed, karboksüülsed ja hüdroksüülsed funktsionaalsed grupid, mis reageerivad ja vähendavad H⁺ ionide kontsentratsiooni mullas mõjutades seeläbi mulla pH-d (Cha *et al.* 2016). Mulla pH mõjub eelkõige taimetoitelementide omastatavusele ning seeläbi taimede kasvule (Domene *et al.* 2013). Verheijen *et al.* (2010) leidis, et biosöe lisamisel mulda on ilmselt kõige suurem efekt pH muutusel mullas. Jeffery (2011) märkis, et mulla pH tõus on üheks peamiseks põhjuseks, miks kultuuride saagikus biosöega rikastatud mullal kasvades suureneb.

Madala pH-ga muldadel on väike kationide neelamismahutavus, seetõttu on seal palju toksilisi anioone, millel on negatiivne mõju taimede produktiivsusele (Verheijen *et al.* 2010). Kationide neelamismahtavuse suurendamine on oluline taimede toitumise seisukohalt ning mullaviljakuse kujundamisel (Astover 2006). Mengel (1993) märkis, et mida kõrgem on kationide neelamismahutavus seda aeglasemalt langeb mulla pH ning harvem vajab muld lupjamist. Üks võimalus mulla neelamismahutavust tõsta on lisada sinna biosütti. Glaser *et al.* (2001) uurimus näitas, et lehtpuust toodetud biosüsi suurendas mulla algset kationide neelamismahutavust 50 % võrreldes kontrollvariandiga, seevastu okaspuu biosüsi vähendas seda. Biosöe kationide neelamismahutavus aja jooksul mullas suureneb, mis võib olla tingitud funktsionaalsete rühmade arvu kasvust biosöe pinnal (Verheijen *et al.* 2010; Raboin *et al.* 2016). Selle tõttu suureneb biosöe ja ühes sellega ka mulla võime siduda orgaanilist ainet ning mineraale (Sohi *et al.* 2009). Cha *et al.* (2016) leidis oma uurimuses, et lisaks funktsionaalsete gruppide arvu suurenemisele on kationide neelamismahutavus seotud mulla eripinna suurenemisega, mistõttu on mullal suurem

võime siduda katioone. Tänu suurenenud veehoiuvõimele väheneb ka toitainete leostumine mullast ning toitained püsivad kauem taimede juurte piirkonnas (Major *et al.* 2010; Liu *et al.* 2013; Sun *et al.* 2014). Samuti on biosöe mineraalses osas kõrge toitainete (P, Ca, K) kontsentratsioon, mis biosöe lisamisel mulda võib suurendada mulla toitainete sisaldust või olla kasutatud mikroorganismide poolt (Cha *et al.* 2016).

1.2.3. Biosöe mõju mulla bioloogilistele omadustele

Biosöe lisamisel mulda on leitud, et see suurendab mikrobiaalselt aktiivsust ning liigilist koosseisu, samuti mikrobiaalset efektiivsust mulla orgaanilise aine lagundamisel (Rutigliano *et al.*, 2014). Mikrobiaalne aktiivsus võib esialgu biosüte lisamisel mulda suurenedada, tänu biosüte pinnal olevatele ühenditele, nt. suhkrud (Verheijen *et al.* 2010). Samuti võivad väiksemad mikroorganismid leida biosüte poorides kaitset suuremate mikroorganismide eest (Verheijen *et al.* 2010). Vastupidiselt eelnevale on Ameloot *et al.* (2014) leidnud, et mulla orgaanilised osakesed võivad olla biosöe poorides kaitstud mikrobiaalse lagundamise eest, mistõttu võib mikrobiaalne aktiivsus ning liigirikkus väheneda.

Biosüsi ja vihmaussid mõjutavad taimede kasvu osaliselt sarnaste mehhanismide kaudu (mulla struktuur, mikrobiaalset aktiivsus ning liigiline koosseis, toitainete ringe) (Gomez-Eyles *et al.* 2010). Vihmaussid suurendavad orgaanilise aine lagunemist ja mineralisatsiooni, kuid samas biosüsi aitab hoida toitaineid kauem taimede juurte piirkonnas, st vähendab nende leostumist (Gomez-Eyles *et al.* 2010). Biosüsi mõjutab mullaorganismide nii oma füüsikaliste kui ka keemiliste omadustega (Gomez-Eyles *et al.* 2010). Erinevatest materjalidest ja erinevatel tootmisprotsessi tingimustel toodetud biosüsi (erinev pH, veehoiuvõime, tuhasus jne) mõjub mullaelustikule erinevalt, sh vihmaussidele (Lehmann *et al.* 2010).

Biosöe füüsikalised omadused (pooride struktuur, eripind, mineraalse aine osatähtsus) ning pH mõjutavad oluliselt mullaorganismide aktiivsust, liigirikkust ning samuti taimede omastatavate toitainete sisaldust mullas (Lehmann *et al.* 2010).

Seniste uuringute tulemusena on selgunud, et vihmaussid eelistavad biosõega rikastatud mulda biosõeta mullale (Lehmann *et al.* 2010; Verheijen *et al.* 2010; Weyers, Spokas 2011). Laboratoorsetes tingimustes on leitud, et vihmaussidel puuduvad eelistused substraadi suhtes või eelistavad nad pigem biosõe ja mulla segu (Weyers, Spokas 2011). Teataval määral leidub ka selliseid katseid, kus vihmaussid pigem vältisid biosõega mulda (Topoliantz, Ponge 2003; Li *et al.* 2010). Li *et al.* (2010) uurimus näitas, et vihmaussid vältisid biosõega rikastatud mulda seni kuni seda polnud niisutatud. Seetõttu võib arvata, et vihmaussid väldivad kuiva biosõega segatud mulda, kuna biosõe osakesed kleepuvad nende kehapiinnale ning põhjustavad seeläbi vihmausside surma (Li *et al.* 2010). Topoliantz ja Ponge (2003) märkisid, et biosõega rikastatud mullas ei leitud ühtegi vihmausside toitumiskäiku. Seega võib oletada, et vihmaussid toitumisel eelistavad pigem mulda kui biosõe ja mulla segu või lükatakse biosõe osakesed toitumisel kõrvale (Topoliantz, Ponge 2003).

Biosõe mõju vihmausside kasvule ja vitaalsusele oleneb toorainest, biosõe keemilisest koostisest ning kasutamise normist (Weyers, Spokas 2011). Liesch *et al.* (2010) leidis, et kanasõnnikust toodetud biosões on lisaks vajalikele mikroelementidele ka kõrge kontsentratsioon toksilisi metalle (As, Al), mis võivad mõjutada vihmausside ellujäämisvõimet, kasvu ning reproduktsiooni. Liesch *et al.* (2010) katses selgus, et männilaastudest toodetud biosõega mullas oli vihmausside ellujäämus oluliselt kõrgem kui kanasõnnikust toodetud biosõega rikastatud mullas. Samuti ilmnes selles katses, et kanasõnnikust toodetud biosõe kasutamisel sai vihmaussidele tõenäoliselt surmavaks asjaolu, et see sisaldas ammoniaaki ning biosõe kõrge pH põhjustas järsu muutuse mulla pH-s. Liesch *et al.* (2010) leidis, et vihmaussidele sai fataalseks just järsk pH muutus biosõega rikastatud mullas.

Eelnevate uurimistööde käigus on leitud, et biosõite mõju vihmausside käitumisele sõltub ka selle normist ning omadustest. Vihmaussid vältisid õunapuu laastudest valmistatud biosõega rikastatud mulda (kuiv biosõe 100 ja 200 g kg⁻¹) mõlema normi puhul statistiliselt olulisel määral ning vihmaussid kaotasid oluliselt kaalu 28 päevase katse jooksul (Li *et al.* 2010). Samas väikse normiga (10 g kg⁻¹) lisatud biosõega muld ei tekitanud vihmaussides vältimise efekti (Li *et al.* 2010). Li *et al.* (2010) leidis, et laboritingimustes, ilma täiendava orgaanilise materjali lisamiseta vihmausside kaal langes oluliselt 10 % ning 20 % biosõe ja mulla segu variantides võrreldes kontrollvariantidega.

Kanasõnnikust toodetud biosüsi mõjus vihmaussidele toksiliselt 45 Mg ha⁻¹ normi puhul. 10% mulla kaalust biosöe lisamisega põhjustati vihmaussidel DNA kahjustumist. 68 ja 90 Mg ha⁻¹ normiga lisatud biosüsi põhjustas vihmausside suremust ja kasvuiibe langust (Liesch *et al.* 2010). Li *et al.* (2010) leidis veel, et kui anda biosütt väikese normiga (10 Mg ha⁻¹) siis see vihmausse ei kahjusta.

Tuhasisaldus erinevates biosütes mõjutab vihmausside populatsioonide suurust (Weyers, Spokas 2011). Kui tuha kogus puidust toodetud ning põllule viidud biosöel ületab 2500 kg ha⁻¹, siis vihmausside arvukus mullas vähenes oluliselt pH järsu tõusu tõttu (Weyers, Spokas 2011).

Uuringud vihmausside sooltest ja väljaheidetest näitavad, et vihmaussid seedivad ka biosöe osakesi (Weyers, Spokas 2011). Seedimine siiski ei tähenda, et vihmaussid saaksid biosöe osakestest eluks vajalikku energiat (Lehmann *et al.* 2010; Weyers, Spokas 2011). Lehmann *et al.* (2010) oletab, et vihmaussid võivad biosütt tarbida, kuna nende soolestikus olevate ensümaatiliste bakterite ja biosöe koosmõjul võib tõusta pH vihmausside seedekulglas. Samuti võib biosüsi vihmausside seedekulglas täita ainult orgaanilise materjali „jahvataja“ rolli nagu liivgi (Lehmann *et al.* 2010). Endogeilised liigid võivad eelistada biosöega mulda, kuna toituvad biosöe poorides peituvatest mikroobidest või nende metaboliitidest (Lehmann *et al.* 2010).

Topoliantz ja Ponge (2003) märkisid, et vihmausside käikude loomine oli aktiivsem mullas ning passiivsem mulla ja biosöe segus. Käikude ruumala erines oluliselt, olles 14,6 cm³ mullas ning 1,7 cm³ mulla ja biosöe segus (Topoliantz, Ponge 2003). Selline suur erinevus võib olla põhjustatud mikroobide elupaikade ümberpaiknemisest biosöe pooridesse, mille tõttu võis väheneda toidu kättesaadavus vihmaussidele, mis omakorda võis viia nende kaalu vähenemiseni (Weyers, Spokas 2011). Gomez-Eyles *et al.* (2010) uurimuses selgus, et vihmausside kaal vähenes oluliselt biosöega rikastatud reostunud rähkmullas (mullas sisaldusid PAH, Cu, Co, Pb, Ni, As, Cd, Zn). Gomez-Eyles *et al.* (2010) leidsid ka, et vihmaussid hakkasid seal 56. katsepäevaks koguma oma kehasse polüaromaatseid hüdrokarbonaate (PAH), mistõttu vähenes ka nende kehakaal. Koosmõjus biosöega vähenes reostatud mullas toksiliste ainete kontsentratsioon vihmausside kehakudedes kuni 45 %, mis võis olla põhjustatud biosöe võimest neid siduda (Gomez-Eyles *et al.* 2010).

Vihmaussid võivad olla olulised biosöe mikrobiaalse aktiivsuse modifitseerijad, muutes selle omadusi seedimise kaudu või kandes biosüüt mullas laiali (Ponge, *et al.* 2006; Lehmann *et al.* 2010). Major *et al.* (2010) märkis, et vihmausside käigud, eriti aneetsiliste vihmausside käigud olid oluliselt tumedama värvusega kui ümberkaudne muld, mis viitabki eelnevalt mainitud faktile, et vihmaussid kannavad biosüüt mullas laiali. Biosöe lisamisel mulda ei ole märgatud mõju vihmausside reproduktsioonivõimele (Weyers, Spokas 2011).

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Põldkatse üldinformatsioon

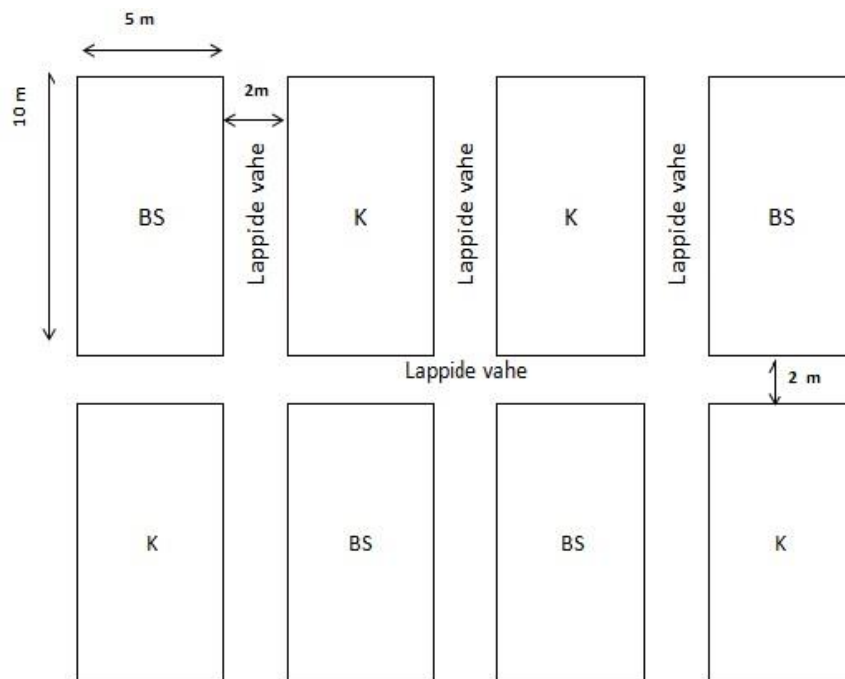
Põldkatse rajati 2011. aastal maikuus Põlvamaal Ahja vallas Kosova külas asuva tootmistalu maadele. Katseala GPS koordinaadid on X:645749,Y:678541. Katse asub kahkjal (*Fragi-Stagnic Albeluviso, WRB*) kerge liivsaviilõimisega mullal. Mulla agrokeemilised näitajad on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Ahja põldkatse mullaagrokeemilised näitajad erinevates mullakihtides

	pH	N _{üld} (%)	P _{AL} (g kg ⁻¹)	K _{AL} (g kg ⁻¹)	CEC (cmol kg ⁻¹)	Eripind (m ² g ⁻¹)
0-10 cm	5,9	0,1	0,06	0,12	8,8	19,4
10-20 cm	5,8	0,1	0,06	0,14	7,7	19,6

Katse ülesehitus oli ühe faktoriline randomiseeritud lappide asetusega blokkkatse, milles uuriti biosöe mõju mulla füüsikalistele ja keemilistele näitajatele, kultuuride saagile ning vihmausside arvukusele ja liigilisele koosseisule. Katses oli kaks varianti: kontroll (põllumuld) ja põllumuld + biosüsi. Katsevariandid olid neljas korduses. Ühe katselapi pindala oli 50 m² (5x10m). Vältimaks biosöe kandumist kontrollvariandile oli kõigi katselappide vahel 50 m² suurune puhverala.

Katses kasutatud biosüsi oli toodetud Biolani biosöe tehases, mis asub Pärnumaal Seljal. Söe tooraineks oli lehtpuuliikide segu, kus domineerisid lepp ja paju. Enne mulda viimist peenestati süsi teraviljamuljuri. Erineva suurusega fraktsioonide osakaal mulda viidud söes oli järgmine: üle 10 mm 0,05 %, 2...10 mm 23,9%, 1...2 mm 12,75%, 0,5...1 mm 14,85%, 0,25...0,5 mm 17,7%, 0,1...0,25 mm 24,7%, 0,05...0,1 mm 5,45% ning alla 0,05 mm 0,6%. Söe pH oli 8,29 ja toitainete sisaldus vastavalt N 0,7% , P 0,06%, K 0,44%, Na 0,17%. Söe eripind oli 113,3 m² g ja kationide neelamismahutavus 16,74 meg/100 g mulla kohta. Biosüsi normiga 50 t KA ha⁻¹ laotati lappidele käsitsi (joonis 1) ja segati järgmisel päeval vertikaalselt liikuva tööorganiga varustatud freesiga, 0...10 cm sügavusse mullakihti.



Joonis 1. Katse skeem

2.2. Mullaharimine

Katse alal kasvatati samu kultuure ja hariti maad sarnaselt kogu ülejäänud põlluga, millel katse paiknes. Tabelis 2 on välja toodud Ahja põldkatsel teostatud põllutööd aastatel 2011 kuni 2016. Katse ajal kasvatati põllul suvirapsi, põldheina (2 aastat), otra, talinisu ning suviotra. Tootmispõllul rakendatakse intensiivset künnipõhist mullaharimist.

Tabel 2. Tootmispõllul ja katselappidel teostatud põllutööd

		2011	
Kultuur	Mullaharimistööd	Väetamine	Taimekaitsetööd
Suviraps	Randaalimine, kultiveerimine, külvamine, koristamine, kündmine	120 kg N ha ⁻¹ 14 kg P ha ⁻¹ 26 kg K ha ⁻¹	Devrinol (toimeaine: napropamiid). Norm 2 l ha ⁻¹ , Decis(toimeaine : deltametriin). Norm: 0,2 l ha ⁻¹
		2012	
Kultuur	Mullaharimistööd	Väetamine	Taimekaitsetööd
Põldhein (p.ristik 8 kg+timut 12 kg segus)	Külvamine, kultiveerimine, niitmine	Väetist ei antud	Taimekaitsetöid ei teostatud
		2013	
Kultuur	Mullaharimistööd	Väetamine	Taimekaitsetööd
Põldhein	Niitmine x2, kündmine	Väetist ei antud	Taimekaitsetöid ei teostatud
		2014	
Kultuur	Mullaharimistööd	Väetamine	Taimekaitsetööd
Oder (kevadel)	Kultiveerimine, külvamine, koristamine, kündmine,	48 kg N ha ⁻¹ 5,3 kg P ha ⁻¹ 29 kg K ha ⁻¹	Secator (toimeaine: amidosulfuroon, metüüljodosulfuroon- naatrium, mefenpüür- dietüül). Norm: 0,1 l ha ⁻¹ ,
Talinisu (sügisel)	kultiveerimine, külvamine		
		2015	
Kultuur	Mullaharimistööd	Väetamine	Taimekaitsetööd
Talinisu	Koristamine, kündmine	84 kg N ha ⁻¹ 12 kg P ha ⁻¹ 45 kg K ha ⁻¹	Mustang (toimeaine: florusulaam, 2,4-D (toimeaine: etüülheksüülester). Norm: 0,5 l ha ⁻¹
		2016	
Kultuur	Mullaharimistööd	Väetamine	Taimekaitsetööd
Suvioder	Külvamine, koristamine	40 kg N ha ⁻¹ 8,8 kg P ha ⁻¹ 16,6 kg K ha ⁻¹	Secator(toimeaine: amidosulfuroon, metüüljodosulfuroon- naatrium, mefenpüür- dietüül) Norm: 0,1 l ha ⁻¹ Danadim(toimeaine: dimetooat). Norm: 0,5 l ha ⁻¹

2.3. Proovivõtmised, mõõtmised ja analüüsid

Mulla füüsikaliste ja keemiliste omaduste määramiseks võeti esimesel aastal kevadel, enne söe laotamist ja sügisel pärast saagi koristamist kõigilt katselappidelt mullaproovid kolmelt sügavuselt (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm). Proove koguti kõigilt katselappidelt neljas korduses juhuslikult valitud kohtadest. Edaspidi toimus mulla füüsikaliste ja keemiliste omaduste määramine iga kolme aasta järel.

Mulla lasuvustiheduse ning omastatava vee sisalduse määramiseks võeti proovid 54 mm läbimõõduga metallsilindriga. Mulla keemiliste omaduste ja omastamatu vee sisalduse määramiseks kasutati proovivõtuks 20 mm läbimõõduga mullapuuri. Mullaproovid kuivatati õhukuivaks ning sõeluti seejärel läbi 2 mm avaga sõela. Lisaks tehti aastatel 2012, 2015 ja 2016 septembrikuus vihmausside arvukuse, biomassi ja liigilise koosseisu selgitamiseks kõigil 8 lapil juhuslikult valitud kohas 0,25 m² suurusel pinnal kaeve. Esmalt eemaldati muld 0–10 cm ja seejärel 10–20 cm sügavusest kihist. Muld asetati koormakattele ja nopiti välja kõik selles leidunud vihmaussid. Vihmaussid paigutati koos mullaga plastikkarpidesse ning viidi Eerika välilaborisse kaalumisele ning liikide määramisele. Vihmausside liigid määrati T. Timmi (1999) koostatud „Eesti rõngusside määraja“ järgi.

Mulla füüsikalistest omadustest määrati lasuvustihedus, üldpoorsus, õhustatus ning omastatava ja omastamatu veehulk (De Cima 2016). Mulla keemilistest omadustest määrati P, K, Ca, Mg, Na sisaldus Mehlich-III meetodil (Handbook on..., 1992) ja pH_{KCl} pH/EC-meetriga. Mulla eripind määrati veeauru meetodil (Klute, 1986), katioonide neelamismahutavus CEC määramismeetodil Bühneri lehtriiga (Chapman, 1965) ning orgaanilise süsiniku sisaldus CNS-element analüsaatoril (ELEMENTAR, Hanau, Germany).

Laboratoorsed mullaanalüüsid teostati Põllumajandusuuringute Keskuse agrokeemia ja Eesti Maaülikooli mulla ja agrokeemia osakonna laborites.

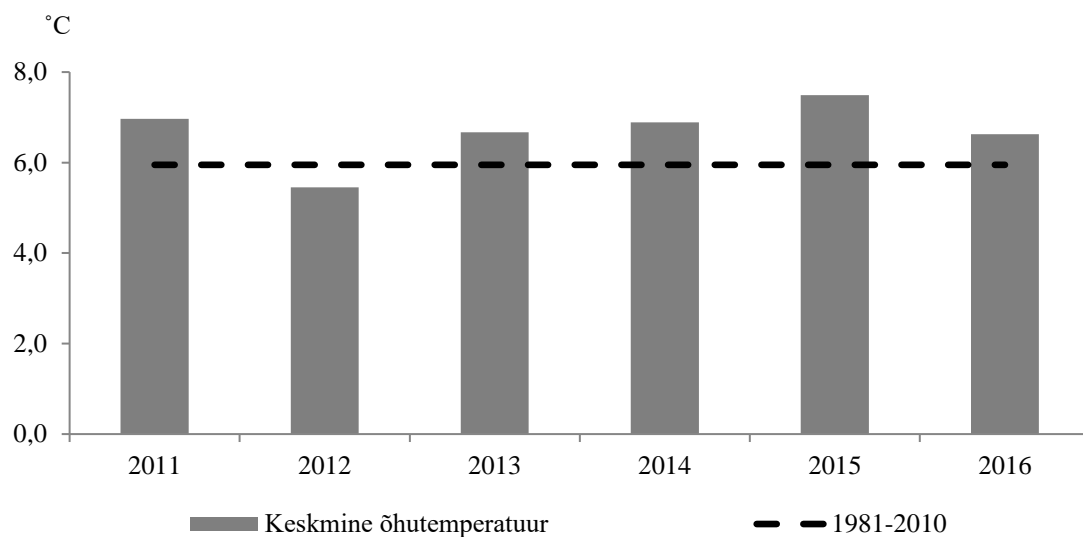
2.4. Andmetöötlus

Katseandmed töödeldi statistiliselt dispersioonanalüüsi (*ANOVA*) meetodil 95% usalduspiiri juures, kasutades andmetöötlusprogrammi *Statistica ver. 13*. (Dell Inc. (2015). Dell Statistica (data analysis software system), version 13. software.dell.com).

Biosöe mõju hindamiseks uuritavale tunnusele (mulla eripind, lasuvustihedus, neelamismahutavus, pH_{KCl} , poorsus, vihmausside arvukus ja toitainete sisaldus) kasutati ühefaktorilist dispersioonanalüüsi. Biosöe koosmõju mullakihi sügavuse ja katse algusest möödunud ajaga selgitati mitmefaktorilise dispersioonanalüüsiga.

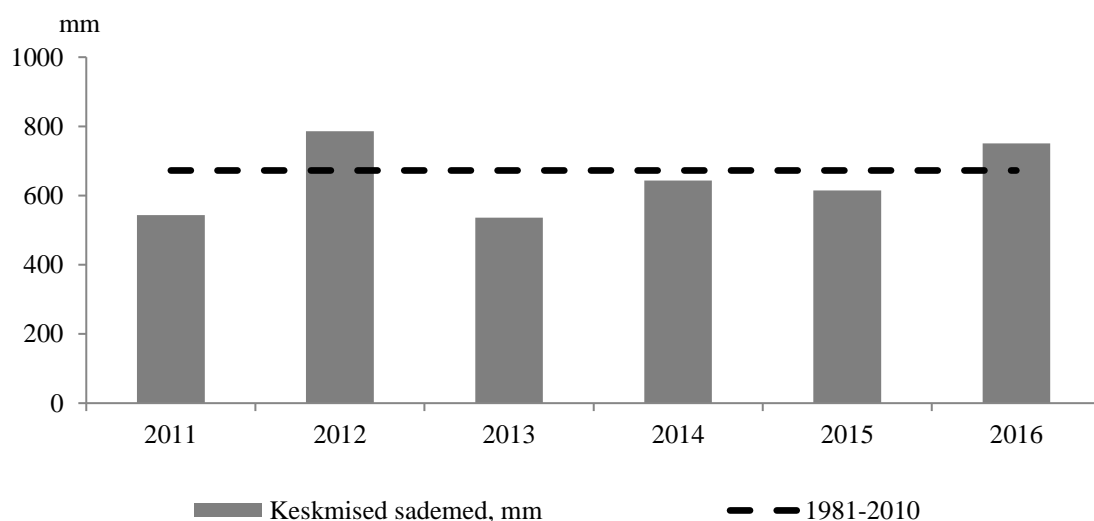
2.5. Ilmastik

Kuna katseala paiknes ligilähedaselt võrdsel kaugusel Võru (42,4 km edela suunal) ja Tõravere (33,6 km lääne suunal) ilmajaamast, siis kasutati katseperioodi ilmastiku iseloomustamiseks nende kahe ilmajaama keskmiste temperatuuride ning sademete aritmeetilise keskmist.



Joonis 2. Keskmine õhutemperatuur (°C) Ahja põldkatsel aastatel 2011-2016

Keskised õhutemperatuurid olid katse aastatel paljude aastate (1981-2010) keskmise õhutemperatuuriga võrreldes kõrgemad aastatel 2011., 2013., 2014., 2015. ja 2016. aastal, vastavalt 17,6 %, 12,6 %, 15,9 %, 26,0 % ning 10,9 %. 2012. aastal oli õhutemperatuur paljude aastate keskmisest 7,6% madalam (joonis 2).



Joonis 3. Sademete summa (mm) Ahja põldkatsel 2011-2016. aastal

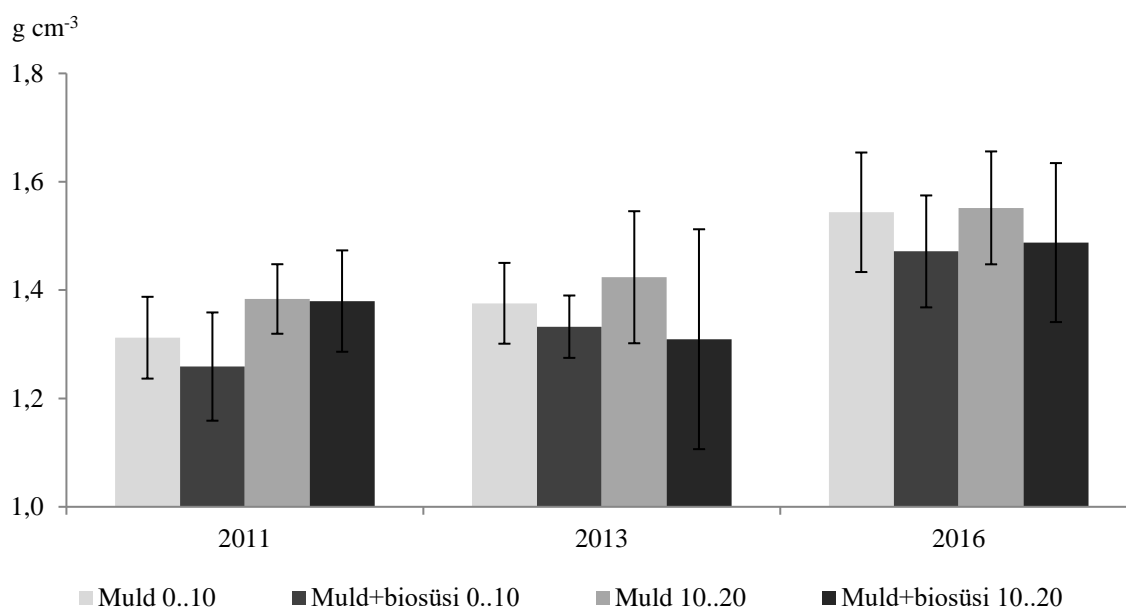
Sademetek hulk võrreldes paljude aastate keskmisega (1981-2010) oli 2011., 2013., 2014. ja 2015. aastal madalamad, vastavalt 19,2 %, 21,2 %, 4,4 % ja 8,6 %. Antud näitaja oli keskmisest sademetek hulgast kõrgem 2012. ja 2016. aastal, vastavalt 16,9 % ja 11,6 % (joonis 3).

3. TULEMUSED

3.1. Mulla füüsikalised omadused

3.1.1. Mulla lasuvustihedus

Katseperioodi keskmine mulla lasuvustihedus 0..10 cm kihis oli muldvariandis $1,41 \pm 0,09$ g/cm⁻³ ning muld+biosüsi variandis $1,35 \pm 0,09$ g/cm⁻³. 10..20 cm kihid olid need näitajad vastavalt $1,45 \pm 0,10$ g cm⁻³ ja $1,39 \pm 0,15$ g cm⁻³ (joonis 4).



Joonis 4. Mulla lasuvustihedus (g cm⁻³) Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variandis aastatel 2011, 2013 ja 2016. Vearibad tähistavad keskmist standardhälvet.

Biosöe mõju mulla lasuvustihedusele oli usutav, kuid see oli aastati ja mullakihi erinev (tabel 3). Usutav erinevus kahe variandi vahel esines ainult 10...20 cm kihis 2013 ja 2016

aastal. Teistes sügavustes biosöe mõju usutav ei olnud. Katseperioodi jooksul suurenes mulla lasuvustihedus usutavalt kõigis katse variantides ($P < 0,05$, tabel 3).

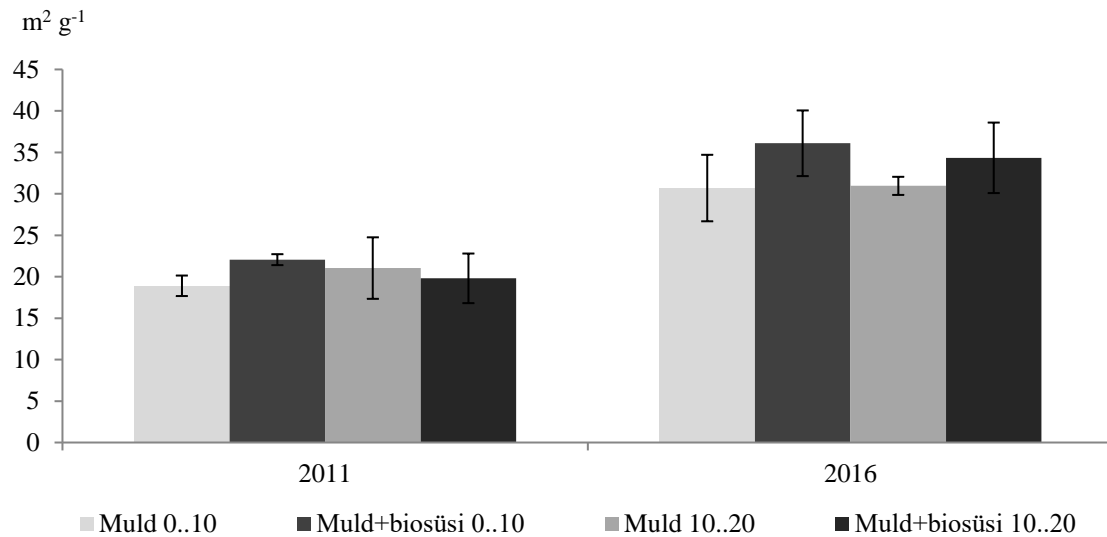
Tabel 3. Katsefaktorite mõju mulla füüsikalistele omadustele

Faktor	Lasuvustihe- dus, g m^{-3}	Eripind , m^{-2} g^{-1}	Üldpoor- sus, %	Õhuga täidetud poorid, %	Omastatav veehulk, %	Omastamatu veehulk, %
Variant(A)	0,000*	0,080	0,165	0,525	0,004*	0,028*
Sügavus(B)	0,013*	0,785	0,000*	0,000*	0,000*	0,191
Katse aasta (C)	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
A x B	0,887	0,205	0,454	0,449	0,241	0,972
A x C	0,407	0,024*	0,665	0,180	0,541	0,018*
B x C	0,051*	0,887	0,000*	0,017*	0,006*	0,720
A x B x C	0,299	0,477	0,801	0,776	0,379	0,772

*- P-väärtus alla 0,05

3.1.2. Mulla eripind

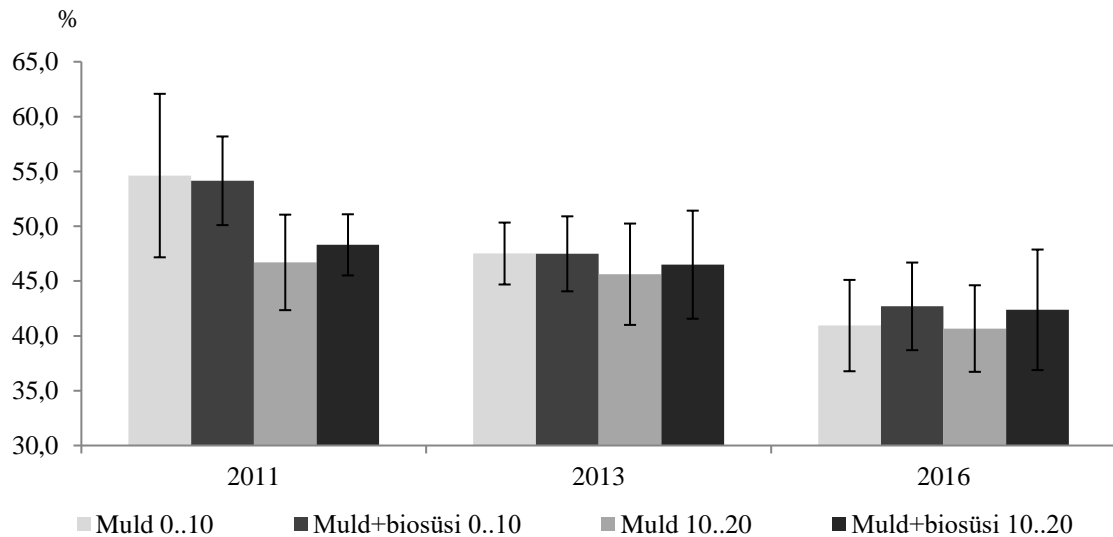
Katseperioodi keskmine mulla eripind 0..10 cm kihis oli muldvariandis $24,80 \pm 2,62 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ning muld + biosüsi variandis $29,08 \pm 2,31 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (joonis 5). 10..20 cm kihis oli antud näitajad vastavalt $26,00 \pm 2,40 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ja $27,07 \pm 3,62 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (joonis 5). Biosöe mõju mulla eripinnale katseperioodil tervikuna statistiliselt usutav ei olnud (tabel 3). Küll esines muld ja muld + biosüsi variantide vahel statistiliselt oluline eripinna erinevus 0-10 cm kihis katse esimese aasta sügisel. Ka 2016. aastal oli biosöega variandi mõlemas mullakihis eripind biosöega variandis suurem, kuid see erinevus ei olnud statistiliselt oluline. Katseperioodi jooksul mulla eripind usutavalt suurenes ($P < 0,05$, tabel 3) kõigis katsevariantides.



Joonis 5. Mulla eripind ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel aastatel 2011 ja 2016. Vearivad tähistavad keskmist standardhälvet.

3.1.3. Mulla üldpoorsus

Katseperioodi keskmine mulla üldpoorsus 0..10 cm kihis oli muldvariandis $47,69 \pm 4,82 \%$ ning muld + biosüsi variandis $48,11 \pm 3,82 \%$. 10..20 cm kihis olid need näitajad vastavalt $44,33 \pm 4,31 \%$ ja $45,72 \pm 4,41 \%$ (joonis 6).

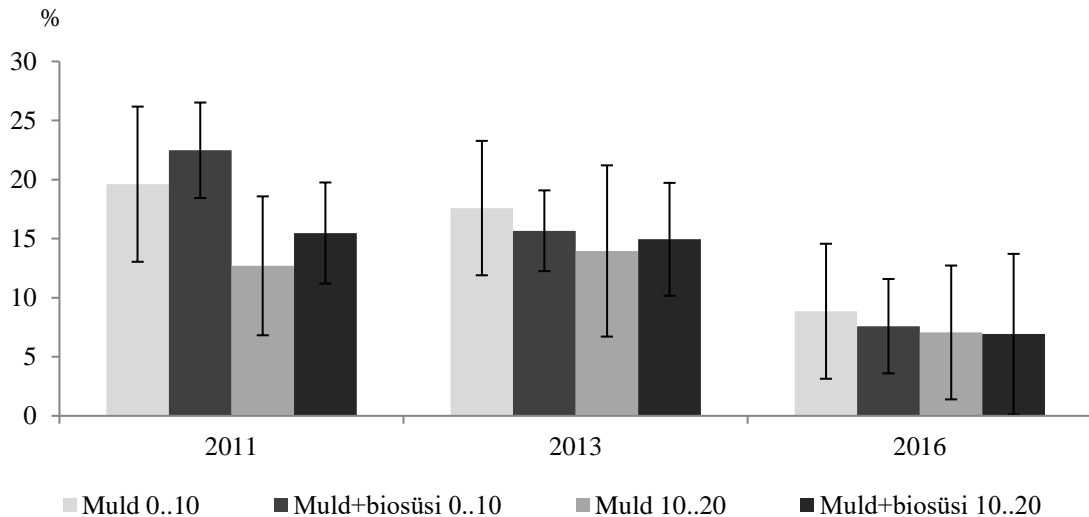


Joonis 6. Mulla üldpoorsus Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantides aastatel 2011, 2013 ja 2016. Vearivad tähistavad keskmist standardhälvet.

Biosöel mõju mulla üldpoorsusele üheski uuritud mullakihis usutav ei olnud. Katseperioodi kestel mulla üldpoorsus vähenes ($P < 0,05$, tabel 3).

3.1.4. Õhuga täidetud pooride osakaal mullas

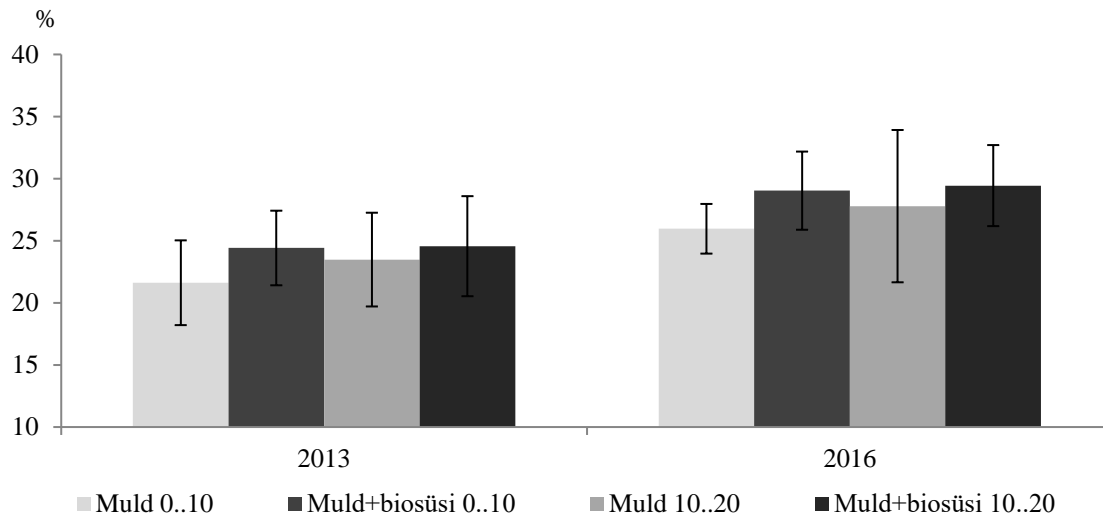
Katseperioodi keskmine mulla õhuga täidetud pooride osakaal 0..10 cm kihis oli muldvariandis $15,35 \pm 5,99$ % ning muld+biosüsi variandis $15,25 \pm 5,95$ %. 10..20 cm kihis olid antud näitajad vastavalt $11,24 \pm 6,26$ % ja $12,44 \pm 5,29$ % (joonis 7). Katseperioodi kokkuvõttes õhuga täidetud pooride osakaal biosöega ja biosöeta variandis ei erinenud ja mõlemas variandis see aastatega vähenes.



Joonis 7. Õhuga täidetud pooride osakaal (%) üldpoorsusest Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel aastatel 2011, 2013 ja 2016. Vearibad tähistavad keskmist standardhälvet.

3.1.5. Taimetele omastatava vee sisaldus mullas

Katseperioodi keskmine taimetele omastatava vee sisaldus 0..10 cm kihis oli muldvariantis $23,79 \pm 2,71$ % ning muld + biosüsi variantis $26,72 \pm 3,08$ %. 10..20 cm kihis olid antud näitajad vastavalt $25,63 \pm 4,95$ % ja $27,00 \pm 3,65$ % (joonis 8).

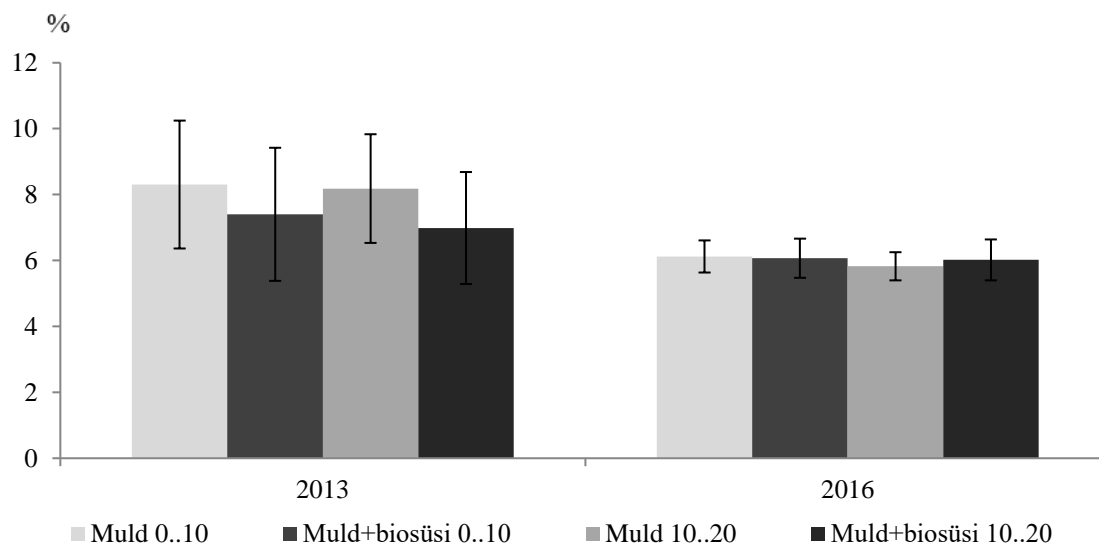


Joonis 8. Omastatava vee sisaldus (%) mulla üldpoorsusest Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel aastatel 2013 ja 2016. Vearivad tähistavad keskmist standardhälvet.

Biosüsi mõju taimedele omastatava vee sisaldus oli usutav ($P < 0,05$) ainult 0..10 cm kihis kuid ka 10...20 cm kihis oli see näitaja biosöega variandis võrreldes muldvariandiga veidi suurem. Omastatava veehulk mullas suurenes katseperioodil usutavalt ($P < 0,05$, tabel 3) mõlemas variandis .

3.1.6. Taimede omastamatu vee sisaldus mullas

Katseperioodi keskmine taimedele omastamatu vee sisaldus 0..10 cm mullakihis oli muldvariandis $7,21 \pm 1,21$ % ning muld+biosüsi variandis $6,73 \pm 1,31$ %. 10..20 cm kihis olid antud näitajad vastavalt $7,00 \pm 1,04$ % ja $6,50 \pm 1,16$ % (joonis 9). Biosüsi omastamatu vee sisaldust mullas usutavalt ei mõjutanud ($P > 0,05$)

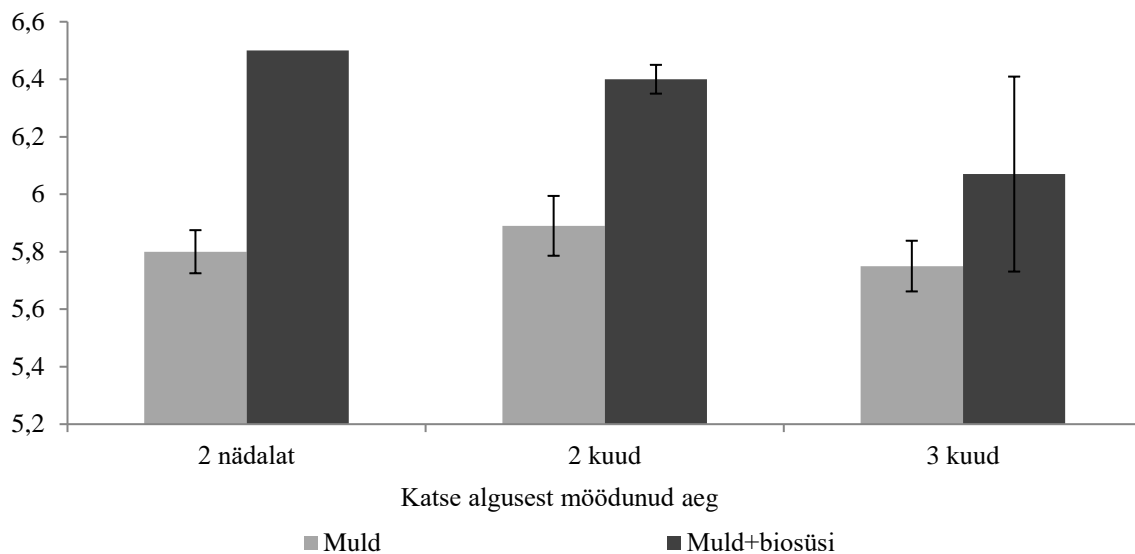


Joonis 9. Omastamatu vee sisaldus (%) mulla üldpoorsusest Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel aastatel 2013 ja 2016. Vearivad tähistavad keskmist standardhälvet.

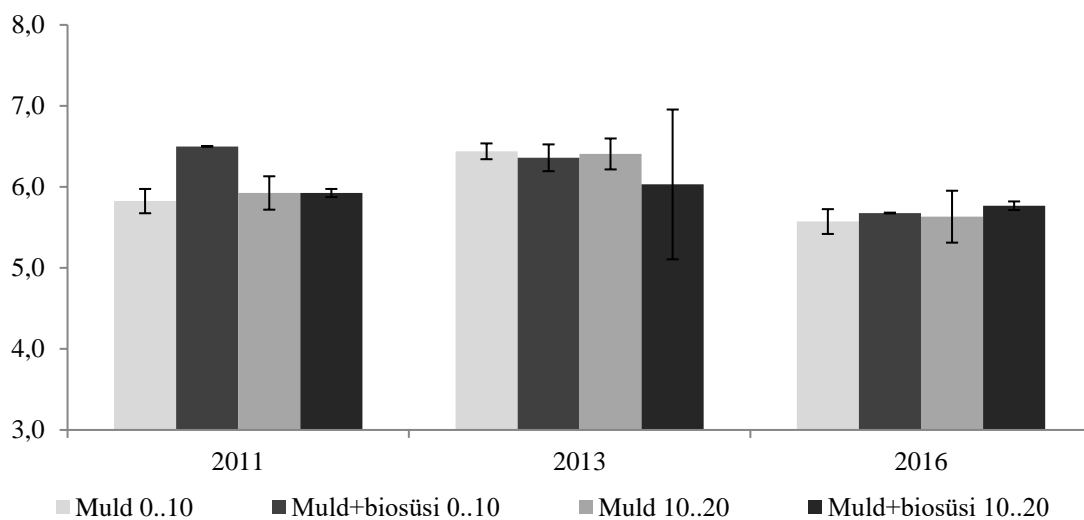
3.2. Mulla keemilised omadused

3.2.1. Mulla pH_{KCl}

Biosöe mõju mulla pH_{KCl} -le oli usutav ainult esimesel aastal ($P < 0,01$). Erinevus kahe variandi vahel oli kõige suurem kaks nädalat pärast biosöe laotamist ja edaspidi see vähenes (joonis 11). Kaks aastat (2013) ja viis aastat (2016) pärast söe laotamist mulla pH_{KCl} muld ja muld+biosüsi variandis enam ei erinenud (joonis 12). Biosöe mõju mulla pH-le esines esimesel aastal ainult 0...10 cm kihis. Järgmistel aastatel oli väike pH_{KCl} erinevus ka 10...20 cm kihis, kuid see ei olnud statistiliselt oluline ($P > 0,05$). Katseperioodil oli mulla pH_{KCl} usutavalt langeva trendiga ($P < 0,05$, tabel 4).



Joonis 11. Mulla pH_{KCl} Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantides 2011. aastal. Vearibad tähistavad keskmist standardhälvet.



Joonis 12. Mulla pH_{KCl} Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel aastatel 2011, 2013 ja 2016. Vearibad tähistavad keskmist standardhälvet.

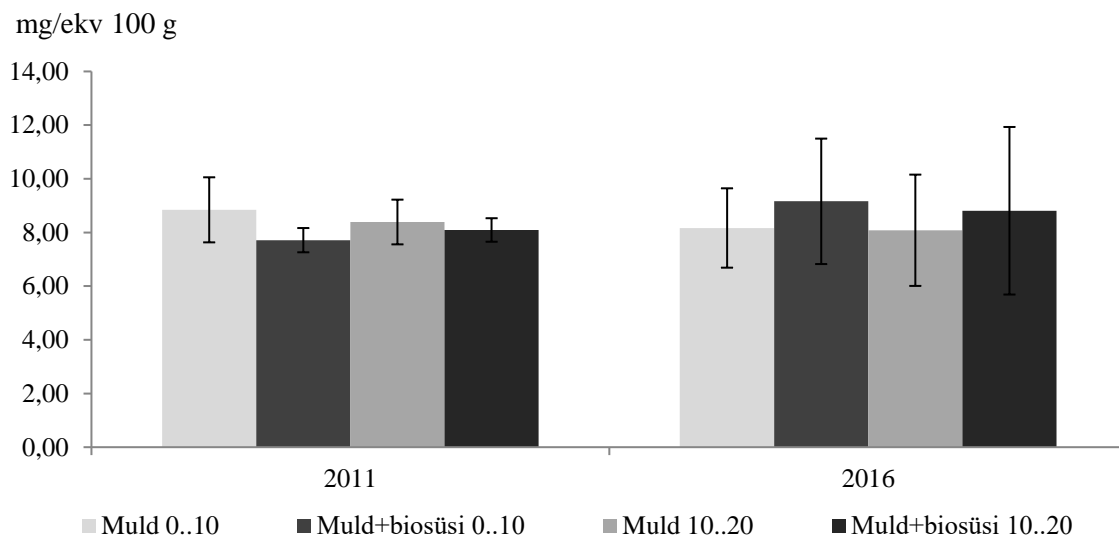
Tabel 4. Katsefaktorite mõju mulla keemilistele omadustele

Faktor	pH	CEC, mg/ekv 100 g mullas	N, %	P, mg/100 g mullas	K, mg/ 100 g mullas
Variant (A)	0,000*	0,846	0,011*	0,198	0,277
Sügavus (B)	0,328	0,589	0,016*	0,343	0,687
Katse algusest möödunud aastate arv (C)	0,131	0,550	0,000*	0,000*	0,000*
A x B	0,025*	0,869	0,522	0,736	0,839
A x C	0,149	0,387	0,202	0,658	0,240
B x C	0,648	0,919	0,529	0,504	0,111
A x B x C	0,827	0,712	0,740	0,547	0,964

*- p-väärtus alla 0,05

3.2.2. Katioonide neelamismahutavus

Katseperioodil oli mulla keskmine katioonide neelamismahutavus 0..10 cm kihis muldvariandis $8,51 \pm 1,35$ mg/ekv. 100 g mullas ning muld+biosüsi variandis $8,44 \pm 1,39$ mg/ekv. 100 g mullas. 10..20 cm kihis olid need näitajad vastavalt $8,24 \pm 1,45$ mg/ekv (joonis 13). 100 g mullas ja $8,45 \pm 1,78$ mg/ekv. 100 g mullas. Need erinevused ei ole statistiliselt olulised (tabel 4).



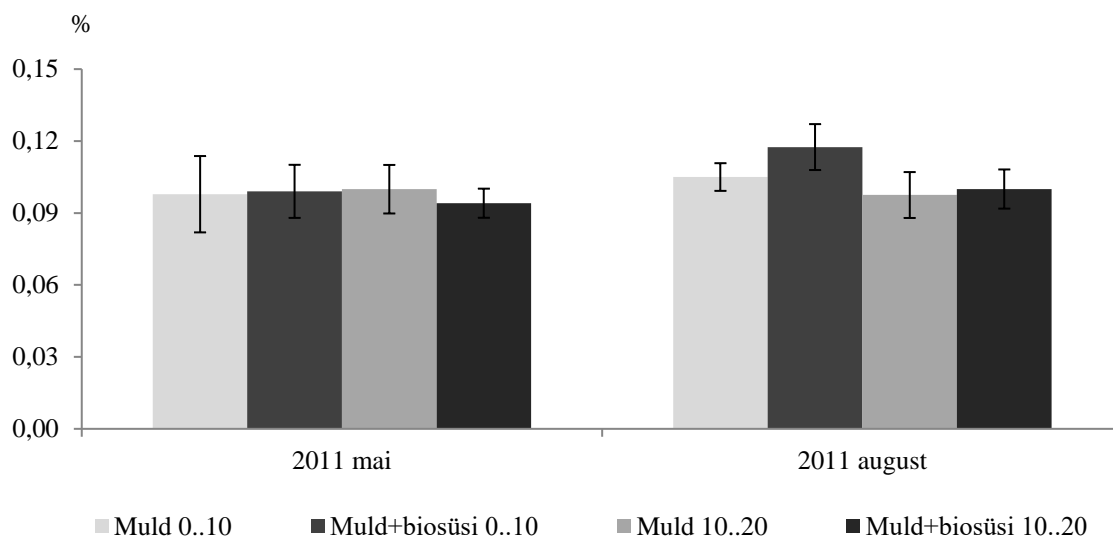
Joonis 13. Mulla katioonide neelamismahutavus (mg/ekv 100 g mulla kohta) Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel 2011. ja 2016. aastal. Vearibad tähistavad keskmist standardhälvet.

3.2.2. Mulla toitainete sisaldused

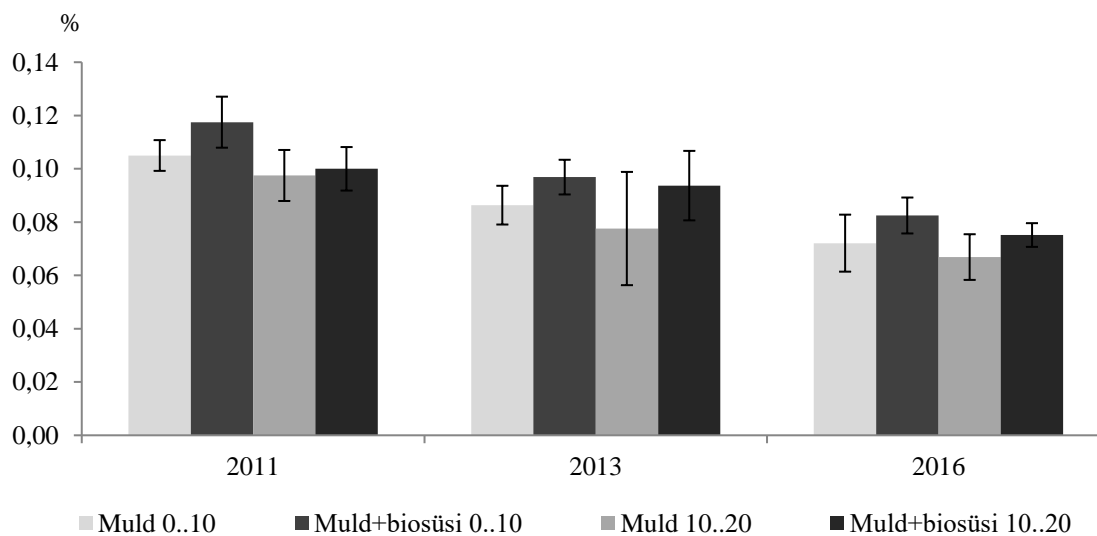
3.2.3.1. Lämmastiku sisaldus

Katseperioodil oli keskmine mulla lämmastiku sisaldus 0..10 cm kihis muldvariantis $0,09 \pm 0,01$ % ning muld + biosüsi variantis $0,10 \pm 0,01$ %. 10..20 cm kihis olid need näitaja vastavalt $0,08 \pm 0,01$ ja $0,09 \pm 0,01$ %. Biosöe mõju mulla lämmastiku sisaldusele avaldus juba esimesel aastal. Vahetult enne biosöe mulda viimist (mai 2011) oli mulla lämmastiku sisaldus mõlemas variantis sarnane (joonis 14) Kolm kuud hiljem oli see muld + biosüsi variantis 0..10 cm kihis võrreldes muldvariantiga (joonis 14) 11,90 % suurem ($P > 0,05$). Sügavuselt järgmisesse kihti biosöe mõju esimesel aastal ei ulatunud (joonis 15). 2013. ja 2016. aastal oli väike erinevus mulla lämmastiku sisalduses ka 10...20 cm kihis ($P > 0,05$) Järgmistel aastatel vähenes mulla lämmastiku sisaldus mõlemas variantis, kuid erinevus kahe variandi vahel püsis 0...10 cm kihis ligilähedaselt sama suur kuni katseperioodi

lõpuni. Katseperioodi kokkuvõttes oli biosöe mõju mulla lämmastiku sisaldusele usutav ($P < 0,05$, tabel 4).



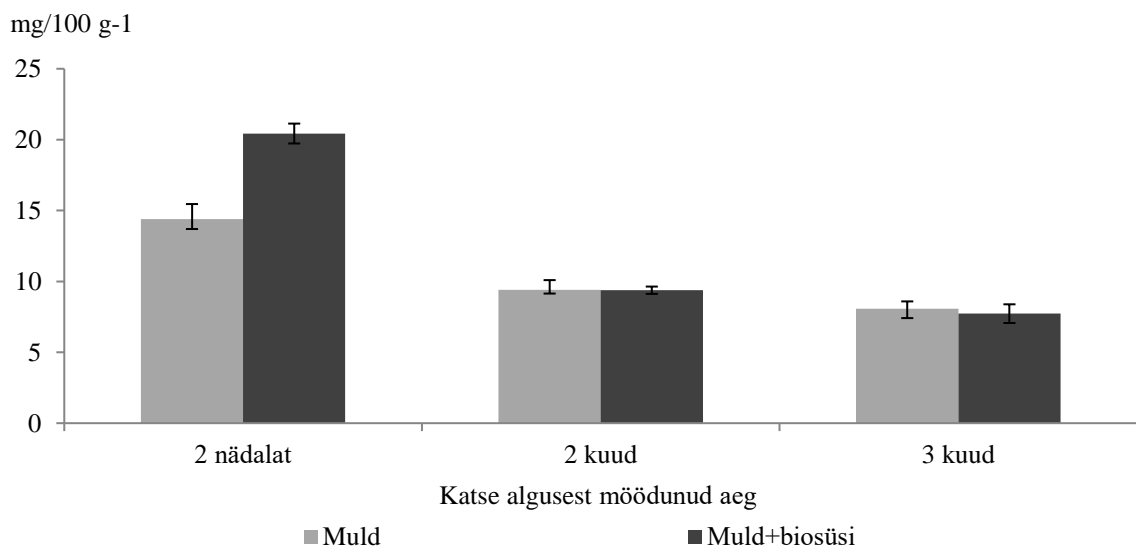
Joonis 14. Mulla lämmastiku sisaldus (%) Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel erinevatel sügavustel 2011. aasta mais ja augustis. Vearibad tähistavad keskmist standardhälvet.



Joonis 15. Mulla lämmastiku sisaldus (%) Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel aastatel 2011, 2013 ja 2016. Vearibad tähistavad keskmist standardhälvet.

3.2.3.2. Fosfori sisaldus

Katseperioodi keskmine mulla fosfori sisaldus 0...10 cm kihis oli muldvariandis $10,43 \pm 1,09$ mg/100 g mulla kohta ning muld + biosüsi variandis $9,71 \pm 1,10$ mg/100 g mulla kohta. 10..20 cm kihis olid antud näitajad vastavalt $10,56 \pm 0,86$ mg/100 g mulla kohta ja $10,1 \pm 0,79$ mg/100 g mulla kohta (joonis 16). Biosöega variandis oli mulla fosfori sisaldus 0...10 cm kihis muldvariandiga võrreldes usutavalt ($P < 0,01$) kõrgem ainult esimesel kahel nädala pärast biosöe laotamist. Kaks kuud hiljem ning edaspidi võetud proovides see enam ei erinenud.

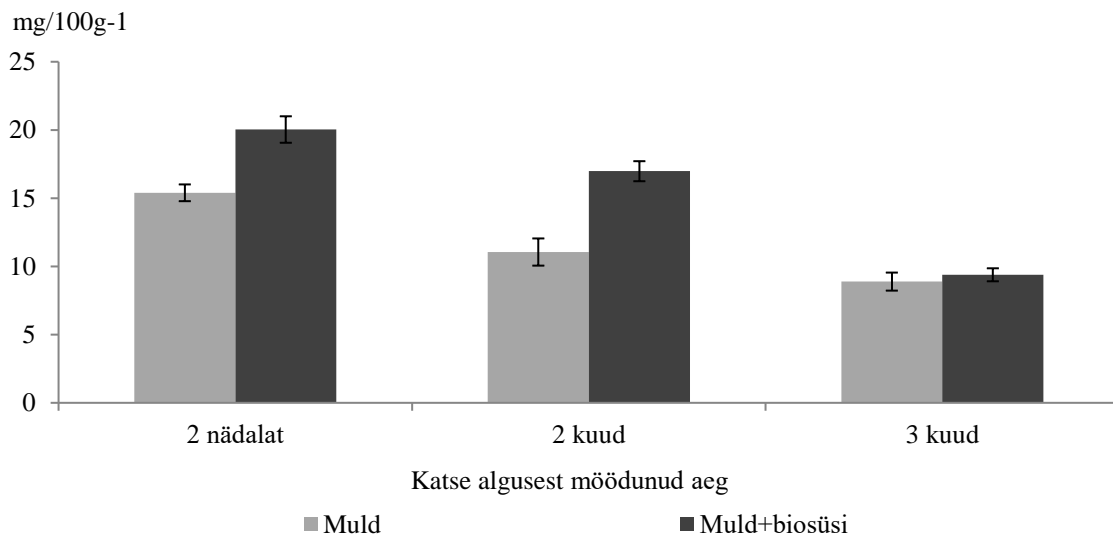


Joonis 16. Mulla fosfori sisaldus (mg/100 g mulla kohta) Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel 2011. aastal. Vearibad tähistavad keskmist standardhälvet.

3.2.3.3. Kaaliumi sisaldus

Katseperioodi keskmine mulla kaaliumi sisaldus oli 0..10 cm kihis muldvariandis $11,74 \pm 1,34$ mg/100 g mulla kohta ning muld+biosüsi variandis $11,83 \pm 1,33$ mg/100 g mulla

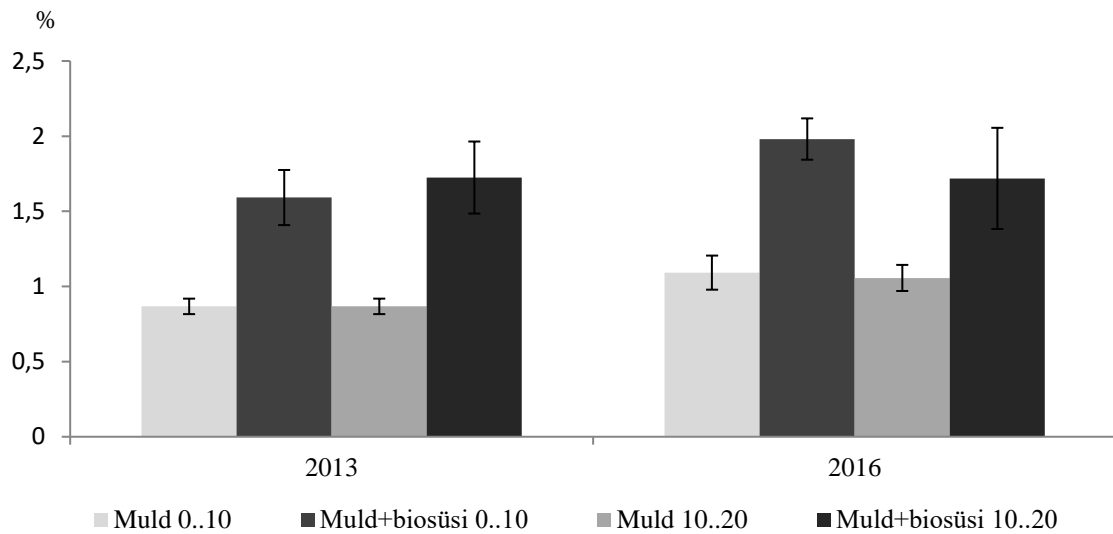
kohta. 10..20 cm kihis olid need näitajad vastavalt $10,4 \pm 0,55$ mg/100 g mulla kohta ja $10,75 \pm 0,54$ mg/100 g mulla kohta. Biosöe mõju oli mulla K sisaldusele oli usutav ($P < 0,05$) ainult ülemises 0..10 cm kihis esimesed 2 kuud pärast biosöe laotamist (joonis 17). Kolm kuud pärast söe laotamist oli K sisaldus biosöega variandis langenud samale tasemele, mis muldvariandis ning püsis selliselt kuni katseperioodi lõpuni 2016 aastal.



Joonis 17. Mulla kaaliumi sisaldus (mg/100 g mulla kohta) Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel 2011. aastal. Vearivad tähistavad keskmist standardhälvet.

3.2.3.4. Mulla süsiniku sisaldus

Keskmine mulla süsiniku sisaldus oli katseperioodil 0..10 cm kihis muldvariandis $0,98 \pm 0,08$ % ning muld+biosüsi variandis $1,79 \pm 0,16$ %. 10..20 cm kihis oli antud näitaja vastavalt $0,96 \pm 0,07$ ja $1,72 \pm 0,29$ %. Süsiniku sisaldus oli mõlemal aastal analüüsitud sügavustel muld+biosöe variandis usutavalt kõrgem kui muldvariandis ($P < 0,05$, tabel 4). Süsiniku sisaldus 0..10 cm kihis muld+biosüsi variandis katseperioodil tõusis ning 10..20 cm kihis samas variandis püsis samal tasemel. Muldvariandis püsis süsiniku sisaldus kogu katseperioodi samal tasemel (joonis 18).

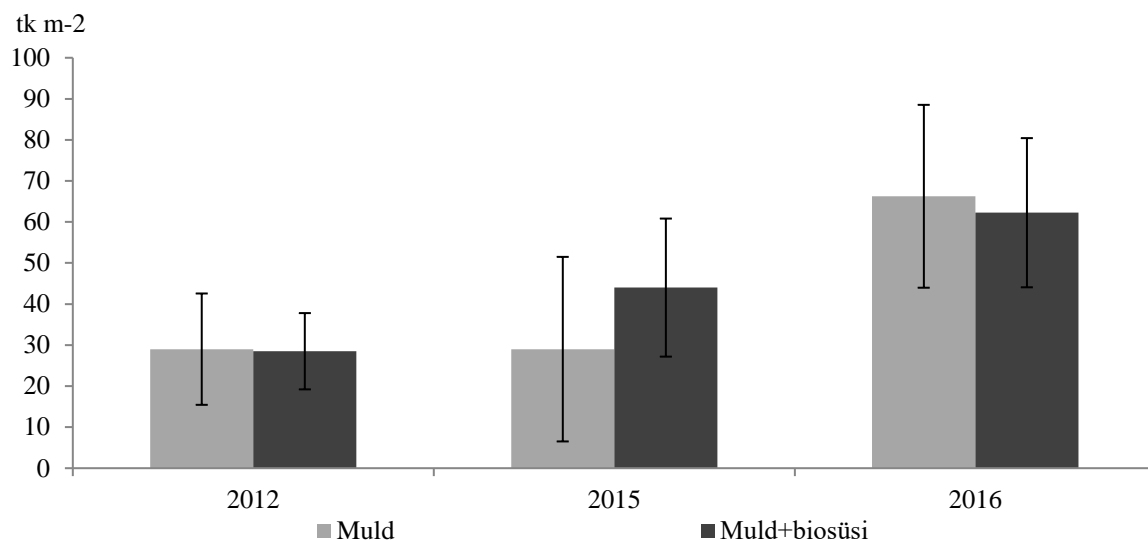


Joonis 18. Mulla süsiniku sisaldus (%) Ahja põldkatses muld ja muld+biosüsi variantidel aastatel 2013 ja 2016. Veariivad tähistavad keskmist standardhälvet.

3.3. Mulla bioloogilised omadused

3.3.1. Vihmausside arvukus

Katseperioodi keskmine vihmausside arv 0...20 cm kihis muldvariandis oli $41,42 \pm 19,44$ tk m^{-2} ja muld+biosüsi variandis $44,92 \pm 14,76$ tk m^{-2} . Keskmiselt oli vihmausside arv muld+biosüsi variandis 6,71 % kõrgem kui muldvariandis (joonis 21) kuid see erinevus ei ole statistiliselt oluline ($P > 0,05$, tabel 5). Mõlemas variandis oli vihmausse usutavalt ($P < 0,05$, tabel 5) rohkem 0...10 cm kihis. Katseperioodil vihmausside arvukus mullas usutavalt suurenes ($P < 0,05$, tabel 5).



Joonis 19. Vihmausside arvukus (tk m^{-2}) Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel 0..20 cm kihis aastatel 2012, 2015 ja 2016. Vearibad tähistavad keskmist standardhälvet.

Tabel 5. Katsefaktorite mõju vihmaussidele

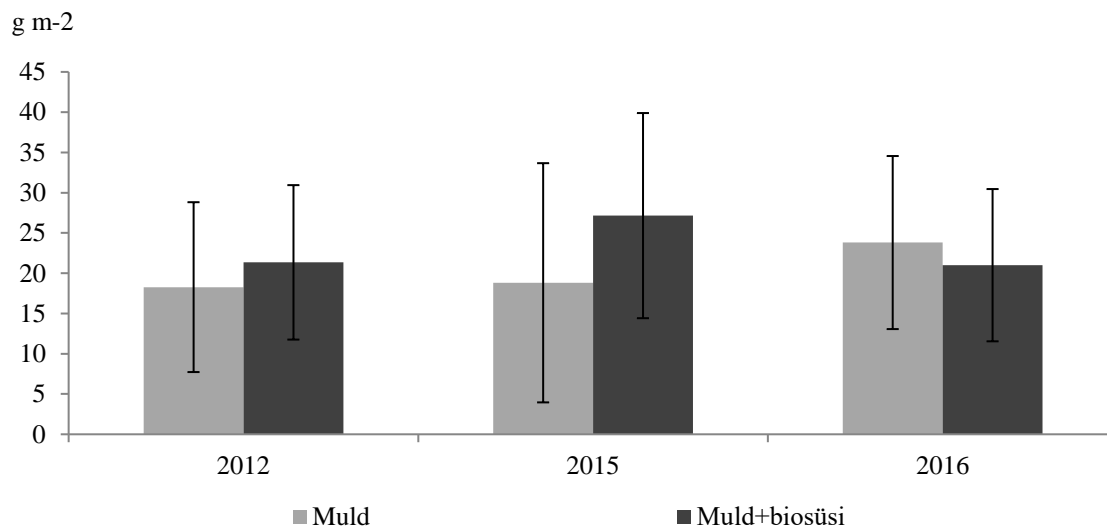
Faktor	Vihmausside arvukus tk m^{-2}	Vihmausside kaal g m^{-2}	Ühe vihmaussi kaal g tk^{-1}
Variant(A)	0,501	0,589	0,186
Sügavus(B)	0,000*	0,000*	0,000*
Katse algusest möödunud aastate arv(C)	0,002*	0,903	0,003*
A x B	0,902	0,753	0,080
A x C	0,250	0,277	0,292
B x C	0,007*	0,950	0,418
A x B x C	0,624	0,346	0,089

*- p-väärtus alla 0,05

3.3.2. Vihmausside kogukaal

Katseperioodi keskmine vihmausside biomassi kaal oli 0..20 cm kihis muldvariandis $20,30 \pm 12,05 \text{ g m}^{-2}$ ja muld+biosüsi variandis $23,17 \pm 10,59 \text{ g m}^{-2}$. Keskmiselt oli antud näitaja muld+biosüsi variandis 14,13 % kõrgem kui muldvariandis (joonis 22) kuid see erinevus ei

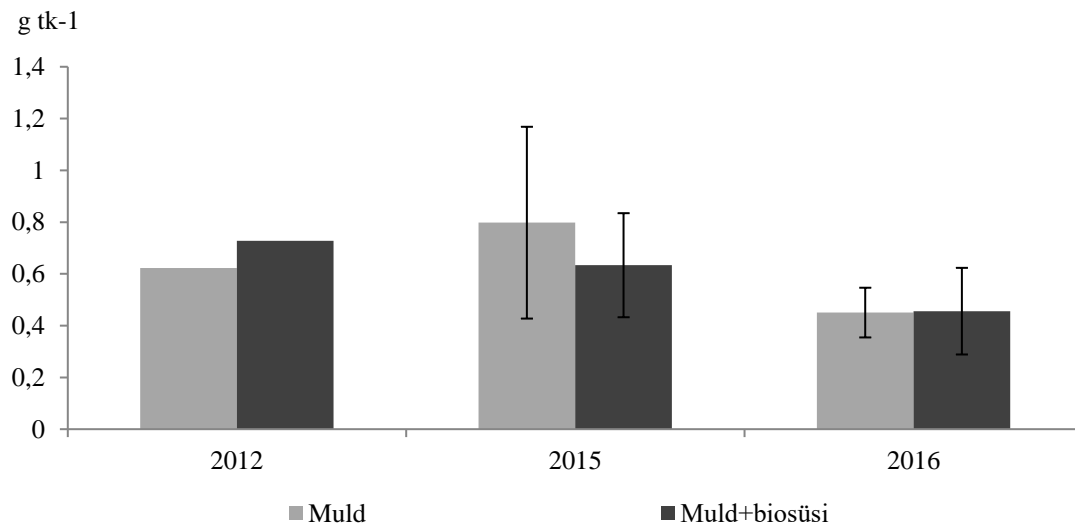
ole statistiliselt oluline ($P < 0,05$, tabel 5). Vihmausside biomass oli usutavalt suurem 0...10 cm kihis.



Joonis 20. Vihmausside kaal (g m^{-2}) Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel aastatel 2012, 2015 ja 2016. Vearibad tähistavad keskmist standardhälvet.

3.3.3. Ühe vihmaussi kaal

Ühe vihmaussi keskmine kaal katseperioodil oli 0..20 cm kihis muldvariandis $0,62 \pm 0,17$ g tk⁻¹ ning muld+biosüsi variandis $0,61 \pm 0,14$ g tk⁻¹. Keskmiselt oli antud näitaja muldvariandis 2,88 % kõrgem kui muld+biosüsi variandis (joonis 22) kuid see erinevus ei ole statistiliselt oluline ($P < 0,05$, tabel 5).



Joonis 21. Ühe vihmaussi keskmine kaal (g) Ahja põldkatsel muld ja muld+biosüsi variantidel aastatel 2012, 2015 ja 2016. Vearivad tähistavad keskmist standardhälvet.

4. ARUTELU

4.1. Biosöe mõju mulla füüsikalistele omadustele

Erinevate uurimuste tulemused on näidanud, et biosüsi mõjutab mulla füüsikalisi omadusi, nt. väheneb mulla lasuvustihedus, suureneb mulla üldpoorsus, eripind ja veehoivõime (sh taimedele omastatava vee sisaldus) (Sohi *et al.* 2009, Verheijen *et al.* 2010, Jeffery *et al.* 2017). Seevastu on leitud, et biosüte mõju mulla füüsikalistele omadustele sõltub suuresti biosöe lähtematerjalist ning mulla struktuurist. Biosöed, mis on toodetud puidust ja põhust võivad mõjutada enam mulla füüsikalisi omadusi kui sõnnikust toodetud biosüsi, mis on üldiselt suurema toitainetesisaldusega ja mõjutab seetõttu rohkem mulla keemilisi omadusi (Jeffery *et al.* 2017). Samas Burrell *et al.* (2016) märkis, et jämedateralise tekstuuriga muldadel on biosöe lisamisel suurem efekt mulla füüsikalistele omadustele. Selline efekt on ilmselt tingitud biosöe fraktsioonilisest jaotusest, mis jämedateralise tekstuuriga muldadel avaldab mulla füüsikalistele omadustele enam mõju.

Du *et al.* (2016) leidis, et biosüsi vähendas oluliselt mulla lasuvustihedust tänu biosöe enda madalale lasuvustihedusele ning suurele poorsusele. See on vastuolus Tammeorg *et al.* (2014a) uurimusega, kus selgus, et biosüsi normiga 10 t ha^{-1} mulla lasuvustihedust oluliselt ei mõjutanud. Käesoleva töö katse tulemused näitasid, et biosöe mõju mulla lasuvustihedusele oli usutav kuid erinevus variantide vahel esines ainult kahel analüüsitud aastal (2013 ja 2016) ja üksnes 10..20 cm kihis. 0..10 cm kihis usutavat erinevust polnud. See viitab sellele, et biosöe mõju mulla lasuvustihedusele ei olnud püsiv või oli see oluliselt mõjutatud biosöe paiknemisest erinevates mullakihtides. Biosüsi freesiti pärast laotamist 10 cm sügavuselt mulda ja edaspidi sõltus biosöe paiknemine oluliselt mullaharimisest, eriti kündmisest, millega viidi süsi ühel aastal sügavamale ja toodi teisel pindmisesse kihti tagasi. Söe segunemist kogu 0 - 20 cm künnikihi ulatuses kuus aastat kestnud katseperioodi jooksul ei toimunud. Nii 2013. kui 2016. aastal oli süsi proovivõtmise ajal peamiselt alumises 10 - 20cm kihis, mis on ilmselt põhjuseks, miks erines lasuvustihedus neil aastatel just selles kihis. Meie katse puhul võis mõju avaldada ka biosöe oluliselt suurem norm võrreldes Tammeorg *et al.* (2014a) uurimistööga. Meie

tulemused näitasid samuti, et nii muld kui muld+ biosüsi variandis lasuvustihedus katseperioodil suurenes, mis võib olla tingitud tootmispõllul rakendatud agrotehnilistest võtetetest. Nelissen *et al.* (2014) uurimus näitas, et biosöe mõju lasuvustihedusele ei pruugi olla püsiv ning see võib oluliselt sõltuda ka teistest faktoritest nagu näiteks mullaharimine ning mulla veesidumisvõime. Meie tulemused toetavad seda, sest lasuvustiheduse erinevus kahe variandi vahel katse jooksul vähenes.

Meie katsest selgus veel, et biosüsi ei mõjutanud usutavalt mulla eripinda, üldpoorsust, õhustatust ega ka taimedele omastamatu vee osakaalu. Sarnaselt meie katsetulemustele leidis Tammeorg *et al.* (2014a), et okaspuust toodetud biosüsi (tootmistemperatuur 550-600 °C) ei mõjutanud mulla poorsust. Seevastu Igalawithana *et al.* (2017) märkis, et maisi põhust biosöe, mis oli toodetud 500 °C juures lisamisel suurenes mulla poorsus. Need tulemused osutavad võimalusele, et biosöe mõju mulla poorsusele võib sõltuda biosöe tootmiseks kasutatud toorainest, millest olenevad biosöe omadused nagu poorsus, veehoiuvõime ja toitainete sidumisvõime.

Oluliselt mõjutas biosüsi meie katses taimedele omastatava vee sisaldust 0..10 cm kihis, 10..20 cm usutavat erinevust polnud. Selline tulemus on osaliselt kooskõlas Du *et al.* (2016) uurimusega, kus märgiti, et biosöe lisamisel taimedele omastatava vee sisaldus mullas suurenes tänu biosöe omadustele nagu näiteks suur eripind ning poorsus. Samas on saadud ka vastupidiseid tulemusi, kus biosüsi on küll tänu oma füüsikalistele omadustele mõjutanud mulla poorsust, kuid mulla veehoiuvõimet ning taimedele omastatava vee sisaldust ei suurendanud (Hardie *et al.* 2014). Carvalho *et al.* (2014) uurimusest selgus, et biosöe normil oli oluline mõju taimedele omastatava vee hulga. Tema uurimus näitas, et iga lisatud Mg ha⁻¹ biosüti suurendas 0,8 % võrra taimedele omastatava vee sisaldust mullas. Meie uurimuses nii suurt erinevust katse variantide vahel ei olnud, antud näitaja oli muld+biosüsi variandis keskmiselt ca 3% võrra kõrgem võrreldes muldvariandiga. Glab *et al.* (2016) märkis, et biosöe mõju taimedele omastatava vee sisaldus mullas oleneb laborikatses kus kasutati saviliivlõimisega mulda lisatud biosöe fraktsiooni suurusel. Omastatava vee hulka mullas suurendas kõige enam väiksema fraktsiooniga biosüsi. (Glab *et al.* 2016). Käesolevas uurimuses võis taimedele omastatava vee sisaldust samuti mõjutada biosöe fraktsioonide suuruse jaotus ning biosöe norm. Kuna suurema osakaaluga olid väiksemad kui 0,5 mm osakesed, siis võisid mullapoorid osaliselt biosöe osakestega täituda ning seetõttu taimedele omastatava vee sisaldus suurened. Ka Verheijen *et al.*

(2010), on oma analüüsi põhjal jõudunud järeldusele, et mulla veehoiuvõime võib biosöe mulda viimisel suurenda just tänu mullapooride täitumisele biosöe osakestega.

Kogu katseperioodil mulla eripind suurenes ning üldpoorsus, õhustatus ja taimedele omastamatu vee osakaal vähenesid. Samas kui Jeffery *et al.* (2017) analüüsi põhjal oleks võinud eeldada, et meie katses kasutatud lehtpuust toodetud biosöe kasutamisel normiga 50 Mg ha⁻¹ parandab oluliselt just mulla füüsikalisi omadusi. Sarnaselt mulla lasuvustihedusele olid ka antud näitajad suure tõenäosusega mõjutatud mulla tihenemisest, mis on ilmselt tingitud valedest mulla harimisvõtetest. Lisaks võib arvata, et mulla poorid täitusid biosöe osakestega, mistõttu poorsus vähenes ning seeläbi suurenes biosöe fraktsioonide arvelt mulla eripind.

4.2. Biosöe mõju mulla keemilistele omadustele

Eelnevalt läbiviidud katsete tulemusel on leitud, et biosüsi kui mullaparandusaine on mõjutanud mulla keemilisi omadusi nagu pH-d (Glaser *et al.* 2001; Jeffery *et al.* 2011; Domene *et al.* 2013; Cha *et al.* 2016; Paneque *et al.* 2016; Hansen *et al.* 2017), katioonide neelamismahutavust (Glaser *et al.* 2001; Cha *et al.* 2016; Raboin *et al.* 2016) ning toitainete sisaldus (Lehmann *et al.* 2007; Liu *et al.* 2012; Keith *et al.* 2016; Goa *et al.* 2016; Sanchez-Garcia *et al.* 2016). Jeffery *et al.* (2017) analüüs näitas, et biosöel on mulla keemilistele omadustele suurem mõju troopilistes, happelistes ning toitainetevaestes muldades. Parasvöötme piirkonnas asuvatel muldades, kus on pH ning väetustase kõrgemad sellist efekti biosöe lisamisega ei pruugi kaasneda, kuna biosüte mõju sõltub suuresti biosöe omadustest või nende erinevuse suurusest võrreldes mulla algse tasemega (Jeffery *et al.* 2017).

Biosöe mõju kohta mulla pH-le on eelnevad uurimused andnud vastakaid tulemusi näidates, et see sõltub kliimast (Jeffery *et al.* 2017), biosöe toorainest (Glaser *et al.* 2002), tootmisprotsessi tingimustest ning mulla algsest pH-st (Jeffery *et al.* 2017). Käesoleva uurimuse tulemusel selgus, et pH muutus katse mullas oli biosöe lisamise järel lühiajaline, olles usutavalt kõrgem vaid esimesel katseaastal. Kahe ja viie aasta pärast variantide vahel pH tasemes enam usutavat erinevust polnud. Selline tulemus võib olla seotud biosöe suure

labiilse süsiniku sisaldusega, mis võis olla tingitud nii söe tootmiseks kasutatud toorainest (lehtpuu) kui ka tootmistemperatuurist (500 - 600 °C). Glaser *et al.* (2002) märkis, et lehtpuust toodetud biosüsi on kõrgema labiilse süsinikusisaldusega kui okaspuust toodetud biosüsi. Samuti on teada, et labiilsete süsinikühendite sisaldus väheneb biosöe tootmistemperatuuri tõustes (Verheijen *et al.* 2010). Suurema labiilse süsiniku sisaldusega biosütel on ainult lühiajaline mõju mulla pH-le, kuna labiilne süsinik on oluliselt väiksema stabiilsusega mullas kui süsi ise. Sarnase tulemuseni jõudis ka Nelissen *et al.* (2015) oma põldkatses, kus suure labiilse süsiniku sisaldusega biosöel oli vaid lühiajaline efekt mulla pH-le, kuigi algne mulla pH oli enam kui kahe ühiku võrra madalam kui biosöel. Samas on leitud, et pidevalt väikese normiga biosöe lisamisega mulda on võimalik saavutada stabiilne pH taseme tõus mullas (Hansen *et al.* 2017).

Meie uurimus näitas, et biosöe lisamine mulda ei suurendanud oluliselt ka katioonide neelamismahutavust. Seda võib seostada asjaoluga, et mulda paigutati värske biosüsi, mille pinnale ilmselt ei olnud veel tekkinud kuigi palju funktsionaalseid rühmasid. Funktsionaalsete rühmade hulk peaks biosöe pinnal aja jooksul mullas viibimisel biosöe pinna oksüdeerumise tulemusena suurenema (Raboin *et al.* 2016). Sarnaselt meie tulemusetele leidis ka Raboin *et al.* (2016), et biosüsi ei mõjutanud mulla katioonide neelamismahutavust. Lisaks lisati mulda puidust toodetud biosütti, mille puhul on kirjanduses viidatud, et sellel on üldiselt madalam katioonide neelamismahutavus kui taimsetest jäätmetest toodetud biosöel (puulehed jne.) (Kookana *et al.* 2011). Lisaks on katioonide neelamismahutavuse suurenemine seotud mulla pH-ga. Madala pH-ga muldades on toksiliste anioonide kontsentratsioon kõrge, mis omakorda raskendab katioonide liikumist mullas ning seetõttu on katioonide neelamismahutavus madal (Verheijen *et al.* 2010). See võib samuti olla põhjuseks (pH muutus oli vaid lühiajaline), miks meie katses katioonide neelamismahutavus ei suurenenud oluliselt.

Käesolev uurimus näitas, et biosöe lisamisel mulla süsiniku sisaldus oluliselt suurenes. Biosüsi koosneb suuresti süsinikust, seega selle lisamisel on enamike uurimistööde tulemusena leitud, et süsiniku sisaldus mullas suureneb (Lehmann *et al.* 2007; Liu *et al.* 2012; Keith *et al.* 2016; Goa *et al.* 2016; Sanchez-Garcia *et al.* 2016). Biosöe mõju suurus mulla süsiniku sisaldusele sõltub mulla algse süsiniku sisalduse ning biosöe süsiniku sisalduse erinevusest, lisaks veel sõltub see söe normist ning aromaatses süsiniku sisaldusest biosöes. Viimasest oleneb kui kaua biosöe mõju mulla süsiniku sisaldusele püsib.

Mulla lämmastiku sisaldus oli meie katses usutavalt suurem muld+biosüsi variandis. See tulemus on kooskõlas Biedermann'i ja Harpole'i (2013:208) uurimusega, kes leidsid, et biosüsi suurendab mulla üldlämmastiku sisaldust tänu lämmastiku sidumisele biosöe struktuuridesse. Selliselt on lämmastik taimedele ning mikroobidele kättesaamatu. Lämmastiku sisalduse suurenemine mullas võib vastupidiselt olla seotud ka suurenenud C:N suhtega. Viies mulda suure koguse süsinikku hakkavad mulla mikroorganismid süsinikku lagundama ning selleks vajavad nad energiat, mida nad saavad lämmastikust. Selliselt seotakse mullast lämmastik hoopis mikroorganismidesse ning see vabaneb sealt alles peale mikroobide surma. Sarnase tulemuse leidis ka Tammeorg *et al.* (2014a), kelle katses lämmastiku sisaldus rapsi ja nisu biomassis biosöe lisamisel vähenes arvatava immobilisatsiooni tõttu. Seevastu Nelissen *et al.* (2015) katses biosöe lisamisel mulda lämmastiku immobilisatsiooni ei tuvastatud ning üldlämmastiku sisaldus oluliselt ei erinenud. Sarnaselt eelnevale Rogovska *et al.* (2016) uurimuses selgus, et biosöe lisamisel mulla süsiniku sisaldus suurenes, kuid üldlämmastiku sisaldus usutavalt ei erinenud.

Antud töö katses selgus, et mulla fosfori ja kaaliumi sisaldus oli usutavalt suurem muld+biosüsi variandis vastavalt 2 nädala ning 2 kuu möödudes peale katse algust, hiljem erinevust ei leitud. Selline efekt võis olla põhjustatud biosöe mineraalse osa fosfori ja kaaliumi sisaldusest, mis suurendas lühiajaliselt mullas antud toitainete sisaldust, kuid hiljem kasutati taimede poolt ära. Selline tulemus on kooskõlas Biedermann; Harpole (2013), kelle tööst selgus, et mulla fosfori ja kaaliumi sisaldus oli biosöe lisamise järgselt kõrgem. Autorid märkisid, et selline efekt oli arvatavasti tingitud biosöe orgaanilistes ühendites olevatest toitainetest, mis vabanesid mulda ning hiljem kasutati ära taimede poolt või leostus mullast. Sarnase tulemuseni kaaliumi sisalduse puhul jõudis ka Tammeorg *et al.* (2014a) oma uurimuses, kes leidis, et biosöe lisamise järgselt oli mulla kaaliumi sisaldus usutavalt suurem vaid esimesel katseaastal. Samas uurimuses mulla fosfori sisaldusele usutavat mõju biosöe lisamisega ei olnud (Tammeorg *et al.* 2014a).

4.3. Biosöe mõju mulla bioloogilistele omadustele

Seniste uurimuste tulemused vihmausside arvukuse kohta biosöega rikastatud mullas on olnud erinevad ja vastuolulised. Eelnevalt on leitud, et biosüsi mõjutab vihmausside

käitumist ja arvukust (Liesch *et al.* 2010; Li *et al.* 2010; Tammeorg *et al.* 2014b, Hmid *et al.* 2015) kui ka seda, et ei mõjuta (Van Zwieten *et al.* 2010; Hale *et al.* 2013). Käesoleva uurimuse tulemus on kooskõlas nende tulemustega, mis näitasid, et biosöe mõju on vihmaussidele neutraalne (Van Zwieten *et al.* 2010; Hale *et al.* 2013; Domene *et al.* 2014). Samas leidub uurimistöid, kus selgus, et biosöe mõju võib vihmaussidele olla ka negatiivne (Liesch *et al.* 2010; Weyers, Spokas 2011; Tammeorg *et al.* 2014b) või siis vastupidiselt positiivne (Sizmur *et al.* 2010; Hmid *et al.* 2015).

Erinevates katsetes on selgunud, et biosüsi suurendab mulla pH-d ning mõjutab seeläbi vihmausside käitumist (Liesch *et al.* 2010, Van Zwieten *et al.* 2010; Domene *et al.* 2014). Meie uurimuses loendati vihmausse katses, kus kontrollvariandi mulla pH oli nõrgalt happeline (pH 5,8), mis on vihmaussidele elutegevuseks sobiv. Biosöe lisamise tulemusena suurenes algselt pH 0,3 ühikut, mis ilmselt on liialt väike muutus, et see vihmausside arvukust mõjutaks. Nagu Liesch *et al.* (2010) ning Domene *et al.* (2014) oma katsetes leidsid, on biosöe mõju vihmausside arvukusele suur muldadel, kus on juba algselt aluselise reaktsiooniga pH, mis biosöe lisamise tulemusena veelgi suureneb ning ületab kokkuvõttes vihmausside taluvuspiiri. Ka on biosöe mõju märgatav väga happelistel muldadel, milles biosöe lisamise tulemusena pH tõuseb ja elukeskkond muutub vihmaussidele soodsamaks. Seda kinnitas ka Van Zwieten *et al.* (2010) uurimistöö, kus biosöe lisamisel suurenes mulla pH 4,2-lt ühikult 5,9-le ning sellise muutuse tulemusena tõusis mullas vihmausside arv. Sarnase tulemuseni jõudis ka Sizmur *et al.* (2011), kus pH tõusis biosöega variandis 2,7-lt 6,9-ni. Seevastu selgus Tammeorg *et al.* (2014b) uurimistöös, et biosöe lisamisel mulda jäi selle mõju vihmausside arvukusele väikseks, kuna mulla pH oluliselt ei muutunud. Siit järeldub, et biosöe lisamisel mulda sõltub selle mõju vihmaussidele mulla algsest pH tasemest ning sellest, milliseks muutub mulla pH võrreldes vihmausside kohastumusega mulla reaktsiooni suhtes.

Tammeorg *et al.* (2014b) uurimistööst selgus, et vihmausse võib mõjutada mulla veepotentsiaali langus, mis toimub biosöe mulda viimise järel. Nimelt tema poolt läbiviidud katses oli 14 päeva möödudes vihmausside arv biosöega mullas puhta mullaga võrreldes usutavalt väiksem, selle põhjuseks ta leidis olevat biosöega variandi 0,2 kPa võrra madalam veepotentsiaal. Varasemates uuringutes on selgunud, et veepotentsiaali vähenemisest võib olla tingitud vihmausside kuivamine (Li *et al.*, 2010) ning mulla

kõvaks muutumine (Chan, Barchia 2007), mistõttu vihmaussid hakkavad antud mulda vältima.

Sizmur *et al.* (2011) leidis oma läbiviidud katse tulemusel endises vasekaevanduses, reostunuud mullas (Cu, Pb, Zn), et vihmausside kaal biosöega rikastatud mullas tõusis 3,2 % võrreldes muldvariandiga. Seevastu Topoliantz ja Ponge (2003) uurimistööst selgus, et vihmaussid üritasid sütt toiduna vältida, kuigi nende seedekulglast leiti ka söe osakesi. Oma töö põhjal nad järeldasid, et söega rikastatud mullas on võrreldes tavalise mullaga vihmausside toitumisaktiivsus väiksem ning nende kaal langeb. Käesolevas uurimustöö selgus, et põldkatses oli ühe vihmaussi kaal muldvariandis veidi suurem võrreldes muld+biosüsi variandiga, kuid see erinevus ei olnud usutav.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida biosöe mõju kahkja (*Fragi-Stagnic Albeluvisol*) mulla omadustele. Selleks kasutati 2011. aastal rajatud põldkatsel kolmel (2011, 2013, 2016) aastal kogutud andmeid mulla füüsikalise-keemiliste omaduste ning vihmausside arvukuse ja biomassi (2012, 2015 ja 2016) kohta.

Katse tulemused näitasid, et biosüsi avaldas positiivset mõju mullas taimedele omastatava vee osakaalule, süsinikusisaldusele ning lämmastikusisaldusele. Biosöe mõju mulla lasuvustihedusele, pH-le ning kaaliumi ja fosfori sisaldusele oli tingitud (i) biosöe paiknemisest künnikihis ja/või (ii) söe mõju aastatega vähenes. Teistele analüüsitud parameetritele (mulla eripind, üldpoorsus, õhuga täidetud pooride ja taimedele omastatava vee osakaal, katioonide neelamismahutavus ning vihmausside arvukus ja biomass) biosüsi mõju ei avaldanud.

Meie poolt saadud tulemused toetavad ainult osaliselt püstitatud hüpoteesi, et biosüsi mõjutab kahkja mulla füüsikalise-keemilisi omadusi. Kinnitust ei leidnud meie teine hüpotees, et biosüsi suurendab mullas vihmausside arvukust ja biomassi

Uurimistöö käigus läbitöötatud kirjanduse ning katse tulemuste põhjal võib järeldada, et biosöe mõju mulla omadustele sõltub oluliselt biosüte toorainest, tootmistingimustest ja omadustest, mulla algsetest omadustest ja liigist ning kliimast. Biosüsi näib mõjutavat mulla füüsikalise-keemilisi omadusi enam siis kui biosöe vastavad omadused erinevad oluliselt võrreldes mullaga, kuhu seda lisatakse. Ka vihmausside arvukus ning biomass on biosöe lisamisel mulda enam mõjutatud juhul kui nende elukeskkonna tingimuste (pH, veemahutavus) muutus on selle tulemusel suur. Käesolevas katses oli biosöe mõju enamikule mulla füüsikalise-keemilistele omadustele ning vihmausside arvukusele väike ilmselt just seetõttu, et söe ja mulla omadused erinesid vähe.

Biosöe mõju mulla füüsikalise-keemilistele omadustele ning ka vihmaussidele vajaks edaspidi jätkuvalt uurimist, kuna olemasolevad katsed on enamasti lühiajalised ning

üldsõnalised. Uurida tuleks erinevatest toorainetest ning erinevatel tingimustel toodetud biosüte ja muldade omavahelisi seoseid ning biosöe mõju mulla elustikule.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Ameloot, N., Sleutel, S., Case, S.D.C., Alberti, G., McNamara, N.P., Zavalloni, C., Vervisch, B., delle Vedove, G., De Neve, S. 2014. C mineralization and microbial activity in four biochar field experiments several years after incorporation. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 78, lk 195-203
2. Asada, T., Ishihara, S., Yamane, S., Toba, T., Yamada, A., Oikawa, K. 2002. Science of bamboo charcoal: Study of carbonizing temperature of bamboo charcoal and removal of harmful gases. *J Health Science* Vol. 48, lk 473–479.
3. Astover, A. 2006. Mulliteaduse alused. Tartu, EMÜ, 38 lk, <http://www.eau.ee/~tamm/Mulliteadus/Mulla%20lisa%20failid/Mulliteadus-%20FCldosa2010%5B1%5D.pdf> (10.05.17)
4. Atkinson C.J., Fitzgerald D., Hipps N.A. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *J.Plant and Soil* Vol. 337, lk 1-18.
5. Beesley, L., Moreno-Jimenez, E., Gomez-Eyles, J.L., Harris, E., Robinson, B., Sizmur, T., 2011. A review of biochars potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution* Vol. 159, lk 3269-3282
6. Biedermann, L.A., Harpole, S.W. 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy* Vol. 5, lk 202-214
7. Borchard, N., Siemens, J., Ladd, B., Möller, A., Amelung, W. 2014. Application of biochars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice. *Soil and Tillage Research* Vol. 144, lk 184-194
8. Bruun E.W., Ambus P., Egsgaard H., Hauggaard-Nielsen H. 2012. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover Dynamics. *J. Soil Biology - Biochemistry* Vol. 46, lk 73-79
9. Buecker, J., Kloss S., Wimmer, B., Rempt, F., Zehetner, F., Soja, G. 2016. Leachate Composition of Temperate Agricultural Soils in Response to Biochar Application. *Water Air Soil Pollution* Vol. 227, lk 117-128
10. Burrell, L.D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., Soja, G. 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma* Vol. 282, lk 96-102

11. Cao, C.T.N., Farrell, C., Kristiansen, P.E., Rayner, J.P. 2013. Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. *Ecological Engineering* Vol. 71, lk 368-374
12. Case, S.D.C., McNamara, N.P., Reay, D.S., Whitaker, J. 2013. Can biochar reduce soil greenhouse gas emissions from a *Miscanthus* bioenergy crop. *Global Change Biology Bioenergy* Vol. 6, lk 76-89
13. Cayuela, M.L., van Zwietenb, L., Singhb, B.P., Jeffery, S., Roiga, A., Sánchez-Monederoa, M.A. 2013. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agricultural Ecosystem Environment* Vol. 191, lk.5-16
14. Cha, J.S., Park, S.H., Jung, S.-C., Ryu, C., Jeon, J.-K., Shin, M.-C., Park, Y.-K. 2016. Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* Vol 40, lk 1-15
15. Chan, K.Y., Barchia, I. 2007. Soil compaction controls the abundance, biomass and distribution of earthworms in a single dairy farm in south-eastern Australia. *Soil Tillage Res.* Vol. 94, lk 75–82
16. Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. In: *Methods of Soil Analysis Part 2* (ed. C.A. Black), pp. 891–901. American Society of Agronomy, Madison, WI.
17. De Melo Carvalho, M. T., De Holanda Nunes Maia, A., Madari, B. E., Bastiaans, L., van Oort, P. A. J., Heinemann, A. B., Soler da Silva, M. A., Petter, F. A., Marimon Jr., B. H., Meinke, H. 2014. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. *Solid Earth* Vol. 5, lk 939–952
18. Dell Inc. 2015. Dell Statistica (data analysis software system), version 13. software.dell.com
19. Demirbas, A. 2006. Production and characterization of biochars from biomass via pyrolysis. *Energy Sources* Vol. 28, lk 413-422
20. Domene, X., Mattana, S., Hanley, K., Enders, A. 2013. Medium-term effects of corn biochar addition on soil biota activities and functions in a temperate soil cropped to corn. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 72, lk 152-162
21. Domene, X., Mattana, S., Hanley, K., Enders, A., Lehmann, J. 2014. Medium term effects of corn biochar addition on soil biota activities and functions in a temperate soil cropped to corn. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 72, lk 152-162
22. Du, Z., Chen, X., Qi, X., Li, Z., Nan, J., Deng, J. 2016. The effects of biochar and hoggerly biogas slurry on fluvo-aquic soil physical and hydraulic properties: a field study of four consecutive wheat–maize rotations. *J Soils Sediments* Vol. 16, lk 2050-2058
23. EBC 2012. 'European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.' European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. <http://www.europeanbiochar.org/en/download>. Version 6.2E of 04th February 2016

24. Enders A., Hanley K., Whitman T., Joseph S., Lehmann J. 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology* Vol. 114, lk 644-653.
25. Glab, T., Palmowska, J., Zaleski, T., Gondel, K. 2016. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma* Vol. 281, lk 11-20
26. Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., and Zech, W. 2001. The 'Terra Preta' phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* Vol. 88, lk 37-41
27. Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal. *Biology and Fertility of Soils* Vol. 35, lk 219-230
28. Goa, S., Hoffmann-Krull, K., Bidwell, A.L., Deluca, D.H. 2016. Locally produced wood biochar increases nutrient retention and availability in agricultural soils of the San Juan Islands. USA, *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol. 233, lk 43-54
29. Gomez-Eyles, J.L., Sizmur, T., Collins, C.D., Hodson, M.E. 2010. Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements. *Environmental Pollution* Vol. 159, lk 616-622
30. Hale, S.E., Jensen, J., Jakob, L., Oleszczuk, P., Hartnik, T., Henriksen, T., Okkenhaug, G., Martinsen, V., Cornelissen, G. 2013. Short-term effect of the soil amendments activated carbon, biochar, and ferric oxyhydroxide on bacteria and invertebrates. *Environmental Science and Technology* Vol. 47, lk 8674-8683
31. Hammond, J., Shackley, S., Prendergast-Miller, M., Cook, J., Buckingham, S., Pappa, V.A. 2013. Biochar field testing in the UK: outcomes and implications for use. *Carbon Manag.* Vol. 4, lk 159-170.
32. Handbook on Reference Methods for Soil Analysis. 1992. Soil and Plant Analysis Council, Inc. 202 lk.
33. Hansen, V., Müller-Stöver, D., Inparato, V., Henning Krogh, P., Stoutmann Jensen, L., Dolmer, A., Hausgaard-Nielsen, H. 2017. The effects of straw or straw-derived gasification biochar application on soil quality and crop productivity: A farm case study, *Journal of Environmental Management* Vol. 186, lk 88-95
34. Hardie, M., Oliver, G., Bound, S., Clothier, B., Close, D. 2014. Effect of biochar application on soil water availability and hydraulic conductivity. *Plant and Soil* Vol. 376, lk 347-361
35. Hmid, A., Al Chami, Z., Sillen, W., De Vocht, A., Vangronsveld, J. 2015. Olive mill waste biochar: a promising soil amendment for metal immobilization in contaminated soils. *Environ Sci Pollut Res* Vol. 22, lk 1444-1456

36. Hunt, J., DuPont, M., Sato, D., Kawabata, 2010. The Basics of Biochar: A natural soil amendment. *Soil and Crop Management* Vol. 30, lk 1-14
37. Igalawithana, A.D., Ok, Y.S., Niازه, N.K., Rizwan, M., Al-Wabel, M.I., Usman, A.R.A., Moon, D.H., Lee, S.S. 2017. Effect of corn residue biochar on the hydraulic properties of sandy loam soil. *Sustainability* Vol. 9 Iss. 266
38. Jeffery *et al.* 2017. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environ. Res. Lett.*, at press
39. Jeffery, S., Verheijen, F.G.A. , van der Velde, M, Bastos, A.C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using met-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol. 144, lk 175-187
40. Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M., Bastos, A.C. 2010. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol. 144, lk 175-187
41. Kameyama, K., Miyamoto, T., Shiono, T., Shinogi, Y. 2012. Influence of Sugarcane Bagasse-derived Biochar Application on Nitrate Leaching in Calcaric Dark Red Soil. *Journal of Environmental Quality* Vol. 41, lk 1131-1137
42. Kammann, C.I., Schmidt, H.-P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., Koyro, H.-W., Conte, P. and Joseph, S. 2015. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific Reports* Vol. 5, lk
43. Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I., Regina, K. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity - Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol.140, lk 309-313
44. Keith, A., Singh, B., Dijkstra, F.A., van Ogtrop, F. 2016. Biochar Field Study: Greenhouse Gas Emissions, Productivity, and Nutrients in Two Soils. *Agronomy. Soils and Environmental quality* Vol 108, lk 1805-1815
45. Khodadad, C.L.M., Zimmerman, A.R., Green, S.J., Uthandi, S., Foster, J.S. 2011. Texas-specific changes in soil microbial community composition induced by pyrogenic carbon amendments. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 43, lk 385-392
46. Klute, A. 1986. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 2nd edn. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI.
47. Kookana, R.S., Sarmah, A.K., Van Zwieten, L., Krull, E., Singh, B. 2011. Biochar application on soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences. *Advances in Agronomy* Vol. 112, lk 103-143
48. Laghari, M., Naidu, R., Xiao, B., Hu, Z., Mirjat, M.S., Hu, M., Kandhro, N.M., Chen, Z., Guo, D., Jogi, Q., Abudi, Z.N., Fazal, S. 2016. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review. *J Sci Food Agric* Vol. 96, lk 4840-4849

49. Laird, D.A., Brown, R.C, Amonette, J.E., Lehmann, J. 2009. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* Vol. 3, lk 547-562
50. Lehmann, J. 2007. A handful of Carbon. *Nature* Vol. 447, lk 143-144
51. Lehmann, J., da Silva, J.P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* Vol. 249, lk 343–357
52. Lehmann, J., Joseph, S. 2009. *Biochar for Environmental Management: An Introduction*. ES_BEM_16-2, 12 lk
53. Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., Crowley, D. 2010. Biochar effects on soil biota – a review. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 43, lk 1812-1836
54. Li, D., Hockaday, W.C., Masiello, C.A., Alvarez, P.J.J. 2010. Earthworm avoidance of biochar can be mitigated by wetting, *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 43, lk 1732-1737
55. Liesch, A.M., Weyers, S.L., Gaskin, J.W., Das, K.C. 2010. Impact of two different biochars on earthworm growth and survival. *Annals of Environmental Science* Vol. 4, lk 1-9
56. Liu, X., Ye, Y., Liu, Y., Zhang, A., Zhang, X., Li, L., Pan, G., Kibua, G.W., Zheng, J., Zheng J. 2013. Sustainable biochar effects for low carbon crop production: A 5-crop season field experiment on a low fertility soil from Central China. *Agricultural Systems* Vol. 129, lk 22-29
57. Liu, X.Y., Qu, J.J., Li, L.Q., Zhang, A.F., Zheng, J.F., Zheng, J.W., Pan, G.X. 2012. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N₂O emission in rice paddies? A cross site field experiment from South China. *Ecological Engineering* Vol. 42, lk 168-173
58. Lua A. C., Yang T., Guo J. 2004. Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachionutshells. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* Vol. 72, lk 279-287
59. Major, J., Lehmann, J., Rondon, M., Goodale, C. 2010. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology* Vol. 16, lk 1366-1379
60. Mengel, D. 1993. *Fundamentals of Soil Cation Exchange Capacity*. Department of Agriculture, University of Purdue, 2 lk

61. Nelissen, V. Ruyschaut, G., Abusi, D.M., D'Hose, T., De Beuf, K., Al-Barri, B., Cornelis, W., Boeckx, P. 2014. Impact of a woody biochar on properties of a sandy loem soil and spring barley during a two-year field experiment. *Europ. J. Agronomy* Vol. 62, lk 65-78
62. Ojeda, G., Mattana, S., Àvila, A., Alcañiz, J.M., Volkmann, M., Bachmann, J. 2015. Are soil–water functions affected by biochar application? *Geoderma* Vol. 249-250, lk 1-11
63. Paneque, M., De la Rosa, J.M., Franco-Navarro, J.D., Colmenero-Flores, J.M., Heike Knicker, H. 2016. Effect of biochar amendment on morphology, productivity and water relations of sunflower plants under non-irrigation conditions. *Catena* Vol. 147, lk 280-287
64. Prost, K., Borchard, N., Simens, J., Kautz, T., Séquaris, J-M., Möller, A., Amelung, W. 2013. Biochar affected by composting with farmyard maure. *Journal of Environmental Quality* Vol. 42, lk 164-172
65. Purakayastha, T.J., Kumari, S., Pathak, H. 2014. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues. *Geoderma* Vol. 239-240, lk 293-303
66. Raave, H., Keres, K., Kauer, K., Nõges, M., Rebane, J., Tampere, M., Loit, E. 2014. The impact of activated carbon on NO_3^- -N, NH_4^+ -N, P, K leaching in relation to fertilizer use. lk.120-127
67. Raboin, L.-M., Razafimahafaly, A.H.D., Rabenjarisoac, M.B., Rabaryc, B., Dusserrea, J., Thierry Becquerda, T. 2016. Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biochar application: A long term comparison in the highlands of Madagascar. *Field Crops Research* Vol. 199, lk 99-108
68. Rogovska, N., Laird, D.A., Karlen, D.L. 2016. Corn and soil response to biochar application and stover harvest. *Field Crops Research* Vol. 187, lk 96-106
69. Rutigliano, F.A., Romano, M., Marzaioli, R., Baglivo, I., Baronti, S., Miglietta, F., Castaldi, S. 2014. Effect of biochar addition on soil microbial community in a wheat crop. *European Journal of Soil Biology* Vol. 60, lk 9-15
70. Sanchez de Cima, D. 2016. Vahekultuuride ja väetamise mõju mulla omadustele külvikorrakatses – filosoofiadoktori väitekiri. EMÜ, Põllumajanduse ja keskkonna instituut, 144 lk
71. Sanchez-Garcia, M., Sanchez-Monedero, M.A., Roig, A., Lopez-Cano, I. Moreno, B., Benitez, E., Cayuela, M.L. 2016. Compost vs biochar amendment: a two-year field study evaluating soil C build-up and N dynamics in an organically managed olive crop. *Plant Soil* Vol. 408, lk 1-14
72. Sizmur, T., Wingate, J., Hutchings, T., Hodson, M.E. 2010. *Lumbricus terrestris* L. Does not impact on the remediation efficiency of compost and biochar amendments. *Pedologia* Vol. 54, lk 211-216
73. Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., Bol, R. 2009. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. CSIRO Land and Water Science Report, 65 lk

74. Spokas K. A., Novak J.M., Venterea R.T. 2011. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture. *Journal Plant Soil* Vol. 350, lk 35-42
75. Suliman, W., Harsh, J.B., Abu-Lail, N.-I., Fortuna, A.-M., Dallmeyer, I., Garcia-Pérez, M. 2017. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of The Total Environment* Vol. 574, lk 139-147
76. Sun, Z., Bruun, E.W., Arthur, E., Wollesen de Jonge, L., Moldrup, P. Hauggaard-Nielsen, H., Elsgaard, L. 2014. Effect of biochar on aerobic processes, enzyme activity and crop yields in two sandy loam soils, *Biol Fertil Soils* Vol. 50, lk 1087-1097
77. Taghizadeh-Toosi A, Clough T., J, Condrón L.M., Sherlock R., R, Anderson C., R, Craigie R., A. 2011. Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches. *Journal of Environment Quality* Vol. 40, lk 468-475
78. Tammeorg, P., Parviainen, T., Nuutinen, V., Simojoki, A., Vaara, E., Helenius, J. 2014b. Effects of biochar on earthworms in arable soil: avoidance test and field trial in boreal loamy sand. *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol. 191, lk 150-157
79. Tammeorg, P., Simojoki, A., Mäkelä, P., Stoddard, F.L., Alakukku, L., Helenius, J. 2014a. Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: effect on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean. *Plant Soil* Vol. 374, lk 89-107
80. Timm, T. 1999, Eesti rõngusside (Annelida) määraja. *Teaduste Akadeemia Kirjastus*, 208 lk
81. Topoliantz, S., Ponge, J.F. 2003. Borrowing activity of the geophagous earthworm *Pontoscolex corethrurus* in presence of charcoal. *Applied Soil Ecology* Vol. 23, lk 267-271
82. Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K.Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., Cowie, A. 2009. Effects of biochars from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* Vol. 327, lk 235-246
83. Verheijen, F., Jeffrey, S., Bastos, A.C., van der Velden, M., Diafas, I. 2010. Biochar application to soils, European Communities, 166 lk
84. Weyers, S.L., Spokas, K.A. 2011. Impact of biochar on earthworm population: a review. *Applied and Environmental Soil Science* Vol. 01/2011, 12 lk
85. Winsley, P. 2007. Biochar and bioenergy production for climate change mitigation. *New Zealand Science Review* Vol. 64, lk 1-10
86. Yargicoglu, E.N., Sadasivam, B-Y., Krishna, R.R., Spokas, K. 2015. Physical and chemical characterization of waste wood derived biochars. *Waste Management* Vol. 36, lk 256-268

THE EFFECT OF BIOCHAR ON SOIL'S PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES

Summary

Biochar is a heterogeneous material which has a high content of aromatic carbon (over 50 %) and nutrients, it is set apart from barbecue charcoal by its area of use (EBC 2012). Biochar is produced by pyrolysis from natural organic material (litter, leaves, wood etc.) (Lehmann, Joseph 2009; Beesley *et al.* 2011; Cao *et al.* 2013; Domene *et al.* 2013).

Biochar as a soil amendment has lately gained a lot of interest, because of its long-term impacts on soil properties. It is found that biochar is one of the few materials, which can permanently increase stable carbon content in arable soils. It may also decrease greenhouse gas emission to atmosphere and improve soil fertility (Laghari *et al.* 2016). It is also found that biochar application to soil may improve soil physico-chemical properties. But before it can be widespreadly used as a soil amendment, it must be proven that it does not have negative impact on soil properties and organisms.

Aim of this work is to study the impact of biochar on a *Fragi-Stagnic Albeluvisol*'s characteristics. The work was drawn up on the basis of the field experiments, set up in 2011 in Põlva county on a production field. The experiment is compiled of two variants and 4 repeats, where on half of the repeats slow-pyrolysis hardwood biochar was applied 50 Mg ha⁻¹. In present study soil's physical and chemical properties (2011, 2013, 2016) and earthworm density and biomass (2012, 2015, 2016) was analysed.

The results showed that biochar had significant effect on plant available water, total carbon and total nitrogen content in the soil. In short-term period biochar significantly decreased soil bulk density, increased pH_{KCl} and soil's P and K content. Soil's surface area, porosity, aeration, cation exchange capacity, earthworms abundance and biomass was not affected by the application of biochar.

Our results support only partly our hypothesis that biochar has an effect on soil's physico-chemical properties. We also did not find any confirmation on our second hypothesis that biochar application to soil increases earthworm abundance and biomass.

In conclusion we found that biochar effect on soil properties significantly depend on the organic materials of which biochar is produced, production conditions and biochar characteristics and also soil's primal properies and soil's type and also climate. The greater the difference between biochar characteristics and soil characteristics were the bigger the biochar effect on the soil properties was.

Biochar effect on soil's physical, chemical properties and also earthworm abundance and biomass need further invastigation, because the excisting data is mostly declarative and short-termed. It is important to research biochar produced from different organic materials and production conditions on different soil types.