

TARTU ÜLIKOOL
ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT
BOTAANIKA OSAKOND
TAIMEÖKOLOOGIA ÕPPETOOL

Helena Tammsaar
PÕLLUKULTUURIDE MÕJU MULLA FUNKTSIOONIDELE

Bakalaureusetöö (12 EAP)
Bioloogia ja elustiku kaitse

Juhendajad:
prof. Marina Semtsenko
kaasprof. Kadri Koorem

TARTU 2026

Infoleht

Põllukultuuride mõju mulla funktsioonidele

Põllukultuuride valiku alusel agroökosüsteemides mulla funktsionaalsuse taastamine on paljulubav lahendus jätkusuutliku põllumajanduse ja toiduturvalisuse saavutamiseks. Seni pole taimede mõju mulla funktsioonidele ja multifunktsionaalsusele veel põllukultuuride puhul piisavalt uuritud. Käesoleva töö kirjanduslik pool annab ülevaate põllumajanduses toidu tootmise ökosüsteemiteenusele aluseks olevatest mulla funktsioonidest. Töö empiirilises osas viidi läbi kasvuhoonekatse, mille eesmärk oli uurida erinevate põllukultuuride ning nende kultuuride eri tunnuste mõju mulla funktsioonidele ja multifunktsionaalsusele. Tööst järeldub, et põllukultuuril ja taimetunnustel on oluline mõju mulla funktsioonidele, kuid ükski tunnus ei suutnud tõhusalt mulla multifunktsionaalsust ennustada. Taimetunnuste ja mulla funktsioonide vahelisi seoseid tuleks edasi uurida, et põllukultuuride teadliku valiku kaudu saaks tulevikus tagada põllumajanduses muldade parem funktsioneerimine ja mulla tervis.

Märksõnad: mulla funktsioonid, mulla multifunktsionaalsus, taimetunnused, jätkusuutlik põllumajandus, agroökoloogia

CERCS kood: B270 Taimeökoloogia

Crop impact on soil functions

Restoring soil functioning in agroecosystems through crop selection is a promising tool for achieving sustainable agriculture and ensuring food security. However, research about crop impact on soil functions and multifunctionality still remains limited. This BSc thesis provides an overview of the soil functions underlying food production in agricultural systems. In the empirical part of the thesis a greenhouse experiment was conducted to investigate how different crops and their specific traits influence soil functions and multifunctionality. The results indicate that crops can have a significant effect on soil functions, however no traits could successfully predict soil multifunctionality. Therefore, further research is needed to better understand these effects and to improve soil health through informed crop selection.

Keywords: soil functions, multifunctionality of soil, plant traits, sustainable agriculture, agroecology

CERCS code: B270 Plant ecology

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Kirjanduse ülevaade.....	6
1.1 Mulla koostis	6
1.2 Mulla tähtsus ja funktsioonid	6
1.3 Põllumajanduse mõju mulla funktsioonidele.....	7
1.4 Mulla kvaliteet.....	8
1.5 Mulla funktsionaalsuse mõõtmine.....	9
1.5.1 Vee regulatsioon ja puhastusvõime.....	11
1.5.2 Toitainete ringlus	11
1.5.3 Orgaanilise aine lagundamine ja varu.....	12
1.5.4 Kliima regulatsioon.....	13
1.6 Mulla multifunktsionaalsus	14
1.7 Põllukultuuride mõju mulla funktsioonidele	14
1.8 Taimetunnuste seos mulla funktsioonidega.....	16
2. Materjal ja metoodika.....	18
2.1 Tegevused kasvuhoones	18
2.1.1 Katse ülespanek.....	18
2.1.2 Katse mahavõtmine.....	18
2.2 Tegevused laboris.....	19
2.2.1 Biomassi analüüs.....	20
2.2.2 Lehe proovide analüüs	21
2.2.3 Juure proovide analüüs.....	21
2.2.4 Mikroobse aktiivsuse määramine.....	22
2.2.5 Mikroobse biomassi määramine	23
2.2.6 Mulla toitainete sisalduse määramine	24
2.2.6.1 Nitraadi sisalduse määramine	24
2.2.6.2 Ammooniumi sisalduse määramine	24
2.2.7 Leostunud lämmastiku analüüs	25
2.2.8 Lämmastiku mineralisatsiooni määramine	25
2.2.9 Ainevoogude määramine	25
2.3 Andmeanalüüs	25
3. Tulemused.....	27
4. Arutelu	34
4.1 Põllukultuuride mõju mulla funktsioonidele.....	34

4.2	Põllukultuuride multifunktsionaalsus.....	35
4.3	Mulla funktsioonide seos taimetunnustega	36
4.4	Mulla multifunktsionaalsus seoses taimetunnustega.....	38
Kokkuvõte.....		40
Summary.....		41
Tänuõnad		42
Kirjanduse loetelu		43
Lisad		51
	Lisa 1.....	51
	Lisa 2.....	54
	Lisa 3.....	55
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks		57

Sissejuhatus

Mulla funktsioonid on mullas toimuvad looduslikud protsessid, mis tagavad ökosüsteemi tervikliku toimimise ning on aluseks mulla poolt pakutavatele ökosüsteemiteenustele (Bünemann et al., 2018, Pereira et al., 2018). Üks inimkonna heaolu seisukohalt olulisemaid mullaga seotud ökosüsteemiteenuseid on toidu tootmine (Dominati et al., 2014; Pereira et al., 2018). Samas avaldab jätkuvalt kasvav inimpopulatsioon mullale järjest suuremat survet ja põllumajandus intensiivistub (Foley et al., 2011). Selle tagajärjena suurenevad kasvuhoonegaaside emissioonid, eutrofeerumine ja elurikkuse kadu - mullad degradeeruvad ning on veel raskem tagada inimkonnale jätkusuutlikult piisavas koguses toitu ja tooraineid (Kopittke et al., 2019).

Toidujulgeoleku tagamiseks on oluline taastada põllumuldade hea kvaliteet ehk nende jätkusuutlik toimimine tervikliku ökosüsteemina (Kibblewhite et al., 2008). Selle saavutamiseks on vaja toetada üksikuid mulla funktsioone või mulla multifunktsionaalsust. Kuna taimed mõjutavad oluliselt mulla funktsioone, võib põllukultuuride teadlik valik aidata kaasa mulla kvaliteedi parandamisele.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli uurida, kuidas mõjutavad erinevad põllukultuurid ja põllukultuuride konkreetsed taimetunnused mulla funktsioone. Selleks viidi töö empiirilises osas läbi katse, kus hinnati mulla funktsioonide indikaatorite kaudu põllukultuuride mõju neljale mulla funktsioonile: vee regulatsioon ja puhastusvõime, toitainete ringlus, süsiniku ringlus mullas ning kliima regulatsioon. Nende mulla funktsioonide alusel hinnati ka põllukultuuride mõju mulla multifunktsionaalsusele.

Bakalaureusetöös otsiti vastuseid järgnevatele uurimisküsimustele: 1. Milliseid mulla funktsioone põllukultuurid mõjutavad ja kuidas erineb see mõju põllukultuuride vahel? 2. Milline on põllukultuuride mõju mulla multifunktsionaalsusele? 3. Kuidas on mulla funktsioonid seotud taimetunnustega? 4. Kas taimetunnuste alusel on võimalik ennustada mulla multifunktsionaalsust?

1. Kirjanduse ülevaade

1.1 Mulla koostis

Muld on maakoore bioloogiliselt aktiivne ülemine kiht, mis on tekkinud erinevate keemiliste, füüsikaliste ja bioloogiliste protsesside tulemusel (McBratney & Hartemink, 2024; Blume et al., 2016). Kõik maailma mullad kokku moodustavad pedosfääri, mis on biosfääris oluline vahelüli elus ja eluta looduse interaktsioonides (Astover et al., 2012; Blume et al., 2016; Eldor A. Paul, 2007). Muld koosneb veest, õhust ning tahkest materjalist, mis omakorda jaguneb mineraalaineks ja orgaaniliseks aineks, kus orgaanilise osa moodustavad mullaelustik ning erinevates lagunemisastmetes ja muundumisjärgkudes orgaaniline aine (Astover et al., 2012; Blume et al., 2016).

Normaalse mineraalmulla puhul jaguneb mulla koostise osatähtsus järgnevalt: mineraalne - 45%, orgaaniline aine - 5%, õhk - 25%, vesi - 25%, kuid need osatähtsused võivad eri muldades ja ilmastikutingimustes oluliselt varieeruda (Astover et al., 2012; Nyle C. Brady, 1990). Mulla orgaanilise ja mineraalse osa vahekord ja koostis on aluseks enamikule mulla füüsikalistele, keemilistele ning bioloogilistele omadustele ehk tunnustele, mida on võimalik mõõta ja mis on muldade omavahelise võrdlemise aluseks (Astover et al., 2012; Dominati et al., 2010). Mulla füüsikalised omadused on näiteks mulla mehaaniline koostis ja poorsus, keemilised omadused on pH ja taimedele omastatavate ainete hulk ning bioloogiline omadus on näiteks mullaelustiku koostis (Astover et al., 2012; Dominati et al., 2010).

1.2 Mulla tähtsus ja funktsioonid

Muld on väga kriitilise tähtsusega, sest see pakub organismidele nende elutegevuseks vajalikku aluskeskkonda, olles nii maismaa elurikkuse kui ka inimtegevuse aluseks (Blume et al., 2016). Mullad on bioloogiliselt väga mitmekesised, sisaldades ligikaudu 59% globaalsest liigirikkusest (Anthony et al., 2023). Samuti poleks inimeste põhivajadusi (nagu söök, puhas vesi ja õhk) võimalik ilma mullata tagada, sest nende aluseks on mulla poolt pakutavad ökosüsteemiteenused (Kopittke et al., 2019).

Kõige laiemas mõttes on ökosüsteemiteenused 2005. aastal avaldatud *Millennium Ecosystem Assessment* raporti kohaselt need kasud, mida pakuvad heas seisus terved ökosüsteemid inimkonnale läbi erinevate looduslike protsesside ("Environmental Degradation and Human Well-Being," 2005). Teenused võivad olla otseselt inimeste poolt tarbitavad, näiteks erinevad

toorained, või hoopis aluseks eluks vajalike stabiilsete keskkonnatingimuste tagamisel (Quijas & Balvanera, 2013). Konkreetselt mullaga seotud ökosüsteemiteenuseid kirjeldasid algselt Daily et al. aastal 1997 ja seda raamistikku on aja jooksul palju edasi arendatud, et efektiivsemalt kirjeldada, mõõta ja väärtustada mulla panust ökosüsteemi toimimisse (Dominati et al., 2010; Robinson et al., 2013a; Robinson et al., 2013b). Mullad pakuvad kolme põhilist liiki ökosüsteemiteenuseid: varustavad teenused, reguleerivad teenused ning kultuuriteenused (Dominati et al., 2014). Üks inimkonna heaolu jaoks tähtsaim mullaga seotud varustav teenus on toidu tootmine, sest see hõlmab enda alla ka olulisi reguleerivaid protsesse, näiteks süsiniku sidumine ning seeläbi atmosfääri kasvuhoonegaaside koguse ja globaalse kliima kontrollimine (Dominati et al., 2014; Kibblewhite et al., 2008; Palm et al., 2014).

Mulla ökosüsteemiteenuste käsitus teaduskirjanduses on enamasti seotud mulla funktsiooni mõistega, millel ei ole konkreetset ja üheti mõistetavat definitsiooni (Bünemann et al., 2018). Seetõttu on sõna funktsioon olnud kasutusel mitmes eri tähenduses, näiteks võivad mulla funktsioonid olenevalt teadusartiklist viidata mullas toimuvatele protsessidele, mulla funktsioneerimisele või mulla poolt pakutavatele ökosüsteemiteenustele (Banwart et al., 2019; Blum, 2005; Bünemann et al., 2018; Robinson et al., 2014). Käesolevas töös mõeldakse mulla funktsioonide mõiste all mullas toimuvaid looduslikke protsesse, mis tagavad ökosüsteemi tervikliku toimimise ning on aluseks mulla poolt pakutavatele ökosüsteemiteenustele (Bünemann et al., 2018; Pereira et al., 2018). Näiteks eelnevalt mainitud toidutootmise teenus poleks võimalik ilma mullas toimuvate taimede- ja mikroorganismidega seotud protsessideta (Pereira et al., 2018). Sellised konkreetsed biomassi tootmise jaoks kriitilise tähtsusega mulla funktsioonid on näiteks orgaanilise aine lagundamine ja mineralisatsioon, toitainete ringlus, veehoidmisvõime ja primaarproduktioon (Pereira et al., 2018).

1.3 Põllumajanduse mõju mulla funktsioonidele

Mulla funktsioonid ja omadused on põllumajanduse tootlikkuse aluseks (Zhang et al., 2007). Samas on muld väga aeglaselt taastuv loodusvara ning jätkuvalt kasvav rahvaarv koostöös suurenenud tarbimisharjumustega vähendab üha enam mulla võimekust pakkuda inimkonnale jätkusuutlikult piisavas koguses toitu ja tooraineid (Kopittke et al., 2019). Nimelt avaldab soov tagada toidujulgeolek ehk olukord, kus kõikidel inimestel peaks olema alati nii füüsiliselt kui majanduslikult tagatud piisav ligipääs tervislikule ja turvalisele söögile, aina suuremat survet põllumajandusele ning seega ka muldadele (Foley et al., 2011; Fresco, 1997). Lisaks raskendavad inimkonna toiduga kindlustamist veel enam ka kliimamuutused, mis toovad

endaga kaasa lisaks muutuvatele temperatuuridele ka näiteks laiaulatuslikke põuaperioode, üleujutusi, uusi kahjuriliike ning ekstreemseid ilmastikuolusid nagu kuumalained või tugevad vihmajärgid (Foley et al., 2011). Tagajärjena kasvab vajadus tõsta põllumajanduse tootlikkust ja maakasutus intensiivistub, kuid intensiivistunud põllumajandus mõjub mulla funktsioonidele negatiivselt ja mullad hakkavad degradeeruma (Li et al., 2023; Robinson et al., 2014; Pereira et al., 2018).

Degradatsioon ehk mulla kui loodusressursi kahjustumine või hävimine aja jooksul toimub üldiselt looduskeskkonna või inimtegevuse tagajärjel ning degradatsiooniprotsessid jagunevad üldjuhul füüsikalisteks, keemilisteks ning bioloogilisteks (Astover et al., 2012; Dominati et al., 2010). Füüsikaline degradatsioon seisneb mulla struktuuri lagunemises ja sinna alla kuulub näiteks tuule- või vee-erosioon. Keemilise degradatsiooniprotsessi, näiteks hapestumise või sooldumise, tulemusel kaob mullas keemilise tasakaalu seisund (Dominati et al., 2010). Mulla bioloogiline degradatsioon väljendub muutustes mullaelustiku liigilises koosseisus või aktiivsuses, mille tagajärjel võib näiteks toimuda üleliigne orgaanilise aine mineralisatsioon (Astover et al., 2012; Dominati et al., 2010). Inimtegevusel on suur mõju nimetatud degradatsiooniprotsessidele just maakasutuse kaudu (Blume et al., 2016; Dominati et al., 2010; Kopittke et al., 2019). Näiteks intensiivistunud põllumajandusega kaasneb üleväetamine, orgaanilise aine kadu, pinnase tihenemine raskete põllumasinate all ja erosioon, mille tõttu kokkuvõttes langeb põllumuldade kvaliteet ehk võimekus efektiivselt täita oma funktsioone (Blume et al., 2016; Dominati et al., 2010; Kopittke et al., 2019). Seega väheneb ka mulla ökosüsteemiteenuste pakkumise võimekus ja ka inimkonna pikaajaline toiduga varustamine (Kopittke et al., 2019). Jätkusuutlikkuse saavutamise aluseks on oluline säilitada eluks vajalikke looduslike protsesse ja funktsioone, millest inimkond sõltub, kuid hinnanguliselt on Euroopa Liidu muldadest juba 60-70% degradeerunud (Banwart et al., 2019; Ekins et al., 2003; Pereira et al., 2018). Seega toidu turvalisuse saavutamiseks on oluline kaitsta põllumuldade ökoloogilist funktsioneerimist ja tagada muldade hea kvaliteet.

1.4 Mulla kvaliteet

Koos õhu ja vee kvaliteediga on mulla kvaliteet oluline keskkonna seisuga kirjeldav komponent, mis mõjutab inimeste ja loomade tervist ja laiemalt ökosüsteemide toimimist (Nortcliff, 2002). Mulla kvaliteedi mõiste ja selle mõõtmise parameetrid on keerulised ja aja jooksul palju muutunud, sest erinevalt õhu ja vee kvaliteedist ei saa seda defineerida vaid reostuse osakaalu järgi (Carter et al., 1997). Selline definitsioon oleks puudulik, sest nagu varasemalt kirjeldatud,

on mulla roll ökosüsteemis väga laiamahuline ja seega on ka mulla kvaliteedi mõju keerukas. Mulla kvaliteeti peaks kirjeldama läbi mitmekülgsete funktsioonide ja ökosüsteemiteenuste, mida kvaliteetne muld tagab (Bünemann et al., 2018). Algselt oli mulla kvaliteedi tähendus pigem antropotsentristlik ja rõhutas mulla võimekust tagada agroökosüsteemides inimese heaolu jaoks piisav biomassi tootlikkus (Bünemann et al., 2018; Mausel, 1971).

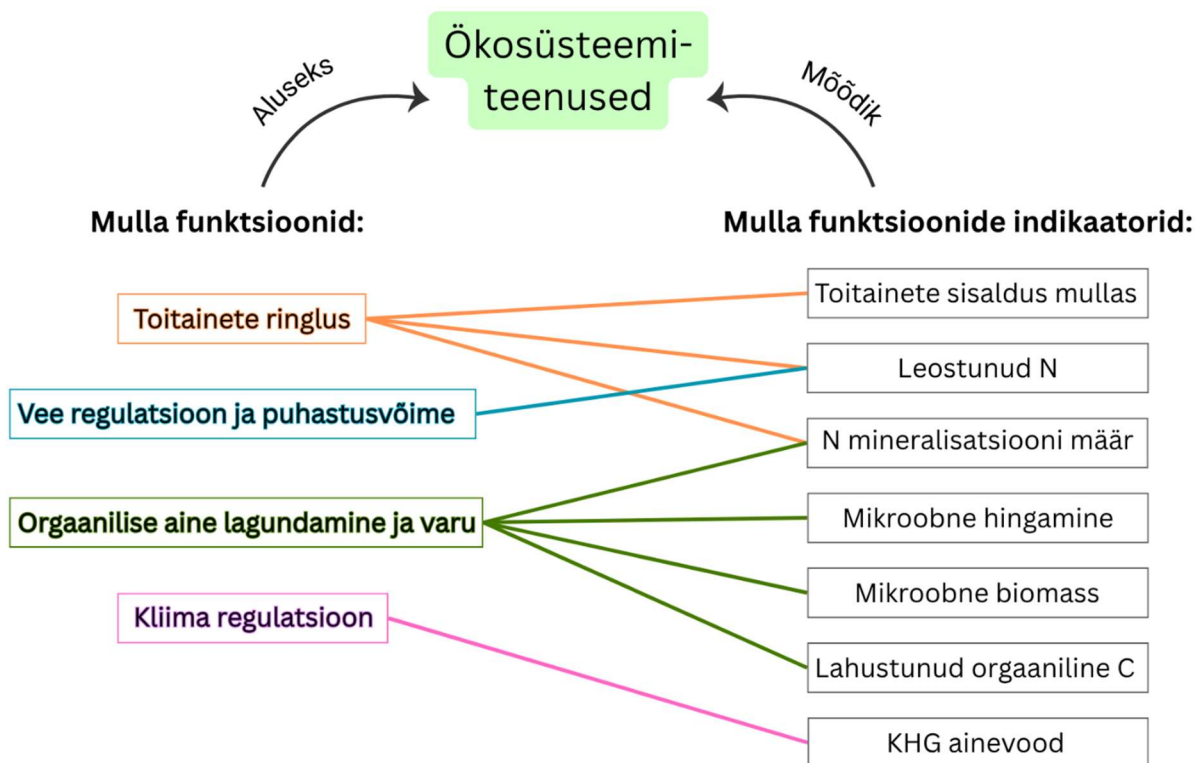
Tänapäeval defineeritakse mulla kvaliteeti sagedamini kui mulla kestvat võimekust toimida tervikliku elussüsteemina, mis vastavalt maakasutusest ja kohalikust ökosüsteemist tulenevatele piiridele suudab tagada elurikkuse ning toetada taimede, loomade ja inimeste tervist (Bünemann et al., 2018; Doran & Parkin, 1994; Doran, J.W & Safley, M, 1997). Mulla kvaliteediga paralleelselt kasutatakse tihti ka mõistet mulla tervis, mis pärineb 90ndate keskpaigast, kui avastati, kuidas mulla kvaliteet saab läbi põllusaagi mõjutada inimeste tervist (Bünemann et al., 2018; Lehmann et al., 2020; Warkentin, 1995). Neid olemuselt sarnaseid termineid kasutatakse ka sünonüümidenäna, kuid mulla kvaliteet on enamasti eelistatum teaduskirjanduses ja mulla tervis on pigem kasutusel poliitikakujundajate seas (Bünemann et al., 2018; Pankhurst, C. E et al., 1997). Mulla tervis on ka Euroopa Liidu kesksete eesmärkide seas, sest heas seisus mullad on aluseks teiste oluliste keskkonnaalaste teemadega tegelemisel, näiteks kliimamuutustega kohanemisel (European Commission, 2021). Euroopa Liidu mullaseire ja vastupidavuse direktiiviga on püstitatud eesmärk hoida ära muldade edasist degradeerumist ning tagada aastaks 2050 kõikide liikmesriikide mulla ökosüsteemide hea tervis (European Parliament and Council of the European Union, 2025). Euroopa Liidu 2030 mulla strateegia kohaselt on mullad terved siis, kui nad suudavad pakkuda võimalikult palju ökosüsteemiteenuseid (European Commission, 2021; Yosef et al., 2026). Selleks, et hinnata seatud eesmärgi saavutamist on oluline tagada mulla kvaliteedi adekvaatne mõõtmine (Bünemann et al., 2018).

1.5 Mulla funktsionaalsuse mõõtmine

Mulla hea kvaliteedi aluseks on ökosüsteemiteenuste pakkumise võimekus, sellega seotud mulla funktsioonid ning mullas toimuvad vastavad biogeokeemilised protsessid (Li et al., 2023). Kuna ökosüsteemiteenuseid ja mulla funktsioone ei ole võimalik otseselt mõõta, võetakse mulla kvaliteedi mõõtmisel enamasti kasutusele erinevad indikaatorid, mis on mõõdikud mullas toimuvatele protsessidele, mille alusel on seeläbi võimalik hinnata konkreetseid mulla funktsioone (Bünemann et al., 2018; Lehmann et al., 2020; Pankhurst, C. E et al., 1997; Wade et al., 2022). Muld on väga mitmekesine ja multifunktsionaalne, seega on

mulla tervist kirjeldavaid indikaatoreid palju ja nad jagunevad enamasti füüsikalisteks, keemilisteks ja bioloogilisteks (Bünemann et al., 2018; Kabato et al., 2025). Kuna muld on ühtne ökosüsteem, ei ole mullas toimuvad protsessid üksteisest sõltumatud, vaid mulla funktsioonid on omavahel seotud ja mõjutatud mitmete mulla füüsikaliste, keemiliste ja bioloogiliste omaduste poolt (Creamer et al., 2022; Dominati et al., 2010; Li et al., 2023).

Seega saab ühte mulla funktsiooni kirjeldada mitme mulla funktsionaalsuse indikaatori kaudu ning indikaatorid võivad omakorda peegeldada mitme mulla funktsiooni olemust (Bünemann et al., 2018; Dominati et al., 2010). Põllumuldade puhul on ökosüsteemiteenustega seotud näiteks järgnevad mulla funktsioonid: vee regulatsioon ja puhastusvõime; toitainete ringlus; süsiniku sidumine ja orgaanilise aine varu; kliima regulatsioon kasvuhoonegaaside ainevoogude kaudu (Creamer et al., 2022; Lehmann et al., 2020; Rinot et al., 2019; Schulte et al., 2014). Seetõttu on need mulla funktsioonid ja vastavad indikaatorid ka käesoleva töö põhifookuses.



Joonis 1. Mulla funktsioonid ja nendega seotud mulla funktsioonide indikaatorid. N - lämmastik; C - süsinik; KHG - kasvuhoonegaasid

1.5.1 Vee regulatsioon ja puhastusvõime

Vee regulatsiooni aluseks on mullas toimuvad protsessid, mille tulemusel toimib vee ringlemine mullas: vee sisenemine mulla keskkonda, vee kinnipidamine ja väljumine (Dominati et al., 2010; Zhang et al., 2007; Yosef et al., 2026). Nii liiguvad mullast läbi ka erinevad vees lahustunud kahjulikud ained, näiteks üleliigsed toitained või pestitsiidid, mille leostumist saab muld puhverdusvõime funktsiooni kaudu ära hoida (Creamer et al., 2022; Skaalsveen et al., 2019). Muld pikendab vee kinnipidamise kaudu ainete viibimist süsteemis, võimendades seeläbi bioloogiliste filtreerivate protsesside toimimisaega (Creamer et al., 2022; Keesstra et al., 2012). Mikroobsete protsesside kaudu saab kahjulikke aineid näiteks lagundada ja läbi toiduvõrgustiku assimileerida (Creamer et al., 2022; Keesstra et al., 2012).

Peamine põllumajandusest tulenev anorgaaniline saasteaine on nitraat, mis leostub negatiivsest laengust tuleneva suure liikuvuse tõttu mullast näiteks liigse väetamise tagajärjel (Hansen et al., 2000; Skaalsveen et al., 2019). Leostunud nitraadi kogus on üks indikaator, mille kaudu on võimalik mõõta mulla vee puhastamise funktsiooni. Vee regulatsiooni ja puhastusvõime funktsiooni puhul on mulla struktuuril oluline roll mulla kvaliteedi määramisel (Bronick & Lal, 2005; Skaalsveen et al., 2019). Kuna põldudel leostunud nitraat kujuneb läbi eutrofeerumise ohuks nii veeökosüsteemidele kui joogivee kvaliteedi kaudu ka inimeste tervisele, peaks hästi funktsioneeriva põllumulla puhul olema leostunud lämmastiku kogus võimalikult väike (Keesstra et al., 2012; Schlesinger, 2009).

1.5.2 Toitainete ringlus

Toitainete ringluses muudavad keemilised elemendid oma olekuid liikudes mulla biotiliste ja abiotiliste komponentide vahel (Dominati et al., 2010). Põllumulla funktsioonina on selle aluseks näiteks järgnevad mullas toimuvad protsessid: toitainete vastuvõtmine, toitainete muutmine taimede kättesaadavasse vormi ja toitainete taimede poolt omastamise toetamine (Creamer et al., 2022; Schröder et al., 2016). Üks olulisemaid mulla aineringes osalevaid makroelemente on lämmastik, sest see on peamine taimede kasvu piirav toitaine (Haygarth & Ritz, 2009; O'Brien et al., 2016). Mullas on lämmastikuringe aluslüliks mullas toimuvad mikroobsed protsessid nagu bioloogiline lämmastiku fikseerimine ja lämmastiku mineralisatsioon (Nyle C. Brady, 1990).

Taimedel on võimalik omastada ainult mineraalsed lämmastikku, täpsemalt peamiselt nitraati (NO_3^-) aga ka ammooniumi (NH_4^+) (O'Brien et al., 2016). Nitraat on oksüdeerunud anorgaaniline lämmastik ja mullas väga liikuv, samas kui ammoonium on redutseerunud ja positiivse laengu tõttu võrreldes nitraadiga mullas palju stabiilsem (Snyder et al., 2009). Orgaanilisel kujul lämmastik, mis on osa mulla orgaanilisest ainest, muudetakse ammooniumiks ja nitraadiks läbi vastavate mikroobsete protsesside: ammonifikatsioon ja nitrifikatsioon (Nyle C. Brady, 1990; Snyder et al., 2009). Indikaatorid, mille kaudu on võimalik mõõta mulla toitainete ringluse funktsiooni, on näiteks mulla mineraalse lämmastiku sisaldus ja lämmastiku mineralisatsiooni määr (Bünemann et al., 2018). Põllumajanduses sõltub lämmastiku ringluse funktsiooni täitmine mulla kvaliteedist (Schröder et al., 2016). Hästi funktsioneerivas põllumullas võiks olla selline kogus toitaineid, mis on piisav taimede kasvu toetamiseks ja toitaine ringluse tasakaalus hoidmiseks, sest kui toitaineid tekib ülejääk või mineralisatsiooni määr on väga kõrge, võivad tagajärjena suurened leostumine ja denitrifikatsiooni protsess, kus nitraat muutub gaasiliseks lämmastikuks, mis mõjub negatiivselt vee ja õhu kvaliteedile (Moebius-Clune et al., 2016; Snyder et al., 2009).

1.5.3 Orgaanilise aine lagundamine ja varu

Orgaanilise aine lagundamise ja mullas hoidmise funktsiooni aluseks on atmosfääris sisalduva süsiniku sidumise võime ning selle edasine ringlus mullas (Powlson et al., 2011). Bioloogiliselt aktiivne muld on elupaigaks suurele mikroorganismide elurikkusele, kes on võtmetähtsusega mullas toimuvate süsiniku aineringluse protsesside reguleerimises (Dominati et al., 2010). Mulla mikroorganismid tagavad taime varise ja muu orgaanilise materjali lagundamise, ajutise stabiilse süsiniku varu läbi orgaanilise süsiniku mikroobse biomassi hulka sidumise ning orgaanilise süsiniku tagasi süsihappegaasiks mineraliseerimise läbi heterotroofse hingamise (Wu et al., 2024). Mulla orgaanilise aine sisaldus on oluline mulla kvaliteedi ja viljakuse määraja, mis kujutab endast järjepidevat kogumit erinevas lagunemisastmes orgaanilistest ühenditest (Jansson & Hofmockel, 2020; Lehmann & Kleber, 2015).

Mulla orgaanilise aine sisalduse või lagundamise kiiruse mõõtmiseks kasutatakse samaaegselt erinevaid indikaatoreid nagu mikroobne biomass, mikroobse hingamise määr ning lahustunud orgaanilise süsiniku sisaldus mullas (Eldor A. Paul, 2007; Nielsen, M. N. et al., 2002). Mikroobne biomass peegeldab mulla aineringes osalevate mikroorganismide, peamiselt bakterite ja seente hulka ning nende biomassi seotud orgaanilise süsiniku kogust (Carter et al.,

1999; Jansson & Hofmockel, 2020; Palm et al., 2014). Mikroobne hingamine on indikaator mullaelustiku aktiivsusele, mõõtes mikroorganismide ainevahetust orgaanilise aine lagundamisel vabaneva CO₂ koguse kaudu (Nielsen, M. N. et al., 2002; Tao et al., 2023). Lahustunud orgaaniline süsinik moodustab mulla süsinikust osatähtsusest väikse kuid olulise osa, mis peegeldab väga liikuvast ja kergesti kättesaadavast vormis süsinikku, mis on oluline näiteks mikroorganismide metabolismis (Bolan et al., 2011).

Põllumulla kvaliteedi jaoks on oluline mitmekesine ja aktiivne kasulike mullaorganismide populatsioon ehk suur mikroobne biomass (Moebius-Clune et al., 2016). See-eest liiga suur lahustunud orgaanilise süsiniku hulk võib põhjustada orgaanilise aine välja leostumist ning liiga kõrge mikroobne hingamine viidata orgaanilise aine liiga kiirele lagundamisele ja suurenenud eralduva CO₂ kogusele, mis võimendab kliimamuutuseid (Bolan et al., 2011; Jansson & Hofmockel, 2020; Palm et al., 2014).

1.5.4 Kliima regulatsioon

Süsiniku sidumine on samuti ka üks mullas toimuvatest protsessidest, mis on aluseks mulla võimekusele reguleerida kasvuhoonegaaside eraldumist ja leevendada seeläbi kliimamuutuseid (Kibblewhite et al., 2008; Stuart Chapin Iii et al., 2009). Mullal on mullaorganismide ja taimede kaudu oluline roll kolme kasvuhoonegaasi ringluses, sest lisaks CO₂ saab mulla kaudu eralduda veel ka N₂O ja CH₄ (Dominati et al., 2010; Robertson & Grace, 2004). N₂O emissioonid tulenevad mullas denitrifikatsiooni protsessi tagajärjel, mida soodustab liigne väetamine (Robertson & Grace, 2004; Saggar et al., 2013; Snyder et al., 2009). Metaan eraldub metanogeenide elutegevuse käigus anaeroobsetes tingimustes kui mullad on liigniisked, põllumajanduslikult näiteks riisipõldudel (Robertson & Grace, 2004). Mullad on metaani siduvad kui seal on palju aktiivseid metanotroofe (Bayer et al., 2012; Robertson & Grace, 2004). Indikaator, millega on kliima regulatsiooni funktsiooni võimalik mõõta, on eraldunud kasvuhoonegaaside ainevood. Kuna põllumajandussektor moodustab juba praegu märkimisväärse koguse iga-astases kasvahoonegaaside heitkogusest, on jätkusuutlikkuse tagamiseks oluline, et mullast eralduv kasvahoonegaaside voog oleks võimalikult madal (Jansson & Hofmockel, 2020).

1.6 Mulla multifunktsionaalsus

Mitmete indikaatorite alusel on võimalik välja arvutada kokkuvõttev indeks, mis kirjeldab mulla multifunktsionaalsust ja saab seeläbi anda ülevaadlikumalt informatsiooni põllumulla kvaliteedi osas (Lehmann et al., 2020; Lima et al., 2013; Rinot et al., 2019). Mulla multifunktsionaalsus viitab muldade võimekusele pakkuda samaaegselt mitmeid erinevaid ökosüsteemiteenuste aluseks olevaid funktsioone (Eldridge et al., 2020). Üldiselt suudavad kõik mullad vähemal või suuremal määral varasemalt käsitletud funktsioone täita (Schulte et al., 2014). Samas on kõikidesse funktsioonidesse võrdselt panustada keeruline ja enamasti esinevad lõivsuhted, mis tulevad eriti hästi esile just põllumajanduse puhul (Romero et al., 2025). Näiteks väetiste abil saavutatud kõrgem toitainete sisaldus mullas korreleerub küll positiivselt põllukultuuri biomassi ehk saagikusega, kuid samaaegselt võib esineda ka negatiivne seos kliimaregulatsiooni funktsiooniga, sest suureneb ka N₂O emissioon (Snyder et al., 2009; Vazquez et al., 2021). Samuti väheneb põllumajanduse intensiivistumise tagajärjel mullaorganismide elurikkus ja seeläbi ka üldine multifunktsionaalsus (Delgado-Baquerizo et al., 2016; Vazquez et al., 2021). Multifunktsionaalsust aitab saavutada suurem mullaorganismide elurikkus, sest sellel on kandev roll mitme funktsiooni puhul (Delgado-Baquerizo et al., 2016).

Samuti on leitud, et erinevad majandamisviisid, näiteks väetiste või kahjuritõrjevahendite kasutus mõjutavad põllumulla multifunktsionaalsust (Li et al., 2023; Vazquez et al., 2021). Selleks, et saavutada kõrgem multifunktsionaalsus, tuleks kasutusele võtta läbimõeldud majandamisviisid, näiteks jätkusuutlik põllumajandus (Vazquez et al., 2021). Jätkusuutliku põllumajanduse eesmärk on kasutada bioloogilisi ressursse ning agroökosüsteemide pakutavaid teenuseid, et toota toitu ja toorainet, arvestades samaaegselt kaasnevate keskkonnamõjudega (Kremsa, 2021; Shelef et al., 2018). Lõivsuhte esinemise tõttu oleks muldade jätkusuutlikuks majandamiseks vaja teada, millised mullad konkreetseid funktsioone paremini täidavad. See sõltub muuhulgas ka mullas kasvavatest taimedest ehk põllukultuurist (Wubs, 2025).

1.7 Põllukultuuride mõju mulla funktsioonidele

Mulla tervise ja mullal kasvavate taimede vahel esineb vastastikune dünaamiline seos, milles põllukultuuridel on oluline roll mulla kvaliteedi tagamisel ja hoidmisel, sest nad saavad mõjutada konkreetseid mulla funktsioone (Xing et al., 2025). Näiteks saavad põllukultuurid

vähendada mulla N₂O emissioone ja lämmastiku leostumist, mõjutades seeläbi toitainete ringe ja kliima regulatsiooni funktsioone (Fernandez Pulido et al., 2025). Lisaks on põllukultuuridel oluline roll atmosfääri süsiniku sidumisel ja mulla orgaanilise aine kujunemisel, mõjutades nii mulla süsiniku ringluse funktsiooni (Jansson & Hofmockel, 2020; Mathew et al., 2020). Kuna taimed omastavad mullast aktiivselt vett ja toitaineid ning jätavad endast maha juureeritisi ning muud orgaanilist materjali on põllukultuuril näiteks ka oluline mõju mulla agregaatide ja seega struktuuri ning veehoidmisvõime tagamisel, mis on aluseks vee regulatsiooni funktsioonile (Bin et al., 2025; Wang et al., 2020; Xing et al., 2025). Samuti on taimede risosfäär oluline mulla mikroobse elurikkuse jaoks, mis on aluseks mullas toimuvale aineringlusele (Xing et al., 2025).

Taime mõju mulla funktsioonidele on seotud taime omadustega ja seetõttu on põllukultuuri valiku alusel võimalik suunata mulla funktsioneerimist, sest fülogeneetiliselt lähedasemad põllukultuurid võivad ühiste tunnuste alusel omada sarnaselt positiivset mõju mulla funktsioonidele (Bin et al., 2025). Näiteks kasvatades kultuure liblikõieliste sugukonnast, kelle juuremügarates esineb sümbioos õhu lämmastikku siduvate mügarbakteritega (*Rhizobium*), on võimalik suurendada mulla toitainete sisaldust (Sharma et al., 2018). Kiirekasvulised ning sügavate juurtega ristõieliste sugukonna kultuurid võivad aga vähendada leostumist, sidudes lämmastiku efektiivselt oma biomassi hulka (Fernandez Pulido et al., 2025). Samuti on Mathew ja teiste (2020) avaldatud globaalse metaanalüüsi kohaselt põllukultuuridel erinev mõju ka süsiniku sidumisele ning mullast eraldumisele. Näiteks mais (*Zea mays*) oli eriti edukas süsiniku siduja ning suure süsiniku varuga, kuid samas oli võrreldes teraviljadega suurem ka süsiniku emissioonide hulk (Mathew et al., 2020).

Lisaks individuaalsetele funktsioonidele on avastatud, et põllukultuuridel on mõju ka mulla multifunktsionaalsusele (Zhang et al., 2022). Bin ja teiste (2025) läbiviidud katsest selgus, et kõige kõrgem multifunktsionaalsus esines liblikõieliste ning madalam teraviljade ja ristõieliste puhul. Samas ei leitud, et ükski põllukultuur suudaks iseseisvalt parandada kõiki mulla funktsioone, vaid mõni kultuur tõstis multifunktsionaalsust panustades toitainete ringluse ja biomassi tootmisega seotud funktsioonidesse ja teine kultuur võis seda saavutada näiteks panustades haigustele vastupanu ja süsiniku sidumisega seotud funktsioonidesse (Bin et al., 2025). Seega mulla hea tervise tagamiseks põllumajanduses tuleb teada, milliseid kultuure konkreetsete funktsioonide parandamiseks kasvatada. Samas ei mõjuta kõik liigid ühe sugukonna siseselt mulla funktsioone alati samamoodi (Fernandez Pulido et al., 2025). Kuna taimed varieeruvad oma omaduste poolest ka sugukonna siseselt võib mõju mulla

funktsioonidele olla liigispetsiifiline (Dayoub et al., 2017). Seepärast on funktsioonide paremaks ennustamiseks kasutusele võetud ka taimetunnused (Bin et al., 2025; Fernandez Pulido et al., 2025). Taime mõju mulla funktsioonidele on otseselt seotud taime omadustega ja võib olla liigispetsiifiline.

1.8 Taimetunnuste seos mulla funktsioonidega

Taimetunnuseid kasutatakse ökoloogilistes uuringutes laialdaselt eesmärgiga kirjeldada ja ennustada, kuidas taimed ökosüsteemi protsesse reguleerivad (Faucon et al., 2017; Zhang et al., 2022; Teixeira et al., 2020). Samuti on üha enam hakatud taimetunnuseid käsitlema jätkusuutliku põllumajanduse arendamise eesmärgil ka agroökoloogia valdkonnas, et ennustada mulla funktsioone ja seeläbi taastada mulla kvaliteeti (Moore et al., 2025; Zhang et al., 2022). Taimetunnused on suur hulk maapealseid ja -aluseid morfoloogilisi, füsioloogilisi ja fenoloogilisi omadusi, mida saab mõõta ühe taimeorganismi tasemel (Faucon et al., 2017; Violle et al., 2007). Taimetunnused mõjutavad otseselt taime elutegevust (kasvu, reproduktsiooni ja ellujäämist) ja seega kaudselt ka taime kohasust (Faucon et al., 2017; Violle et al., 2007).

Lehe- ja juuretunnuseid on kasutatud nn. taimede ökonoomia spektri (*economic spectrum*) kirjeldamisel, mis jagab taimeliike eri strateegiateks sõltuvalt investeeringutest ressursside kiire omastamise ja parema kaitse vahel (Bergmann et al., 2020; Díaz et al., 2016; Wright et al., 2004). Tänapäeval jagatakse ökoloogias taimed tunnuste alusel kas kiire- või aeglase kasvustrateegiaga liikideks (Reich, 2014; Zhang et al., 2022). Kiirekasvulised liigid omastavad toitaineid kiiremini ja panustavad ressursse suuremate mõõtmete kiireks saavutamiseks, kuid taimekoed on selle arvelt lühiealisemad ja vähem kaitstud (Reich, 2014; Wright et al., 2004). Sellist strateegiat kirjeldavad taimetunnused on näiteks kõrge lehe eripind ehk SLA (*specific leaf area*), madal süsiniku (C) ja lämmastiku (N) suhe ehk toitainerikkamad lehed ja juured ning kõrgem fotosünteesiline aktiivsus (Díaz et al., 2016; Reich, 2014). Aeglase kasvustrateegiaga liigid omastavad toitaineid aeglasemalt ja investeerivad rohkem vastupidavusse, mistõttu on taimede kasvukiirus küll madalam, aga koed on see-eest paremini kaitstud ja pikema elueaga (Reich, 2014; Wright et al., 2004). Selle strateegiaga on seotud näiteks kõrge lehe kuivaine sisaldus ehk LDMC (*leaf dry matter content*), kõrge C:N suhe ehk süsinikurikkad lehed ja juured ning suurem juure koetihedus ehk RTD (*root tissue density*) (Bergmann et al., 2020; Díaz et al., 2016; Reich, 2014). Lisaks saab juure tunnuste alusel paigutada taimed veel eraldi nn. „koostöö“ spektrile, mis iseloomustab toitainete omastamise

viisiga seotud süsiniku investeeringuid (Bergmann et al., 2020). Ühel pool telge on suure juure diameetriga liigid (RD ehk *root diameter*), mis panustavad toitainete omastamiseks sümbioosi mükoriisaseentega. Teisel pool telge on kõrgema juure eripikkusega (SRL ehk *specific root length*) liigid, kes suudavad ise mullast toitaineid hankida rohkete peenjuurte abil (Bergmann et al., 2020).

Sellise strateegiatel põhineva raamistiku alusel on uuritud ka seoseid taimetunnuste ja mulla funktsioonide vahel (Faucon et al., 2017). Zhang ja teised (2022) leidsid, et kattekultuurid mõjutasid mulla funktsioone vastavalt kasvustrateegiale. Kiirekasvulised taimed suurendasid toitainete kättesaadavust ning põllumaa tootlikkust, samas kui aeglasemas kasvulises taimed olid aluseks keerukamale toiduvõrgustikule ja toetasid seeläbi rohkem mulla tervist (Zhang et al., 2022). Taimetunnuste alusel on võimalik ennustada ka lämmastikuringe kulgu agroökosüsteemides, sest juure tunnused nagu juure eripikkus, C:N suhe ja juureeritised mõjutavad lämmastiku mineralisatsiooni kiirust, toitainete kättesaadavust, leostumist ning N₂O emissioone (Faucon et al., 2017; Cantarel et al., 2015; Fernandez Pulido et al., 2025).

Lisaks sellele on taimetunnuseid seostatud mulla multifunktsionaalsusega. Selleks, et edukalt ennustada mulla multifunktsionaalsust on vaja vaadata nii maapealseid- kui aluseid tunnuseid (Fry et al., 2018). Varasemalt on näiteks karjamaade ja poolkõrbeliste ökosüsteemide puhul leitud, et erinevaid taimetunnuseid (näiteks lehe eripind, lehe lämmastiku sisaldus, maapealne biomass) on võimalik seostada kõrgema mulla multifunktsionaalsusega (Fry et al., 2018; Peco et al., 2017; Song et al., 2024; Teixeira et al., 2020). Seoseid taimetunnuste ja mulla multifunktsionaalsuse vahel pole aga põllukultuuride kontekstis veel uuritud. Seega ei ole veel ka teada, kas taimetunnuste alusel oleks võimalik ennustada ja parandada põllumuldade multifunktsionaalsust, mis on kliimamuutuste ja intensiivse maakasutuse tõttu vähenenud (Scherzinger et al., 2024; Sünnemann et al., 2023).

2. Materjal ja metoodika

2.1 Tegevused kasvuhoones

2.1.1 Katse ülespanek

Töö empiirilise osa raames viisin läbi kasvuhoonekatse, et uurida põllukultuuride ning taimetunnuste mõju mulla funktsioonidele ja multifunktsionaalsusele. Valisin 30 eri põllukultuuri, mis erinesid üksteisest taksonoomiliselt (Lisa 1). Pottidesse külvasin vastavalt külviselise normile järgnevad põllukultuurid: suvinisu, spelta, durum nisu, tritikale, oder, kaer, mais, sorgo, suvirukis, emmer nisu, hernes, põlduba, kikerhernes, lääts, tatar, kartul, päevalill, sibul ja kanep. Idandatud ja istutatud kultuurid olid põldtimut (*Phleum pratense*), harilik aruhein (*Festuca pratense*), sojauba, suvivikk, aasristik ehk punane ristik (*Trifolium pratense*), lutsern, raps, kinoa ja maguskartul.

Kõik kultuurtaimed külvasin või istutasin 9.06.2025 pottide serva ja keskele jätsin ligikaudu 7 cm diameetriga vaba ringikujulise ala, et hiljem oleks võimalik poti keskelt mullaproovi võtta ja kasvuhoonegaaside ainevooge mõõta. Substraadina kasutasin kõikides pottides ühesugust mulda, mis pärines Maaelu Teadmuskeskuse proovialalt. Katse jaoks lisasin 51 poti põhja looritüki ja seejärel täitsin poti mullaga ning vastavalt külvasin või istutasin sobiva kultuuri. Potte kasteti peale külvamist väetise lahusega (Yara Mila NPK(S) väetis N18 P11 K13 (S 6,5) + mikroelemendid Mg 1,0 ja B 0,02). Väetamise kogus oli kõikide pottide puhul 20 kg N/ha ja kokku väetati potte katse jooksul 3 korda (ehk 60 kg N/ha kokku). Teised väetamised toimusid 21.07.2025 ja 05.08.2025. Igat kultuuri kasvasin 5 korduses ja kontrollina oli katses ka 5 ainult mullaga kontrollpotti, kuhu taimi ei külvatud. Seega kokku oli katses $31 \times 5 = 155$ potti. Katse viisin läbi Jõgeval, Maaelu Teadmuskeskuse kasvuhoones 14 nädala jooksul, juuni 2025 - september 2025. Taimi kasteti automaatselt kaks korda päevas ja pottide asukohti juhuslikustasin kasvuhoones katse vältel kahel korral. Esimese 10 päeva jooksul surnud taimed vahetasin uutega ning 6 nädala jooksul surnud taimed eemaldasid katsest. Katse lõpuni jäi koos kontrollpottidega alles 132 potti.

2.1.2 Katse mahavõtmine

Lehe tunnuste määramiseks kogusin proovid aktiivse kasvu ajal (22.07.2025). Leheproovid säilitati 24h kilekottides vähese veega, pimedas ja 4°C juures enne tunnuste mõõtmist. Samuti

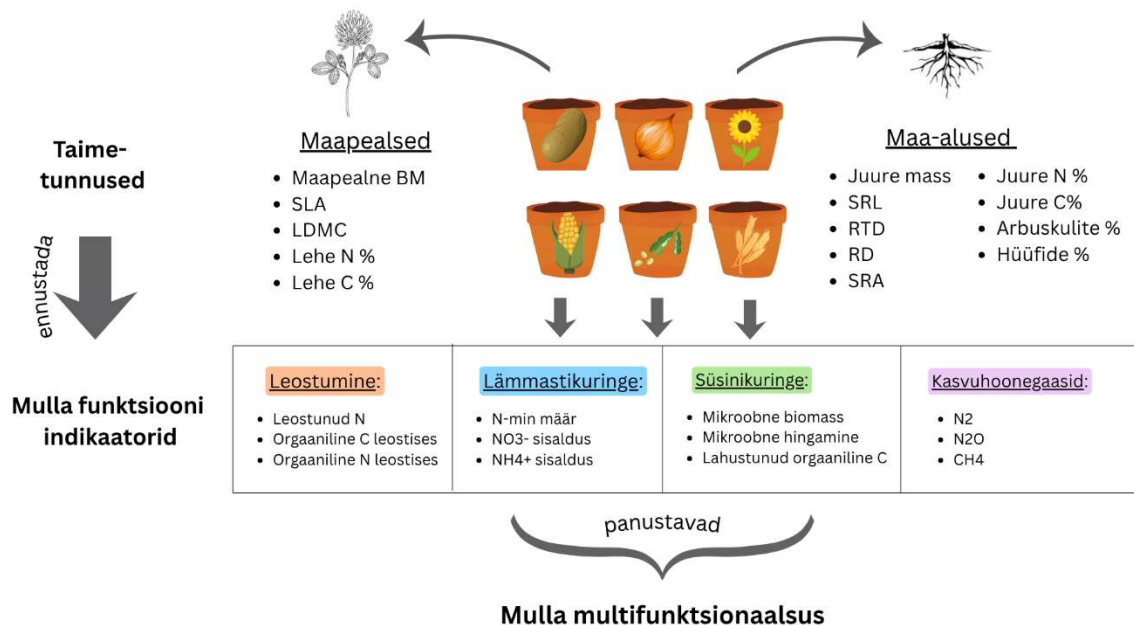
kogusin andmeid pottide lämmastiku leostumise mõõtmiseks (23.07.2025). Selle jaoks panin pottidele alla plastikust panged ning tugeva vihmajuu simuleerimiseks valasin ühte katsepotti 600 ml destilleeritud vett, mis vastab 20 mm vihmajule. Kui leostised olid pange lõpuni kogunenud ehk potist enam vett ei tilkunud, mõõtsin ära välja leostunud lahuse kogused. Seejärel filtreerisin leostised paberfiltritega (poori suurus 2,5; Whatman 42 filter, Global Life Science Solutions Operations Ltd, Suurbritannia). Neli päeva enne katse täielikku mahavõtmist lõpetati taimede kastmine. Esmalt märkisin ära, mitu taime igas potis kasvas ning seejärel kogusin taimede maapealse biomassi paberkottidesse. Poti keskelt võtsin mullaproovi plastikust toruga, mille diameeter oli 7 cm ja sügavus 6,1 cm, mida kasutati laboris kasvuhoonegaaside voogude analüüsimiseks. Samuti kogusin igast potist enamiku juuri, mida peale pesemist säilitasin kilekottides vee ja etanooli lahuses 4°C juures kuni juuretunnuste mõõtmiseni. Kartulitaimede mugulad, bataatide muguljuured ning sibulad (jämenenud maa-alused lühivõsud) kogusin eraldi ja säilitasin -35°C juures. Viimasena kogusin mullaproove. Kokku kogusin 20 g mulda, millest 10 g kasutati mulla mikroobse biomassi määramiseks, 5 g lämmastiku mineralisatsiooni määra leidmiseks ning 5 g mulla mikroobse hingamise määramiseks.

2.2 Tegevused laboris

Antud töös hindasin vastavate mulla funktsiooni indikaatorite mõõtmise kaudu kokku nelja erinevat mulla funktsiooni. Vee regulatsiooni ja puhastusvõime funktsiooni mõõtsin järgnevate leostumisega seotud indikaatorite kaudu: leostunud nitraat (kg N/ha); orgaanilise C sisaldus leostises (mg); orgaanilise N sisaldus leostises (mg). Lämmastiku ringluse funktsiooni mõõtsin lämmastikuringega seotud indikaatorite kaudu: N mineralisatsiooni määr (mg N/kg kuivas mullas/päevas); NO_3^- kättesaadavus mullas (mg N/kg kuivas mullas); NH_4^+ kättesaadavus mullas (mg N/kg kuivas mullas); mikroobse biomassi N ($\mu\text{g/kg}$ kuivas mullas). Süsinikuringet hindasin järgmiste indikaatorite abil: mikroobse biomassi C ($\mu\text{g/kg}$ kuivas mullas); lahustunud orgaaniline C ($\mu\text{g/g}$ kuivas mullas); basaalne mikroobne hingamine ($\mu\text{g C/g}$ kuivas mullas); erinevate süsinikuühenditega indutseeritud mikroobne hingamine ($\mu\text{g C/g}$ kuivas mullas). Kliima regulatsiooni mõõtsin KHG seotud indikaatoreid ehk järgnevate gaaside ainevooge: N_2 ($\mu\text{g N/h/kg}$ kuivas mullas); N_2O ($\mu\text{g N/h/kg}$ kuivas mullas); CH_4 ($\mu\text{g C/h/kg}$ kuivas mullas).

Samuti uurisin töös kokku 14 erinevat taimetunnust. Nendest maapealsed tunnused olid järgnevad: lehe eripind ehk SLA (*specific leaf area*) (cm^2/g); lehe kuivaine sisaldus ehk LDMC (*leaf dry matter content*) (g); lehe C sisaldus (%); lehe N sisaldus (%); taime maapealse

biomassi kuivkaal (g). Maa-alused tunnused olid: maa-aluse biomassi ehk juurte kuivkaal (g); juure keskmine läbimõõt ehk RD (*root diameter*) (mm); juure eripindala ehk SRA (*specific root area*) (cm²/mg); juure eripikkus ehk SRL (*specific root length*) (cm/mg); juure koetihedus ehk RTD (*root tissue density*) (g/cm³); juure C sisaldus (%); juure N sisaldus (%); arbuskulite osakaal (%); hüüfide osakaal (%).



Joonis 2. Katses mõõdetud taimetunnused, mulla funktsiooni indikaatorid ja multifunktsionaalsus. Eri värvidega on tähistatud nelja erineva mulla funktsiooni indikaatorid: oranžiga vee regulatsiooni ja puhastusvõime ehk leostumisega seotud indikaatorid, sinisega toitainete ringluse ehk lämmastikuringega seotud indikaatorid, rohelisega süsinikuringega seotud indikaatorid ja roosaga kliima regulatsiooni funktsiooni ehk kasvuhoonegaaside indikaatorid. Maa-pealsed taimetunnused: maa-pealne BM – maa-pealse biomassi kuivkaal; SLA – lehe eripind; LDMC – lehe kuivaine sisaldus; Lehe N % – lehe lämmastiku sisaldus; Lehe C % – lehe süsiniku sisaldus. Maa-alused tunnused: SRL – juure eripikkus; RTD – juure koetihedus; RD – juure keskmine läbimõõt; SRA – juure pindala, Juure N % – juure lämmastiku sisaldus; Juure C % – juure süsiniku sisaldus. Mulla funktsiooni indikaatorid: Leostunud N – leostunud nitraadi kogus; Orgaaniline C leostises – orgaanilise süsiniku sisaldus leostises; Orgaaniline N leostises – orgaanilise lämmastiku sisaldus leostises; N-min määr – lämmastiku mineralisatsiooni määr; NO₃- sisaldus – nitraadi kättesaadavus mullas; NH₄⁺ sisaldus – ammoniumi kättesaadavus mullas; Mikroobne biomass – mikroobne süsinik ja lämmastik mullas; Lahustunud orgaaniline C – lahustunud orgaaniline süsinik.

2.2.1 Biomassi analüüs

Taimede produktiivsuse määramiseks kaaluti kogutud taimede biomass pärast ahjus konstantse kaaluni kuivatamist temperatuuril 40°C. Kartulid, bataadid ja sibulad võtsin sügavkülmast külmaruumi üleöö sulama, lõikasin väiksemateks tükkideks ja kuivatasin ahjus kolm ööpäeva. Seejärel kaaluti nad täpsusega 0.02 g ja arvestati ülejäänud biomassi hulka.

2.2.2 Lehe proovide analüüs

Värsked leheproovid kaalusin täpsusega 0.001 g ning skaneerisin seejärel resolutsiooniga 300 DPI kasutades EPSON Perfection skannerit (mudel V370, EPSON, Suwa, Jaapan). Skaneeritud ja kaalutud märjad lehed panin paberkottidesse ja kuivatusahju 40°C juurde, kus proovid kuivasid vähemalt kolm ööpäeva konstantse kaaluni. Kuivatatud lehed kaalusin seejärel uuesti, et teada kuivkaalu. Skaneeritud pilte analüüsisin kasutades RhizoVision Explorer tarkvara, et leida leheproovide pindalad. Lehtede kuivkaalu, märgkaalu ning pindala abil arvutasin välja järgnevad taimetunnused: lehe eripind ehk SLA kui leheproovi pindala jagatud kuivkaaluga ja lehe kuivaine sisaldus ehk LDMC kui leheproovi kuivkaalu ja märgkaalu jagatis. Kuivatatud leheproovid purustati (metallkuulidega) peeneks pulbriks, millest 1-3 mg pakiti tinakapslitesse, et mõõta lehe proovide kogu süsiniku ja lämmastiku sisaldust kasutades CN analüsaatorit (UNICUBE, Elementar®, Saksamaa), kus mõõdeti 850°C põletamise käigus eraldunud CO₂ ja N₂ kogused ning tulemusena arvutati süsiniku ja lämmastiku sisaldus vastavalt proovi kaalule.

2.2.3 Juure proovide analüüs

Kogutud juureproovidest osa skaneerisin enne kuivatamist resolutsiooniga 600 DPI, kasutades EPSON Perfection skannerit (EPSON Perfection V800, Epson, Suwa, Jaapan). Seejärel kuivatasin juureproovid konstantse kaalu saavutamiseni ning kaalusin pärast kuivatamist täpsusega 0.001 g. Skaneeritud juurte pilte analüüsisin RhizoVision Explorer tarkvaraga, mille abil leidsin järgmised väärtused: juure kogupikkus (mm), keskmine diameeter (mm), ruumala (mm³) ning pindala (mm²). Nende väärtuste ning juurte kuivkaalu põhjal oli võimalik leida järgnevad taimetunnused: juure eripikkus ehk SRL kui juure kogupikkuse ja juure kuivmassi jagatis, juure eripindala ehk SRA (*specific root area*) kui juure pindala ja juure kuivmassi jagatis, juure koetihedus ehk RTD (*root tissue density*) kui juure kuivmassi ja juure ruumala jagatis ja juure keskmine läbimõõt ehk RD (*root diameter*). Juureproovidest määrati sarnaselt leheproovidega kogu süsiniku ja lämmastiku sisaldust (UNICUBE, Elementar®, Saksamaa).

Skaneeritud juurte kuivatatud proove kasutasin arbuskulaarse mükoriisa kolonisatsiooni määramiseks. Juurte värvimiseks kasutasin Vierheilig et al. (1998) koostatud juhendit. Selle jaoks lõikasin kuivatatud juurte hulgast lühikesi juure juppe ja asetasin need plastikust kassettidesse. Kassettides leotasin juuri 10% KOH lahuses 24 tundi, peale mida loputasin proovid kolm korda veega läbi ning asendasin seisnud KOH lahus uuega. Kassetid asetasin koos KOH lahusega 95°C vette. Kuna põllukultuuride juured erinesid üksteisest palju, keetsin juuri mitmes väiksemas grupis ja eri keetmisaegadega. Teraviljade (suviniisu, spelta, durum

nisu, tritikale, oder, kaer, mais, sorgo, suvirukis, Emmer nisu) puhul hoidsin juuri 95°C juures 13 minutit. Ülejäänud kõrreliste puhul (*P. pratense*, *F. pratense*) ootasin peale proovide vette asetamist kuni KOH lahus tõusis 70°C ning seejärel kuumutasin proove 15 minutit. Liblikõieliste (põlduba, kikerhernes, lääts, sojauba, *T. pratense*, galeega, lutsern) puhul ootasin kuni KOH lahus tõusis 80°C ja seejärel hoidsin proove lahuses samuti 15 minutit. Kõige hapramate juurtega kultuur olid sibul ja seda kuumutasin 95°C vees 10 minutit. Kinoa ja kanepi juured olid teistest oluliselt jäigemad. Seega nende proovide puhul ootasin kuni KOH lahus tõusis 87°C ja seejärel keetsin proove veel 15 minutit. Kõige jäigemad olid kartuli ja bataadi juured, mida tuli keeta peale KOH lahuse jõudmist temperatuurini 87°C 20 minutit. Ülejäänud põllukultuuride (tatar, raps, päevalill) puhul kasutasin teraviljadega samu keetmisaegu ehk 13 minutit 95°C vees. Peale juurte keetmist loputasin proovid kolm korda veega läbi ning asetasin värvilahusesse (5% tinti, 5% äädikhapet).

Värvilahuses hoidmise aeg erines samuti põllukultuuride vahel. *P. pratense* ja *F. pratense* juure proovidega kassette hoidsin värvilahuses 10 minutit ning sibula kassette 6 minutit. Ülejäänud põllukultuuride juure proove hoidsin värvilahuses 6,5 minutit. Seejärel pesin juured viimast korda veega läbi ja asetasin 24 tunniks vee ja äädika lahusesse (1:5 äädikhapet ja vett). Värvitud juureproovid eemaldasid kassetidest ja nendest valmistasin slaidid. Arbuskulaarse mükoriisa ja hüüfide osakaalu (%) määramiseks vaatasin valmistatud slaide McGonigle et al. (1990) meetodi järgi valgusmikroskoobi all ja registreerisin 100 juure ristlõike kohta esinenud krohmseente hüüfid ja arbuskulid.

2.2.4 Mikroobse aktiivsuse määramine

Eri põllukultuuride mulla mikroobse aktiivsuse määramiseks kasutati MicroResp™ katsekomplekti, et mõõta kuidas eri süsiniku substraadid mõjutavad mikroobset aktiivsust. Katse viidi läbi MicroResp™ juhendi järgi (MicroResp™, James Hutton Ltd, Aberdeen, Suurbritannia) ning süsiniku substraatideks valiti L-tsüsteiin hüdrokloriid (väävlit sisaldav substraat), 4-aminobutaanhape (lämmastiku sisaldav orgaaniline hape), D(+)-trehhaloos dihüdraat (suhkur), L(+)-lüsiin monohüdrokloriid (hüdrofiilne ja laenguga aminohape), D(+)-glükoos (suhkur), DL-õunhape (ilma lämmastikuta orgaaniline hape),alaniin (hüdrofoobne ja neutraalse laenguga aminohape) ning lisaks ka destilleeritud vesi. Destilleeritud vee alusel saab määrata mulla basaalset mikroobset hingamist, mida ülejäänud süsiniku ühendite lisamisel saab indutseerida ja selle alusel hinnata mikroobikoosluse eelistusi eri substraatide suhtes. Kõigepealt täideti katsekomplekti hulka kuuluvad 96-augulised 1,2 ml Deepwell plaadid

mullaproovidega. Iga katsepoti mullaproovi kohta täideti 16 auku ja ühte auku lisati ligikaudu 0,3 g mulda. Seejärel lisati muldadele kahes korduses eelnevalt nimetatud kaheksat keemilist substraati. Plaadid kaeti detektsioonigeeliga mikroplaatidega, suleti õhukindlalt kummist tihendi ning klambri abil ja inkubeeriti 23°C juures pimedas keskkonnas. Geelplaatides olev detektsioonigeel sisaldas kresoolpunast, mis muudab süsihappegaasiga kokkupuutel värvi ja indikeerib seeläbi mullahingamise intensiivsust. Geelplaatide neelduvust mõõdeti 570 nm juures Tecan mikropaadi lugejas (Magellan™, Tecan Trading AG, Šveits). Tulemuste põhjal arvutati CO₂ eraldumise kiiruse mulla kuivkaalu kohta. Indutseeritud hingamise arvutamiseks lahutati vastava substraadiga saadud tulemusest maha basaalne hingamine.

2.2.5 Mikroobse biomassi määramine

Mikroobse biomassi hindamiseks mõõdeti mullaproovidest mikroobse süsiniku ja lämmastiku kogused kasutades NPOC/TN_b (*non-purgeable organic carbon and total bound nitrogen*) meetodit. Selle jaoks kaaluti 50 ml Falcon® tuubidesse iga mulla kohta kaks 5 g mullaproovi, millest ühte fumigeeriti, et lagundada mullas leiduvate mikroobide rakud ja vabastada nendes sisalduv orgaaniline süsinik ja lämmastik. Teine proov jäi fumigeerimata ja seega ei sisalda mikroobse biomassi hulka kuuluvat C ja N. Kõikidesse tuubidesse lisati 25 ml 0,5 M K₂SO₄ ning fumigeeritud proovidele lisati ka 600 µl kloroformi. Mullaproove ekstraheeriti toatemperatuuril 60 minutit loksutis (MaxQ 4450, Thermo Fisher Scientific Inc., Ameerika Ühendriigid). Seejärel tsentrifuugiti proove veel 10 minutit kiirusel 3700 rpm (Centrifuge 5804 R, Vaudaux-Eppendorf AG, Šveits) ja jäeti 10 minutiks toatemperatuurile seisma. Ekstraheeritud mullaproovidest filtreeriti 10 ml vedelikku (Whatman 42 filter, Global Life Science Solutions Operations Ltd, Suurbritannia). Filtreeritud proove hoiti sügavkülmas temperatuuril -35°C. Orgaanilise süsiniku ja lämmastiku sisalduse määramiseks sulatati proovid üles ja analüüsiti enviro TOC analüsaatoril (enviro TOC, Elementar®, Saksamaa). Mikroobse süsiniku ja lämmastiku koguse leidmiseks lahutati fumigeeritud proovide tulemustest mittefumigeeritud proovide tulemused ja jagati konverteerimisfaktoriga. Süsiniku puhul oli konverteerimisfaktor 0,45 (Joergensen, 1996) ning lämmastiku puhul 0,54 (Brookes et al., 1985). Lahustunud orgaanilise süsiniku sisaldus leiti fumigeerimata proovi tulemuste alusel.

2.2.6 Mulla toitainete sisalduse määramine

Mullaproovidest määrati nitraadi ja ammooniumi sisaldused, kasutades Hood-Nowotny et al. (2010) juhendit. Kõigepealt arvutati välja iga mullaproovi niiskusesisaldus. Selleks eraldati kogutud mullaproovidest 10g mulda, mida kuivatati esmalt kuivatusahjus ja seejärel kaaluti. Kasutades niiske ja kuivatatud mulla masse arvutati mullaproovide niiskusesisaldus. Selle jaoks kaaluti mullaproovide ekstraheerimiseks tuubidesse 2 g mulda ning lisati 15 ml 0,5 mol/L K_2SO_4 lahust. Proove hoiti toatemperatuuril 60 minutit loksutis kiirusel 300 rpm (MaxQ 4450, Thermo Fisher Scientific Inc., Ameerika Ühendriigid). Seejärel tsentrifuugiti proove toatemperatuuril 10 minutit kiirusel 3234 rpm (Centrifuge 5804 R, Vaudaux-Eppendorf AG, Šveits). Siis lisati 100 µl igat tsentrifuugitud proovi mikrotiiterplaatidele. Samuti lisati plaadile ka nitraadi ja ammooniumi standardlahuseid.

2.2.6.1 Nitraadi sisalduse määramine

Muldade nitraadi sisalduse mõõtmiseks lisati mikroplaatidele 100 µl mullaproovi ekstrakti või nitraadi standardlahust, 100 µl VCl_3 reagenti lahust (50,9 mmol/L VCl_3), 50 µl Griessi reagenti 1 (0,77 mmol/L N-naptüületüleendiamiin dihidrokloriidi lahus) ning 50 µl Griessi reagenti 2 (58 mmol/L sulfaniilamiidi lahust). Seejärel inkubeeriti mikroplaat 60 minutit 37 °C juures. Neeldumist mõõdeti 540 nm juures Tecan mikroplaadi lugejas (Magellan™, Tecan Trading AG, Šveits) ja tulemused konverteeriti N sisalduseks grammi kuiva mulla kohta kasutades mullaproovi niiskuse sisalduse andmeid ja standardlahustega tehtud kalibratsioonikõveraid.

2.2.6.2 Ammooniumi sisalduse määramine

Ammooniumi sisalduse mõõtmiseks lisati mikroplaatidele 100 µl mullaproovi ekstrakti või ammooniumi standardlahust, 50 µl värvi reagenti (1,06 M naatriumsaltsülaati, 4,29 mmol/l naatrium nitroprussiidi, 0,3 mol/l NaOH lahust) ja 20 µl oksüdatsiooni reagenti (3,9 mmol/l dikloroisotsüaanuurhappe naatriumi soola dihidraadi lahust). Mikroplaat hoiti toatemperatuuril 30 minutit. Seejärel mõõdeti spektrofotomeetrilist neeldumist 660 nm juures (Magellan™, Tecan Trading AG, Šveits). Ammooniumi sisaldust arvutati sarnaselt nitraadisisalduse määramisele.

2.2.7 Leostunud lämmastiku analüüs

Kogutud leostiste proovidest arvutati leostunud nitraadi kogus sarnaselt mullaproovide nitraadisalduse määramisele Hood-Nowotny et al. (2010) juhendi järgi. Ülejäänud leostisi säilitati sügavkülmas -35°C juures. Leostiste orgaanilise süsiniku (TOC) ja orgaanilise lämmastiku (TON) sisalduse määramiseks sulatati proovid üles ja kasutati sarnaselt mullaproovidele NPOC/TNb (non-purgeable organic carbon and total bound nitrogen) meetodit ja enviro TOC analüsaatori tehnilise juhendit (enviro TOC, Elementar®, Saksamaa).

2.2.8 Lämmastiku mineralisatsiooni määramine

Lisasin 5 g mulda 50 ml suurustesse Falcon® tuubidesse ja juurde pipeteerisin nii palju vett, et iga mullaproov saavutaks 60% maksimaalsest veehoidmisvõimest, mis oli enne katseliselt määratud. Proove inkubeerisin toatemperatuuril 28 ööpäeva, mille järel määrasin mineraalse lämmastiku kättesaadavust mullas. Inkubeeritud muldade ekstraheerimiseks lisasin proovidele 25 ml 0,5 M K_2SO_4 lahust. Seejärel määrasin nitraadi ja ammooniumi sisaldust nagu eelnevates peatükkides kirjeldatud. Lämmastiku mineralisatsiooni ($N_{\min}$) määra leidmiseks arvutati mulla mineraalse N sisalduse erinevus enne ja pärast inkubeerimist, mis jagati inkubeerimise kestusega ööpäevades.

2.2.9 Ainevoogude määramine

Poti keskelt puuriga kogutud mullaproovidest mõõtis ÖMI geograafia osakonna Maastiku aineringete ja ökotehnoloogia töörühm N_2 , N_2O ja CH_4 emissioone heeliumi atmosfääri mulla inkubatsiooni meetodi järgi (Butterbach-Bahl et al., 2002; Swerts et al., 1995). Eraldunud gaaside kontsentratsioonid tuvastati gaas-kromatograafia (Shimadzu GC-2014) ja ainevood arvutati Butterbach-Bahl et al. (2002) kasutatud valemi järgi. Peale ainevoogude määramist sõeluti puuriga kogutud mullaproovidest välja juured, mis kuivatati ja kaaluti, et liita ka need ülejäänud juurte biomassi hulka.

2.3 Andmeanalüüs

Andmeanalüüsi käigus uuriti mulla funktsiooni indikaatorite ja mulla multifunktsionaalsuse seoseid kasvatatud põllukultuuride ning taimetunnuste vahel. Selleks, et vaadata põllukultuuride mõju olulisust mulla funktsiooni indikaatoritele võrreldes tühja mulla ehk kontrollpottidega, kasutati lineaarset mudelit. Samuti kasutati lineaarset mudelit, et vaadata põllukultuuride mõju olulisust taimetunnustele. Lineaarses mudelis oli sõltumatuks muutujaks

kasvatatud põllukultuurid ning sõltuvaks muutujaks vastavalt mulla funktsioonide indikaatorid ja taimetunnused. Lineaarse mudeli eelduste kontrollimiseks kasutasin Levene testi dispersioonide võrdsuse hindamiseks ja normaaljaotuse kvantiilide graafikut mudeli jääkide normaaljaotuse kontrollimiseks. Eelduste kontroll tuvastas, et mitme tunnuste puhul oli vajalik andmete transformatsioon kümnendlogaritmiga. Mulla funktsiooni indikaatoritest log-transformeerisin järgnevad indikaatorid: leostunud nitraadi kogus; orgaanilise C kogus leostises; orgaanilise N kogus leostises; nitraadi kogus mullas; N mineralisatsiooni määr. Taimetunnustest log-transformeerisin järgnevad tunnused: arbuskulite osakaal; juure diameeter; juure eripind; juure eripikkus; juure koetihedus; juure C sisaldus; juure N sisaldus; taime maa-aluse biomassi kuivkaal; lehe eripind; lehe kuivaine sisaldus; lehe C sisaldus; lehe N sisaldus; taime maapealse biomassi kuivkaal.

Iga põllukultuuri puhul arvutati ka mulla multifunktsionaalsus (Chao et al., 2024). Arvutuses kasutati normaliseeritud andmestikku, kus iga mulla funktsiooni indikaator oli transformeeritud nii, et selle väärtus varieerub nullist üheni. Kõrgem väärtus indikeerib inimese seisukohalt positiivset mõju mulla funktsionaalsusele. Seetõttu korrutati negatiivse mõjuga indikaatorite ehk leostunud nitraadi, leostiste orgaanilise C and N andmed ning eraldunud kasvuhoonegaaside andmed enne transformeerimist miinus ühega, et funktsiooni indikaatori väärtus oleks maksimaalne muldades, milles leostumine ja KHG emissioonid on minimaalsed. Seejärel arvutati multifunktsionaalsust kui transformeeritud funktsioonide kaalutud summat, võttes arvesse mulla funktsiooni indikaatorite vahelisi korrelatsioone. Arvutatud multifunktsionaalsuse väärtuste puhul kasutasin eelnevalt kirjeldatud lineaarset mudelit, et vaadata põllukultuuride mõju olulisust. Eelduste kontroll tuvastas, et ka multifunktsionaalsuse puhul oli vajalik andmete transformatsioon kümnendlogaritmiga. Mulla funktsiooni indikaatorite, mulla multifunktsionaalsuse ja taimetunnuste vaheliste korrelatsioonide hindamiseks koostasın korrelatsioonimaatriksi, kasutades Pearsoni korrelatsioonikordajat (r).

Andmete analüüsimiseks kasutasin tarkvaraprogrammi R versioon 4.5.3 (R Core Team, 2026) koos Rstudio versiooniga 2026.01.1+403 (Posit team, 2026). Multifunktsionaalsuse arvutamiseks kasutati paketti *MF.beta4* (Chao et al., 2024). Graafikute joonestamiseks kasutasin paketti *ggplot2* (Wickham, 2016). Korrelatsioonimaatriksi tegemiseks kasutati paketti *corrplot* (Wei & Simko, 2021) ja korrelatsioonimaatriksi visualiseerimiseks kasutasin paketti *igraph* (Csárdi & Nepusz, 2006). Töös kasutasin koodivigade, teksti voolavuse ja viidete vormistuse parandamiseks M365 Copilot (GPT-5) tehisaru.

3. Tulemused

Põllukultuuril oli mõju katses mõõdetud mulla funktsioonide indikaatoritele (Tabel 1). Dispersioonianalüüs näitas, et põllukultuuril on oluline mõju leostumise ja lämmastikuringega seotud mulla funktsioonide indikaatoritest leostunud nitraadi kogusele (Tabel 1; $R^2 = 0,56$; $P < 0,001$), leostise orgaanilise C (Tabel 1; $R^2 = 0,52$; $P < 0,001$) ja N (Tabel 1; $R^2_{\text{adj}} = 0,59$; $P < 0,001$) sisaldusele, N mineralisatsiooni määrale (Tabel 1; $R^2 = 0,46$; $P < 0,001$) ning NO_3^- sisaldusele (Tabel 1; $R^2 = 0,83$; $P < 0,001$). Süsinikuringega seotud mulla funktsioonide indikaatoritest oli põllukultuuril oluline mõju mulla mikroobse C sisaldusele (Tabel 1; $R^2 = 0,19$; $P = 0,003$), basaalsele mikroobsele hingamisele (Tabel 1; $R^2 = 0,21$; $P = 0,04$) ja aminobutaaniga ehk lämmastiku sisaldava orgaanilise happega indutseeritud mikroobsele hingamisele (Tabel 1; $R^2 = 0,21$; $P = 0,04$). Kasvuhoonegaaside ainevoogudest oli põllukultuuril oluline mõju eraldunud CH_4 kogusele (Tabel 1; $R^2 = 0,29$; $P < 0,001$). Samuti oli põllukultuuril oluline mõju ka mulla multifunktsionaalsusele (Tabel 1; $R^2 = 0,17$; $P = 0,01$).

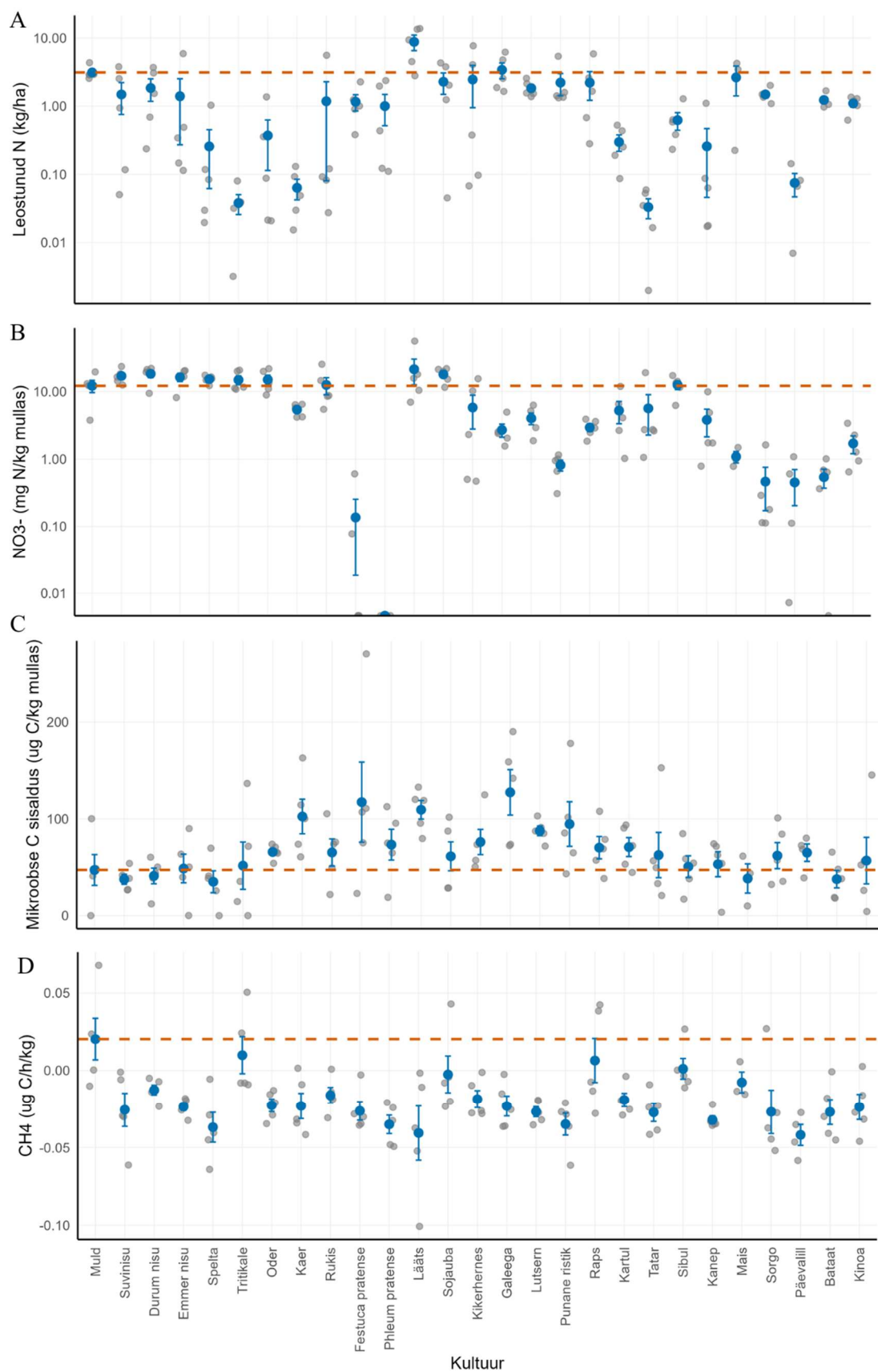
Tabel 1. Kultuuride mõju mulla funktsioonide indikaatoritele. Oranžiga on tähistatud leostumisega seotud mulla funktsiooni indikaatorid, rohelisega lämmastikuringega seotud indikaatorid, sinisega süsinikuringega seotud indikaatorid ning lillaga kasvuhoonegaaside ainevoogudega seotud indikaatorid. Esitatud on F-statistik koos vabadusastmetega (F), p-väärtus (P) ja korrigeeritud determinatsioonikordaja (R^2_{adj}). Paksus kirjas on märgitud statistiliselt olulised seosed ($P < 0,05$) ning indikaatorid, mille puhul põllukultuur suutis kõige rohkem variatsiooni kirjeldada. Mullahingamine ($\mu\text{gC/g}$ kuivas mullas) indutseeritud: Glc – glükoosiga; Cys – tsüsteiiniga; Lys – lüsiiniga; Ala –alaniiniga; Treh – trehhaloosiga; Aminobut – aminobutaanhappega; Malic – õunhappega.

	Mulla funktsiooni indikaator:	F	P	R^2_{adj}
Leostumine	Leostunud N (kg/ha)	$F_{26,103} = 7.43$	<0.001	0.56
	Orgaaniline C leostises (mg)	$F_{26,101} = 6.34$	<0.001	0.52
	Orgaaniline N leostises (mg)	$F_{26,103} = 8.23$	<0.001	0.59
N-ringe	N mineralisatsiooni määr (mg/kg/päevas)	$F_{26,105} = 5.33$	<0.001	0.46
	NO_3^- (mg/kg mullas)	$F_{26,105} = 25.60$	<0.001	0.83
	NH_4^+ (mg/kg mullas)	$F_{26,105} = 1.09$	0.37	0.02
	Mikroobne N ($\mu\text{g/kg}$ mullas)	$F_{26,105} = 1.50$	0.08	0.09
C-ringe	Mikroobne C ($\mu\text{g/kg}$ mullas)	$F_{26,105} = 2.2$	0.01	0.19
	Lahustunud orgaaniline C ($\mu\text{g/g}$ mullas)	$F_{26,105} = 1.5$	0.08	0.09
	Basaalne mikroobne hingamine ($\mu\text{gC/g}$)	$F_{26,89} = 1.7$	0.04	0.18
	Glc indutseeritud ($\mu\text{gC/g}$)	$F_{26,91} = 1.08$	0.4	0.14
	Cys indutseeritud ($\mu\text{gC/g}$)	$F_{26,96} = 0.9$	0.6	0.14
	Lys indutseeritud ($\mu\text{gC/g}$)	$F_{26,94} = 1.16$	0.3	0.17
	Ala indutseeritud ($\mu\text{gC/g}$)	$F_{26,90} = 1.19$	0.27	0.13
	Treh indutseeritud ($\mu\text{gC/g}$)	$F_{26,92} = 1.61$	0.05	0.2
	Aminobut indutseeritud ($\mu\text{gC/g}$)	$F_{26,93} = 1.66$	0.04	0.21
	Malic indutseeritud ($\mu\text{gC/g}$)	$F_{26,92} = 1.33$	0.17	0.17
KHG	N_2 ($\mu\text{gN h/kg}$)	$F_{26,105} = 1.14$	0.32	0.03
	N_2O ($\mu\text{gN h/kg}$)	$F_{26,105} = 1.28$	0.19	0.05
	CH_4 ($\mu\text{gC h/kg}$)	$F_{26,105} = 3.12$	<0.001	0.29
	Multifunktsionaalsuse indeks	$F_{25,93} = 2.02$	0.01	0.17

Leostumise indikaatoritest kirjeldas põllukultuur kõige rohkem orgaanilise N ja leostunud nitraadi sisalduse variatsiooni (Tabel 1). Kuna leostunud N on sagedasti kasutatav ökosüsteemi toimimise näitaja, vaatasin selle varieerumist põllukultuuride vahel täpsemalt (Joonis 3A). Statistiliselt oluliselt vähendasid N leostumist tühja mullaga võrreldes tritikale, tatar, kaer, päevalill, spelta, oder, kanep ja rukis (Tabel 2; kõikidel $P < 0,001$). Lämmastiku ringe indikaatoritest kirjeldas põllukultuur kõige rohkem nitraadi sisaldust mullas (Tabel 1), seega vaatasin selle varieerumist põllukultuuride vahel (Joonis 3B). Nitraadi sisaldus oli võrreldes tühja mullaga oluliselt madalam *F. pratense*, *P. pratense*, sorgo, päevalille, bataadi, punase ristiku, maisi, ja kinoa pottide puhul (Tabel 2; kõikidel $P < 0,001$). Süsiniku ringe indikaatoritest

kirjeldas põllukultuur kõige rohkem mikroobse süsiniku sisaldust mullas (Tabel 1). Mikroobse süsiniku sisaldus oli võrreldes tühja mullaga oluliselt suurem *F. pratense* (Tabel 2; $P = 0,004$), galeega (Tabel 2; $P = 0,001$), läätses (Tabel 2; $P = 0,01$) ja kaera (Tabel 2; $P = 0,02$) puhul. Kasvuhoonegaasidega seotud indikaatoritest kirjeldas põllukultuur kõige rohkem metaani ainevooge (Tabel 1). Eraldunud CH_4 kogus (mõõdetud eraldunud süsiniku kogusena tunnis ühe kg mulla kohta) oli tühjast mullast madalam kõikide põllukultuuride puhul (Joonis 3D). Metaani emissioonid olid oluliselt madalamad võrreldes taimedeta pottidega suvinisu, emmer nisu, spelta, odra, kaera, *F. pratense*, *P. pratense*, läätses, galeega, lutserni, punase ristiku, tatra, kanepi, sorgo, päevalille, bataadi ja kinoa pottide puhul (Tabel 2; kõikidel $P < 0,001$) ning ka rukki (Tabel 2; kõikidel $P = 0,004$), kikerherne (Tabel 2; kõikidel $P = 0,002$) ja kartuli (Tabel 2; kõikidel $P = 0,001$) puhul.

Käesolevas töös kasvatatud põllukultuurid erinesid üksteisest lisaks fülogeneesile oluliselt ka taimetunnuste poolest (Lisa 2).



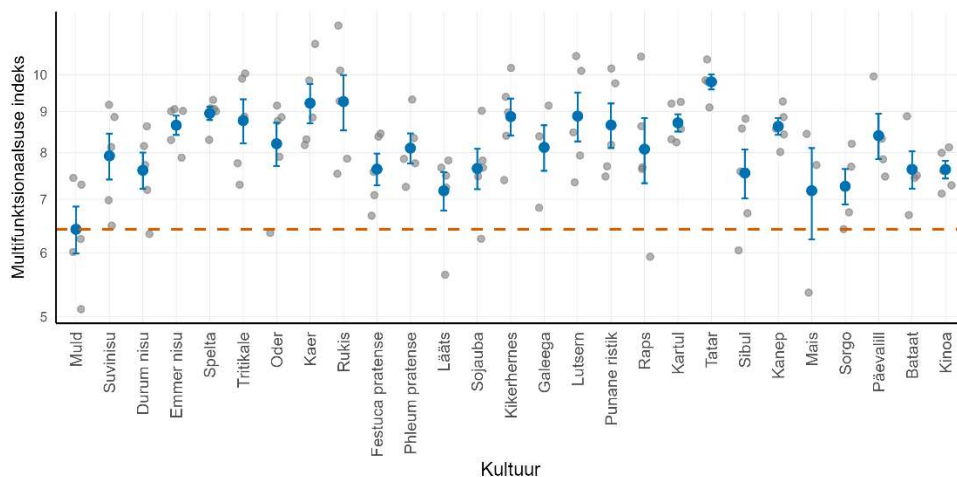
Joonis 3. Eri põllukultuuride mõju valitud mulla funktsioonide indikaatoritele. Joonisel on näidatud põllukultuuride mõju nelja erineva mulla funktsiooni indikaatori väärtustele võrreldes tühja mullaga. Oranži katkendliku joonega on tähistatud

mullanivoo, mis on tühja mulla ehk taimedeta kontrollpottide keskmine väärtus indikaatorite puhul. Sinisega on tähistatud kõikide põllukultuuride ja kontrollpottide keskmised väärtused vastavate indikaatorite puhul, koos standardveaga. Halliga on tähistatud üksikute vaatluste väärtused. (A) Leostunud nitraadi kogus (kg N/ha), leostunud N kogus on kümnendlogaritmitud. (B) Nitraadi kättesaadavus (mg NO₃⁻ kujul N/kg mullas). (C) Mikroobse süsiniku sisaldus (µg C/kg mullas). (D) Metaani ainevoog (tunnis eraldunud µg C/kg mullas) eri põllukultuuriga pottides.

Tabel 2. Eri põllukultuuride mõju valitud mulla funktsioonide indikaatoritele võrreldes taimedeta pottidega. Esitatud on p-väärtused t-testi põhjal ja paksus kirjas on märgitud statistiliselt olulised erinevused ($P < 0,05$). Kollasega on tähistatud teraviljad, rohelisega ülejäänud kõrrelised ning sinisega liblikõielised kultuurid.

Kultuur	Leostunud N (kg N/ha)	NO ₃ - (mg N/kg mullas)	Mikroobne C (µg C/kg mullas)	CH ₄ (µgC/h/kg)
Suvinisu	0,07	0,43	0,69	<0,001
Durum nisu	0,26	0,37	0,8	0,009
Emmer nisu	0,02	0,5	0,95	<0,001
Spelta	<0,001	0,53	0,61	<0,001
Tritikale	<0,001	0,61	0,85	0,4
Oder	<0,001	0,62	0,44	<0,001
Kaer	<0,001	0,2	0,02	<0,001
Rukis	<0,001	0,99	0,45	0,004
Festuca pratense	0,16	<0,001	0,004	<0,001
Phleum pratense	0,03	<0,001	0,27	<0,001
Lääts	0,28	0,45	0,01	<0,001
Sojauba	0,22	0,37	0,55	0,07
Kikerhernes	0,04	0,008	0,23	0,002
Galeega	0,97	0,009	0,001	<0,001
Lutsern	0,5	0,06	0,091	<0,001
Punane ristik	0,53	<0,001	0,05	<0,001
Raps	0,32	0,02	0,33	0,26
Kartul	0,002	0,07	0,32	0,001
Tatar	<0,001	0,03	0,52	<0,001
Sibul	0,031	0,86	0,87	0,12
Kanep	<0,001	0,01	0,8	<0,001
Mais	0,44	<0,001	0,75	0,05
Sorgo	0,38	<0,001	0,53	<0,001
Päevalill	<0,001	<0,001	0,48	<0,001
Bataat	0,27	<0,001	0,69	<0,001
Kinoa	0,19	<0,001	0,68	<0,001

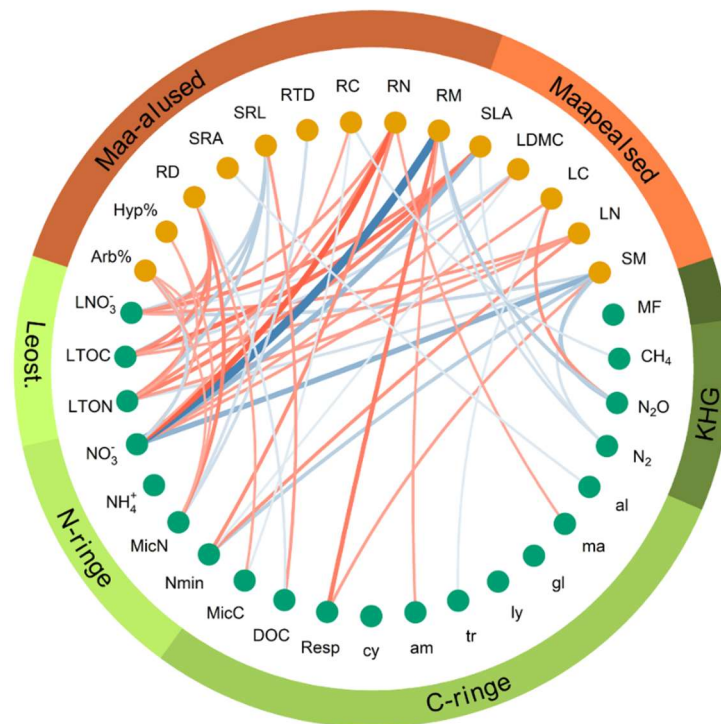
Kõige multifunktsionaalsem kultuur oli tatar (Joonis 4; $P = 0,009$). Samuti kaldus multifunktsionaalsuse indeks olema võrreldes teiste kultuuridega kõrgem ka kaeral (Joonis 4; $P = 0,06$), rukkil (Joonis 4; $P = 0,07$). Kõige madalam multifunktsionaalsuse indeks oli maisil (Joonis 4; $P = 0,24$), läätsel (Joonis 4; $P = 0,24$) ja sorgol (Joonis 4; $P = 0,34$).



Joonis 4. Põllukultuuride multifunktsionaalsuse indeks. Joonisel on näidatud põllukultuuride mõju mulla multifunktsionaalsusele võrreldes tühja mullaga. Oranži katkendliku joonega on tähistatud mullanivoo, mis on tühja mulla ehk taimedeta kontrollpottide keskmine väärtus indikaatorite puhul. Siniste ringidega on näidatud kõikide põllukultuuride ja kontrollpottide keskmine multifunktsionaalsuse indeks koos. Hallid ringid on üksikute vaatluste väärtused.

Mulla funktsioonide indikaatorite vahel esines olulisi korrelatsioone (Lisa 3). Samas ei korreleerunud multifunktsionaalsus mitte ühegi taimetunnusega, aga korrelatsioonid esinesid üksikute taimetunnuste ja mulla funktsioonide indikaatorite vahel (Joonis 5). Leostumist kirjeldavate indikaatorite puhul esines oluline negatiivne korrelatsioon juure eripikkuse ja leostunud nitraadi koguse vahel (Joonis 5; $r = -0,27$; $P = 0,003$), leostise orgaanilise süsiniku koguse (Joonis 5; $r = -0,3$; $P < 0,001$) ja leostise orgaanilise lämmastiku koguse vahel (Joonis 5; $r = -0,3$; $P < 0,001$). Oluline positiivne seos oli lehe eripindala ning leostumise indikaatorite vahel: leostunud nitraadi kogusega (Joonis 5; $r = 0,33$; $P < 0,001$), leostise orgaanilise süsiniku kogusega (Joonis 5; $r = 0,39$; $P < 0,001$) ja leostise orgaanilise lämmastiku koguse vahel (Joonis 5; $r = 0,34$; $P < 0,001$). Positiivne seos esines ka leostumise indikaatorite ja juure keskmise läbimõõdu vahel: leostunud nitraadi kogusega (Joonis 5; $r = 0,28$; $P = 0,002$), leostise orgaanilise süsiniku kogusega (Joonis 5; $r = 0,31$; $P < 0,001$) ja leostise orgaanilise lämmastiku koguse vahel (Joonis 5; $r = 0,29$; $P = 0,002$). Lämmastikuringega seotud indikaatoritest oli kõige olulisem negatiivne seos nitraadi kättesaadavuse ja põllukultuuri juure massi vahel (Joonis 5; $r = -0,66$; $P < 0,001$). Nitraadi sisaldus oli olulises negatiivses seoses ka maapealse biomassiga (Joonis 5; $r = -0,43$; $P < 0,001$) ja lehe eripinnaga (Joonis 5; $r = -0,41$; $P < 0,001$). Nitraadi kättesaadavus mullas oli oluliselt positiivselt seotud juurte lämmastiku sisaldusega (Joonis 5; $r = 0,46$; $P < 0,001$). Lämmastikuringe indikaatoritest esines oluline positiivne korrelatsioon ka mikroobse lämmastiku ja juure läbimõõdu vahel (Joonis 5; $r = 0,32$; $P < 0,001$). Samuti esines positiivne seos ka mikroobse lämmastiku ja arbuskulite koguse vahel (Joonis 5; $r = 0,2$; $P = 0,031$). Lämmastiku mineralisatsiooni määr oli positiivses seoses lehe

lämmastiku sisalduse (Joonis 5; $r = 0,28$; $P = 0,002$) ning juure lämmastiku sisaldusega (Joonis 5; $r = 0,29$; $P = 0,002$). Süsinikuringega seotud indikaatoritest esines kõige tugevam positiivne seos basaalse mullahingamise ning maa-aluse biomassi vahel (Joonis 5; $r = 0,36$; $P < 0,001$). Mikroobne süsiniku sisaldus oli positiivselt seotud juure keskmise läbimõõduga (Joonis 5; $r = 0,21$; $P = 0,02$). Kasvuhoonegaasidega seotud indikaatoritest olid olulisemad negatiivsed seosed N_2O ainevoog ja maa-pealse biomassi (Joonis 5; $r = -0,33$; $P < 0,001$) ning maa-aluse biomassi vahel (Joonis 5; $r = -0,31$; $P < 0,001$). CH_4 ainevoog korreleerus negatiivselt juure süsiniku sisaldusega (Joonis 5; $r = 0,21$; $P = 0,02$).



Joonis 5. Korrelatsioonid taimetunnuste ja mulla funktsioonide indikaatorite ning multifunktsionaalsuse indeksi vahel.

Punase joonega on näidatud olulised ($P < 0.05$) positiivsed seosed eri taimetunnuste (tähistatud oranžiga) ja mulla funktsiooni indikaatorite (tähistatud rohelisega) ning multifunktsionaalsuse indeksi (MF, tähistatud tumerohelisega) vahel. Sinise joonega on tähistatud olulised negatiivsed seosed ($P < 0.05$). Mida paksem ja tumedam on joon, seda olulisem on korrelatsioon. Mulla funktsioonide indikaatorite grupeerimine: Leost. – leostumisega seotud mulla funktsioonide indikaatorid; N-ringe – lämmastikuringega seotud; C-ringe – süsinikuringega seotud; KHG – kasvuhoonegaaside voogudega seotud indikaatorid. LNO_3^- – leostunud nitraat; LTOC – orgaanilise C kogus leostises; LTON – orgaanilise N kogus leostises; NO_3^- – nitraadi kättesaadavus mullas; NH_4^+ – ammoniumi kättesaadavus mullas; MicN – mikroobne N mullas; Nmin – N mineralisatsiooni määr; MicC – mikroobne C mullas; DOC – lahustunud orgaaniline C; Resp – basaalse mullahingamine; indutseeritud mullahingamine eri substraatidega: cy – tsüsteiiniga; am – aminobutaanhappega; tr – trehhaloosiga; ly – lüsiiniga; gl – glükoosiga; ma – õunhappega; al –alaniiniga. MF – multifunktsionaalsuse indeks. Taimetunnuste jaotus: Aboveground – maa-pealsed; Belowground – maa-alused tunnused. Arb% – arbuskulite osakaal; Hyp% – hüüfide osakaal; RD – juure keskmine läbimõõt; SRA – juure eripindala; SRL – juure eripikkus; RTD – juure koetihedus; RC – juure süsiniku sisaldus; RN – juure lämmastiku sisaldus; RM – taime maa-aluse biomassi kuivkaal; SLA – lehe eripindala; LDMC – lehe kuivaine sisaldus; LC – lehe süsiniku sisaldus; LN – lehe lämmastiku sisaldus; SM – taime maa-pealse biomassi kuivkaal.

4. Arutelu

Kuna mulla funktsioonid on aluseks põllumajanduse jätkusuutlikkusele, on toidu turvalisuse saavutamiseks oluline tagada põllumulla hea kvaliteet ehk jätkusuutlik toimimine tervikliku ökosüsteemina (Kopittke et al., 2019; Pereira et al., 2018; Zhang et al., 2007). See võib tähendada, et hea kvaliteedi saavutamiseks on vaja parandada või toetada konkreetselt mõne üksiku mulla funktsiooni toimimist, mille puhul ei vasta funktsiooni peegeldav indikaator veel soovitud tasemele. Sellisel juhul võiks kvaliteedi saavutamist toetada põllukultuuri teadlik valik. Käesolevas töös läbiviidud katses mõõtsin mulla funktsioonide indikaatoreid ja taimetunnuseid, et uurida, kuidas taimed mõjutavad mulla funktsioone ja multifunktsionaalsust nii põllukultuuri kui taimetunnuste tasandil. Mulla funktsiooni indikaatoreid mõõtsin nelja mulla funktsiooni puhul: vee regulatsioon ja puhastusvõime ehk leostumisega seotud indikaatorid, lämmastikuringega seotud indikaatorid, süsinikuringega seotud indikaatorid ja kliima regulatsioon ehk kasvuhoonegaasidega seotud indikaatorid. Täpsemalt otsisin vastust neljale uurimisküsimusele.

4.1 Põllukultuuride mõju mulla funktsioonidele

Esimese uurimisküsimuse raames soovisin kontrollida, kas põllukultuurid üldse mõjutavad mulla funktsioone. Käesoleva töö tulemuste põhjal selgus, et põllukultuurid mõjutasid kõikide uuritud mulla funktsioonide tüüpide ehk nii leostumise-, lämmastikuringe-, süsinikuringe- kui kasvuhoonegaasidega seotud mulla funktsioonide indikaatoreid. See läheb hästi kokku varasemate teadustöödega, kus on tõestatud, et taimedel on oluline mõju individuaalsetele mulla funktsioonidele, näiteks leostumise vähendamisele ja süsiniku sidumisele (Fernandez Pulido et al., 2025; Mathew et al., 2020). Saadud tulemused viitavad laiemalt sellele, et põllukultuuridel on oluline roll mulla üldise funktsioneerimise tagamisel ning seega tasub mulla hea kvaliteedi saavutamiseks põllukultuuride täpsemat mõju põhjalikumalt uurida.

Esimese uurimisküsimusega soovisin samuti hinnata, kuidas mulla funktsioonidele avaldatud mõju erineb olenevalt mullas kasvavast põllukultuurist. Üldiselt saab tulemuste põhjal öelda, et individuaalsetele mulla funktsiooni indikaatoritele avaldatud mõju olenes mullal kasvatatud põllukultuurist. Vaadatud indikaatorite puhul olid mõned kultuurid mulla funktsioonide toetamisel ja parandamisel edukamad kui teised. Seega, kui on vaja parandada mõnda konkreetset mulla funktsiooni, saaks seda teha ökoloogilisemalt sobiva põllukultuuri valiku kaudu. Süsinikuringe indikaatoritest oli kõige suurem mikroobne süsiniku sisaldus ehk mullaorganismide rohkus *F. pratense* ja galeega pottide puhul. See näitab, et süsiniku ajutine

talletumine mullas oli nende taimede puhul suurim. See on kasulik mulla kvaliteedi jaoks, sest see toetab mulla elustikku ja tõstab orgaanilise aine sisaldust (Moebius-Clune et al., 2016; Palm et al., 2014). Seega saaks nende kultuuride kasvatamisega toetada mulla süsinikuringe funktsiooni ja parandada mulla viljakust.

Samas ei läinud kõik seosed konkreetsete kultuuride ja mulla funktsioonide vahel kokku varasemalt leitud seaduspärasustega sugukondade tasandil. Näiteks leostumisega seotud indikaatorite hulgast vaadati täpsemalt leostunud nitraadi kogust. Selgus, et kultuurid, mis vähendasid leostumist kõige paremini olid tritikale, tatar, kaer, päevalill, spelta, oder, kanep ja rukis. Varasemalt on leitud, et lämmastiku leostumist vähendavad efektiivsemalt sügavamate juurte ja kiirema kasvuga kultuurid, eriliselt just ristöielised ja kõrrelised (Fernandez Pulido et al., 2025; Nouri et al., 2022). Seega on arusaadav, miks tulemustes oli parimate leostumist vähendavate kultuuride seas palju just kõrrelisi. Samas eriti suurte juurtega kõrreline sorgo ning ristöieliste hulka kuuluv raps ei vähendanud oluliselt leostumist võrreldes taimedeta mullaga. Järelikult võivad funktsioonidele avaldatud mõju puhul määravaks osutuda pigem üksikule põllukultuurile omased kindlad taimetunnused ja põllukultuuri mõju ei saa ainult fülogeneesi põhjal, antud juhul sugukonna alusel, edukalt ennustada. See läheb kokku varasemate teadustööde järeldustega, kus näidati, et ainult sugukonna alusel ei saa ennustada kattekultuuri mõju lämmastiku leostumisele (Fernandez Pulido et al., 2025). Selleks, et kontrollida seoste esinemist sugukonna tasandil võiks edaspidi katsetes kasvatada rohkem sama sugukonda kuuluvaid taimi.

4.2 Põllukultuuride multifunktsionaalsus

Kui soov on aga tagada mulla parem kvaliteet laiemalt ehk toetada mitmeid mulla funktsioone samaaegselt, tuleks keskenduda mulla multifunktsionaalsusele. Teise uurimisküsimuse raames soovisin vaadata, kuidas uuritud põllukultuurid erinevad oma multifunktsionaalsuse poolest. Läbiviidud katses indikeeris kõrge multifunktsionaalsuse indeks, et põllukultuur suudab paralleelselt panustada edukalt mitmesse mulla funktsiooni, mis toetavad mulla paremat kvaliteeti. Sellisel moel defineeritud multifunktsionaalsus on võimalik, kui lõivsuhteid erinevate kasulike funktsioonide vahel on vähe. Kui ühe funktsiooni suurem positiivne mõju korreleeruks teise funktsiooni negatiivse mõjuga, oleks kokkuvõttes ühine panus multifunktsionaalsusesse neutraalne. Näiteks käesolevas töös korreleerus suurem lämmastiku mineralisatsiooni määr ja mikroobne biomass, mis on põllumulla kvaliteedi tagamisel olulised (Moebius-Clune et al., 2016), toitainete suurema leostumisega. Kui selliseid korrelatsioone esineks funktsioonide vahel palju, poleks multifunktsionaalsust üldse võimalik saavutada.

Kuid siin katses mõõdetud indikaatorite vahel oli lõivsuhteid siiski kokkuvõttes vähe ja seega mõni põllukultuur saavutas kõrgema multifunktsionaalsuse kui teised.

Varasemalt on leitud, et põllukultuuridel on erinev mõju mulla multifunktsionaalsusele ning see on seotud ka põllukultuuri fülogeneesiga (Bin et al., 2025; Zhang et al., 2022). Selles töös oli kõige multifunktsionaalsemaks põllukultuuriks tatar. Samuti oli multifunktsionaalsuse indeks kõrgem ka kaera ja rukki puhul. Seega tehtud katse põhjal ei saa ennustada multifunktsionaalsust fülogeneesi alusel. Tulemused ei lähe otseselt kokku varasemalt läbiviidud uurimusega, mis leidis, et kõige multifunktsionaalsemad kultuurid olid liblikõielised ning teraviljade puhul oli multifunktsionaalsus pigem madalam (Bin et al., 2025). Samas kattusid käesoleva ning Bin ja teiste (2025) katses kasvatatud kultuuridest vaid kaer, mais, suvinisu ja sojauba. Lisaks võib selline erinevus konkreetselt tuleneda ka katses kasutatud mullast või multifunktsionaalsuse arvutamiskäigust. Siin töös kasutati multifunktsionaalsuse arvutamisel suuremat hulka mulla funktsioonide indikaatoreid, kaasates muuhulgas ka kasvuhoonegaaside ainevood. Tatal esines kõikide kultuuride võrdluses mõõdetud mulla funktsioonidele kõige sagedasemalt statistiliselt oluline mõju, mis oli stabiilselt hea või siis keskpärane. Sage statistiliselt oluline mõju esines ka kaeral ja rukkil. Seega kõrge multifunktsionaalsus nende kultuuride puhul näitab, et nad panustasid stabiilselt mitmesse erinevasse mulla funktsiooni, olles kooskõlas varasemates teadustöodes leituga (Bin et al., 2025). Kõrge multifunktsionaalsusega kultuuride, näiteks tatra, tuvastamine ja kasutamine võiks aidata parandada mulla kvaliteeti ja multifunktsionaalsust.

4.3 Mulla funktsioonide seos taimetunnustega

Varasemates töödes on järeldatud, et mulla funktsioonide edukaks ennustamiseks ei piisa ainult põllukultuuride valikust fülogeneesi alusel, sest sama sugukonna liikide mõju mulla funktsioonidele võib oluliselt varieeruda (Bin et al., 2025; Fernandez Pulido et al., 2025). Kolmanda uurimisküsimuse raames soovisingi vaadata, kas taime mõju mulla funktsioonidele on võimalik seostada hoopis konkreetsete taimetunnustega. Varasemad uuringud on leidnud seoseid taimetunnuste ja erinevate mulla funktsioonide vahel rohumaade (Cantarel et al., 2015; Fry et al., 2018), poolkõrbeliste ökosüsteemide (Teixeira et al., 2020) ja kattekultuuride puhul (Fernandez Pulido et al., 2025; Zhang et al., 2022). Antud töös leidsin, et seosed taimetunnuste ja mulla funktsioonide vahel esinevad ka põhikultuuridel, mis võimaldab seega taimetunnuste põhjal hinnata mulla funktsioneerimist ja kvaliteeti.

Mõõdetud taimetunnustest oli põllukultuuride biomass ja juure keskmine läbimõõt seotud kõige rohkemate mulla funktsioonide indikaatoritega. Põllukultuuri maapealne ja -alune biomass oli näiteks oluliselt seotud mulla toitainete ringluse ja kliimaregulatsiooni funktsioonidega. Biomassi negatiivne seos mullas oleva NO_3^- sisaldusega viitab sellele, et suuremad taimed omastavad mullas olevaid toitaineid kiiremini. Lisaks oli suurem maapealne biomass seotud ka väiksema leostumisega. See läheb kokku ka varasemalt leitud, kus suurema kasvuga kattekultuurid vähendasid leostumist rohkem (Fernandez Pulido et al., 2025). Samuti leiti siin katses seos, et suurem lehe eripind, mis on iseloomulik kiirele kasvustrateegiaga (Wright et al., 2004), korreleerus mullas madalama toitaine sisaldusega. Seevastu oli väiksema biomassiga taimedel nii mullas suurem NO_3^- sisaldus kui ka suurem eraldunud N_2O kogus. Varasemad uurimistööd on leidnud, et aeglase kasvustrateegiaga võib kaasneda suurem N_2O emissioon, sest üleliigne toitainete sisaldus soodustab denitrifikatsiooni protsessi (Snyder et al., 2009).

Põllukultuuri juure diameeter oli oluliselt seotud näiteks vee regulatsiooni ja puhastusvõime funktsiooni ehk leostumise ning ka süsinikuringega seotud indikaatoritega. Põllukultuuride suurem juure diameeter, mis viitab koostöö spektril suuremale koostööle mükoriisa seentega (Bergmann et al., 2020), oli seotud suurema leostumisega. Samuti leiti negatiivne seos juure eripikkuse ja leostumise vahel, mis viitab sellele, et koostöösse vähem panustavad juured, mis on peenemad ja ulatuvad kaugemale, saavad mullast toitaineid paremini kätte ja vähendavad seeläbi ka leostumist (Bergmann et al., 2020). Samas esines juure diameetri puhul positiivne korrelatsioon mikroobse lämmastiku ja süsiniku sisaldusega, viidates sellele, et jämedamad juured panustavad rohkem koostöösse mullamikroobidega. Samuti esines positiivne korrelatsioon juure diameetri ja arbuskulite ning hüüfide osakaalu vahel. See tähendab, et sümbioosi panustavad põllukultuurid võiksid mitmekesise mullaelustiku kaudu tagada mullas suurema ajutiselt stabiilse süsiniku varu ning mulla viljakuse aluseks oleva orgaanilise aine talletumise (Wu et al., 2024). Varasemalt on sarnast seost leitud aeglase kasvustrateegiaga kattekultuuride puhul, mis toetasid mullas keerukamaid toiduvõrgustikke ja suuremat elurikkust (Zhang et al., 2022). Kuid koostöö spektri alusel pole taimetunnuste seoseid mulla funktsioonidega varasemalt põllukultuuride puhul vaadatud.

Seega kiirendasid toitaineid kiiremini omastavad põllukultuurid mullas aineringlust ja tõstsid suurema biomassi arvelt ka mulla tootlikust. Mükoriisaga koostöösse panustavad põllukultuurid toetasid rohkem mullaelustikku ja seeläbi süsiniku sidumist mulda, kuid ei vähendanud leostumist. Peenemate ja kaugeleulatuvate juurtega taimed aga, kes on koostöö

spektri teises otsas, vähendasid leostumist. Kultuurtaimede kasvustrateegia ja juurte koostöö spekter on seega paljulubavad mõõdikud mulla funktsioonide hindamiseks, kuid sealseid seoseid tuleks rohkem uurida. Näiteks käesolevas töös ei käsitletud taimede kaitstust kahjurite eest, mis võib kasvustrateegiate vahel oluliselt erineda (Zhang et al., 2022; Reich, 2014). Lähtudes taimetunnustest ja kasvustrateegiatest oleks võimalik vastavalt põllumulla seisukorrale valida mulla kvaliteedi parandamiseks sobivaimad põllukultuurid. Kuid selles katses mõõdeti vaid valitud osa mulla funktsioonide indikaatoritest, mistõttu võib taimetunnuste ja kasvustrateegiate mõju mulla funktsioonidele olla tegelikkuses veelgi laiem. Seega võiks edaspidi mõõta laiemat spektri erinevaid indikaatoreid, et saaks täpsemalt hinnata, kuidas erinevad kasvustrateegiad mulla funktsionaalsust mõjutavad. Käesolevas töös ei mõõdetud näiteks ühtegi füüsikalist mulla funktsiooni indikaatorit, mis peegeldavad olulist külge mulla funktsioneerimisest. Näiteks mulla agregaatide stabiilsus oleks hea mulla struktuuri indikaator ja oluline mulla elustiku tingimuste kujundaja (Kabato et al., 2025).

4.4 Mulla multifunktsionaalsus seoses taimetunnustega

Neljanda uurimisküsimuse raames soovisin hinnata, kas ka multifunktsionaalseid kultuure oleks võimalik tuvastada taimetunnuste alusel. Kuid antud katse põhjal leiti, et ükski uuritud taimetunnusest ei korreleerunud mulla multifunktsionaalsusega. Samas on varasemates teadustöodes näiteks karjamaade ja poolkõrbeliste ökosüsteemide puhul suudetud tuvastada seoseid kõrgema mulla multifunktsionaalsuse ja erinevate taimetunnuste (näiteks lehe eripind, lehe lämmastiku sisaldus, maapealne biomass) vahel (Fry et al., 2018; Peco et al., 2017; Song et al., 2024; Teixeira et al., 2020). Selline vastuolu võib tuleneda sellest, et käesoleva töö katse kestis võrreldes teistega pigem lühikest aega ja seetõttu ei pruukinud taime mõju jõuda mulla funktsioonidele täielikult avalduda. Seega võiks multifunktsionaalsusega seotud tunnuste leidmiseks tulevikus läbi viia pikemaajalise katse. Samuti erinesid katsete puhul ka mõõdetud taimetunnused ja multifunktsionaalsuse arvutuses kasutatud indikaatorid, mis mõjutab otseselt tuvastatud seoseid. Näiteks leidsid Fry ja teised (2018) positiivse seose juure tunnuste ja multifunktsionaalsuse vahel, kuid juure tunnuseid kirjeldati kasvustrateegia tasemel, mitte eraldiseisvate taimetunnustena nagu siin katses.

Käesolevas töös mõõdeti vaid valitud taimetunnuseid ja ei saa välistada, et mõne muu taimetunnuse alusel oleks multifunktsionaalsust siiski võimalik ennustada. Lisaks võib multifunktsionaalsus korreleeruda ka hoopis mõne muu muutujaga, mida siin katses ei uuritud, näiteks põllukultuuride kliimaatiline päritolu või aretus. Läbiviidud katse tulemuste põhjal saab aga öelda, et mulla kvaliteedi parandamise jaoks võiks suurendada põllumulla

multifunktsionaalsust näiteks segaviljeluse kaudu, kus üheskoos kasvaks erinevaid mulla funktsioone parandavad kultuurid, mis on tuvastatud taimetunnuste ja kasvustrateegia alusel. Sellise järelduseni on jõutud ka varasemates töödes, kus leiti, et kultuur üksi ei suuda kõiki mulla funktsioone parandada, aga funktsionaalne mitmekesisus võiks põllul mulla multifunktsionaalsust tõsta (Bin et al., 2025; Finney & Kaye, 2017; Zhang et al., 2022). Samuti saaks mulla multifunktsionaalsust suurendada, kui kasvatada üksikuid kõrgema multifunktsionaalsusega põllukultuure, näiteks käesoleva töö alusel tatart.

Kokkuvõte

Mulla funktsioonid on inimkonnale väga olulise tähtsusega, olles aluseks toidu tootmise ökosüsteemiteenusele. Kasvava rahvaarvuga kaasnev põllumajanduse intensiivistumine paneb muldade pakutavad teenused aga ohtu, sest muld hakkab degradeeruma. Tagajärjena langeb põllumuldade kvaliteet ehk võimekus funktsioneerida ühtse ökoloogilise tervikuna. Selleks, et saavutada toiduturvalisus, on vaja tagada põllumuldade hea tervis, mida saab kontrollida erinevate mulla funktsiooni indikaatorite alusel. Taimedel on oluline roll mulla ökoloogilises funktsioneerimises, sest nad mõjutavad mulla funktsioonide kulgu nii fülogeneesi kui taimetunnuste alusel. Samuti mõjutavad taimed mulla nn. multifunktsionaalsust ehk mulla võimekust pakkuda samaaegselt mitmeid erinevaid ökosüsteemiteenuste aluseks olevaid funktsioone. Seega on põllukultuuri valikul suur potentsiaal turgutada agroökosüsteemides mulla funktsioneerimist ja vähendada seeläbi degradatsiooni.

Käesoleva töö eesmärk oli uurida, kuidas põllukultuurid ja nende konkreetsete taimetunnused mõjutavad üksikuid mulla funktsioone ja multifunktsionaalsust, et põllukultuuri valiku alusel oleks tulevikus võimalik suunata mulla funktsioneerimist. Selgus, et põllukultuurid mõjutasid kõiki uuritud mulla funktsioone ehk vee regulatsiooni ja puhastusvõimet, lämmastikuringet, süsiniku ringlust mullas ning kliima regulatsiooni ehk kasvuhoonegaaside vooge. Konkreetsetele mulla funktsioonidele avaldatud mõju olenes mullal kasvatatud põllukultuurist, seega saab põllukultuuri teadliku valikuga suunata mulla funktsioneerimist. Samuti erines kasvatatud põllukultuuride vahel ka mulla multifunktsionaalsus ja kõige multifunktsionaalsem kultuur oli tatar, mille kasvatamine aitaks parandada mulla kvaliteeti. Samas selgus, et individuaalseid mulla funktsioone ja multifunktsionaalsust ei saanud fülogeneesi ehk antud juhul sugukonna alusel ennustada. See-eest esinesid seosed põllukultuuride taimetunnuste ja mulla funktsioonide vahel. Näiteks juure tunnused, mis viitasid toitainete iseseisvale omastamisele, vähendasid toitainete leostumist, samas kui juure tunnused, mis viitasid koostööle mükoriisaseentega, toetasid mulla elustikku ja suurendasid süsiniku sidumist mulda. Taimetunnused tunduvad head mõõdikud mulla funktsioonide ennustamiseks, kuid põllukultuuride mõju mulla multifunktsionaalsusele polnud nende alusel võimalik ennustada.

Summary

Soil functions are the foundation for the food production ecosystem service in agroecosystems and are therefore essential to human well-being. However, the intensification of agriculture driven by rapid population growth is placing increasing pressure on soils and leading to their degradation. As a result, the quality of agricultural soils and their ability to function as complete ecological systems is declining. Ensuring soil health is therefore critical for achieving food security and can be monitored through various indicators of soil functions. Plants play an important role in the ecological functioning of soils, as they influence soil processes through both their phylogeny and functional traits. In addition, plants also influence soil multifunctionality which refers to the ability of soils to supply many soil functions simultaneously. Consequently, the selection of crop species has a significant potential to support soil functioning in agroecosystems and help reduce soil degradation.

The aim of this BSc thesis was to investigate how crops and their specific traits influence both individual soil functions and overall soil multifunctionality, with the broader goal of supporting the sustainable management of soil functioning through crop selection. The findings demonstrated that crop species influenced all studied soil functions including water regulation and purification, nitrogen cycling, carbon cycling and climate regulation. The effects on individual soil functions varied among crops, suggesting that soil functioning can indeed be directed through carefully considered crop selection. Furthermore, crop species differed in their effects on soil multifunctionality, with buckwheat presenting highest levels of multifunctionality among the studied crops. However, neither individual soil functions nor multifunctionality could be explained by plant taxonomy alone. Instead, plant traits had a more significant effect on soil functions. For example, root traits linked to independent resource acquisition reduced nutrient leaching while root traits associated with mycorrhizal collaboration supported soil microbial communities and enhanced carbon sequestration. These findings suggest that plant traits are useful predictors of individual soil functions, although they were not sufficient to predict overall soil multifunctionality.

Tänuõnad

Soovin tänada oma juhendajaid, kes olid töö tegemisel väga suureks toeks. Aitäh Marina Semtšenko, tänu kellele mul oli võimalik teha oma bakalaureusetöö minu jaoks nii huvitaval teemal ja viia selle raames läbi ka põnev katse. See on olnud väga tänuväärne ja arendav kogemus minu bakalaureuseõpingutes. Aitäh Kadri Koorem, kes aitas mul paika panna töö täpsema fookuse ja andis head nõu ja tuge töö kirjutamisel.

Samuti soovin eraldi tänada Miinat, kes oli alati abivalmis, vastas kõigile mu muredele ning kelle juhendamine ja töö olid suureks abiks katse laboratoorses osas. Suur tänu ka ülejäänud Evolutsioonilise taimeökoloogia töörühmale, tänu kelle panusele oli mul võimalik oma töös käsitleda nii palju erinevaid meetodeid ja kogutud andmeid. Aitäh ka John Davison, kelle kirjutatud koodi abil oli mul võimalik kasutada analüüsis multifunktsionaalsuse indeksit ja koostada korrelatsioonimaatriks.

Kindlasti soovin tänada ka Maaelu Teadmuskeskuse poolseid inimesi, kes Ilmar Tamme juhendamisel olid katse ülespanemisel ja taimede kasvatamisel suureks abiks. Lisaks ka geograafia osakonna Maastiku aineringete ja ökotehnoloogia töörühma kasvuhoonegaaside ainevoogude mõõtmise eest.

Suur aitäh ka minu perele ja sõpradele, kes olid alati olemas ja nõus alatasa minu lõputööteemalisi jutte kuulama.

Rahastuse eest avaldan tänu Euroopa Komisjonile (ERC grant PlantSoilAdapt, 101044424), Eesti Haridus- ja Teadusministeeriumile (teaduse tippkeskus „Agroökoloogia ja uued kultuurid tulevikukliimas“) ja Eesti teadusagentuurile (PRG 1836).

Kirjanduse loetelu

- Anthony, M. A., Bender, S. F., & Van Der Heijden, M. G. A. (2023). Enumerating soil biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(33), e2304663120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>
- Ashraf, M., Othman, R., & Ishak, C. (Eds.). (2017). *Soils of Malaysia*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315277189>
- Astover, A., Kölli, R., Roostalu, H., Reintam, E., & Leedu, E. (2012). *Mullateadus. Õpik kõrgkoolidele*. Eesti Maaülikool.
- Banwart, S. A., Nikolaidis, N. P., Zhu, Y.-G., Peacock, C. L., & Sparks, D. L. (2019). Soil Functions: Connecting Earth's Critical Zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1), 333–359. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020544>
- Bayer, C., Gomes, J., Vieira, F. C. B., Zanatta, J. A., De Cássia Piccolo, M., & Dieckow, J. (2012). Methane emission from soil under long-term no-till cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 124, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.006>
- Bergmann, J., Weigelt, A., Van Der Plas, F., Laughlin, D. C., Kuyper, T. W., Guerrero-Ramirez, N., Valverde-Barrantes, O. J., Bruelheide, H., Freschet, G. T., Iversen, C. M., Kattge, J., McCormack, M. L., Meier, I. C., Rillig, M. C., Roumet, C., Semchenko, M., Sweeney, C. J., Van Ruijven, J., York, L. M., & Mommer, L. (2020). The fungal collaboration gradient dominates the root economics space in plants. *Science Advances*, 6(27), eaba3756. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba3756>
- Bin, Z., Van Der Putten, W. H., Wang, G., Zhang, J., & Veen, G. F. (Ciska). (2025). Effects of crop species on soil functions and soil multifunctionality are species-specific. *Functional Ecology*, 39(9), 2354–2369. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.70089>
- Blum, W. E. H. (2005). Functions of Soil for Society and the Environment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 4(3), 75–79. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-2236-x>
- Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2016). *Scheffer/Schachtschabel Soil Science*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30942-7>
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., Kunhikrishnan, A., James, T., McDowell, R., & Senesi, N. (2011). Dissolved Organic Matter. In *Advances in Agronomy* (Vol. 110, pp. 1–75). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385531-2.00001-3>
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Brookes, P. C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D. S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6), 837–842. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., De Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Butterbach-Bahl, K., Willibald, G., & Papen, H. (2002). Soil core method for direct simultaneous determination of N₂ and N₂O emissions from forest soils. *Plant and Soil*, 240(1), 105–116. <https://doi.org/10.1023/A:1015870518723>
- Cantarel, A. A. M., Pommier, T., Desclos-Theveniau, M., Diquélou, S., Dumont, M., Grassein, F., Kastl, E.-M., Grigulis, K., Laine, P., Lavorel, S., Lemauiel-Lavenant, S., Personeni, E., Schlöter, M., & Poly, F. (2015). Using plant traits to explain plant–microbe relationships involved in nitrogen acquisition. *Ecology*, 96(3), 788–799. <https://doi.org/10.1890/13-2107.1>

- Carter, M. R., Gregorich, E. G., Anderson, D. W., Doran, J. W., Janzen, H. H., & Pierce, F. J. (1997). Chapter 1 Concepts of soil quality and their significance. In *Developments in Soil Science* (Vol. 25, pp. 1–19). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80028-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80028-1)
- Carter, M. R., Gregorich, E. G., Angers, D. A., Beare, M. H., Sparling, G. P., Wardle, D. A., & Voroney, R. P. (1999). Interpretation of microbial biomass measurements for soil quality assessment in humid temperate regions. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(4), 507–520. <https://doi.org/10.4141/S99-012>
- Chao, A., Chiu, C., Hu, K., Van Der Plas, F., Cadotte, M. W., Mitesser, O., Thorn, S., Mori, A. S., Scherer-Lorenzen, M., Eisenhauer, N., Bässler, C., Delory, B. M., Feldhaar, H., Fichtner, A., Hothorn, T., Peters, M. K., Pierick, K., Von Oheimb, G., & Müller, J. (2024). Hill–Chao numbers allow decomposing gamma multifunctionality into alpha and beta components. *Ecology Letters*, 27(1), e14336. <https://doi.org/10.1111/ele.14336>
- Creamer, R. E., Barel, J. M., Bongiorno, G., & Zwetsloot, M. J. (2022). The life of soils: Integrating the who and how of multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108561. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108561>
- Csárdi, G., & Nepusz, T. (2006). The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems*, 1695. <https://igraph.org/>
- Dayoub, E., Naudin, C., Piva, G., Shirliff, S. J., Fustec, J., & Corre-Hellou, G. (2017). Traits affecting early season nitrogen uptake in nine legume species. *Heliyon*, 3(2), e00244. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00244>
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F. T., Reich, P. B., Jeffries, T. C., Gaitan, J. J., Encinar, D., Berdugo, M., Campbell, C. D., & Singh, B. K. (2016). Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 7(1), 10541. <https://doi.org/10.1038/ncomms10541>
- Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J. H. C., Wright, I. J., Lavorel, S., Dray, S., Reu, B., Kleyer, M., Wirth, C., Colin Prentice, I., Garnier, E., Bönisch, G., Westoby, M., Poorter, H., Reich, P. B., Moles, A. T., Dickie, J., Gillison, A. N., Zanne, A. E., ... Gorné, L. D. (2016). The global spectrum of plant form and function. *Nature*, 529(7585), 167–171. <https://doi.org/10.1038/nature16489>
- Dominati, E., Mackay, A., Green, S., & Patterson, M. (2014). A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. *Ecological Economics*, 100, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.008>
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858–1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Eds.), *SSSA Special Publications* (1st ed., Vol. 35, pp. 1–21). Wiley. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>
- Doran, J. W. & Safley, M. (1997). Defining and Assessing Soil Health and Sustainable Productivity. In *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International.
- Ekins, P., Simon, S., Deutsch, L., Folke, C., & De Groot, R. (2003). A framework for the practical application of the concepts of critical natural capital and strong sustainability. *Ecological Economics*, 44(2–3), 165–185. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00272-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00272-0)
- Eldor A. Paul. (2007). *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-02816-5>
- Eldridge, D. J., Delgado-Baquerizo, M., Quero, J. L., Ochoa, V., Gozalo, B., García-Palacios, P., Escolar, C., García-Gómez, M., Prina, A., Bowker, M. A., Bran, D. E., Castro, I., Cea, A., Derak, M., Espinosa, C. I., Florentino, A., Gaitán, J. J., Gatica, G., Gómez-González, S., ... Maestre, F. T. (2020). Surface indicators are correlated with soil multifunctionality in global

- drylands. *Journal of Applied Ecology*, 57(2), 424–435. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13540>
- Environmental Degradation and Human Well-Being: Report of the Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Population and Development Review*, 31(2), 389–398. <https://doi.org/10.1111/j.1728-4457.2005.00073.x>
- European Commission. (2021, November 17). *EU Soil Strategy for 2030: Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate* [Communication (COM(2021) 699 final)]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0699>
- European Parliament and Council of the European Union. (2025). *Directive (EU) 2025/2360 on soil monitoring and resilience (Soil Monitoring Law)* (Directive (EU) 2025/2360). Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202502360
- Faucon, M.-P., Houben, D., & Lambers, H. (2017). Plant Functional Traits: Soil and Ecosystem Services. *Trends in Plant Science*, 22(5), 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.01.005>
- Fernandez Pulido, C. R., Rasmussen, J., Eriksen, J., & Abalos, D. (2025). Cover crops for nitrogen loss reductions: Functional groups, species identity and traits. *Plant and Soil*, 507(1–2), 127–140. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05895-x>
- Finney, D. M., & Kaye, J. P. (2017). Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system. *Journal of Applied Ecology*, 54(2), 509–517. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12765>
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O’Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Fresco, L. O. (1997). The 1996 world food summit. *Global Environmental Change*, 7(1), 1–3. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(96\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(96)00051-9)
- Fry, E. L., Savage, J., Hall, A. L., Oakley, S., Pritchard, W. J., Ostle, N. J., Pywell, R. F., Bullock, J. M., & Bardgett, R. D. (2018). Soil multifunctionality and drought resistance are determined by plant structural traits in restoring grassland. *Ecology*, 99(10), 2260–2271. <https://doi.org/10.1002/ecy.2437>
- Hansen, B., Kristensen, E. S., Grant, R., Høgh-Jensen, H., Simmelsgaard, S. E., & Olesen, J. E. (2000). Nitrogen leaching from conventional versus organic farming systems—A systems modelling approach. *European Journal of Agronomy*, 13(1), 65–82. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00060-5)
- Haygarth, P. M., & Ritz, K. (2009). The future of soils and land use in the UK: Soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy*, 26, S187–S197. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.016>
- Hood-Nowotny, R., Umana, N. H.-N., Inselbacher, E., Oswald- Lachouani, P., & Wanek, W. (2010). Alternative Methods for Measuring Inorganic, Organic, and Total Dissolved Nitrogen in Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 74(3), 1018–1027. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0389>
- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1), 35–46. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>
- Joergensen, R. G. (1996). The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the kEC value. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(1), 25–31. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00102-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00102-6)

- Kabato, W., Hailegnaw, N., Mutum, L., & Molnar, Z. (2025). Managing soil health for climate resilience and crop productivity in a changing environment. *Science of The Total Environment*, 1000, 180460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180460>
- Keesstra, S., Geissen, V., Mosse, K., Piirainen, S., Scudiero, E., Leistra, M., & Van Schaik, L. (2012). Soil as a filter for groundwater quality. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.007>
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685–701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Kremsa, V. Š. (2021). Sustainable management of agricultural resources (agricultural crops and animals). In *Sustainable Resource Management* (pp. 99–145). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824342-8.00010-9>
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Li, X., Qiao, L., Huang, Y., Li, D., Xu, M., Ge, T., Meersmans, J., & Zhang, W. (2023). Manuring improves soil health by sustaining multifunction at relatively high levels in subtropical area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 353, 108539. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108539>
- Lima, A. C. R., Brussaard, L., Totola, M. R., Hoogmoed, W. B., & De Goede, R. G. M. (2013). A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. *Applied Soil Ecology*, 64, 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.12.009>
- Mathew, I., Shimelis, H., Mutema, M., Minasny, B., & Chaplot, V. (2020). Crops for increasing soil organic carbon stocks – A global meta analysis. *Geoderma*, 367, 114230. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114230>
- Mausel, P. W. (1971). SOIL QUALITY IN ILLINOIS—AN EXAMPLE OF A SOILS GEOGRAPHY RESOURCE ANALYSIS*. *The Professional Geographer*, 23(2), 127–136. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1971.00127.x>
- McBratney, Alex. B., & Hartemink, A. E. (2024). Define soil. *Soil Security*, 14, 100135. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100135>
- McGONIGLE, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L., & Swan, J. A. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular—Arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115(3), 495–501. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x>
- Moebius-Clune, B. N., D.J. Moebius-Clune, B.K. Gugino, O.J. Idowu, R.R. Schindelbeck, A.J. Ristow, H.M. van Es, J.E. Thies, H.A. Shayler, M.B. McBride, K.S.M Kurtz, D.W. Wolfe, & G.S. Abawi. (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edition 3.2* (3.2). Cornell University.
- Moore, E. B., De, M., Nunes, M. R., Saha, D., Jin, V., Li, L., Johnson, J. M. F., Karlen, D. L., & McDaniel, M. D. (2025). Connections between roots and soil health across agriculture management practices. *Plant and Soil*, 514(1), 131–151. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07367-w>
- Nielsen, M. N., Winding, A., Binnerup, S., Hansen, B. M., Hendriksen, N. B., & Kroer, N. (2002). *Microorganisms as Indicators of Soil Health* (NERI Technical Report Vol. 388). National

- Environmental Research Institute.
http://www.dmu.dk/1_viden/2_Publikationer/3_fagrapporter/rapporter/FR388.pdf
- Nortcliff, S. (2002). Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 161–168. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00253-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00253-5)
- Nouri, A., Lukas, S., Singh, S., Singh, S., & Machado, S. (2022). When do cover crops reduce nitrate leaching? A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 28(15), 4736–4749. <https://doi.org/10.1111/gcb.16269>
- Nyle C. Brady. (1990). *The nature and properties of soils* (Tenth edition). Macmillan.
- O'Brien, J. A., Vega, A., Bouguyon, E., Krouk, G., Gojon, A., Coruzzi, G., & Gutiérrez, R. A. (2016). Nitrate Transport, Sensing, and Responses in Plants. *Molecular Plant*, 9(6), 837–856. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.05.004>
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>
- Pankhurst, C. E. (Ed.). (1998). *Biological indicators of soil health* (repr). CAB Internat.
- Pankhurst, C. E., Doube, B. M., & V. V. S. R. Gupta. (1997). Biological indicators of soil health: Synthesis. In *Biological indicators of soil health*. CAB International.
- Peco, B., Navarro, E., Carmona, C. P., Medina, N. G., & Marques, M. J. (2017). Effects of grazing abandonment on soil multifunctionality: The role of plant functional traits. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 249, 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.013>
- Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., & Brevik, E. C. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>
- Posit team. (2026). *RStudio: Integrated Development Environment for R* (Version 2026.01.1+403) [Arvutitarkvara]. Posit Software, PBC. <https://posit.co/>
- Powlson, D. S., Whitmore, A. P., & Goulding, K. W. T. (2011). Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 62(1), 42–55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x>
- Quijas, S., & Balvanera, P. (2013). Biodiversity and Ecosystem Services. In *Encyclopedia of Biodiversity* (pp. 341–356). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00349-X>
- R Core Team. (2026). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Reich, P. B. (2014). The world-wide ‘fast–slow’ plant economics spectrum: A traits manifesto. *Journal of Ecology*, 102(2), 275–301. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12211>
- Rinot, O., Levy, G. J., Steinberger, Y., Svoray, T., & Eshel, G. (2019). Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Science of The Total Environment*, 648, 1484–1491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259>
- Robertson, G. P., & Grace, P. R. (2004). Greenhouse Gas Fluxes in Tropical and Temperate Agriculture: The need for a Full-Cost accounting of Global Warming Potentials. *Environment, Development and Sustainability*, 6(1–2), 51–63. <https://doi.org/10.1023/B:ENVI.00000003629.32997.9e>
- Robinson, D. A., Fraser, I., Dominati, E. J., Davíðsdóttir, B., Jónsson, J. O. G., Jones, L., Jones, S. B., Tuller, M., Lebron, I., Bristow, K. L., Souza, D. M., Banwart, S., & Clothier, B. E. (2014). On the Value of Soil Resources in the Context of Natural Capital and Ecosystem Service Delivery. *Soil Science Society of America Journal*, 78(3), 685–700. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.01.0017>
- Robinson, D. A., Hockley, N., Cooper, D. M., Emmett, B. A., Keith, A. M., Lebron, I., Reynolds, B., Tipping, E., Tye, A. M., Watts, C. W., Whalley, W. R., Black, H. I. J., Warren, G. P., & Robinson, J. S. (2013). Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate

- soils framework as a basis for valuation. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 1023–1033. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.09.008>
- Robinson, D. A., Jackson, B. M., Clothier, B. E., Dominati, E. J., Marchant, S. C., Cooper, D. M., & Bristow, K. L. (2013). Advances in Soil Ecosystem Services: Concepts, Models, and Applications for Earth System Life Support. *Vadose Zone Journal*, 12(4), 1–13. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.01.0027>
- Romero, F., Labouyrie, M., Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., Tedersoo, L., Bahram, M., Eisenhauer, N., Sünemann, M., Guerra, C. A., Tao, D., Rog, I., Jiao, S., Mocali, S., Rillig, M. C., Lehmann, A., Delgado-Baquerizo, M., & Van Der Heijden, M. G. A. (2025). The soil microbiome as an indicator of ecosystem multifunctionality in European soils. *Nature Communications*, 17(1), 705. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67353-9>
- Saggar, S., Jha, N., Deslippe, J., Bolan, N. S., Luo, J., Giltrap, D. L., Kim, D.-G., Zaman, M., & Tillman, R. W. (2013). Denitrification and N₂O:N₂ production in temperate grasslands: Processes, measurements, modelling and mitigating negative impacts. *Science of The Total Environment*, 465, 173–195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.050>
- Scherzinger, F., Schädler, M., Reitz, T., Yin, R., Auge, H., Merbach, I., Roscher, C., Harpole, W. S., Blagodatskaya, E., Siebert, J., Ciobanu, M., Marder, F., Eisenhauer, N., & Quaas, M. (2024). Sustainable land management enhances ecological and economic multifunctionality under ambient and future climate. *Nature Communications*, 15(1), 4930. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48830-z>
- Schlesinger, W. H. (2009). On the fate of anthropogenic nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(1), 203–208. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810193105>
- Schröder, J. J., Schulte, R. P. O., Creamer, R. E., Delgado, A., Van Leeuwen, J., Lehtinen, T., Rutgers, M., Spiegel, H., Staes, J., Tóth, G., & Wall, D. P. (2016). The elusive role of soil quality in nutrient cycling: A review. *Soil Use and Management*, 32(4), 476–486. <https://doi.org/10.1111/sum.12288>
- Schulte, R. P. O., Creamer, R. E., Donnellan, T., Farrelly, N., Fealy, R., O'Donoghue, C., & O'hUallachain, D. (2014). Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture. *Environmental Science & Policy*, 38, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.10.002>
- Sharma, P., Singh, A., Kahlon, C. S., Brar, A. S., Grover, K. K., Dia, M., & Steiner, R. L. (2018). The Role of Cover Crops towards Sustainable Soil Health and Agriculture—A Review Paper. *American Journal of Plant Sciences*, 09(09), 1935–1951. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.99140>
- Shelef, O., Fernández-Bayo, J. D., Sher, Y., Ancona, V., Slinn, H., & Achmon, Y. (2018). Elucidating Local Food Production to Identify the Principles and Challenges of Sustainable Agriculture. In *Sustainable Food Systems from Agriculture to Industry* (pp. 47–81). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811935-8.00002-0>
- Skaalsveen, K., Ingram, J., & Clarke, L. E. (2019). The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in north-western Europe: A literature review. *Soil and Tillage Research*, 189, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.004>
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133(3–4), 247–266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>
- Song, Z., Zuo, X., Hu, Y., Wang, H., Zhang, X., Wang, Z., Qiao, J., Liu, L., & Medina-Roldán, E. (2024). Plant functional traits predict soil multifunctionality under increased precipitation and nitrogen addition in a desert steppe. *CATENA*, 247, 108486. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108486>
- Stuart Chapin Iii, F., McFarland, J., David McGuire, A., Euskirchen, E. S., Ruess, R. W., & Kielland, K. (2009). The changing global carbon cycle: Linking plant–soil carbon dynamics

- to global consequences. *Journal of Ecology*, 97(5), 840–850. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01529.x>
- Summary of European Commission decisions on authorisations for the placing on the market for the use of substances listed in Annex XIV to Regulation (EC) No 1907/2006 (REACH). (n.d.).
- Sünnemann, M., Beugnon, R., Breitzkreuz, C., Buscot, F., Cesarz, S., Jones, A., Lehmann, A., Lochner, A., Orgiazzi, A., Reitz, T., Rillig, M. C., Schädler, M., Smith, L. C., Zeuner, A., Guerra, C. A., & Eisenhauer, N. (2023). Climate change and cropland management compromise soil integrity and multifunctionality. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 394. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01047-2>
- Swerts, M., Uytterhoeven, G., Merckx, R., & Vlassak, K. (1995). Semicontinuous Measurement of Soil Atmosphere Gases with Gas-Flow Soil Core Method. *Soil Science Society of America Journal*, 59(5), 1336–1342. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900050020x>
- Tao, F., Huang, Y., Hungate, B. A., Manzoni, S., Frey, S. D., Schmidt, M. W. I., Reichstein, M., Carvalhais, N., Ciais, P., Jiang, L., Lehmann, J., Wang, Y.-P., Houlton, B. Z., Ahrens, B., Mishra, U., Hugelius, G., Hocking, T. D., Lu, X., Shi, Z., ... Luo, Y. (2023). Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. *Nature*, 618(7967), 981–985. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06042-3>
- Teixeira, L. H., Oliveira, B. F., Krah, F.-S., Kollmann, J., & Ganade, G. (2020). Linking plant traits to multiple soil functions in semi-arid ecosystems. *Journal of Arid Environments*, 172, 104040. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104040>
- Vazquez, C., De Goede, R. G. M., Rutgers, M., De Koeijer, T. J., & Creamer, R. E. (2021). Assessing multifunctionality of agricultural soils: Reducing the biodiversity trade-off. *European Journal of Soil Science*, 72(4), 1624–1639. <https://doi.org/10.1111/ejss.13019>
- Vierheilig, H., Coughlan, A. P., Wyss, U., & Piché, Y. (1998). Ink and Vinegar, a Simple Staining Technique for Arbuscular-Mycorrhizal Fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(12), 5004–5007. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.12.5004-5007.1998>
- Violle, C., Navas, M., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>
- Wade, J., Culman, S. W., Gasch, C. K., Lazcano, C., Maltais-Landry, G., Margenot, A. J., Martin, T. K., Potter, T. S., Roper, W. R., Ruark, M. D., Sprunger, C. D., & Wallenstein, M. D. (2022). Rigorous, empirical, and quantitative: A proposed pipeline for soil health assessments. *Soil Biology and Biochemistry*, 170, 108710. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108710>
- Wang, X., Whalley, W. R., Miller, A. J., White, P. J., Zhang, F., & Shen, J. (2020). Sustainable Cropping Requires Adaptation to a Heterogeneous Rhizosphere. *Trends in Plant Science*, 25(12), 1194–1202. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.07.006>
- Warkentin, B. P. (1995). The changing concept of soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 50(3), 226–228. <https://doi.org/10.1080/00224561.1995.12456954>
- Wei, T., & Simko, V. (2021). R package „corrplot“: Visualization of a Correlation Matrix. <https://github.com/taiyun/corrplot>
- Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org/>
- Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J. H. C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., ... Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428(6985), 821–827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>

- Wu, H., Cui, H., Fu, C., Li, R., Qi, F., Liu, Z., Yang, G., Xiao, K., & Qiao, M. (2024). Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review. *Science of The Total Environment*, 909, 168627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168627>
- Wubs, E. R. J. (2025). Benchmarking soil multifunctionality. *SOIL*, 11(2), 609–628. <https://doi.org/10.5194/soil-11-609-2025>
- Xing, Y., Wang, X., & Mustafa, A. (2025). Exploring the link between soil health and crop productivity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 289, 117703. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117703>
- Yosef, B. A., Basile, A., Coppola, A., Ungaro, F., Zucca, C., & Bancheri, M. (2026). Soil indicators for ecosystem services: A focus on water regulation. *SOIL*, 12(1), 347–369. <https://doi.org/10.5194/soil-12-347-2026>
- Zhang, C., Xue, W., Xue, J., Zhang, J., Qiu, L., Chen, X., Hu, F., Kardol, P., & Liu, M. (2022). Leveraging functional traits of cover crops to coordinate crop productivity and soil health. *Journal of Applied Ecology*, 59(10), 2627–2641. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14264>
- Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K., & Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 64(2), 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024>
- Zheng, Q., Hu, Y., Zhang, S., Noll, L., Böckle, T., Dietrich, M., Herbold, C. W., Eichorst, S. A., Woebken, D., Richter, A., & Wanek, W. (2019). Soil multifunctionality is affected by the soil environment and by microbial community composition and diversity. *Soil Biology and Biochemistry*, 136, 107521. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107521>

Lisad

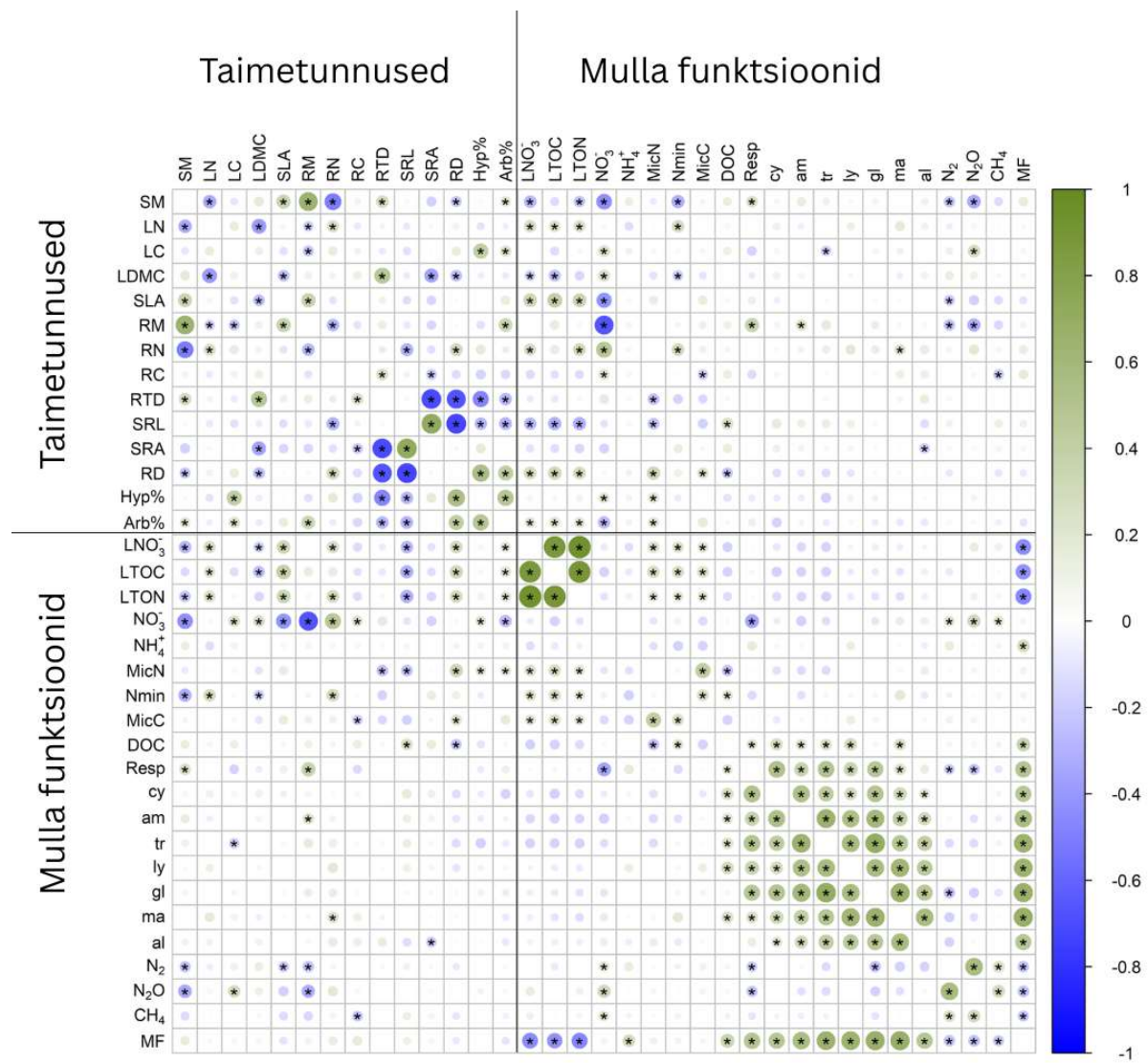
Lisa 1. Põllukultuurid. Tabelis on välja toodud katses kasvatatud 30 põllukultuuri. Punasega on tähistatud need põllukultuurid, mis kõrvaldati katsest ja ei läinud mõõtmisele. Iga kultuuri kohta on välja toodud järgnev informatsioon: sort; külvisse norm põllutingimustes; külvi sügavus (cm); taimede arv potis; ladina keelne nimetus; sugukond.

Kultuur	Sort	Külviseenorm	Külvil sügavus (cm)	Taimi potis	Ladina keelne nimetus	Sugukond
Suvirüisu	Hlie	600 (tera/m2)	2-3	12	harilik nisu (<i>Triticum aestivum</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Spella	Gotland	300 (tera/m2)	2-3	12	speltanisu (<i>Triticum spelta</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Durum nisu	Rosadur	600 (tera/m2)	2-3	12	kõva nisu (<i>Triticum turgidum</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Tritikale	Dublet	600 (tera/m2)	2-3	12	tritikale (nisu x rukis) (<i>Triticosecale</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Oder	Tuuli	500 (tera/m2)	2-3	12	harilik oder (<i>Hordeum vulgare</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Kaer	Kalle	500 (tera/m2)	2-3	12	harilik kaer (<i>Avena sativa</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Mais	Equity,Sunset	5-7 (tera/m2)	2-3	2	harilik mais (<i>Zea mays</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Sorgo	Geenip nr	200-300 (tera/m2)	2-3	4	harilik sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Suvirukis	Ovid, Vergil	500 (tera/m2)	2-3	12	harilik rukis (<i>Secale cereale</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Emmer nisu (lõdne nisu)	Valge emmer	300 (tera/m2)	2-3	12	polbmisu (<i>Triticum turgidum</i> subsp. <i>Dicoccum</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Phleum pratense (põldtimu)	Jõgeva 54	25 (kg/ha)	0.5	20	põldtimu (<i>Phleum pratense</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Festuca pratense (h.aruhein)	Ari	10 (kg/ha)	0.5	20	harilik aruhein (<i>Festuca pratense</i>)	Kõrreliised (<i>Poaceae</i>)
Hernes	Bagoo	120-150 (seemet/m2)	4-6	6	harilik hernes (<i>Pisum sativum</i>)	Liblikõielised (<i>Fabaceae</i>)
Põldubda	Jõgeva	80-120 (seemet/m2)	4-6	4	põldubda (<i>Vicia faba</i>)	Liblikõielised (<i>Fabaceae</i>)
Kikerhernes	Pagomma	80-120 (seemet/m2)	5-7	4	harilik kikerhernes (<i>Cicer arietinum</i>)	Liblikõielised (<i>Fabaceae</i>)
Lääts	Peterburi	60-90 (seemet/m2)	3-5	6	harilik lääts (<i>Lens culinaris</i>)	Liblikõielised (<i>Fabaceae</i>)
Sojauba	Laulena	70-90 (seemet/m2)	3-5	6	põldsoja (<i>Glycine max</i>)	Liblikõielised (<i>Fabaceae</i>)
Suvivikk	Rae kohalik	80-120 (seemet/m2)	3-5	6	suvivikk (<i>Vicia sativa</i>)	Liblikõielised (<i>Fabaceae</i>)
Sinine ehk ahtaleheline lupiin	Borgie	400-500 (seemet/m2)	4-6	12	ahtalehine lupiin (<i>Lupinus angustifolius</i>)	Liblikõielised (<i>Fabaceae</i>)
Punane riistik	Varte	300-500 (seemet/m2)	0.5-1.5	12	aasriitik (<i>Trifolium pratense</i>)	Liblikõielised (<i>Fabaceae</i>)
Galeega e ida kikerhernes	Gale	90-150 (seemet/m2)	0.5-1.5	6	ida-kikerhernes (<i>Galega orientalis</i>)	Liblikõielised (<i>Fabaceae</i>)
Lutsern	Heiti	250-400 (seemet/m2)	0.5-1.5	12	hübriidlutsern (<i>Medicago xvaria</i>)	Liblikõielised (<i>Fabaceae</i>)
Tatar	Alva	250-300 (seemet/m2)	3-5	12	harilik tatar (<i>Fagopyrum esculentum</i>)	Tatralised (<i>Polygonaceae</i>)
Raps	INV 140 CL	70-90 (seemet/m2)	1.5-2.5	4	raps (<i>Brassica napus</i>)	Ristõielised (<i>Brassicaceae</i>)
Kinoa	Titicaca	150-200 (seemet/m2)	1.0	8	išiili hanemalts (<i>Chenopodium quinoa</i>)	Rebasheinaiised (<i>Amaranthaceae</i>)
Maguskartul (bataat)	Erato Vineiland	2-4 (taime)	5-10	1	bataat (<i>Ipomoea batatas</i>)	Kassitapuliised (<i>Convolvulaceae</i>)
Kartul	Tiina	4-6 (mugulat)	20	1	harilik kartul (<i>Solanum tuberosum</i>)	Maavitsaliised (<i>Solanaceae</i>)
Päevalill	Pereodovick	5-7 (seemet/m2)	3-4	4	harilik päevalill (<i>Helianthus annuus</i>)	Korvõielised (<i>Asteraceae</i>)
Sibul	Jõgeva	25-50 (sibulat)	3-5	4	harilik sibul (<i>Allium cepa</i>)	Amarüüliised (<i>Amaryllidaceae</i>)
Kanep	Esitca	60-100 (seemet/m2)	2-4	4	harilik kanep (<i>Cannabis sativa</i>)	Kanepilised (<i>Cannabaceae</i>)

Lisa 2. Põllukultuuri mõju taimetunnustele. Rohelisega on kujutatud maapealsed taimetunnused ning sinisega maa-alused taimetunnused. Esitatud on F-statistik koos vabadusastmetega (F), p-väärtus (P) ja korrigeeritud determinatsioonikordaja (R^2_{adj}). Maapealne BM – taime maapealse biomassi kuivkaal (g); SLA – lehe eripindala; LDMC – lehe kuivaine sisaldus; SRL – juure eripikkus; RTD – juure koetihedus; RD – juure keskmine läbimõõt; SRA – juure eripindala.

Taime tunnus:	F	P	R^2_{adj}
Taimede arv potis	$F_{25,100} = 31.9$	<0.001	0.86
Maapealne BM (g)	$F_{25,101} = 25.96$	<0.001	0.83
SLA (cm ² /g)	$F_{25,100} = 7.01$	<0.001	0.55
LDMC (g)	$F_{25,100} = 25.6$	<0.001	0.8
Lehe N (%)	$F_{25,101} = 21.59$	<0.001	0.36
Lehe C (%)	$F_{25,101} = 2.57$	<0.001	0.24
Juure mass (g)	$F_{25,101} = 25.25$	<0.001	0.83
SRL (cm/mg)	$F_{25,101} = 10.76$	<0.001	0.66
RTD (g/cm ³)	$F_{25,101} = 23.31$	<0.001	0.81
RD (mm)	$F_{25,101} = 47.38$	<0.001	0.9
SRA (cm ² /mg)	$F_{25,101} = 7.61$	<0.001	0.57
Juure N (%)	$F_{25,98} = 35.3$	<0.001	0.87
Juure C (%)	$F_{25,98} = 1.61$	0.051	0.11
Arbuskulid (%)	$F_{25,101} = 8.18$	<0.001	0.59
Hüüfid (%)	$F_{25,101} = 8.00$	<0.001	0.58

Lisa 3. Korrelatsioonid taimetunnuste, mulla funktsioonide indikaatorite ning multifunktsionaalsuse indeksi vahel. Tärniga tähistatud ringidega on näidatud statistiliselt olulised ($P < 0.05$) seosed taimetunnuste vahel, mulla funktsiooni indikaatorite vahel ning taimetunnuste ja mulla funktsiooni indikaatorite vahel. Positiivsed Pearsoni korrelatsioonikordajad on tähistatud rohelisega ja negatiivsed sinisega. Mida tumedam ja suurem on pall, seda tugevam on antud korrelatsioon. Taimetunnused: Arb% – arbuskulite osakaal; Hyp% – hüüfide osakaal; RD – juure keskmine läbimõõt; SRA – juure eripindala; SRL – juure eripikkus; RTD – juure koetihedus; RC – juure süsiniku sisaldus; RN – juure lämmastiku sisaldus; RM – taime maa-aluse biomassi kuivkaal; SLA – lehe eripindala; LDMC – lehe kuivaine sisaldus; LC – lehe süsiniku sisaldus; LN – lehe lämmastiku sisaldus; SM – taime maapealse biomassi kuivkaal. Mulla funktsioonide indikaatorid: LNO_3^- – leostunud nitraat; LTOC – orgaanilise C kogus leostises; LTON – orgaanilise N kogus leostises; NO_3^- – nitraadi kättesaadavus mullas; NH_4^+ – ammooniumi kättesaadavus mullas; MicN – mikroobne N mullas; Nmin – N mineralisatsiooni määr; MicC – mikroobne C mullas; DOC – lahustunud orgaaniline C; Resp – basaalne mullahingamine; indutseeritud mullahingamine eri substraatidega: cy – tsüsteiiniga; am – aminobutaanhappega; tr – trehhaloosiga; ly – lüsiiniga; gl – glükoosiga; ma – õunhappega; al – alaniiniga. MF – multifunktsionaalsuse indeks.



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Helena Tammsaar,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

„Põllukultuuride mõju mulla funktsioonidele“, mille juhendajad on Marina Semtsenko ja Kadri Koorem,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Helena Tammsaar

21.05.2026