

TARTU ÜLIKOOL
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Bioloogia ja ökoinnovatsioon õppekava
Botaanika osakond

**Väetamise, juurte biomassi ja sordi vanuse roll
kaera arbuskulaarse mükoriisa ja teramassi
kujunemisel**

Magistritöö

Ann Inger Kari

Juhendajad:
Inga Hiiesalu-Vahter, PhD
Kaisa Anneli Torppa, PhD

Tartu 2026

INFOLEHT

Väetamise, juurte biomassi ja sordi vanuse roll kaera arbuskulaarse mükoriisa ja teramassi kujunemisel

Käesolevas magistritöös uuriti, kuidas väetustase, sordi registreerimisaasta ja juurte biomass on seotud arbuskulaarse mükoriisa (AM) kujunemise ja teramassiga kaeral (*Avena sativa*). Potikatses võrreldi üheksat eri aegadel registreeritud Eesti kaerasorti madala ja kõrge väetustaseme tingimustes koos AM-seente inokuleerimisega ja ilma selleta.

Tulemused näitasid, et AM kolonisatsioon kaera juurtes oli tõenäolisem madala väetustaseme korral ning vähenes juurte biomassi suurenedes. Sordi registreerimisaasta ei olnud seotud AM hulga muutustega AM-positiivsetes proovides. AM-seente mõju kaera teramassile sõltus nii väetustasemest kui ka sordist. Kõrge väetustaseme korral oli vanemate sortide puhul teramass suurem AM-seente töötluste korral, samas kui uuemate sortide puhul oli teramass suurem kontrolltöötlustes. Madala väetustaseme korral oli teramass kõigi sortide puhul suurem kontrolltöötlustes.

Tulemused viitavad, et AM-seente mõju kaera saagikusele sõltub nii kasvutingimustest kui ka sordi aretusajaloost.

Märksõnad: arbuskulaarne mükoriisa, AM-seened, kaer, *Avena sativa*, väetustase, juurte biomass, teramass, taim–mikroob vastastikmõjud

CERCS teadusala kood: B270 Taimeökoloogia

The role of fertilization, root biomass and cultivar age in shaping arbuscular mycorrhiza and grain mass in oat

This master's thesis investigated how fertilization level, cultivar registration year and root biomass are associated with arbuscular mycorrhiza (AM) formation and grain mass in oat (*Avena sativa*). A pot experiment was conducted using nine Estonian oat cultivars registered in different years under low and high fertilization levels with and without AM fungal inoculation.

The results showed that AM colonization in oat roots was more likely under low fertilization and decreased with increasing root biomass. Cultivar registration year was not associated with variation in AM abundance in AM-positive samples. The effect of AM inoculation on oat grain mass depended on both fertilization level and cultivar registration year. Under high fertilization, older cultivars had higher grain mass with AM inoculation, whereas newer cultivars had higher grain mass without AM inoculation. Under low fertilization, grain mass was higher without AM inoculation across all cultivars.

The results indicate that the effects of AM fungi on oat yield depend on both environmental conditions and breeding history.

Keywords: arbuscular mycorrhiza, AM fungi, oat, *Avena sativa*, root biomass, grain mass, plant-microbe interactions

CERCS research field code: B270 Plant ecology

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Kirjanduse ülevaade	6
1.1 Arbuskulaarne mükoriisa ja selle funktsioonid.....	6
1.2 Domestikatsiooni ja sordiaretuse mõju mükoriisasuhetele.....	7
1.3 Juureomadused ja taimede ressursikasutus	8
1.4 Töö eesmärk ja hüpoteesid.....	8
2. Materjal ja metoodika.....	9
2.1 Kaerasortide valik.....	9
2.2 Potikatsi kirjeldus	9
2.3 Taimede saagikus.....	10
2.4 Mikroskopeerimine.....	10
2.5 Statistiline analüüs.....	10
2.6 Autori panus ja tehisintellekti kasutamine	12
3. Tulemused.....	12
3.1 Juurte biomassi varieerumine	12
3.2 Arbuskulaarse mükoriisa esinemine	14
3.3 Arbuskulaarse mükoriisa hulk AM-positiivsetes proovides.....	15
3.4 Arbuskulaarse mükoriisa inokuleerimise mõju kaera teramassile	16
4. Arutelu.....	17
4.1 Arbuskulaarse mükoriisa esinemine ja hulk.....	18
4.2 AM-töötamise mõju kaera teramassile	19
Kokkuvõte.....	21
Summary.....	22
Tänuõnad	23
Kasutatud kirjandus	24

Sissejuhatus

Kaera (*Avena sativa*) kasvatamine on viimase sajandi jooksul märkimisväärselt muutunud, peegeldades laiemalt põllumajanduse intensiivistumist ja taimearetuse arengut. Kaasaegseid kultuurtaimi, sealhulgas kaera, on selektiivselt aretatud selliste tunnuste jaoks nagu suurem saagikus, haiguskindlus ja ühtlus, samas kui vanemad sordid võivad säilitada omadusi, mis on kujunenud rohkem loodusliku valiku ja madalama sisendiga põllumajandustingimuste mõjul (Tilman, 1982; Martín-Robles et al., 2018; Miao & Lankau, 2023).

Väetamispraktikad, eriti lämmastiku (N) ja fosfori (P) kasutamine, on muutunud intensiivse põllumajanduse keskseks osaks ning võimaldanud märkimisväärselt saagikuse kasvu (Tilman et al., 2002; Zhang et al., 2019). Samas on liigne sõltuvus neist sisenditest tekitanud muret jätkusuutlikkuse, kulude ja keskkonnamõjude pärast (Tilman et al., 2002). Samal ajal on kasvamas huvi kasulike mullaorganismide, eriti arbuskulaarsete mükoriisaseente (AM-seente) rolli vastu taimede toitainete omastamises ja kasvus, kuna need võivad parandada taimede toitumist, eriti toitainetevaestes tingimustes (Read, 1991; Johnson, 2010). Kuigi AM-seente mõju on põhjalikult uuritud mitmete laialtlevinud teraviljade puhul, on kaer võrreldes näiteks nisu ja riisiga jäänud vähem uuritud kultuuriks (Zhang et al., 2019).

Arbuskulaarse mükoriisa sümbioos, mis kujunes koos maismaataimedega enam kui 400 miljonit aastat tagasi (Pirozynski & Malloch, 1975; Brundrett, 2002), on mänginud olulist rolli taimede evolutsioonis, juurestruktuuride ja mulla kujunemises (Johnson, 2010). See iidne vastastikku kasulik suhe mõjutab jätkuvalt taimede talitlust ja ökosüsteemide toimimist, eriti toitainetevaestes tingimustes. Samas võib intensiivsetes põllumajandussüsteemides toimunud selektiivne aretus olla tahtmatult vähendanud kultuurtaimede reageerimisvõimet nendele sümbiootilistele vastastikmõjudele (Rillig & Mummey, 2006).

Varasemad uuringud on näidanud, et kultuurtaimede vastuvõtlikkus arbuskulaarsele mükoriisale sõltub nii liigist, genotüübist kui ka keskkonnatingimustest, eriti mulla toitainete kättesaadavusest (Lehmann et al., 2012; Martín-Robles et al., 2018). Samuti on leitud, et domestikatsioon (metsikute taimede järkjärguline muutumine kultuurtaimedeks inimese valiku tulemusena) ja sordiaretus võivad muuta taimede mükoriisset vastust, kuid need muutused ei ole ühesuunalised ning sõltuvad liigist ja kasvutingimustest (Miao & Lankau, 2023; Li et al., 2024).

Käesoleva töö eesmärk oli testida hüpoteesi, et kaera vastuvõtlikkus arbuskulaarsele mükoriisale väheneb sordi registreerimisaasta suurenedes ning sõltub väetustasemest. Vastuvõtlikkust hinnati mükoriisa esinemise tõenäosuse ja juurte kolonisatsiooni ulatuse põhjal. Lisaks uuriti arbuskulaarse mükoriisa mõju kaera teramassile ning selle sõltuvust sordi registreerimisaastast ja väetustasemest. Täpsemalt käsitleti taimede talitlust tingimustes, kus toitainete kättesaadavus oli madal või kõrge ning AM-seened olid kas olemas või puudusid. Selline lähenemine võimaldab hinnata, kas aretusajalugu on seotud nii mükoriisa kujunemise kui ka taimede saagikusega seotud vastustega ning kas need seosed sõltuvad väetustasemest.

1. Kirjanduse ülevaade

1.1 Arbuskulaarne mükoriisa ja selle funktsioonid

Arbuskulaarne mükoriisa (AM) kuulub kõige iidsemate ja laialdasemalt levinud taime-mikroobi vastastikmõjude hulka, olles koos maismaataimedega koevolutsioneerunud enam kui 400 miljonit aastat tagasi (Pirozynski & Malloch, 1975; Brundrett, 2002). See sümbioos on oluliselt mõjutanud taimede juureehituse, füsioloogia ja mulla kujunemise arengut (Johnson, 2010). Arbuskulaarset mükoriisat moodustavad seened, mis kuuluvad hõimkonda *Glomeromycota*, sõltuvad oma elutsükli läbimiseks peremeestaimest, saades taimelt süsinikku ning pakkudes vastu mineraaltoitaineid, eeskätt fosforit. Nende hüüfivõrgustikud moodustavad olulise osa mulla mikroobsest biomassist ning aitavad kaasa mulla struktuuri kujunemisele ja orgaanilise aine dünaamikale (Olsson et al., 1999; Rillig & Mummey, 2006). AM-seeni on kirjeldatud üle 300 liigi, kuigi tegelik liigirikkus võib olla oluliselt suurem (Öpik et al., 2010; Brundrett & Tedersoo, 2018). Neid iseloomustab vaheseinteta hüüfistik ning taimede juurtes moodustuvad arbuskulid, mis toimivad peamiste toitainete vahetuse struktuuridena taime ja seene vahel. Paljud liigid moodustavad ka vesiikuleid, mida kasutatakse varuainete talletamiseks (Smith & Read, 2008). Mullas moodustavad AM-seened ulatusliku hüüfivõrgustiku ning paljunevad peamiselt mitesuguliselt spooride abil (Brundrett, 2002).

AM-sümbioosi mõju taimedele ei ole siiski universaalselt positiivne ega ühesugune kõigis tingimustes. Kõrge toitainete kättesaadavuse, eriti fosfori rohkuse korral võib mükoriisast saadav kasu väheneda, kuna sümbioosiga seotud süsinikukulu ei pruugi taime jaoks saadavat kasu kompenseerida (Johnson et al., 1997; Johnson, 2010). AM-sümbioosi mõju sõltub mulla toitainete saadavusest, AM-seene liigist ja peremeestaimede genotüübist ning on seetõttu kontekstist sõltuv (Pozo et al., 2020). AM-sümbioosi mõju võib varieeruda mutualismist (mõlemale osapoolale kasulik) kommensalismini (üks osapool saab kasu, teine ei mõjutu) või parasitismini (üks osapool saab kasu teise arvelt) sõltuvalt keskkonnast ja partnerite omadustest (Schwartz & Hoeksema, 1998; Hoeksema & Schwartz, 2003).

Põllumajanduse seisukohalt on oluline, et AM-seened võivad toetada taimede toitainete omastamist ja produktiivsust, eriti madalama sisendiga tingimustes. Lisaks toitainete omastamisele võivad arbuskulaarsed mükoriisaseened parandada taimede veerežiimi, suurendada vastupanu stressile ning mõjutada taimede kaitsemehhanisme patogeenide vastu

(Pozo et al., 2020). Samas ei ole AM-seente mõju saagikusele kõigis süsteemides ühesugune. Siiski on AM-seente põllumajandusliku kasu hindamisel vaja ettevaatust, sest põllukatsetes ei pruugi suurem koloniseeritus alati tähendada suuremat saagikust ning mõju sõltub tugevalt keskkonnast, sordist ja mükoriisaseene kooslusest (Ryan & Graham, 2018). Meta-analüüs seitsme olulise teraviljakultuuriga näitas, et põllutingimustes läbiviidud AM-seente inokulatsiooni katsetes suurenes teraviljade saagikus keskmiselt 16% (Zhang et al., 2019). Lisaks leidsid Zhang et al. (2019), et AM-seente mõju saagikusele oli väiksem uuematel, pärast 1950. aastat aretatud sortidel, mis viitab, et sordiaretus võib olla muutnud kultuurtaimede vastuvõtlikkust mükoriisaseentele. Ühe võimaliku seletusena on pakutud, et vanemad sordid on kujunenud madalama sisendiga tingimustes, samas kui uuemad sordid on aretatud intensiivsema põllumajanduse kontekstis, mis võib mõjutada nende sõltuvust mükoriisast ja vastuvõtlikkust AM-seente inokulatsioonile (Lehmann et al., 2012; Martín-Robles et al., 2018).

1.2 Domestikatsiooni ja sordiaretuse mõju mükoriisasuhetele

Viimastel aastatel on palju tähelepanu pööratud küsimusele, kuidas domestikatsioon ja hilisem sordiaretus on mõjutanud taimede suhteid mükoriisaseentega (Hetrick et al., 1992; Lehmann et al., 2012). Domestikatsiooni (ingl.k. *domestication*) all mõistetakse metsikute taimede järkjärgulist muutumist kultuurtaimedeks inimese valiku tulemusena, samas kui hilisem sordiaretus tähendab juba kultuurtaimede sihipärast aretamist soovitud tunnuste, näiteks suurema saagikuse, haiguskindluse või ühtlasema kasvu suunas (Miao et al., 2023). Võrdlev uuring 27 kultuurliigi ja nende metsikute eellastega näitas, et domestikatsioon on sageli seotud mükoriisa muutumisega ning et see mõju võib sõltuda ka väetusrežiimist (Martín-Robles et al., 2018). Uuemad tööd on näidanud, et domestikatsioon võib vähendada nii mükoriisset kasvuvastust kui ka kolonisatsiooni intensiivsust, näiteks riisil, kus kultiveeritud vormidel olid mõlemad näitajad väiksemad kui metsikutel sugulasvormidel (Li et al., 2024). Samas ei ole domestikatsiooni mõju alati ühesuunaline ning see võib sõltuda liigist, mullatingimustest ja toitainete kättesaadavusest (Miao et al., 2023). Seetõttu ei saa eeldada, et aretusajalugu mõjutab kõiki mükoriisaga seotud tunnuseid samal viisil.

1.3 Juureomadused ja taimede ressursikasutus

Lisaks mulla viljakusele ja genotüübile võivad AM-sümbioosi kujunemist mõjutada ka taime juurte omadused. Viimased käsitlused rõhutavad, et mükoriisaga seotud juuretunnused, nagu juure läbimõõt ja harunemine, on tugeva evolutsioonilise kontrolli all ning seotud taimede ressursiomandamise strateegiatega (Zheng et al., 2024). Juure biomass ja arhitektuur võivad mõjutada seda, mil määral taim omastab toitaineid oma juurte kaudu ning mil määral sümbiootiliste seenpartnerite abil. On näidatud, et sordiaretus võib mõjutada ka teraviljade juureomadusi, sealhulgas juurebiomassi, juurte läbimõõtu, harunemist, juurekarvade arengut ja juurte kasvusügavust. Varasemates uuringutes on leitud, et uuematel sortidel võib olla väiksem juurte biomass ning muutunud juure arhitektuur võrreldes vanemate sortidega (Hetrick et al., 1993; Lynch, 2007). Seetõttu on põhjendatud käsitleda juuretunnuseid võimaliku vahendava mehhanismina mulla viljakuse, AM esinemise ja taimede jõudluse vahel.

1.4 Töö eesmärk ja hüpoteesid

Käesoleva töö eesmärk oli testida hüpoteesi, et kaera vastuvõtlikkus arbuskulaarsele mükoriisale väheneb sordi registreerimisaasta suurenedes ning sõltub väetustasemest. Lähtuti eeldusest, et kõrge väetustase vähendab taimede sõltuvust mükoriisest sümbioosist ning seetõttu võib AM-vastuvõtlikkuse vähenemine uuematel sortidel avalduda tugevamalt kõrge väetustaseme korral. Madala väetustaseme korral võib mükoriisa roll toita inete omastamisel olla suurem, mistõttu võivad erinevused vanemate ja uuemate sortide vahel olla väiksemad või avalduda teistsuguse muustrina. Kaera vastuvõtlikkust AM-le hinnati kaera juurte mükoriisa kolonisatsiooni ulatuse põhjal. Lisaks uuriti arbuskulaarse mükoriisa mõju kaera teramassile ning selle sõltuvust sordi registreerimisaastast ja väetustasemest. Samuti analüüsiti juurte biomassi kui võimalikku juuretunnust, mis võib olla seotud nii mükoriisa kujunemise kui ka taimede ressursikasutusstrateegiatega. Töö eesmärk oli hinnata, kas aretusajalugu ja kasvutingimused kujundavad mükoriisa, juureomaduste ja taime talitluse vahelisi seoseid.

2. Materjal ja metoodika

2.1 Kaerasortide valik

Uurimiseks valiti üheksa eri aastatel registreeritud kaerasorti: 'Kehra varajane' (1927), 'Jõgeva Agu' (1937), 'Hämarik' (1952), 'Viker' (1975), 'Alo' (1986), 'Jaak' (1995), 'Kalle' (2011), 'Kusta' (2016) ja 'Ruudi' (2026). Kõik sordid on aretatud Eestis.

2.2 Potikatsse kirjeldus

Katsse viidi läbi Maaelu Teadmuskeskuse kasvuhoones Jõgeval (58.7622° N, 26.3978° E). Kõigis 1-liitristes pottides kasutati ühesugust kasvusubstraati, mis koosnes 4,5 dl gamma-kiiritatud põllumullast ja 4,5 dl steriliseeritud liivast (0,6–2 mm). AM-töötluseks lisati pottidesse 1 dl töötlemata elusa põllumulla ja 1 dl vee segu. Põllumuld, mida kasutati AM-inokulatsiooniks ja substraadiks, koguti mahepõllumajanduslikult majandatavalt põllult. Kontrolltöötluses lisati igasse potti 1 dl steriliseeritud põllumulda ning mikroobipesu (väikseima sõela avasuurus 38 µm), et taastada mittemükoriisne mikroobikooslus ning tagada, et AM-töötluse ja kontrolli erinevus tuleneks eelkõige arbuskulaarsete mükoriisaseente olemasolust, mitte muudest mullamikroorganismidest. Igasse potti külvati kuus kaeraseemet ning pärast tärkamist harvendati taimed nii, et igasse potti jäi kolm taime.

Madala väetustaseme töötluses väetist ei lisatud. Kõrge väetustaseme töötluses lisati igasse potti üks kord 3 g aeglaselt vabanevat Osmocote'i väetist, mille koostis oli 16% N, 3,9% P ja 10% K. Seejärel lisati iga poti pinnale 1 dl jämedat liiva fraktsiooniga 2–6 mm, et vähendada võimalikku AM-seente levikut kastmise käigus pottide vahel. Kastmine toimus automatiseeritud pealkastmissüsteemi abil. Katseperioodi keskmine temperatuur kasvuhoones oli 19.6 ± 2.9 °C ning suhteline õhuniiskus $49.7 \pm 16.4\%$. Katse kestis alates külvamisest kuni taimede mahalõikamiseni 85 päeva (2.04.2025–26.06.2025).

Katse oli täielikult faktoriaalne ning hõlmas kahte väetustaset (madal ja kõrge), kahte mükoriisatöötlust (AM ja kontroll) ja üheksat kaerasorti. Iga töötluskombinatsiooni oli viis kordust. Kokku kasutati katses 180 potti (2 väetustaset $\times$ 2 mükoriisatöötlust $\times$ 9 sorti $\times$ 5 kordust).

2.3 Taimede saagikus

Taimede saagikuse hindamiseks mõõdeti iga poti teramass, milleks kuivatati pähikud 70 °C juures 48 h ning kaalumiseks eemaldati terad pähikust. Juurte biomassi määramiseks koguti juureproovid eraldi ning kuivatati 50 °C juures 48 h ja kaaluti pärast seda.

2.4 Mikroskopeerimine

Arbuskulaarse mükoriisa juuresisese kolonisatsiooni hindamiseks rehüdreeriti kuivatatud juureproovid üleöö vees ning värviti järgmisel päeval trüpaansinisega. Juured selitati 2,5% KOH lahuses 85 °C juures 8 minuti jooksul, loputati kraaniveega ning hapestati 4% HCl-s 60 minutit. Seejärel värviti juured trüpaansinisega 85 °C juures 10 minutit, loputati kraaniveega ning hoiti happelises glütseroolis vähemalt üleöö, et eemaldada liigne värv (Koske & Gemma, 1989). Preparaatide valmistamiseks lõigati igast proovist 16 juurefragmenti, mis asetati alusklaasile happelise glütserooliga ja kaeti katteklaasiga. Proove vaadeldi valgusmikroskoobiga 100 vaatluspunktis (400x suurendusega). Mikroskopeerimisel registreeriti hüüfide (H) ja vesiikulite (V) esinemine ning nende summana arvutati kogukolonisatsiooni näitaja (AM.tot; McGonigle et al., 1990).

2.5 Statistiline analüüs

Statistilised analüüsid tehti programmis R, versioon 4.5.3 (R Core Team, 2025). Segamudelid koostati paketi *lme4* funktsioonidega *glmer* ja *lmer* (Bates et al., 2015). Sõltumatute muutujate olulisust hinnati paketi *car* funktsiooniga *Anova* (Fox & Weisberg, 2019). Joonised koostati paketiga *ggplot2* (Wickham, 2016). Kaera teramassi visualiseerimiseks kasutati paketti *emmeans* (Lenth, 2024), AM esinemise tõenäosuse ennustused arvutati funktsiooniga *predict*. Ennustusi kasutati AM esinemise tõenäosuse visualiseerimiseks sõltuvalt juurte biomassist erinevate väetustasemete korral ning kaera teramassi visualiseerimiseks sõltuvalt sordi registreerimisaastast erinevate AM-töötluste ja väetustasemete korral. AM esinemise ennustuste puhul hoiti registreerimisaasta keskmisel tasemel. Mudelite eeldusi kontrolliti

jääkide graafilise hindamise abil. Lineaarsete mudelite puhul kontrolliti jääkide normaaljaotust ja dispersiooni homogeensust.

Juurte biomassi mõjutavad tegurid

Selleks, et uurida, kas juurte biomassi mõjutavad väetustase ja sordi registreerimisaasta, kasutati lineaarset segamudelit (lmer). Sõltuvaks muutujaks oli juurte biomass ning sõltumatuteks muutujateks väetustase, sordi registreerimisaasta ja nende interaktsioon. Juhusliku faktorina kasutati sorti.

AM kolonisatsiooni mõjutavad tegurid

Selleks, et uurida, kas kaera arbuskulaarse mükoriisa (AM) kolonisatsiooni mõjutavad väetustase, sordi registreerimisaasta ja juurte biomass, kasutati segamudeleid.

Kuna AM kogukolonisatsiooni näitaja sisaldas palju nullväärtusi, analüüsiti kolonisatsiooni kahes osas:

1. AM esinemise tõenäosus (binaarne tunnus),
2. AM hulk ainult AM-positiivsetes proovides.

AM esinemise tõenäosust analüüsiti binoomse segamudeliga logit-lingifunktsiooniga, kasutades funktsiooni glmer. Sõltuvaks muutujaks oli AM esinemine ning sõltumatuteks muutujateks väetustase, sordi registreerimisaasta ja juurte biomass. Juhusliku faktorina kaasati mudelisse sort.

AM hulka AM-positiivsetes juureproovides analüüsiti lineaarse segamudeliga (lmer), kasutades log-transformeeritud vastustunnust. Sõltuvaks muutujaks oli AM hulk ning sõltumatuteks muutujateks väetustase ja sordi registreerimisaasta. Juhusliku faktorina kasutati sorti. Juurte biomassi lisamise mõju hinnati mudelite võrdlemise teel likelihood ratio test'i abil.

AM esinemise tõenäosuse ja kaera teramassi mudelites hinnati sõltumatute muutujate olulisust Wald-tüüpi Type III testidega. AM hulga analüüsis kasutati Wald-tüüpi Type II teste, kuna interaktsioon ei olnud statistiliselt oluline. Mudelite võrdlemiseks kasutati likelihood ratio teste. Lisaks analüüsiti juurte biomassi eraldi lineaarse segamudeliga, milles sõltumatuteks muutujateks olid väetustase, sordi registreerimisaasta ja nende interaktsioon ning juhuslikuks faktoriks sort.

Teramassi mõjutavad tegurid

Selleks, et uurida, kas kaera teramassi mõjutavad AM-töötlus, väetustase ja sordi registreerimisaasta, kasutati lineaarset mudelit log-transformeeritud vastustunnusega. Sõltuvaks muutujaks oli kaera teramass ning sõltumatuteks muutujateks AM-töötlus, väetustase, sordi registreerimisaasta ja nende interaktsioonid. Kaera teramassi analüüsides kasutati kogu andmestikku ning analüüsist ei eemaldatud AM-töötlusega proove, kus juurtes AM kolonisatsiooni ei tuvastatud. Sõltumatute muutujate olulisust hinnati Type III testidega. Vajaduse korral standardiseeriti pidevad sõltumatud muutujad enne analüüsi. Statistiliselt oluliseks loeti tulemused, mille puhul $p < 0,05$.

2.6 Autori panus ja tehisintellekti kasutamine

Autor osales katse ülesseadmises ja mahavõtmises ning viis läbi kogu juureproovide mikroskopeerimise ja arbuskulaarse mükoriisa kolonisatsiooni hindamise. Andmeanalüüsi ning töö teoreetilise osa on loonud ja kirjutanud töö autor vastavalt juhendajate nõuannetele. Tehisintellekti (ChatGPT-5; OpenAI) kasutati teksti keeleliseks parandamiseks ning loetavuse tõstmiseks.

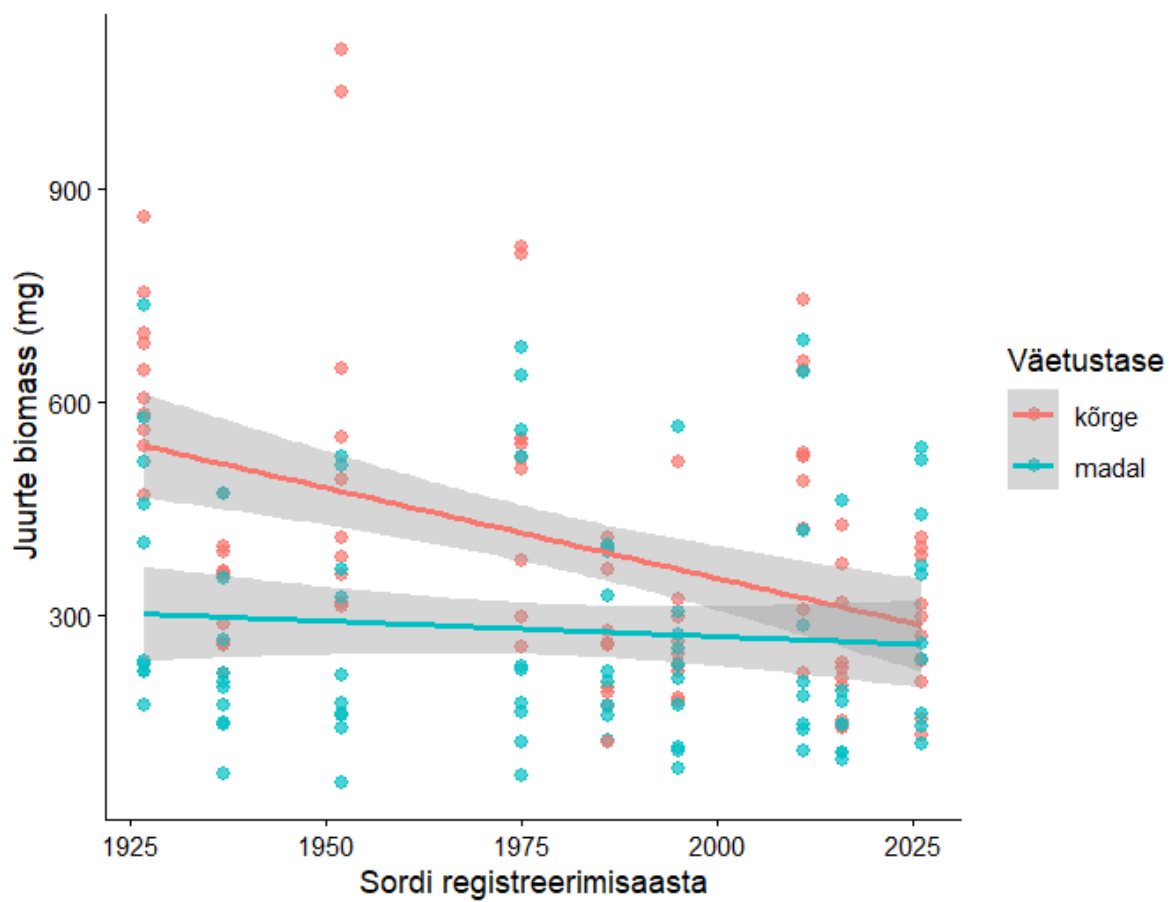
3. Tulemused

3.1 Juurte biomassi varieerumine

Juurte biomass sõltus statistiliselt oluliselt nii väetustasemest kui ka sordi registreerimisaastast ning ilmnes ka nende tegurite vaheline interaktsioon (Tabel 1). Kõrge väetustaseme korral vähenes juurte biomass uuemate sortide suunas, samas kui madala väetustaseme korral oli juurte biomass väiksem ja muutus registreerimisaasta lõikes vähem (Joonis 1).

Tabel 1. Lineaarse segamudeli tulemused juurte biomassi kohta.

Tegur	χ^2	df	p
Väetustase	9.26	1	0.002
Registreerimisaasta	6.60	1	0.010
Väetustase $\times$ registreerimisaasta	8.74	1	0.003



Joonis 1. Juurte biomassi sõltuvus sordi registreerimisaastast kõrge ja madala väetustaseme korral. Jooned näitavad lineaarseid regressioone ning varjutatud alad 95% usaldusvahemikke.

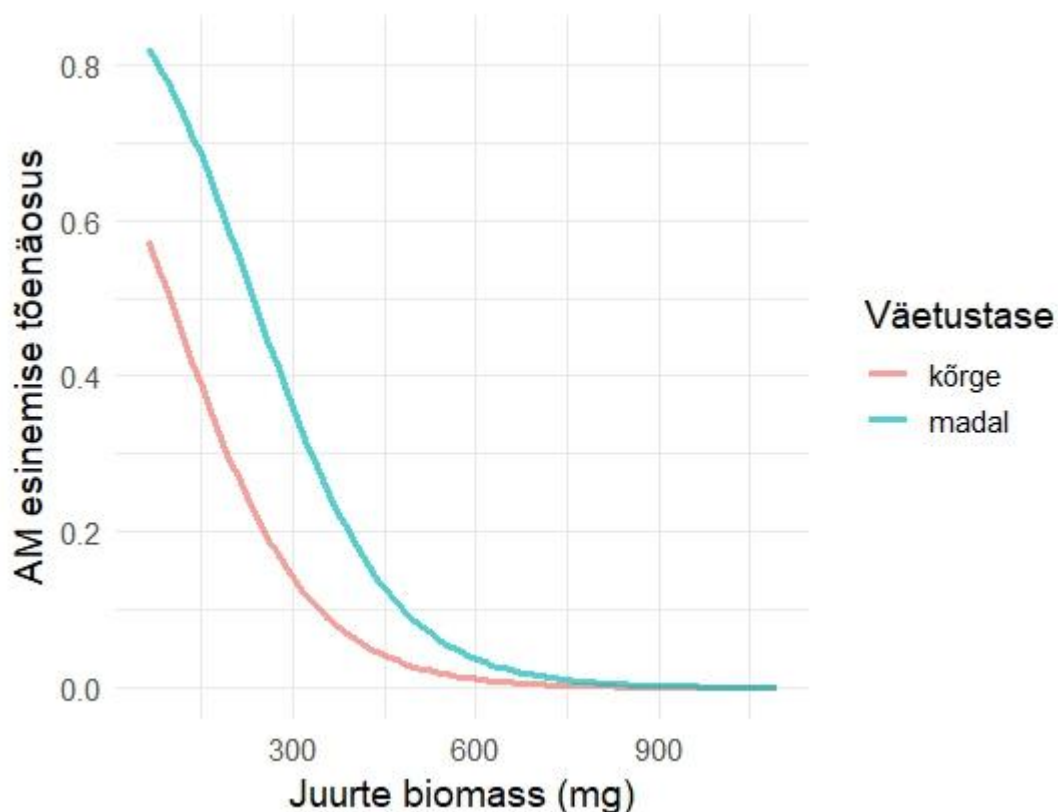
3.2 Arbuskulaarse mükoriisa esinemine

Juurte biomassi lisamine AM esinemise tõenäosust kirjeldavasse binoomsesse segamudelisse parandas oluliselt mudeli sobivust (likelihood ratio test: $\chi^2 = 30.44$, $df = 1$, $p < 0.001$), mistõttu kaasati juurte biomass lõplikku mudelisse. AM esinemise tõenäosus sõltus väetustasemest ja juurte biomassist (Tabel 2). Madala väetustaseme korral oli AM esinemise tõenäosus suurem kui kõrge väetustaseme korral ning vähenes juurte biomassi suurenedes. Seevastu sordi registreerimisaasta ega selle interaktsioon väetustasemega ei olnud seotud AM esinemise tõenäosusega.

Joonisel 2 on esitatud mudelist ennustatud AM esinemise tõenäosus sõltuvalt juurte biomassist erinevate väetustasemete korral. Ennustused näitavad, et madala väetustaseme tingimustes oli AM esinemise tõenäosus läbivalt suurem kui kõrge väetustaseme korral ning vähenes juurte biomassi suurenedes mõlemas väetustaseme variandis.

Tabel 2. Binoomse segamudeli tulemused AM esinemise tõenäosuse kohta.

Tegur	χ^2	df	p
Väetustase	7.00	1	0.008
Registreerimisaasta	0.72	1	0.395
Juurte biomass	18.54	1	<0.001
Väetustase $\times$ registreerimisaasta	0.94	1	0.331



Joonis 2. Binoomsest segamudelist ennustatud arbuskulaarse mükoriisa (AM) esinemise tõenäosus sõltuvalt juurte biomassist kõrge ja madala väetustaseme korral, kui registreerimisaasta on hoitud katses kasutatud kaerasortide keskmisel tasemel. Madala väetustaseme korral oli AM esinemise tõenäosus suurem kui kõrge väetustaseme korral ning vähenes juurte biomassi suurenedes mõlemas väetustaseme variandis.

3.3 Arbuskulaarse mükoriisa hulk AM-positiivsetes proovides

Sordi registreerimisaasta ja väetustaseme mõju kaera juurte arbuskulaarse mükoriisa (AM) kolonisatsioonile analüüsiti ainult AM-positiivsetes proovides. Juurte biomassi lisamine mudelisse ei parandanud mudeli sobivust statistiliselt oluliselt võrreldes lihtsama mudeliga (likelihood ratio test: $\chi^2 = 1.89$, $df = 1$, $p = 0.169$), mistõttu kasutati edasiseks tõlgendamiseks lihtsamat mudelit ilma juurte biomassi efektita. Lõpliku lineaarse segamudeli põhjal ei mõjutanud AM hulka statistiliselt oluliselt ei väetustase, sordi registreerimisaasta ega nende interaktsioon (Tabel 3).

Tabel 3. Lineaarse segamudeli tulemused log-transformeeritud AM hulga kohta AM-positiivsetes proovides.

Tegur	χ^2	df	p
Väetustase	2.37	1	0.124
Registreerimisaasta	1.05	1	0.307
Väetustase $\times$ registreerimisaasta	0.10	1	0.748

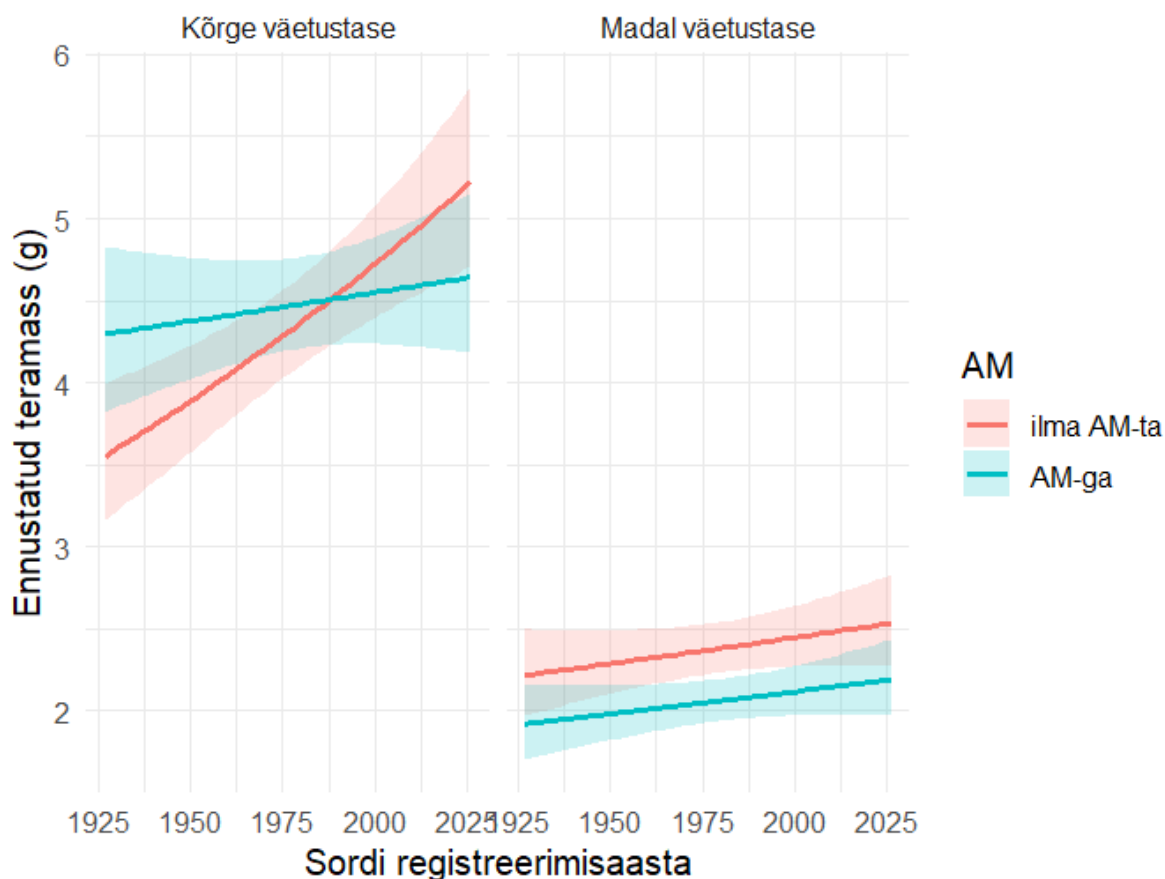
3.4 Arbuskulaarse mükoriisa inokuleerimise mõju kaera teramassile

Kaera teramassi mõjutas arbuskulaarse mükoriisa (AM) töötluse ja sordi registreerimisaasta vaheline interaktsioon (Tabel 4), mis näitab, et AM-töötluse mõju teramassile sõltus sordi vanusest. Lisaks ilmnis nõrgem, marginaalselt statistiliselt oluline väetustaseme ja registreerimisaasta interaktsioon (Tabel 4), mis viitab sellele, et ka väetustaseme mõju teramassile võib sõltuda sordi registreerimisaastast.

Joonisel 3 on esitatud mudelist ennustatud kaera teramass sõltuvalt sordi registreerimisaastast AM-töötluse ja väetustaseme lõikes. Ennustused näitavad, et AM mõju teramassile muutus mööda registreerimisaasta gradienti ning see muutus oli selgem kõrge väetustaseme tingimustes kui madala väetustaseme korral.

Tabel 4. Log-transformeeritud kaera teramassi mudeli tulemused.

Tegur	F	df	df.res	p
AM	5.65	1	162.003	0.019
Väetustase	2.83	1	162.218	0.095
Registreerimisaasta	17.54	1	78.839	<0.001
AM $\times$ väetustase	2.90	1	162.112	0.091
AM $\times$ registreerimisaasta	5.61	1	162.003	0.019
Väetustase $\times$ registreerimisaasta	3.65	1	162.225	0.058
AM $\times$ väetustase $\times$ registreerimisaasta	2.74	1	162.116	0.100



Joonis 3. Mudelist ennustatud kaera teramass sõltuvalt sordi registreerimisaastast AM-töötlusega ja ilma AM-töötluseta, kõrge ning madala väetustaseme korral. Varjutatud alad näitavad 95% usaldusvahemikke.

4. Arutelu

Käesoleva töö eesmärk oli selgitada, kuidas väetustase, sordi registreerimisaasta ja arbuskulaarse mükoriisaga inokuleerimine on seotud kaera mükoriisa kolonisatsiooniga, juurte biomassi ja teramassiga. Tulemused näitasid, et arbuskulaarse mükoriisa kolonisatsiooni esinemise tõenäosus oli suurem madala väetustaseme korral ning vähenes juurte biomassi suurenedes, samas kui AM kolonisatsiooni ulatust AM-positiivsetes proovides ei mõjutanud statistiliselt oluliselt ei väetustase ega sordi registreerimisaasta. Kaera teramassi puhul ilmnes interaktsioon sordi registreerimisaasta, väetustaseme ja AM-seente töötluse vahel, mis viitab, et AM-seente mõju sõltus nii mulla toitainesisaldusest kui ka sordi aretusajaloost. Selline muster on kooskõlas käsitlusega, et arbuskulaarse mükoriisa mõju on kontekstisõltuv ning

võib varieeruda sõltuvalt nii keskkonnast kui ka peremeestaime tunnustest (Johnson et al., 1997; Johnson, 2010; Martín-Robles et al., 2018).

4.1 Arbuskulaarse mükoriisa esinemine ja hulk

Elusa mullaga inokuleerimise tulemusena kujunes arbuskulaarne mükoriisa kaera taimede juurtes tõenäolisemalt madala väetustaseme korral kui kõrge väetustaseme korral. See tulemus on kooskõlas üldise arusaamaga, et kõrgema toitainete kättesaadavuse korral võib taimede sõltuvus AM-sümbioosist väheneda, sest sellega kaasneb taimede süsinikukulu (Johnson et al., 1997; Johnson, 2010). Sellistes tingimustes võivad taimed aktiivselt vähendada AM kolonisatsiooni ehk alla reguleerida sümbioosi kujunemist (Johnson, 2010).

Juurte biomassi suurenemine oli seotud AM esinemise tõenäosuse vähenemisega. See tulemus on kooskõlas varasemate uuringutega, mis näitavad, et taimede investeeringud juurestikku ja AM-sümbioosi võivad toimida osaliselt asenduvate strateegiatena toitainete omastamisel. Kui taim investeerib rohkem oma juure biomassi, võib tema sõltuvus mükoriisest partnerist väheneda, kuna toitainete omastamine toimub suuremas ulatuses otseselt juurte kaudu. Selline muster on kooskõlas käsitlevaga, et taimede ressursiomandamise strateegiad kujunevad kompromissina juureehituse ja sümbiootiliste suhete vahel (Johnson et al., 1997; Treseder, 2004; Soudzilovskaia et al., 2020; Kong et al., 2019). Samuti ei kajasta juurte biomass juurefunktsiooni, peenjuurte osakaalu ega juure arhitektuuri, mis võivad AM kolonisatsiooni seisukohalt olla olulisemad kui kogu juure biomass (Zheng et al., 2024). Käesolevas töös teisi juuretunnuseid ei mõõdetud, mistõttu ei olnud võimalik hinnata, millised juure omadused olid AM kolonisatsiooniga kõige tugevamalt seotud.

Sordi registreerimisaasta ei mõjutanud AM esinemise tõenäosust statistiliselt oluliselt, kui mudelis arvestati juurte biomassi, ehk ei ilmnenud, et vanemad ja uuemad sordid erineksid AM esinemise tõenäosuse poolest otseselt registreerimisaasta alusel. Samas mõjutas registreerimisaasta statistiliselt oluliselt juurte biomassi, mis viitab, et võimalik seos sordi vanuse ja AM esinemise vahel võis olla kaudselt seotud juuretunnuste erinevustega. Varasemates uuringutes on samuti näidatud, et sordiaretus võib mõjutada teraviljade juureomadusi, sealhulgas juurebiomassi ja juure arhitektuuri (Hetrick et al., 1993; Lynch,

2007). Sellised muutused võivad omakorda mõjutada taimede ressursiomandamise strateegiaid ja sõltuvust mükoriisest sümbioosist.

Lisaks kvantitatiivsetele tulemustele täheldati mikroskopeerimisel, et arbuskulaarne mükoriisa ei olnud kaera juurestikus seotud kõige peenemate juurtega, vaid esines pigem veidi jämedamates juureosades. Kuna seda mustrit ei testitud statistiliselt, tuleks seda käsitleda kvalitatiivse vaatlusena. Üks võimalik seletus on, et veidi jämedamad juured olid keskmiselt vanemad ning seetõttu suurema tõenäosusega koloniseeritud (Brundrett, 2002). Samas ei saa välistada ka meetoodilist mõju. Kuna kolonisatsiooni hindamine põhines piiratud hulgal juurefragmentidel, võib suurema ja heterogeensema juurestikuga taimede puhul olla suurem tõenäosus, et proov ei esinda kogu juurestikku. Lisaks võivad väga peenikestes juurtes mükoriisa struktuurid olla raskemini tuvastatavad, mis võib viia kolonisatsiooni alahindamiseni.

Katse läbiviimine suhteliselt väikestes pottides võis samuti mõjutada saadud tulemusi. Piiratud kasvuruumis võivad nii juurestiku kui ka mükoriisse seeneniidistiku areng olla piiratud, mis võib muuta taimede ja seente vahelise ressursijaotuse dünaamikat. Sellistes tingimustes, eriti madala väetustaseme korral, võib mükoriisse sümbioosi süsinikukulu olla taime jaoks suhteliselt suurem ning saadav toitaineline kasu ei pruugi seda kompenseerida (Johnson et al., 1997; Johnson, 2010). See võib aidata selgitada käesolevas töös täheldatud mustrit, kus madala väetustaseme tingimustes oli kaera teramass sageli väiksem AM-töötluise korral kui ilma selleta. Samas tuleb arvestada, et AM hulga analüüs hõlmas ainult AM-positiivseid proove, mistõttu oli valimi suurus väiksem ning statistiline võimsus piiratum. Seetõttu ei saa välistada, et mõned nõrgemad mõjud jäid käesolevas töös avastamata.

4.2 AM-töötluise mõju kaera teramassile

AM-seente mõju kaera teramassile erines vanade ja uute sortide vahel. Kõrge väetustaseme korral oli vanemate sortide puhul teramass suurem AM-seente töötluise korral, samas kui uuemate sortide puhul oli teramass suurem ilma AM-töötluiseta. Madala väetustaseme korral oli teramass kõigi sortide puhul suurem ilma AM-töötluiseta, mis viitab AM pigem negatiivsele mõjule nendes tingimustes. Üks võimalik seletus sellele mustrile on, et erineva aretusajalooga sordid erinevad oma ressursikasutuselt ja süsiniku eraldamises juurtesse. Samuti on võimalik, et erineva aretusajalooga sordid kujundavad või eelistavad erinevaid

AM-seente kooslusi, mis võib mõjutada taimede vastuvõtlikkust mükoriisile inokuleerimisele (García de León et al., 2020). Kuna AM-sümbioos põhineb taimelt saadaval süsinikul ja vastu saadavatel toitainetel, võivad sellised erinevused mõjutada seda, kas sümbioos osutub taime jaoks kasulikuks või kulukaks (Johnson, 2010). Varasemates uuringutes on leitud, et AM võib kaeral saagikust suurendada. Näiteks Zhang et al. (2023) näitasid, et AM seeneliigiga *Rhizophagus intraradices* inokuleerimine suurendas veestressi tingimustes kaera terasaaki ning parandas N ja P omastamist. Käesoleva töö tulemused näitasid samuti, et AM-seente mõju kaera produktiivsusele sõltub keskkonnatingimustest, kuid mõju ei olnud kõigis tingimustes positiivne. Statistiliselt oluline AM ja registreerimisaasta interaktsioon viitab, et aretusajalooline taust võib mõjutada seda, kuidas kaerasordid on vastuvõtlikud mükoriisile inokuleerimisele. See tulemus sobitub laiemasse arutellusse selle üle, kas intensiivne sordiaretus ja kõrge sisendiga põllumajandussüsteemidele kohanemine on muutnud kultuurtaimede võimet või kalduvust mükoriisestest partneritest kasu saada (Martín-Robles et al., 2018; Zhang et al., 2019; Li et al., 2024).

Kasutatud väetustasemed ei pruukinud olla optimaalsed ei taimede ega mükoriisse sümbioosi toimimiseks. Madala väetustaseme korral oli saagikus väiksem ning AM mõju negatiivne, mis viitab olukorrale, kus taim ja mükoriisaseened konkureerisid piiratud ressursside pärast. Kõrgema toitainete kättesaadavuse korral võib mükoriisse sümbioosi kasu taime jaoks väheneda, samas kui madala väetustaseme korral võib sümbioos muutuda kulukaks, kui süsinikukulu ei tasakaalustu saadava toitainelise kasuga (Johnson et al., 1997; Johnson, 2010). Nagu eelpool mainitud, võis katse läbiviimine suhteliselt väikestes pottides piirata nii juurestiku kui ka seeneniidistiku arengut. Tulevikus oleks oluline testida laiemat väetustasemete spektrit, et täpsemini hinnata, kuidas sordi aretusajalugu mõjutab taimede vastuvõtlikkust AM-seentele erineva toitainete kättesaadavuse korral. Käesolevas töös ei mõõdetud näiteks taimede fosforisisaldust, juure arhitektuuri ega AM-seente koosluse koosseisu detailsemat struktuuri, mistõttu ei olnud võimalik otseselt hinnata mehhanisme, mille kaudu AM-seened taimede kasvu mõjutas. Samuti on võimalik, et AM mõju sõltus konkreetsest mulla mikroobikooslusest või muudest keskkonnateguritest, mida käesolevas katses eraldi ei hinnatud. Kuigi kontrolltöötluses kasutati mikroobipesu, et vähendada erinevusi teiste mullamikroorganismide koosseisus, ei pruugi selline lähenemine täielikult ühtlustada kõiki mulla bioloogilisi omadusi AM-töötluse ja kontrolli vahel.

Kaera teramass oli suurem uuematel sortidel võrreldes vanemate sortidega, mis võib viidata sordiaretuse käigus kujunenud erinevustele taimede ressursikasutuses ja toitainete kasutamise efektiivsuses sõltumata AM-tööstlusest.

Kokkuvõte

Arbuskulaarse mükoriisa esinemise tõenäosus oli suurem madala väetustaseme korral ning vähenes juurte biomassi suurenedes. Sordi registreerimisaastal ei olnud iseseisvat mõju AM esinemisele, mis viitab, et võimalik seos registreerimisaasta ja AM vahel oli seotud pigem juurte biomassi erinevustega. Väetustase, registreerimisaasta ega juurte biomassi ei selgitanud AM hulka nendes proovides, kus mükoriisa juba esines. Kaera teramassi puhul erines AM-seente tööstluse mõju vanade ja uute sortide vahel: kõrge väetustaseme korral oli vanemate sortide puhul teramass suurem AM-seente tööstluse korral, samas kui uuemate sortide puhul oli teramass suurem ilma AM-seenteta. Madala väetustaseme korral oli teramass kõigi sortide puhul suurem ilma AM-seenteta. Need tulemused viitavad, et AM-seente inokulatsiooni mõju kaera saagikusele ei saa üldistada, vaid see sõltub nii kasutatavast sordist kui ka väetustasemest. See on oluline sordiaretuse ja põllumajanduse seisukohalt, kuna näitab, et mükoriisaga seotud tunnuste arvestamine võiks aidata paremini mõista sortide reageerimist erinevatele kasvatustingimustele. Samuti viitab see, et intensiivsetes tootmissüsteemides ei pruugi AM-seente inokulatsioon alati saagikust suurendada.

Summary

The probability of arbuscular mycorrhiza (AM) occurrence was higher under low fertilization and decreased with increasing root biomass. Cultivar registration year had no independent effect on AM occurrence, suggesting that the relationship between registration year and AM was more closely associated with differences in root biomass. Fertilization level, cultivar registration year and root biomass did not explain AM abundance in samples where mycorrhiza was already present.

The effect of AM fungal treatment on oat grain mass differed between older and newer cultivars. Under high fertilization, older cultivars had higher grain mass with AM fungal treatment, whereas newer cultivars had higher grain mass without AM fungi. Under low fertilization, grain mass was higher without AM fungi across all cultivars.

These results indicate that the effect of AM fungal inoculation on oat yield cannot be generalized, as it depends on both cultivar and fertilization level. This is important from the perspectives of crop breeding and agriculture, as it suggests that considering mycorrhiza-related traits could help to better understand how cultivars respond to different growing conditions. The results also indicate that AM fungal inoculation may not always increase yield in intensive agricultural production systems.

Tänuõnad

Tööd toetas Teaduse tippkeskus „Agroökoloogia ja uued kultuurid tuleviku kliimas (TK200)“. Tänan oma juhendajaid nõuannete, mõistva suhtumise ja toetuse eest. Lisaks soovin tänada Jürgen Maidlat ja Tuul Seppa, kes inspireerisid mind magistriõpinguid alustama.

Kasutatud kirjandus

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Brundrett, M. C. (2002). Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytologist*, 154(2), 275–304. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00397.x>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R companion to applied regression* (3rd ed.). Sage.
- García de León, D., Vahter, T., Zobel, M., Koppel, M., Edesi, L., Davison, J., Al-Quraishy, S., Hozzein, W. N., Moora, M., Oja, J., Vasar, M., & Öpik, M. (2020). Different wheat cultivars exhibit variable responses to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi from organic and conventional farms. *PLoS ONE*, 15(5), e0233878. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233878>
- Hetrick, B. A. D., Wilson, G. W. T., & Cox, T. S. (1992). Mycorrhizal dependence of modern wheat varieties, landraces, and ancestors. *Canadian Journal of Botany*, 70(10), 2032–2040.
- Hetrick, B. A. D., Wilson, G. W. T., & Cox, T. S. (1993). Mycorrhizal dependence of modern wheat cultivars and ancestors: relationship with root morphology. *Canadian Journal of Botany*, 71(3), 512–518. <https://doi.org/10.1139/b93-056>
- Hoeksema, J. D., & Schwartz, M. W. (2003). Expanding comparative-advantage biological market models: Contingency of mutualism on partners' resource requirements and acquisition trade-offs. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270(1518), 913–919. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2312>
- Johnson, N. C. (2010). Resource stoichiometry elucidates the structure and function of arbuscular mycorrhizas across scales. *New Phytologist*, 185(3), 631–647. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03110.x>
- Johnson, N. C., Graham, J. H., & Smith, F. A. (1997). Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism–parasitism continuum. *New Phytologist*, 135(4), 575–585. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00729.x>

- Koske, R. E., & Gemma, J. N. (1989). A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycological Research*, 92(4), 486–488. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(89\)80195-9](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(89)80195-9)
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest package: Tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*, 82(13), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- Lehmann, A., Veresoglou, S. D., Leifheit, E. F., & Rillig, M. C. (2012). Arbuscular mycorrhizal influence on plant growth, nutrient uptake and productivity under different fertilization regimes: A meta-analysis. *Plant and Soil*, 363, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1095-1>
- Lenth, R. V. (2024). *emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means* (R package). <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Li, Y., Chen, H., Gu, L., Wu, J., Zheng, X., Fan, Z., Pan, D., Li, J., Shu, W., Rosendahl, S., & Wang, Y. (2024). Domestication of rice may have changed its arbuscular mycorrhizal properties by modifying phosphorus nutrition-related traits and decreasing symbiotic compatibility. *New Phytologist*, 243(4), 1554–1570. <https://doi.org/10.1111/nph.19901>
- Lynch, J. P. (2007). Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, 55(5), 493–512. <https://doi.org/10.1071/BT06118>
- Martín-Robles, N., Lehmann, A., Seco, E., Aroca, R., Rillig, M. C., & Milla, R. (2018). Impacts of domestication on the arbuscular mycorrhizal symbiosis of 27 crop species. *New Phytologist*, 218(1), 322–334. <https://doi.org/10.1111/nph.14962>
- 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>
- Miao, M., & Lankau, R. (2023). Plant host domestication and soil nutrient availability determine positive plant microbial response across the *Solanum* genus. *Journal of Experimental Botany*, 74(5), 1579–1593. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac453>

- Olsson, P. A., Thingstrup, I., Jakobsen, I., & Bååth, E. (1999). Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(13), 1879–1887. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00119-4)
- Pirozynski, K. A., & Malloch, D. W. (1975). The origin of land plants: A matter of mycotrophism. *BioSystems*, 6(3), 153–164. [https://doi.org/10.1016/0303-2647\(75\)90023-4](https://doi.org/10.1016/0303-2647(75)90023-4)
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Read, D. J. (1991). Mycorrhizas in ecosystems. *Experientia*, 47(4), 376–391. <https://doi.org/10.1007/BF01972080>
- Rillig, M. C., & Mummey, D. L. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 171(1), 41–53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>
- Schwartz, M. W., & Hoeksema, J. D. (1998). Specialization and resource trade: Biological markets as a model of mutualisms. *Ecology*, 79(3), 1029–1038. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1998\)079\[1029:SARTBM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1998)079[1029:SARTBM]2.0.CO;2)
- Tilman, D. (1982). *Resource competition and community structure*. Princeton University Press.
- Wagg, C., Bender, S. F., Widmer, F., & van der Heijden, M. G. A. (2014). Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(14), 5266–5270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Zhang, B., Lv, Y.-F., Li, Y., Li, L., Jia, J.-Q., Feng, M.-C., Wang, C., Song, X.-Y., Yang, W.-D., Shafiq, F., & Zhang, M.-J. (2023). Inoculation with *Rhizophagus intraradices* confers drought stress tolerance in oat by improving nitrogen and phosphorus nutrition. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2), 2039–2052. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01160-3>

- Zhang, S., Lehmann, A., Zheng, W., You, Z., & Rillig, M. C. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi increase grain yields: A meta-analysis. *New Phytologist*, 222(1), 543–555. <https://doi.org/10.1111/nph.15570>
- Zheng, J., Freschet, G. T., Tedersoo, L., Li, S., Yan, H., Jiang, L., Wang, H., Ma, N., Dai, X., Fu, X., & Kou, L. (2024). A trait-based root acquisition–defence–decomposition framework in angiosperm tree species. *Nature Communications*, 15, 5311. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49666-3>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ann Inger Kari ,
(*autori nimi*)

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

Väetamise, juurte biomassi ja sordi vanuse roll kaera arbuskulaarse mükoriisa ja
teramassi kujunemisel

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on Inga Hiiesalu-Vahter, Kaisa Anneli Torppa ,
(*juhendaja nimi*)

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada Tartu Ülikooli digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;

2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi kaudu Creative Commons 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.

Ann Inger Kari

22.05.2026