TARTU ÜLIKOOL

ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT

BOTAANIKA OSAKOND

TAIMEÖKOLOOGIA ÕPPETOOL

Jana Katre Ojasoo

PESTITSIIDIDE MÕJU ARBUSKULAARSELE MÜKORIISALE LOODUSLIKES KOOSLUSTES

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Bioloogia ja elustiku kaitse

Juhendaja: PhD Kadri Koorem

Tartu 2026

Infoleht

Pestitsiidide mõju arbuskulaarsele mükoriisale looduslikes kooslustes

Tänapäeva intensiivpõllumajanduses kasutatakse laialdaselt keemilisi pestitsiide, kuid nende mõju taimede ja teiste organismide (sh mittesihtorganismide) vahelistele suhetele on seni vähe uuritud. Käesoleva töö praktilises osas analüüsitakse pestitsiidide mõju hariliku keraheina (*Dactylis glomerata*) ja aasristiku (*Trifolium pratense*) kasvule, herbivooria ulatusele ja arbuskulaarse mükoriisa kolonisatsioonile ning hinnatakse nendevahelisi korrelatsioone.

Töö tulemustesed näitasid, et hariliku keraheina puhul avaldas fungitsiid negatiivset mõju arbuskulaarse mükoriisa (AM) hüüfide ja vesiikulite kolonisatsioonile aga ei mõjutanud taime biomassi. Aasristiku puhul tõstis fungitsiidi lisamine taime biomassi, kuid molluskitsiid vähendas AM-hüüfide kolonisatsiooni. See näitab, et pestitsiidide mõju mittesihtorganismidele on oluline ja varieerub samas koosluses taimeliikide vahel.

Märksõnad: fungitsiid, insektitsiid, molluskitsiid, harilik kerahein, aasristik, herbivooria, arbuskulaarne mükoriisa

CERCS kood: B270 Taimeökoloogia

The impact of pesticides on arbuscular mycorrhiza in natural habitats

While chemical pesticides are widely used in intensive agriculture, little is known about their impact on the interactions between plants and other organisms, including non-target species. The aim of this bachelor thesis was to study the impact of pesticides on the growth, herbivory and arbuscular mycorrhizal fungal colonization in *Dactylis glomerata* and *Trifolium pratense*.

The results of this thesis showed that in *Dactylis glomerata*, fungicide use negatively affected colonization by arbuscular mycorrhizal hyphae and vesicles but did not influence plant biomass. In *Trifolium pratense*, arbuscular mycorrhizal hyphal colonization was reduced by molluscicide, whereas fungicide increased plant dry mass. Therefore, pesticides had significant effects on non-target organisms, but the specific effects varied with plant species.

Keywords: fungicide, insecticide, molluscicide, herbivory, *Dactylis glomerata, Trifolium pratense*, arbuscular mycorrhizal fungi

CERCS code: B270 Plant ecology

Sisukord

Infoleht 2
Sissejuhatus 5
1. Kirjanduse ülevaade 6
1.1. Mulla elurikkus 6
1.2. Krohmseened 7
1.3. Herbivooria 8
1.4. Taimede sekundaarsed metaboliidid 8
1.4.1. Taimede vastus putukherbivooriale 9
1.4.2. Taimede vastus limuste herbivooriale 10
1.4.3. Taimede vastus seenpatogeenidele 10
1.5. Taimekaitsemürgid 11
1.5.1. Seenemürk 12
1.5.2. Putukamürk 13
1.5.3. Limusetõrjevahend 13
2. Metoodika 14
2.1. Katse ülesehitus 14
2.2. Uurimuses kasutatavate liikide ülevaade 15
2.2.1. Harilik kerahein 15
2.2.2. Aasristik 16
2.3. Andmete kogumine 17
2.3.1. Biomass 17
2.3.2. Juurte kogumine 17
2.3.3. Juureproovide analüüs 17
2.4. Andmeanalüüs 17
3. Tulemused 19
3.1. Üldised näitajad 19
3.2. Hariliku keraheina näitajad 20
3.3. Aasristiku näitajad 21
3.4. Korrelatsioonid 22
4. Arutelu 24
4.1 Edasiarendused 26
Kokkuvõte 28
Summary 29
Tänusõnad 30

Kasutatud kirjandus 31
Lisad 46
Lisa 1. 46
Lisa 2. 46
Lihtlitsents 47

Sissejuhatus

Tänapäeva intensiivses põllumajanduses kasutatakse laialdaselt keemilisi pestitsiide, kuid seni on vähe uuritud nende mõju taimede ja teiste organismide vahelistele interaktsioonidele, sealhulgas mullaelustikule. Hinnanguliselt elab või sõltub mullast 59% (±15%) kogu maailma liikidest (Anthony jt, 2023). See tähendab, et muld on keerukas ökosüsteem, kus elutsevad erinevad organismid, sealhulgas mükoriissed seened, mis on määrava tähtsusega taimede toitainete omastamisel ja stressitaluvuses.

Krohmseened ehk arbuskulaarmükoriissed (AM) seened on mikroskoopilised mullaorganismid, mis moodustavad taimerakkudes hüüfe, vesiikuleid ja arbuskuleid. Ligikaudu 72–80% soontaimedest moodustavad sümbioosi AM-seentega (Brundrett & Tedersoo, 2018). See sümbioos parandab taimede ligipääsu mullas sageli piiratud kättesaadavusega toitainetele, nagu vask, tsink ja ammoonium (Johnson jt, 1997), ning võib katta kuni 80% taime fosforivajadusest (Riedo jt, 2021) ja 25% lämmastikuvajadusest (Marschner & Dell, 1994).

Arbuskulaarmükoriisne sümbioos parandab ka taimede toimetulekut biootilise stressiga (Fiorilli jt, 2024) ning kiirendab sekundaarsete metaboliitide akumulatsiooni patogeeni või herbivoori rünnaku korral (Manresa-Grao jt, 2022; Papantoniou jt, 2022). Hinnanguliselt on sekundaarseid metaboliite üle 200 000 erineva keemilise ühendi (Pichersky & Lewinsohn, 2011). Nende ühendite toime hõlmab otsest toksilisust kahjuritele, nende seedimise pärssimist või kahjurite looduslike vaenlaste ligimeelitamist (Divekar jt, 2022).

Hoolimata pestitsiidide kahjulikkusest mittesihtorganismidele, kasutatakse põllumajanduses kahjurite tõrjeks laialdaselt taimekaitsevahendeid. 2023. aastal kasutati põllumajanduses kokku ligikaudu 3,73 miljonit tonni pestitsiidide toimeaineid (Pesticides Use and Trade, 2025). Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli analüüsida, kuidas herbivooride ja patogeenide eemaldamine pestitsiidide kasutamisega mõjutab taimede kasvu ja arbuskulaarset mükoriisat looduslikes kooslustes hariliku keraheina ja aasristiku näitel.

Töös püstitati järgnevad hüpoteesid:

H1: Pestitsiidide kasutamine looduslikes kooslustes vähendab herbivooride ja patogeenide kahjustuste ulatust, eriti liblikõielisel aasristikul.

H2: Pestitsiidiga töödeldud taimed kasvavad paremini ehk on suurema biomassiga.

H3: Pestitsiidide kasutamine vähendab arbuskulaarse mükoriisa kolonisatsiooni taimede juurtes.

1. Kirjanduse ülevaade

1.1. Mulla elurikkus

Mullas elab väga suur hulk erinevaid organisme. Anthony jt (2023) väidavad, et ligikaudu 59% (± 15%) kogu maailma liikidest elab või sõltub mullast, muutes selle Maa kõige liigirikkamaks elupaigaks. Kuigi mullas elavate liikide keskmise arvukuse ja biomassi hindamine on keeruline (Menta, 2012), moodustab hinnanguliselt ligikaudu 50% kogu loomade biomassist mullaelustik (Fierer jt, 2009).

Mullaelustiku mitmekesisuse kirjeldamisel kasutatakse organismide keha suurusel põhinevat jaotust, mille Wallwork (1970, viidatud Menta, 2012 kaudu) jagab mikro-, meso-, makro- ja megafaunaks. Eelneva allika põhjal kuuluvad mikrofaunasse (20–200 µm) kõige väiksemad organismid (nt algloomad, väikesed lestad, nematoodid), mesofaunasse (200 µm–2 mm) pisikesed lülijalgsed ja putukavastsed, makrofaunasse (2–20 mm) selgrootud (vihmaussid, teod ja enamik putukaid) ning megafaunasse (> 20 mm) suuremad selgrootud ja ka mõned selgroogsed (nt väikenärilised, roomajad, kahepaiksed). Kõik need organismide rühmad moodustavad ühtse bioloogilise võrgustiku.

Mulla mikroorganismide mitmekesisus on oluline ökosüsteemide kestlikkuse tagamiseks, sest see toetab mulla toiduvõrgustiku toimimist ja energiavoogude liikumist (Delgado-Baquerizo jt, 2020). Makrofaunasse kuuluvate organismide (molluskite ja vihmausside) elutegevus parandab mullastruktuuri ning vähendab erosiooniriski (Menta, 2012). Lisaks on nende poolt seeditud orgaaniline aine taimedele kergemini omastatav (Menta, 2012). Kui mulla elurikkus muutub, mõjutab see otseselt ökosüsteemi protsesse ja seeläbi kogu ökosüsteemi toimimist (Wagg jt, 2014). Mullaelustik võib mõjutada ka taimede poolt toodetavate ainete hulka ja kvaliteeti. Näiteks patogeenide, parasiitide ja juure herbivooride liigne kogunemine ühte piirkonda võib viia süsiniku ja toitainete kadumiseni taime kudedest ning vähendada juurte võimet toitaineid omastada (Wardle jt, 2004). Seetõttu on taimede maapealsed protsessid ja mullaelustik omavahel tihedalt seotud, moodustades vastastikku toimiva süsteemi, mis mõjutab kogu ökosüsteemi tervist ja talitlust.

Olulise osa mullaelustikust moodustavad seened. Seni on kirjeldatud ligikaudu 205 225 liiki seeni (Royal Botanic Gardens, Kew, s.a.). Seened elavad väga erinevates elupaikades, moodustades eri eluvorme, milleks on lagundajad, patogeenid, sümbiondid, kommensalistid ja endofüüdid (asümptomaatiliselt taimes kasvav seen) (Peay jt, 2016). Mullas täidavad seened olulist rolli lagundades orgaanilist ainet ning olles osa toitainete ringes (Li jt, 2019). Mulla

seenekooslustes domineerivad sageli *Basidiomycota* (kandseente) esindajad ja mükoriissed seened, samas kui taimedes leidub peamiselt endofüüte, mükoriisseid seeni ja seenpatogeene (Peay jt, 2016).

1.2. Krohmseened

Krohmseened on mikroskoopilised seened (hõimkonnast *Glomeromycota*), mis elavad mullas ja taimede juurtes, moodustades arbuskulaarset mükoriisat (AM). Arbuskulaarse mükoriisa puhul saab seen taimelt eluks vajaliku süsiniku ning vastutasuks parandab taime toitainetega varustatust ning vastupidavust abiootilisele ja biootilisele stressile (Fiorilli jt, 2024). Mükoriisaseened parandavad taimede ligipääsu mullas sageli piiratud kättesaadavusega toitainetele, milleks on näiteks: vask, tsink ja ammoonium (Johnson jt, 1997). Kokku võivad krohmseened katta kuni 80% peremeestaime fosfori- (Riedo jt, 2021) ja 25% lämmastikuvajadusest (Marschner & Dell, 1994). See võib omakorda suurendada AM-sümbioosis oleva taime biomassi (Farhaoui jt, 2025).

Arbuskulaarne mükoriisa on kõige levinum mükoriisa tüüp (Smith & Read, 2008) ning moodustab seega olulise osa looduslikest ökosüsteemidest ja agroökosüsteemidest (Pagano jt, 2023). Soontaimede puhul moodustavad 72–80% liikidest sümbioosi AM-seentega (Brundrett & Tedersoo, 2018) ning selline kooseluvorm on eksisteerinud juba üle 400 miljoni aasta (Parniske, 2008). Wijayawardene jt (2020) uurimuse põhjal on kirjeldatud 330 liiki AM-seeni. DNA- põhiste uuringute abil väidetakse, et on veel seni määramata liike, kuna paljusid neist ei saa kasvatada ilma peremeestaimeta (Větrovský jt, 2023). Üheks põhjuseks, miks krohmseened ei suuda taimeta elada, on võimetus sünteesida ise rasvhappeid, mistõttu AM-seened sõltuvad nende saamisel täielikult peremeestaimest (Y. Jiang jt, 2017).

Arbuskulaarse mükoriisa korral moodustavad seened erinevaid struktuure (arbuskuleid, vesiikuleid ja hüüfe) taimerakkude sisse. Arbuskulid on taimerakkudes paiknevad põõsasjad moodustised, mis arenevad taime ja seene hüüfide interaktsiooni tulemusel (Parniske, 2008). Arbuskulid on ajutised struktuurid, mis läbivad kindla arengutsükli, kasvades kuni maksimaalse suuruse saavutamiseni ning seejärel vananedes ja lagunedes (Javot jt, 2007). Kokku võtab arbuskuli arengutsükkel aega ~ 8,5 päeva (Alexander jt, 1989, viidatud Javot jt, 2007 kaudu). See võimaldab mükoriisasuhte pidevat uuenemist. Parniske (2008) sõnul on nende struktuuride peamine funktsioon tagada efektiivsem toitainete vahetus taime ja seene vahel, suurendades nendevahelist kontaktpinda. Vesiikulid toimivad seene jaoks varuainete säilitusorganina (Parniske, 2008) ja hüüfid on niitjad kuni 5 µm läbimõõduga struktuurid (Abbott & Robson, 1985), mida mööda toimub toitainete transport.

1.3. Herbivooria

Herbivooria on üks domineerivamaid interaktsioone Maa ökosüsteemides (Strong jt, 1984). Üleüldiselt käsitletakse uurimustes peamiste herbivooria rühmadena limuseid, putukaid, imetajaid ja linde (Barton & Koricheva, 2010; Hale jt, 2024; Moreira jt, 2021; Oerke, 2006). Herbivoorid võivad kahjustada taime lehti, juuri, õisi ja vilju (Wetzel jt, 2023). Turcotte jt (2014) uurimuses analüüsiti herbivooria kahjustusi 1058 soontaimeliigi lehtedel. Tulemustest selgus, et 40% liikidest esines alla 5% herbivooria kahjustusi ning alla 10% liikide puhul oli kahjustatud üle 25% lehe pinnast (Turcotte jt, 2014). Erinevalt eelmainitud looduslikest kooslustest on põllumajandusmaastikes herbivooria kahjustuste hulgad märgatavalt suuremad. Oerke (2006) uurimuse põhjal võivad taime kahjurite (sh herbivooride ja patogeenide) poolt tekitatud saagi kahjustused olla kuni 50% nisul ja 75% kartulil. Pestitsiidide kasutamine teraviljadel on aidanud potentsiaalset saagikuse kadu 50%-lt vähendada kuni 29%-ni (Oerke, 2006).

Lisaks pestitsiididele aitavad taimedel kahjurite rünnakutega edukamalt toime tulla ka krohmseened. Näiteks võivad nad suurendada resistentsust mullas levivate patogeenide (Farhaoui jt, 2025; Jung jt, 2012) ja nematoodide suhtes (Schouteden jt, 2015). See väljendub arbuskulaarse mükoriisaga koloniseeritud taimedel kiiremas sekundaarsete metaboliitide akumulatsioonis patogeeni või herbivoori rünnaku korral (Manresa-Grao jt, 2022; Papantoniou jt, 2022). Krohmseente kasulikkust herbivooria korral toetab D. Jiang jt (2021) uurimus, kus märgati *Lymantria dispar* Linnaeus vastsete puhul, kes toitusid AM-sümbioosis oleva papli lehtedest, keha mõõtmete vähenemist ning ellujäämuse langust. Lisaks on Rasmann jt (2017) näidanud, et AM taimedel on herbivooride arenguaeg pikem.

1.4. Taimede sekundaarsed metaboliidid

Taimede sekundaarsed metaboliidid omavad olulist rolli taimede keemilises kaitses kahjurite vastu. Hinnanguliselt on sekundaarseid metaboliite üle 200 000 erineva keemilise ühendi (Pichersky & Lewinsohn, 2011), mis paiknevad suuremates kogustes taime lehtedes ja viljade koores (Pierpoint, 2000). Peamiste sekundaarsete metaboliitide rühmadena toovad Divekar jt (2022) välja terpenoidid, fenoolsed ühendid ning lämmastikku ja väävlit sisaldavad metaboliidid (nt glükosinolaadid). Nendel ühenditel võib esineda mitmekesine toime, mis hõlmab otsest toksilisust kahjurile, nende seedimise pärssimist või kahjurite looduslike vaenlaste ligimeelitamist (Divekar jt, 2022). Kahjustuse tekkimisel aktiveeruvad taimes spetsiifilised signaalirajad ja hormonaalsed regulatsioonimehhanismid, mis käivitavad kaitseühendite biosünteesi (Divekar jt, 2022) ning akumulatsiooni kahjustatud piirkonda

(Fiorilli jt, 2024). Mõne taime puhul on täheldatud juurerakkudes kaitsereaktsioone ka AM-sümbioosi algstaadiumis, kuid võrreldes patogeensete interaktsioonidega on need nõrgemad ja ajutised (Giovannetti jt, 2015). Vees lahustuvaid sekundaarseid metaboliite talletatakse peamiselt rakkude vakuoolides ning lipofiilseid ühendeid taime väliskihis (vaigukanalites, õlirakkudes, trihhoomides või kutiikulas), võimaldades neil toimida otsese kokkupuute korral (Divekar jt, 2022).

Taimede vastus herbivooriale sõltub sageli herbivooria tüübist. Peamiste herbivooria vormidena eristatakse putukate, limuste ja suurimetajate herbivooriat (viimast käsitletakse käesolevas töös vaid põgusalt). Teraviljakasvatuses on enim levinud peremees-spetsiifiline putukherbivooria (Bernal & Medina, 2018; Schoonhoven jt, 2010), mida soodustab sama põllumajanduskultuuri kasvatamine suurtel pindaladel, pakkudes kahjuritele ulatuslikke toitumisvõimalusi. Loomakasvatuses domineerib aga suurimetajate tahtlik herbivooria ehk karjatamine (Ford & Barrett, 2011). Erinevaid herbivooria tüüpe esineb ka looduslikes kooslustes, kuid sealne mitmekesine taimestik takistab reeglina ühe konkreetse putukaliigi massilist kogunemist. Järgnevalt käsitlen lähemalt putukherbivooriat, limuste herbivooriat ning lisaks ka seenpatogeene.

1.4.1. Taimede vastus putukherbivooriale

Putukad on liigiliselt kõige arvukam organismide klass Maal ning ligikaudu pool kirjeldatud putukaliikidest toitub elustaimedest (Schoonhoven jt, 2010). Seetõttu kujutab putukherbivooria endast ökoloogiliselt kõige olulisemat ja mitmekesisemat taimetoidulisuse vormi. Just putukate laia leviku tõttu on taimedel välja kujunenud keerukad kaitsemehhanismid, milles mängivad keskset rolli sekundaarsed metaboliidid ning spetsiifilised signaalrajad. Taimed on võimelised eristama mehhaanilist vigastust herbivooride põhjustatud kahjustusest, kuna putukate suuõõne eritistes leiduvad molekulid vallandavad spetsiifilise kaitsevastuse (Divekar jt, 2022). Lisaks mehaanilistele kahjustustele tajuvad taimed ka keemilisi signaale, mis võivad pärineda näiteks taimele munetud putukamunadest (Mithöfer & Boland, 2012). Sellise regulatsiooni tulemusel suunab taim oma ressursid esmajärjekorras kaitsevastuste aktiveerimiseks, piirates samal ajal ajutiselt kasvu ning muid vähem kriitilisi protsesse (Divekar jt, 2022).

Krohmseened võivad mängida olulist rolli taime kaitsereaktsioonide kujundamisel. Näiteks suudab AM-sümbioosis olev taim kohandada juureeritiste koostist ning muuta seeläbi elukeskkonna sobimatuks ka juureparasiitsetele taimedele ja teistele organismidele (Fernández-Aparicio jt, 2010). Lisaks võivad taime toodetud sekundaarsed metaboliidid toetada taime

kaitset ka kaudsete mehhanismide kaudu, meelitades herbivooride looduslikke vaenlasi. Näiteks eritab mais mardikavastsetega nakatunud juurtest mulda lenduvat orgaanilist ühendit [(E)-β-karüofüleeni], mis meelitab mullas elavaid mardikavastsete looduslikke vaenlasi - nematoode nakatunud juurte juurde (Rasmann jt, 2005).

1.4.2. Taimede vastus limuste herbivooriale

Limuste herbivoorne rünnak põhjustab võrreldes putukatega taimele ulatuslikumaid koekahjustusi ning pikemaajalist stressi (Laznik jt, 2026). Falk jt (2014) uurimuses leiti, et harilik müürlook (*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.) reageerib limuste limale, aktiveerides taime kaitsehormoonide (JA ehk jasmoonhappe) signaaliraja, mis suurendab taime vastupanuvõimet järgneva herbivooria suhtes. Lisaks on tuvastatud, et salitsüülhappe (SA) tase suureneb müürlooga lehtedes spetsiifiliselt kokkupuutel kirjunälkja (*Deroceras reticulatum* (O.F.Müller)) limaga, samas kui teiste nälkjaliikide puhul sellist muutust ei täheldatud (Kästner jt, 2014). Kuna nimetatud liigi lima sisaldab SAd, toimib see nii välise allikana kui ka signaalmolekulina, mis kutsub esile taime kaitsevastuseid (Kästner jt, 2014). Siiski võib salitsüülhappe süntees patogeenivabas keskkonnas avaldada negatiivset mõju taime kasvule ja kohasusele (Abreu & Munné-Bosch, 2007). Lisaks leidsid Laznik jt (2026), et nälkjate herbivooria suurendab peakapsataimedes (*Brassica oleracea var. capitata* L.) lenduvate orgaaniliste ühendite emissiooni. Artikli põhjal eritavad neid ühendeid nii taime maapealsed osad kui ka juured ning nende koostis sõltub taimekahjustaja liigist. Selline muutus toimib kaudse kaitsemehhanismina, meelitades ligi nälkjaid parasiteerivaid nematoode (Laznik jt, 2026).

Mullaelustiku ja maapealsete herbivooride vahelised seosed on keerukad ning sageli liigispetsiifilised. Kuigi arbuskulaarse mükoriisa ja limuste vahelisi interaktsioone on seni vähe uuritud, selgus Trouvé jt (2014) uuringust, et AM-seente kolonisatsiooni korral suurenesid aasristikul limuste tekitatud herbivoorsed kahjustused 342%, kuid süstlehise teelehe puhul vähenes kahjustuste ulatus 42% võrra. Uurimus tõi esile ka interaktsioonide keerukuse: vihmausside juuresolek leevendas limuste herbivooria mõju aasristikule (Trouvé jt, 2014).

1.4.3. Taimede vastus seenpatogeenidele

Seenpatogeenid on ühed levinuimad taimekahjustajad maailmas, põhjustades põllumajanduses igal aastal märkimisväärset saagikadu. Sõltuvalt taimest võidakse seenevastaseid ühendeid sünteesida kas pidevalt või vastusena patogeenirünnakule (Pusztahelyi jt, 2015). Näiteks käivitub patogeensete seentega kokkupuutel fütoaleksiinide ehk taime poolt toodetud kaitsvate

ühendite süntees (Ahuja jt, 2012; Pusztahelyi jt, 2015), mille toksiline mõju kahjustab seene rakumembraani (Joubert jt, 2011). Lisaks on maavitsaliste (*Solanaceae*) sugukonda kuuluvatest taimedest leitud ühendeid, mis pärsivad seente idanemist ja kasvu (Ahuja jt, 2012). Mõnede sekundaarsete metaboliitide puhul, mida sünteesitakse seenpatogeeni rünnaku korral, on täheldatud, et liigse akumulatsiooni korral võivad antud ühendid olla toksilised ka neid sünteesivale taimele (Pusztahelyi jt, 2015).

Arbuskulaarse mükoriisa ja seenpatogeenide vahel on leitud erinevaid interaktsioone. Näiteks El-Abeid jt (2025) uurimuses leiti, et juuresisene seenpatogeen vähendas AM-kolonisatsiooni savises mullas keskmiselt 36%. Seevastu Carlsen jt (2008) ning Veresoglou & Rillig (2012) artiklite põhjal ei avaldanud seenpatogeen AM-seente kolonisatsioonile mingit mõju, küll aga pärssisid AM-seened oluliselt patogeeni levikut.

Sarnaselt taimedele on ka seentest leitud tuhandeid sekundaarsete metaboliitide ühendeid (Pusztahelyi jt, 2015). Seente poolt toodetud sekundaarsed metaboliidid võivad hävitada taime rakke (Barna jt, 2012) või häirida taime signaalradade tööd (X. Wang jt, 2014).

1.5. Taimekaitsemürgid

Pestitsiidid (taimekaitsemürgid) on taimede peal kasutatavad keemilised ained, mida tarvitatakse erinevate kahjurite hävitamiseks intensiivpõllumajanduses. 2023. aastal kasutati põllumajanduses kokku ligikaudu 3,73 Mt (miljonit tonni) taimekaitsemürkide toimeaineid (Pesticides Use and Trade, 2025). Sellest 1,84 Mt kasutati Ameerikas, 1,05 Mt Aasias, 0,44 Mt Euroopas, 0,21 Mt Aafrikas ning 0,19 Mt Okeaanias (Pesticides Use and Trade, 2025). Pestitsiide kui mürkkemikaale rakendatakse taimekahjustajate ja umbrohtude tõrjeks laialdaselt, sest taimehaigusi põhjustavad üle 10 000 erineva seene, bakteri ja viiruse (Pagano jt, 2023). Lisaks neile on taimekahjuriteks ka erinevad loomarühmad, näiteks molluskid (Pagano jt, 2023).

Taimekaitsemürgid, sealhulgas seenemürgid ei mõjuta ainult patogeene, vaid ka kasulikke mullamikroobe ja ensüümseid protsesse (Singh & Pedrinho, 2026; Z. Wang jt, 2025). Sellele lisandub oht, et pestitsiidides sisalduvad raskesti lagunevad ühendid võivad kuhjuda toiduahela kaudu ka teistesse organismidesse (Araújo jt, 2023). Sealjuures on pestitsiidide mõju AM-i struktuuridele keerukas uurida, kuna lisaks manustatud aine kogusele mõjutavad tulemusi ka mulla füüsikalis-keemilised omadused, kasvatatav taimesort, manustamisviis ning mitmed muud tegurid (Hage-Ahmed jt, 2019). Olulist rolli mängib ka mulla koostis, kuna sellel on otsene seos keskkonnariskidega: näiteks on leitud, et kui orgaanikarikkad happelised mullad

suudavad pestitsiide siduda, siis vähese orgaanilise ainega liivmuldades leostuvad need ühendid kergesti põhjavette (Kodešová jt, 2011). Pestitsiidide mõju vähendamiseks AM-ile ja teistele mullaorganismidele soovitatakse kasutada looduslikke taimekaitsemeetodeid, näiteks suurendada kasulike mikroorganismide hulka mullas (Singh & Pedrinho, 2026).

Erinevate katsete põhjal on selgunud, et kasutades pestitsiide soovitatud kogustes, võivad nad avaldada AM-struktuuridele kas negatiivset (Köninger jt, 2026; Riedo jt, 2021), neutraalset või positiivset mõju (Hage-Ahmed jt, 2019; Pagano jt, 2023). Standardimisorganisatsioon ISO (1998) standardprotokollid hindavad taimekaitsemürkide toksilisust mulla selgrootutele parasvöötme tingimustes vastaval 20 ± 2 °C temperatuuril (De Silva jt, 2009). Uurimused näitavad, et arbuskulaarmükoriissete seente erinevad struktuurid reageerivad pestitsiididele varieeruvalt: kõige vastupidavamateks peetakse tavaliselt spoore ja juurekolonisatsioone, kuid ka nende taluvus on liigispetsiifiline (Hage-Ahmed jt, 2019). Samas on arbuskulaarmükoriissete seente struktuurid pestitsiidide suhtes kõige haavatavamad sümbioosieelses faasis (Giovannetti jt, 2006; Pagano jt, 2023).

1.5.1. Seenemürk

Fungitsiidi (seenemürgi) mõju mullale sõltub nii toimeainest, kontsentratsioonist kui ka mulla omadustest (Z. Wang jt, 2025). Toime AM-ile sõltub seene liigist, kuna erinevatel seeneliikidel on pestitsiidide suhtes erinev tundlikkus (Pagano jt, 2023). Madala kontsentratsiooni juures avaldas fungitsiid karbendasiim AM-ile positiivset mõju, samas kui põllumajanduses soovitusliku kasutuskoguse juures mõjus see arbuskulaarsele mükoriisale kahjulikult (Jakobsen jt, 2021). Riedo jt (2021) uurimuses täheldati taimekaitsemürkide hulga ja AM-i arvukuse vahel tugevat negatiivset seost. Artikli sõnul võivad mullas esinevad pestitsiidid, eriti fungitsiidid, pärssida sümbioossete seenehüüfide kasvu ning häirida füsioloogilisi protsesse, nagu metaboliitide ja toitainete omastamist, transporti ning taime ja arbuskulaarse mükoriisa vahelist signaaliülekannet.

Seenemürgid võivad mõjutada ka teisi mullaelustiku näitajaid. Soovituslikust suuremad kontsentratsioonid pärsivad lisaks patogeensetele seentele ka mullas olevate seente, aktinomütseetide ja teiste mikroorganismide arvukust ning langetavad nende organismide liigilist mitmekesisust (Z. Wang jt, 2025). Näiteks vähendavad mitmed fungitsiidid mulla mikroobset biomassi, pidurdavad mulla hingamist (Z. Wang jt, 2025) ja suruvad alla mitmete oluliste mullaensüümide aktiivsust (Zubrod jt, 2019). Lisaks kujutavad fungitsiidid ohtu ka mullaloomadele, kuigi vihmaussid võivad mõningaid seenemürkide negatiivseid mõjusid teistele mullaloomadele leevendada (Z. Wang jt, 2025). Sealjuures võib taimekaitsevahendite

suuremates kogustes kasutamine viia ka kemikaalide resistentsuse tekkeni (seda ka teiste pestitsiidide puhul). See omakorda vähendab taimekaitsemürkide efektiivsust ning sunnib kasutama suuremaid koguseid või uusi keemilisi ühendeid, mis omakorda võib suurendada keskkonnakoormust (Araújo jt, 2023).

1.5.2. Putukamürk

Insektitsiidid (putukamürgid) on toksilised ained, mida kasutatakse putukate tõrjeks ja nende populatsioonide arvukuse reguleerimiseks põllumajanduses (Araújo jt, 2023). Eelneva allika sõnul võivad insektitsiidid põhjustada keskkonna saastumist ning avaldada kahjulikku mõju putukate kõrval ka teistele elusorganismidele. Näiteks tuvastasid Siemann jt (2008), et 22 protsendis nende poolt analüüsitud artiklitest ilmnes insektitsiidide negatiivne mõju mulla elustikule, põhjustades nii mullaorganismide liigirikkuse kui ka isendite arvukuse kahanemist.

Toimemehhanismi alusel jaotatakse insektitsiidid kolme peamisse rühma. Esimesse rühma kuuluvad närvisüsteemi talitlust häirivad putukamürgid (Araújo jt, 2023), mis mõjutavad närviimpulsside ülekannet (Zhang jt, 2016). Nimetatud toimemehhanismiga putukamürgid on tänapäeval rahvusvaheliselt kõige laialdasemalt kasutatavad insektitsiidid (Insecticide Resistance Action Committee, 2024). Teise rühma moodustavad ainevahetusprotsesse takistavad insektitsiidid, mis häirivad organismi elutähtsaid biokeemilisi reaktsioone (Araújo jt, 2023). Kolmandasse rühma kuuluvad kasvu ja arengut reguleerivad insektitsiidid, mis mõjutavad putukate arengutsüklit ja takistavad nende normaalset kasvamist või paljunemist (Araújo jt, 2023).

1.5.3. Limusetõrjevahend

Molluskid moodustavad loomariigi suuruselt teise hõimkonna ning neid iseloomustab kõrge sigimispotentsiaal, kuna nad paljunevad aktiivselt kogu hooaja vältel ja munevad mune erinevatesse elupaikadesse (Kumar, 2020). Selline sigimisstrateegia muudab nende populatsioonide arvukuse kontrollimise keerukaks, mistõttu kasutatakse nende ohjamiseks mitmesuguseid tõrjemeetodeid. Tigude ja nälkjate arvukust saab piirata mehaaniliselt, sealhulgas isendite käsitsi kogumise ja hävitamisega, samuti bioloogiliste ja keemiliste tõrjevahendite abil (Kumar, 2020). Bioloogilise tõrje puhul kasutatakse looduslikke vaenlasi, näiteks parasiteerivaid nematoode, kellest üheks liigiks on *Phasmarhabditis hermaphrodita* (A.Schneider, 1859) Andrássy (Rae jt, 2007). Peamiseks kasutatavaks keemiliseks ühendiks on metaldehüüd, mis on tehtud pelletiteks (Douglas & Tooker, 2012). Metaldehüüd suurendab nälkjatel limaeritust, mistõttu surevad isendid dehüdratsiooni tulemusel (Port ja Port, 1986, viidatud Henderson & Triebskorn, 2002 kaudu).

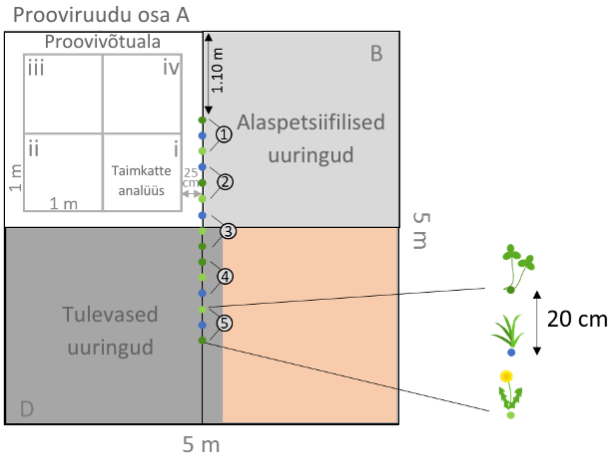
2. Metoodika

2.1. Katse ülesehitus

Andmed koguti rahvusvahelise projekti BugNet (Kempel jt, 2025) raames. See katse uurib taimi söövate organismide mõju taimekooslustele. Katses eemaldati kooslusest putukad, molluskid ja patogeensed seened, kasutades selleks siis vastavalt putuka-, limuse- või seenemürki. Antud lähenemine võimaldas omakorda uurida nimetatud mürkide mõju taimede suhetele krohmseentega. Katse „Phytometer Addon“ viidi läbi vahemikus 2023-2024 (https://www.bug-net.org/phytometer-addon/), kui katsealadele istutati ühise päritoluga katsetaimi. Katsealad asusid Eestis (Silluksel) ning Šveitsis kolmes proovikohas (Clavadeler Alp, Jatzhorn, Bruech) (Lisa 1). Katsealusteks liikideks olid harilik kerahein ja aasristik, lisaks kasvatati veel harilikku võilille *(Taraxacum officinale* Dahlst.), mida antud töös ei käsitleta.

Kõikide katsetaimede seemned pärinesid Šveitsist. Seemned idandati potimullas ning neid kasvatati kasvuhoones 3–4 nädalat, kuni taimedel oli arenenud vähemalt paar pärislehte. Seejärel aklimatiseeriti kasvuhoones kasvanud taimi ühe nädala jooksul, paigutades need esialgu lühikeseks ajaks varjulisse väliskeskkonda ning pikendades järk-järgult välitingimustes viibimise aega.

Peale aklimatiseerumist istutati taimed BugNet katsealadele. Iga proovikoha katseala koosnes 24st 5 × 5 m suurusest prooviruudust, kuhu kasvuperioodi vältel ca 4 nädalase intervalliga lisati seene-, putuka-, limusemürki kas üksinda või kombinatsioonis üksteisega (täisfaktoriaalne disain). Putukatõrjevahendina kasutati Karate Zeon’i (toimeainega lambda-tsühalotriin), seenemürgina kombineeriti Score (difenokonasool) ja Ortiva (asoksüstrobiin), limusetõrjevahendina rakendati Limax Ferro pelleteid (raud(III)fosfaat) (Kempel jt, 2025). Katsetaimed istutati iga ruudu keskjoonele katseala äärest 1,1 m kaugusele 20 cm vahedega kolmest taimest koosnevate rühmadena, milles oli üks isend igast liigist (Joonis 1). Igale prooviruudule istutati viis sellist rühma ning taimede järjestus rühmas määrati juhuslikult.



Joonis 1. Prooviruudu (5 × 5 m) skeem. Tumerohelise täpiga on tähistatud aasristik, sinise täpiga harilik kerahein ning helerohelise täpiga harilik võilill (Kempel & Allan, s.a., autori tõlge).

Istutades taime katsealale mõõdeti iga isendi maapealse osa kõrgus ning taim märgistati bambuskeppide ja plastiksiltidega või asetati värviline plastikrõngas iga fütomeetri (katsealuse taime) ümber. Taimed, mis surid ühe nädala jooksul pärast katsealale istutamist, asendati uue isendiga. Taimi kasvatati aktiivse kasvuperioodi tipphetkeni (kesksuveni). Proovialade kasvuperiood jäi vahemikku 42-80 päeva, varieerusid ka keskmine õhutemperatuur ja sademete hulk (Tabel 1). Kasvuperioodi tipphetkel valiti eksperimendiks igalt prooviruudult üks aasristiku ja hariliku keraheina taim täpsemateks mõõtmisteks (kokku 48 taime katseala kohta).

Tabel 1. Katsealade võrdlus kasvuperiood kestuse, sademete hulga ja keskmise temperatuuri põhjal.

Katseala	Taimede kasvuperiood (päevades)	Sademete hulk (mm)	Keskmine temperatuur (°C)
Sillukse	72	83,5	16
Bruech	42	176,3	14
Clavadeler Alp	48	169,9	10,1
Jatzhorn	80	308,4	7,2

2.2. Uurimuses kasutatavate liikide ülevaade

2.2.1. Harilik kerahein

Harilik kerahein (*Dactylis glomerata* L.) kuulub kõrreliste (*Poaceae*) sugukonda. Tegu on taimega, mis suudab taluda laias ulatuses keskkonnatingimusi, kuid on tundlik ekstreemsete temperatuuri-, niiskus- ja tuuleolude suhtes (Beddows, 1959). Lisaks ei kasva taim happelisel

mullal (Beddows, 1959). Harilik kerahein on hallikasroheline taim, mis võib kasvada 30–130 cm kõrguseks ning moodustab väikeseid mättaid (Kukk, 2024). Taime lehed on lapikud ning karedad (Kukk, 2024). Hariliku keraheina õisikuks on püstine pööris, mille värvus võib varieeruda helerohelisest lillaka toonini (Krall jt, 2010).

Taime üheks enimlevinumaks patogeenseks kahjuriks peetakse *Puccinia graminis* Pers. (Clarke & Eagling, 1994), mis kuulub roosteliste sugukonda. Herbivoorid eelistavad enamjaolt kevadel ja suvel süüa teisi koosluses kasvavaid taimi, mistõttu võib harilik kerahein muutuda koosluse domineerivaimaks liigiks (Davies, 1938). Harilik kerahein moodustab arbuskulaarset mükoriisat, FungalRoot andmebaasi 20 vaatluse põhjal on selle taimeliigi keskmine AM-kolonisatsiooni intensiivsus 63,82% (± 8,09 % SE) (Soudzilovskaia jt, 2020).

2.2.2. Aasristik

Liblikõieliste (*Fabaceae*) sugukonda kuuluvaid taimi kasvab üle maailma erinevates piirkondades ja kliimavööndites (Kaurinovic jt, 2012). Sellesse sugukonda kuulub ka aasristik (*Trifolium pratense* L.). Tegu on taimega, mis elab sümbioosis mullabakteriga *Rhizobium leguminosarum biovar trifolii* ning suudab sel viisil siduda aastas kuni 400 kg lämmastikku hektari kohta (Taylor ja Quesenberry, 1996, viidatud Boller jt, 2010 kaudu).

Aasristik võib kasvada 10–40 cm kõrguseks ning selle leherootsud on karvased (Kukk, 2024). Taime lehed on ümarad või veidi piklikud ning sageli esineb lehe keskel iseloomulik hele kolmnurkne laik (Kukk, 2024). Üldiselt on lehed tumerohelised ja õied lillakaspunased (Krall jt, 2010).

Aasristiku üheks levinumaks patogeeniks on *Erysiphe polygoni* DC. (Boller jt, 2010), mis kuulub jahukasteliste sugukonda. Lisaks patogeenidele mõjutavad taime levikut ka herbivoorid. Ford ja Barrett (2011) testisid 3,5 aasta pikkuse katse käigus aasristiku vastupidavust veiste rotatsioonkarjatamisele ehk korduvale herbivooriale. Tulemustest selgus, et 18 uuritud aasristiku populatsiooni isendite keskmine ellujäämus oli vaid 22% (Ford & Barrett, 2011). Aasistik moodustab ka arbuskulaarset mükoriisat. FungalRoot andmebaasi 21 vaatluse põhjal on liigi keskmine AM kolonisatsiooni intensiivsus küllaltki kõrge – 79,1% (± 6,61% SE) (Soudzilovskaia jt, 2020).

2.3. Andmete kogumine

2.3.1. Biomass

Kasvuperioodi tipphetkel mõõdeti iga taime kõrgus (sentimeetrites) ja korjati taim maapinnalt lõigates täpsemateks analüüsideks. Seejärel hinnati iga taime iga lehe kahjustunud lehepindala protsentides. Eraldi hinnati lehepindala osa, mille olid ära söönud taimtoidulised herbivoorid (närivad, pahku tekitavad ning lehe mahlasid imevad kahjurid), ning lehepindala osa, mis oli kaetud patogeensete haigustunnustega, nagu hahkhallitus, jahukaste, rooste ja lehelaigud. Kahjustuste hindamisel kontrolliti lehe mõlemat külge ning tabelisse lisati taimeisendi lehtede keskmine kahjustuste hulk protsentides.

2.3.2. Juurte kogumine

Taime juureomaduste mõõtmiseks koguti peenjuuri. Pärast kogumist puhastati juured mullast, pestes neid veega. Tunnuste mõõtmiseks valiti mitu peenjuurt, mille kogupikkus oli umbes 40 cm.

2.3.3. Juureproovide analüüs

Arbuskulaarse mükoriisa kolonisatsiooni määramiseks hindasin hüüfide, vesiikulite ja arbuskulite esinemist hariliku keraheina ja aasristiku juurtes. Selleks asetasin peenjuured märgistatud kassettidesse ning värvisin vastavalt Vierheilig jt (1998) koostatud protokollile. Lähtuvalt protokollist jätsin juurtega kassetid 24 tunniks 10% KOH-lahusesse (Lisa 2). Seejärel keetsin juuri 95 °C juures 15 minuti vältel. Pärast keetmist loputasin juured põhjalikult, asetasin tindilahusesse ning keetsin veel 10 minutit 95 °C juures. Tindilahus sisaldas 5% Parkeri tinti, 5% äädikat ja destilleeritud vett. Seejärel loputasin juured uuesti ning panin vastava proovi numbriga tähistatud Eppendorfi tuubidesse, kuhu lisasin happelist glütserooli edasiseks säilitamiseks.

Mikroskoopilise analüüsi jaoks valmistasin igast proovist ühe slaidi. Vaatlused viisin läbi valgusmikroskoobiga, kasutades 40-kordse suurendusega objektiivi. Igal slaidil tegin 100 vaatlust, mille käigus hindasin arbuskulaarse mükoriisa esinemist. Tulemused kirjeldasin vastavalt: kas mükoriisa struktuurid puudusid või olid nähtavad hüüfid, arbuskulid või vesiikulid (McGonigle jt, 1990).

2.4. Andmeanalüüs

Kõik järgnevad analüüsid tegin hariliku keraheina ja aasristiku kohta eraldi. Arvutasin mõlema liigi keskmised väärtused biomassi, AM-hüüfide hulga ning herbivooride ja patogeenide

põhjustatud kahjustuste kohta. Keskmised väärtused esitasin kogu andmestiku ja kasvukohtade lõikes, et kirjeldada ruumilist varieeruvust.

Analüüsisin taimekaitsevahendite (putukamürk, limusemürk, seenemürk) peamõju katsealuse taime biomassile, AM-seente hüüfide, arbuskulite ja vesiikulite kolonisatsioonile, herbivooride ning patogeenide poolt tekitatud kahjustuste hulgale. Biomassi hindamiseks kasutasin lineaarset segamudelit paketist lmerTest. AM-seente kolonisatsiooni edukuse ja herbivooride ning patogeenide poolt tekitatud kahjustuste hulga analüüsimiseks kasutasin beeta-binoomset segamudelit paketist glmmTMB. Sõltuvaks muutujaks võtsin AM-hüüfide koloniseeritud ja mittekoloniseeritud vaatluste arvu. Püsiefektina kaasasin putukamürgi, limusemürgi ja seenemürgi mõju ning juhusliku efektina lisasin kasvukoha.

Korrelatsioonimaatriksi koostamiseks kasutasin Pearsoni korrelatsioonianalüüsi, kus korrelatsioonikordaja r väärtused jäävad vahemikku –1 kuni 1. Korrelatsioonimaatriksis võrreldi omavahel järgmiseid tunnuseid: patogeenide kahjustused, AM-hüüfide kolonisatsioon, herbivooria kahjustused ning taime maapealne kuivmass. Joonisele lisasin iga tunnuse vahelise võrdluse kohta ka statistilise testi p väärtuse.

Lisa 1 tabeli koostamisel kasutasin tarkvara Google Earth Pro (versioon 7.3), et leida geograafiliste koordinaatide alusel katsealade kõrgusandmed. Kõrgusnäitajate määramisel rakendasin seadistust *Absolute*, mis tugineb digitaalsele kõrgusmudelile (DEM). Kõik analüüsid viisin läbi tarkvara R (versioon 4.5.2) abil (R Core Team, 2025). Töö koostamisel kasutasin tehisintellekti tööriistu (OpenAI ChatGPT ja Google Gemini) asjakohaste teadusallikate leidmiseks, teksti sõnastuse ja voolavuse parandamiseks ning R-programmeerimiskeele koodi kirjutamiseks.

3. Tulemused

3.1. Üldised näitajad

Hariliku keraheina ja aasristiku keskmine biomass, hüüfide kolonisatsioon ning herbivooride ja patogeenide põhjustatud kahjustused varieerusid kasvukohtade lõikes märkimisväärselt (Tabel 2). Hariliku keraheina keskmine biomass oli 0,63 g (± 0,05 SE), olles madalaim Jatzhornis (0,40 g (± 0,07 SE)) ja kõrgeim Clavadeler Alpis (1,08 g (± 0,13 SE)). Seevastu aasristiku keskmine biomass oli 0,95 g (± 0,05 SE), olles madalaim Silluksel (0,47 g (± 0,05 SE)) ja kõrgeim Bruechis (1,46 g (± 0,08 SE)). Arbuskulaarse mükoriisa kolonisatsioon jäi alla 5% enamikes kasvukohtades, madalaim kolonisatsioon hinnati mõlema liigi puhul Bruechi kasvukohas (harilikus keraheinas 1,17% (± 0,35 SE), aasristikus 0,04% (± 0,02 SE)). AM-hüüfide kolonisatsiooni puhul esinesid suhteliselt kõrgemad väärtused hariliku keraheina puhul Silluksel (27,6% (± 2,1 SE)) ning aasristikul Clavadeler Alpis (30,8% (± 1,39 SE)). Herbivooride kahjustuste hulk varieerus rohkem hariliku keraheina lehtedel. Madalaim kahjustuste hulk tuvastati Bruechis (0,13% (± 0,03 SE)) ja kõrgeim Silluksel (8,03% (± 2,59 SE)). Aasristiku puhul jäi kahjustuste ulatus kitsamasse vahemikku (madaim oli Bruechis 1,90% (± 0,26 SE), kõrgeim Clavadeler Alpis 3,43% (± 0,89 SE)). Patogeenide põhjustatud kahjustused olid hariliku keraheina puhul väga madalad (< 0,5%), kuid aasristikul oluliselt suurema varieeruvusega, olles vähim Clavadeler Alpis (0,79% (± 0,3 SE)) ja kõrgeim Bruechis (5,57% (± 1,87 SE)).

Tabel 2. Hariliku keraheina (Kerahein) ja aasristiku (Ristik) keskmised näitajad biomassi, arbuskulaarse mükoriisa (AM) hüüfide kolonisatsiooni ning herbivooride ja patogeenide poolt tekitatud kahjustuste kohta eri kasvukohtades.

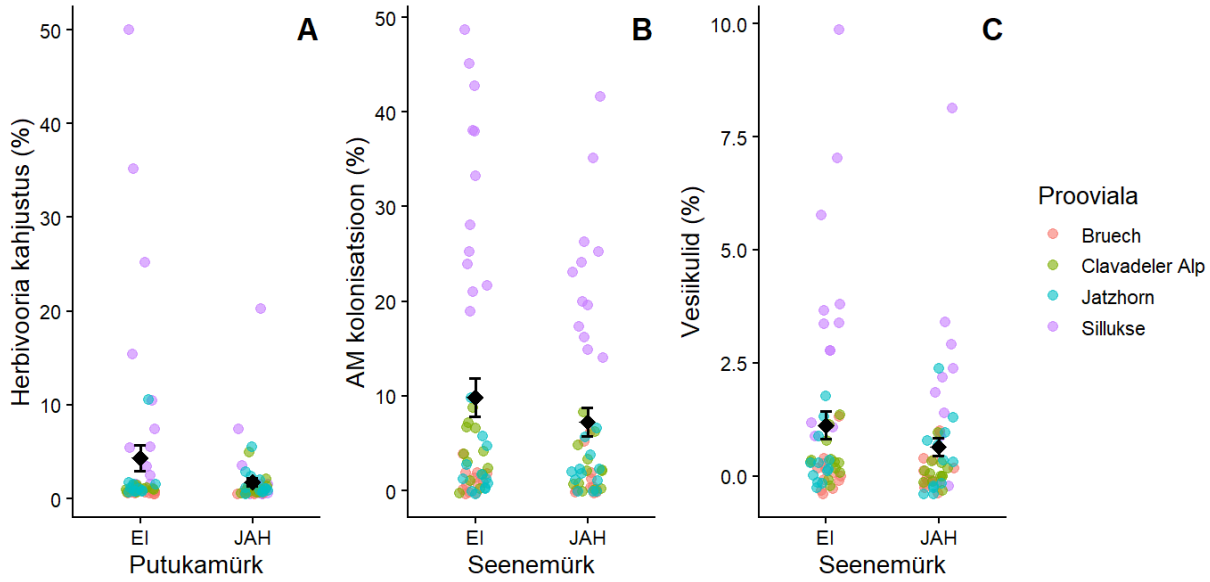
Kasvukoht	Keskmine biomass (g)		Keskmine AM-hüüfide kolonisatsioon (%)		Herbivooride poolt tekitatud kahjustused (%)		Patogeenide poolt tekitatud kahjustused (%)	
	Kerahein	Ristik	Kerahein	Ristik	Kerahein	Ristik	Kerahein	Ristik
Keskmine väärtus	0,63	0,95	8,56	9,12	2,56	2,84	0,19	2,61
Sillukse	0,62	0,47	27,6	4,35	8,03	3,42	0,48	2,85
Bruech	0,43	1,46	1,17	0,04	0,13	1,90	0,19	5,57
Clavadeler_Alp	1,08	0,89	3,17	30,8	0,69	3,43	0,07	0,79
Jatzhorn	0,40	0,95	2,33	1,04	1,27	2,59	0,02	1,32

3.2. Hariliku keraheina näitajad

Putukamürgi lisamine avaldas statistiliselt olulist mõju ainult hariliku keraheina herbivooria kahjustustele, mis oli väiksem putukamürgi lisamisel (Tabel 3). Putukamürgiga pritsides oli herbivooride kahjustuste ulatus keskmiselt 1,24% (± 0,46 SE) ja kontrolltaimedel 3,89% (± 1,39 SE) (Joonis 2A). Putukamürgi kasutamine hariliku keraheina puhul ei avaldanud statistiliselt olulist mõju taime maapealsele biomassile, arbuskulaarse mükoriisa hüüfide, arbuskulite ja vesiikulite kolonisatsioonile ning patogeenide kahjustuste ulatusele. Seenemürgi lisamine mõjutas oluliselt krohmseente hüüfide ja vesiikulite kolonisatsiooni (Tabel 3). Fungitsiidiga töödeldes oli hüüfide kolonisatsioon 7,25% (± 1,48 SE) ja vesiikulite oma 0,65% (± 0,2 SE), samas kui kontrolltaimedes olid need näitajad vastavalt 9,88% (± 2,03 SE) ja 1,12% (± 0,30 SE) (Joonis 2B,C). Seenemürgi kasutamine ei avaldanud statistiliselt olulist mõju taime maapealsele biomassile, arbuskulaarse mükoriisa arbuskulite kolonisatsioonile ning herbivooria ja patogeenide kahjustuste ulatusele. Limusemürgi lisamine ei avaldanud statistiliselt olulist mõju ühelegi mõõdetud hariliku keraheina näitajale (Tabel 3).

Tabel 3. Taimekaitsevahendite (putukamürk, limusemürk, seenemürk) peamõju hariliku keraheina mõõdetud parameetritele: maapealsele kuivmassile, arbuskulaarse mükoriisa hüüfide kolonisatsiooni protsendile (AM %), arbuskulaarse mükoriisa arbuskulite kolonisatsiooni protsendile (Arb %), vesiikulite kolonisatsiooni protsendile ning herbivooria ja patogeenide kahjustustele. Tabelis on esitatud F-statistik mudeli statistilise olulisuse testimiseks, χ^2 (hii-ruut) statistik, p-väärtus (tulemus loeti statistiliselt oluliseks kui $p < 0,05$ ning on märgitud paksus kirjas).

	putukamürk		seenemürk		limusemürk	
Maapealne kuivmass (g)	$F_{1,88}$=1,21	p=0,27	$F_{1,88}$=1,57	p=0,21	$F_{1,88}$=1,42	p=0,24
AM (%)	χ^2 =3,66	p=0,06	χ^2 =7,78	**p=0,005**	χ^2 =0,47	p=0,49
Arb (%)	χ^2 =0,00	p=1,00	χ^2 =0,22	p=0,64	χ^2 =0,88	p=0,35
Vesiikulid (%)	χ^2 =0,18	p=0,67	χ^2 =4,23	**p=0,04**	χ^2 =0,05	p=0,82
Herbivooria kahjustused (%)	χ^2 =4,34	**p=0,04**	χ^2 =1,11	p=0,29	χ^2 =0,80	p=0,37
Patogeenide kahjustused (%)	χ^2 =0,00	p=0,96	χ^2 =0,04	p=0,83	χ^2 =0,10	p=0,76



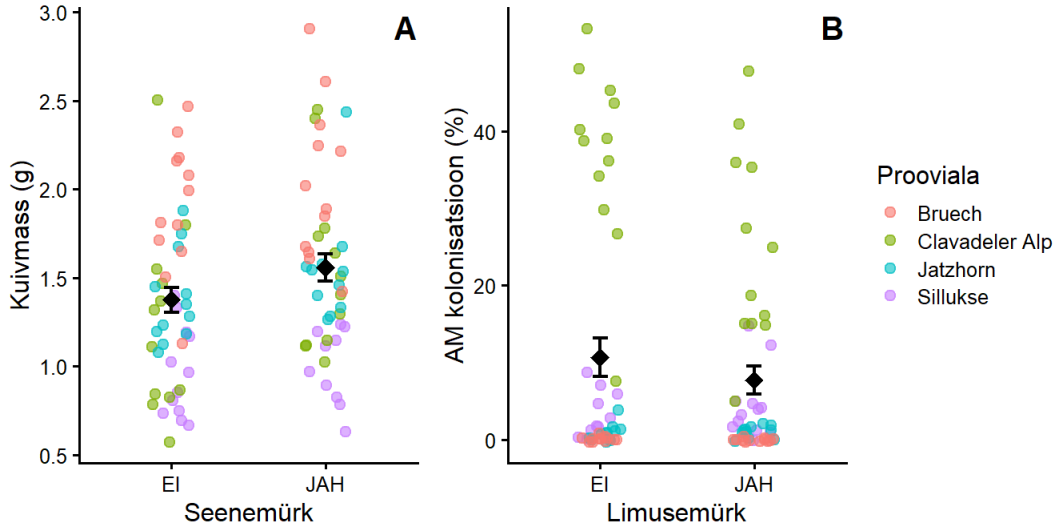
Joonis 2. Hariliku keraheina juures täheldatud putukamürgi mõju herbivooria kahjustuste hulgale (A), seenemürgi mõju AM-hüüfide kolonisatsioonile (B) ning seenemürgi mõju AM-vesiikulite kolonisatsioonile (C). Joonisel olevad värvilised punktid vastavad iga kasvukoha isenditele. Mustad rombid tähistavad rühma aritmeetilist keskmist ning vertikaalsed jooned tähistavad standardviga (± SE).

3.3. Aasristiku näitajad

Putukamürgi lisamine ei avaldanud statistiliselt olulist mõju ühelegi mõõdetud aasristiku näitajale (Tabel 4). Seenemürgi lisamine mõjutas oluliselt ainult maapealse biomassi hulka (Tabel 4), suurendades seda 12,39% (kontrollrühmas oli keskmine kuivmass 0,86g (± 0,07 SE), seenemürgiga pritsides 1,04 g (± 0,08 SE)) (Joonis 3A). Seenemürgi kasutamine aasristiku puhul ei avaldanud statistiliselt olulist mõju arbuskulaarse mükoriisa hüüfide, arbuskulite ja vesiikulite kolonisatsioonile ning herbivooria ja patogeenide kahjustuste ulatusele. Limusemürgi lisamine avaldas statistiliselt olulist mõju ainult aasristiku arbuskulaarse mükoriisa hüüfide kolonisatsioonile (Tabel 4), vähendades AM-kolonisatsiooni keskmist taset (kontrolltaimedes 10,66% (± 2,44 SE), limusemürki kasutades 7,70% (± 1,78 SE)) (Tabel 4) (Joonis 3B). Teistele mõõdetud parameetritele, milleks olid taime maapealne biomass, arbuskulaarse mükoriisa arbuskulite ja vesiikulite kolonisatsioon ning herbivooria ja patogeenide kahjustuste ulatus, limusemürk mõju ei avaldanud.

Tabel 4. Taimekaitsevahendite (putukamürk, limusemürk, seenemürk) peamõju aasristiku mõõdetud parameetritele: maapealsele kuivmassile, arbuskulaarse mükoriisa hüüfide kolonisatsiooni protsendile (AM %), arbuskulaarse mükoriisa arbuskulite kolonisatsiooni protsendile (Arb %), vesiikulite kolonisatsiooni protsendile ning herbivooria ja patogeenide kahjustustele. Tabelis on esitatud F-statistik mudeli statistilise olulisuse testimiseks, χ^2 (hii-ruut) statistik, p-väärtus (tulemus loeti statistiliselt oluliseks kui $p < 0,05$ ning on märgitud paksus kirjas).

	putukamürk		seenemürk		limusemürk	
Maapealne kuivmass (g)	$F_{1,88}$=0,12	p=0,73	$F_{1,88}$=4,30	**p=0,04**	$F_{1,88}$=1,90	p=0,17
AM (%)	χ^2=0,12	p=0,73	χ^2=2,52	p=0,11	χ^2=5,88	**p=0,02**
Arb (%)	χ^2=1,37	p=0,24	χ^2=0,01	p=0,91	χ^2=0,63	p=0,43
Vesiikulid (%)	χ^2=0,68	p=0,41	χ^2=0,02	p=0,89	χ^2=0,59	p=0,44
Herbivooria kahjustused (%)	χ^2=1,59	p=0,21	χ^2=0,00	p=0,97	χ^2=0,36	p=0,55
Patogeenide kahjustused (%)	χ^2=0,13	p=0,72	χ^2=3,40	p=0,07	χ^2=0,05	p=0,82

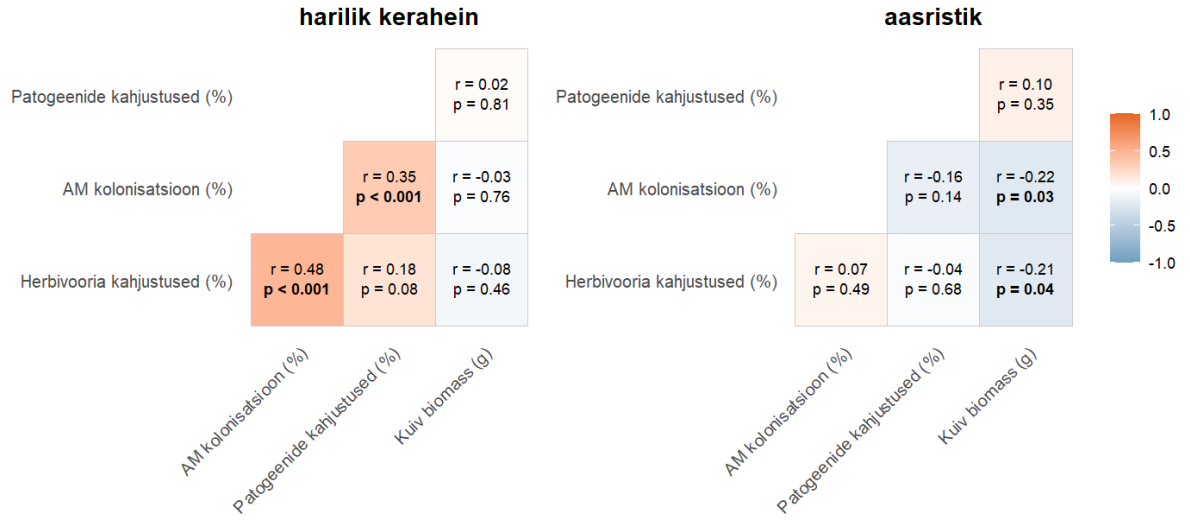


Joonis 3. Aasristiku juures täheldatud seenemürgi mõju taime kuivmassile (A) ning limusemürgi mõju AM-hüüfide kolonisatsioonile (B). Joonisel olevad värvilised punktid vastavad iga kasvukoha isenditele. Mustad rombid tähistavad rühma aritmeetilist keskmist ning vertikaalsed jooned tähistavad standardviga (± SE).

3.4. Korrelatsioonid

Hariliku keraheina puhul varieerusid korrelatsioonid keskmiselt positiivsetest kuni väga nõrgalt negatiivseteni (Joonis 4). Statistiliselt olulised positiivsed korrelatsioonid esinesid AM-kolonisatsiooni (%) ja patogeenide kahjustuste vahel ning herbivooria kahjustuste ja AM-kolonisatsiooni (%) vahel ($p < 0,001$). Statistiliselt olulist korrelatsiooni ei tuvastatud herbivooria ja patogeenide kahjustuste vahel ning maapealse biomassi ja teiste näitajate vahel, milleks olid patogeenide kahjustused, AM-kolonisatsiooni (%) ja herbivooria kahjustused.

Aasristiku puhul varieerusid korrelatsioonid väga nõrgalt positiivsetest kuni nõrgalt negatiivseteni (Joonis 4). Statistiliselt olulised negatiivsed korrelatsioonid esinesid AM-kolonisatsiooni (%) ja maapealse biomassi vahel ning herbivooria kahjustuste ja maapealse biomassi vahel. Statistiliselt olulist korrelatsiooni ei tuvastatud herbivooria kahjustuste ja AM-kolonisatsiooni (%) vahel ning patogeenide kahjustuste ja teiste näitajate vahel, milleks olid maapealne biomass, AM-kolonisatsiooni (%) ja herbivooria kahjustused.



Joonis 4. Korrelatsioonimaatriks hariliku keraheina ja aasristiku andmete kohta. Korrelatsioonimaatriks on koostatud patogeenide kahjustuste, arbuskulaarse mükoriisa (AM) kolonisatsiooni (%), herbivooria kahjustuste ja kuiva biomassi vahel. Mida suuremad (positiivsed või negatiivsed) r väärtused, seda tugevam on korrelatsioon. Mida oranžim, seda positiivsem seos; mida sinisem, seda negatiivsem seos. Joonisel olev p näitab statistilise testi tulemust (tulemus loeti statistiliselt oluliseks kui $p < 0,05$).

4. Arutelu

Nüüdisaja põllumajanduspraktikate oluliseks osaks on pestitsiidide kasutamine herbivooria vähendamiseks. Hiljutised teadusuuringud näitavad, et pestitsiidid mõjutavad ka mittesihtorganisme (Singh ja Pedrinho, 2026; Z. Wang jt, 2025), kuid siiani napib teadmisi nende mõjude kohta looduslikes kooslustes. Käesoleva uurimuse eesmärk oli analüüsida pestitsiidide mõju arbuskulaarsele mükoriisale looduslikes kooslustes, kasutades harilikku keraheina (*Dactylis glomerata*) ja aasristikut (*Trifolium pratense*).

Tulemused näitavad, et mõlema liigi keskmine kuivmass oli suurim lühema kasvuperioodiga kasvukohtades (harilik kerahein Clavadeler Alpis, aasristik Bruechis). See viitab sellele, et biomassi kujunemist mõjutavad suuresti konkreetsete kasvukohtade keskkonnatingimused ning taime interaktsioonid herbivooride, patogeenide ja sümbiontidega. Varasemate uurimuste kohaselt on märgatud mäestikes suuremat kasvukiirust, kuna lühike kasvuperiood sunnib taimi ressursse kiiremini omastama (Ryser & Aeschlimann, 1999), mis võib selgitada ka antud katsealade tulemusi. Lühema kestusega katsealadel võis taimede suurem biomass tuleneda ka sellest, et nad ei pidanud suunama energiat stressitaluvusse ega ebasoodsate keskkonnatingimustega (nt suvine põud, imetajate poolt põhjustatav herbivooria) toimetulekuks, saades seeläbi investeerida olemasoleva ressursi maksimaalselt kasvu ja biomassi suurenemisesse.

Hariliku keraheina patogeenide ja herbivooria kahjustuste ulatuses oli positiivses seoses AM-kolonisatsiooniga, mida võib selgitada kahe erineva protsessiga. Esiteks võib suurenev taimekahjurite kahjustuste ulatus ajendada taime kahjustuste mõju vähendamiseks AM-kolonisatsiooni suurendama. Ka varasemalt on leitud, et AM-kolonisatsioon taime juurtes suureneb herbivooria koormuse tõustes (Eom jt, 2001). Teisalt võis esmalt suureneda AM-kolonisatsiooni hulk ning kuna taim sai sümbioosi käigus kasvada suuremaks, võis see osutuda herbivooride jaoks atraktiivsemaks (Gange 2007, viidatud Gehring & Bennett, 2009 kaudu).

Aasristiku puhul oli statistiliselt oluline negatiivne seos taime maapealse biomassi ja herbivooria kahjustuste vahel, mis oli ootuspärane tulemus ja näitas, et suuremat herbivooriat kogenud taimedel oli katse lõpuks vähem maapealset biomassi. Lisaks oli aasristiku maapealse biomassi ja AM-kolonisatsiooni vahel negatiivne seos, millel võib olla kaks selgitust. Esiteks võis tekkida olukord, kus seenele kuluv süsiniku hulk ületas sümbioosist saadava kasu, mis viis taime biomassi vähenemiseni (Johnson jt, 1997). Seda võib juhtuda, kui mullas on vee või

toitainete puudus (M. Wang jt, 2023). Teiseks, on võimalik, et väiksemad isendid investeerisid rohkem seensümbioosi, et parandada toitainete kättesaadavust (Koide jt, 1988).

Töös püstitatud esimene hüpotees ennustas, et pestitsiidide kasutamine looduslikes kooslustes vähendab herbivooride ja patogeenide kahjustuste ulatust, eriti liblikõielistel taimedel, leidis osalist toetust. Katse tulemused näitasid, et ainult putukamürgi kasutamine vähendas herbivooria kahjustuste hulka, aga mitte aasristikus vaid harilikus keraheinas. Kuigi üldine kahjustustase oli madal, esines harilikul keraheinal vähem kahjustusi putukamürgiga töötlustes, mida on ka varem näidatud (Wilbur jt, 2013). Üheks aspektiks, millega selgitada putukamürgi mõju just harilikule keraheinale ja mitte ristikule, on taimede morfoloogiline ehitus. Nimelt saavad keraheina püstised lehed suurema tõenäosusega insektitsiidiga kaetud, samas kui aasristiku horisontaalsed lehed tekitavad varjutusefekti (Yeary jt, 2018). Selle tulemusena ei ulatu pritsitav aine lehtede alumisele küljele ega vartele, mis võimaldab sealsetel putukatel ellu jääda.

Teine püstitatud hüpotees, et pestitsiidiga töödeldud taimed on suurema biomassiga, leidis toetust ainult aasristiku ja seenemürgi kasutamise puhul. Käesolevas töös kombineeriti fungitsiidide toimeaineid difenokonasool ja asoksüstrobiin, mille mõju on võrreldav Schierenbecki jt (2023) uuringus kasutatud mitme toimemehhanismiga fungitsiididega TSC ja TS (sisaldavad triasooli (T), strobiluriini (S) ja karboksamiidi (C)). Leiti, et fungitsiidide kasutamise järel suurenes taimede biomass 9,6–19,2% võrreldes töötlemata taimedega (Schierenbeck jt, 2023), ning ka käesoleva töö tulemus biomassi kasvu osas jääb eelmainitud vahemikku. See viitab asjaolule, et seenpatogeenid toimivad antud ökosüsteemis oluliste biomassi piirajatena. Nendest vabanemine vähendab taime biootilist stressi ja võimaldab suunata varem kaitsemehhanismidele kulunud ressursid kasvu, kinnitades seeläbi taimekahjurite olulist rolli taimede kasvupotentsiaali reguleerimisel looduslikes tingimustes.

Kooskõlas kolmanda hüpoteesiga vähendas pestitsiidide kasutamine arbuskulaarse mükoriisa kolonisatsiooni mõlema katsealuse taime juurtes. Samas mõjusid katsetaimede arbuskulaarsele mükoriisale erinevad mürgid. Harilikus keraheinas vähendas AM-hüüfide ja -vesiikulite kolonisatsiooni hulka seenemürgi kasutamine, olles kooskõlas varasemate töödega (Gange & West, 1994; Okiobe jt, 2022). Varasemad tööd on leidnud fungitsiidi negatiivset mõju ka arbuskulitele (Gange & West, 1994; Okiobe jt, 2022), kuid käesolevas töös nendele struktuuridele olulist mõju ei leitud. Aasristiku puhul oli negatiivne mõju AM-hüüfidel näha limusemürgi kasutamise puhul, mille toimeaineks oli raud(III)fosfaat (FePO4). Sarnaselt metaldehüüdi negatiivsele mõjule mittesihtorganismidele (Macar jt, 2023), viitavad siinsed

tulemused ka raud(III)fosfaadi potentsiaalsele ökoloogilisele riskile. Kirjanduse põhjal kuuluvad Fe-ga seotud fosfaadid vähelahustuvate fosforivormide hulka ning on taimedele sageli piiratud kättesaadavusega (Ae jt, 1990). Samas võivad mõned taimed fosforivaeguses eritada juureeritisi, mis soodustavad $FePO_4$ lahustumist (Ae jt, 1990; Khan jt, 2022). Suurenenud fosfori sisaldus mullas võis vähendada AM-hüüfide kolonisatsiooni (Nagy jt, 2009), kuna taim sai vajaliku fosfori kätte otse molluskitsiidist ning sümbioos AM-seenega muutus taime jaoks vähem vajalikuks.

Antud katses esinesid küll statistiliselt olulised erinevused pestitsiidi kasutamise mõjus AM-hüüfide kolonisatsioonile, kuid see oli üldiselt madal mõlema liigi puhul ka mittetöödeldud taimedes. Võrdlusena on varasemates uurimuses hinnatud aasristiku AM-hüüfide kolonisatsiooni väärtuseks tavatingimustes 23% (Moll jt, 2016) ning hariliku keraheina puhul on täheldatud varieeruvust vahemikus 23,52% - 53,87% aasta lõikes (Xin jt, 2012). Käesoleva töö tulemustest jäid sarnasesse vahemikku vaid hariliku keraheina proovid Sillukse katsealalt ning aasristiku proovid Clavadeler Alpist. Teiste kasvukohtade kolonisatsioonitase jäi alla 10%, kusjuures madalaim näitaja (0,04%) tuvastati Bruechi kasvukohast pärit aasristiku taimedel. Madala kolonisatsioonitaseme üheks põhjuseks võib pidada katseperioodi lühidust, mis on sarnaselt varem välja toodud ka Okiobe jt (2022) uurimuses. Lisaks võis hüüfide ligipääsu juurtele piirata taimede istutamine koos juuri ümbritseva mullapalliga. Huvitav on märkida, et Šveitsi proovide puhul ei järginud kolonisatsioon otseselt kõrgusgradienti: kuigi Bruech asub madalaimal ja Jatzhorn kõrgeimal punktil (Lisa 1), oli just madalaimas punktis kolonisatsioon minimaalne. See viitab sellele, et lisaks kõrgusele mõjutavad mükoriisat muud asukohaspetsiifilised tegurid, nagu mulla toitainesisaldus või inimmõju intensiivsus.

Korrelatsioonimaatriksist ei selgunud ühtegi statistiliselt olulist negatiivset seost AM-kolonisatsiooni ja patogeenide või herbivooride kahjustuste vahel. See viitab asjaolule, et antud katses ei pakkunud mükoriisne sümbioos taimedele täiendavat kaitset biootilise stressi vastu. Selline tulemus võib olla otseses seoses leitud madala kolonisatsioonitasemega – kui seente ja taime vaheline võrgustik ei ole piisavalt välja arenenud, ei pruugi avalduda ka sümbioosile omased kaitsereaktsioonid.

4.1 Edasiarendused

Käesoleva töö metoodika võimaldas registreerida krohmseente kolonisatsiooni hulka. Tulevikus võiks sarnastes uurimustes lisaks kasutada molekulaarseid meetodeid (nt DNA sekveneerimine), et tuvastada ka juurtes leiduvate krohmseente liigilist koosseisu. See annaks põhjalikuma ülevaate mullaelustiku liigilisest varieeruvusest eri kasvukohtade vahel — antud

uurimuse kontekstis ka eri riikide ja kõrgusgradientide lõikes — ning võimaldaks tuvastada teisigi juurtes esinevaid seenerühmi (nt saprotroofe).

Kuna käesoleva uurimuse korrelatsioonanalüüsid tõid välja mitmeid interaktsioone, mille põhjus-tagajärg seoseid ei ole võimalik ainult nende andmete põhjal kinnitada, tuleks toimemehhanismide selgitamiseks läbi viia manipuleerivaid eksperimente. Näiteks saaks kontrollitud tingimustes (kasvuhoonekatses) uurida, kuidas mulla steriliseerimise abil AM-seente eemaldamine mõjutab taimekahjurite tekitatud kahjustuste ulatust ja taime maapealset biomassi.

Uurimuse tulemusi võis mõjutada ka taimede suhteliselt lühike kasvuperiood, mis mitmeaastaste taimede puhul oli vaid mõni kuu. Okiobe jt (2022) on välja toonud, et 35-päevase kasvuperioodi järel võetud proovides oli AM-seente sisaldus ühtlaselt madal ning fungitsiidi kasutamine ei andnud statistiliselt olulisi tulemusi. Samas ilmnes fungitsiidi selge negatiivne mõju hüüfidele, arbuskulitele ja vesiikulitele alles 90 päeva möödudes (Okiobe jt, 2022). Seega võiks katseperioodi pikendamine, näiteks mitmeaastaste katsetaimede kasutamise näol, potentsiaalselt esile tuua veelgi tugevamaid ja selgemini eristatavaid seoseid käesolevas uurimuses käsitletud faktorite vahel.

Kokkuvõte

Bakalaureusetöö eesmärk oli analüüsida pestitsiidide mõju arbuskulaarsele mükoriisale looduslikes kooslustes, kasutades harilikku keraheina (*Dactylis glomerata*) ja aasristikut (*Trifolium pratense*). Tänapäeva intensiivpõllumajanduses kasutatakse laialdaselt keemilisi pestitsiide, kuid seni on vähe uuritud nende mõju taimede ja teiste organismide vahelistele interaktsioonidele, sealhulgas mullaelustikule.

Andmed koguti aastatel 2023-2024 läbi viidud BugNet („Phytometer Addon“) katse raames. Eestis (Sillukse) ning Šveitsis (Clavadeler Alp, Jatzhorn, Bruech) asuvatele katsealadele istutati ühise päritoluga katsetaimi. Katse lõppedes analüüsiti igalt katsealalt kummagi liigi puhul 24 taime tunnuseid. Töö tulemused näitasid, et hariliku keraheina puhul vähendas fungitsiidi kasutamine arbuskulaarse mükoriisa hüüfide ja vesiikulite kolonisatsiooni, aasristiku puhul avaldas sama mõju AM-hüüfide kolonisatsioonile molluskitsiid. Samas leiti ka positiivseid mõjusid taime jaoks herbivooride ja patogeenide eemaldamise läbi. Aasristiku puhul suurendas fungitsiidi kasutamine taimede maapealset biomassi.

Töö põhjal saab järeldada, et pestitsiidide mõju ulatub kahjurite piiramisest kaugemale, muutes oluliselt mittesihtorganismide ja taimede vahelisi suhteid looduslikes ökosüsteemides. Kuna pestitsiidide mõju arbuskulaarsele mükoriisale on taimeliigiti erinev ning sõltub mitmetest teguritest, tuleb taimekaitsevahendite kasutamisel alati hoolikalt kaaluda kaasnevate keskkonnakahjude ja saadava kasu suhet.

Summary

While chemical pesticides are widely used in intensive agriculture, their impact on the interactions between plants and other organisms, including soil ecosystems, remains widely under-researched. The aim of this bachelor's thesis was to analyze how chemical pesticides affect arbuscular mycorrhiza in natural habitats.

The data were collected during the 2023–2024 BugNet ("Phytometer Addon") experiment from experimental plots in Estonia (Sillukse) and Switzerland (Clavadeler Alp, Jatzhorn, and Bruech). The researched species, *Dactylis glomerata* and *Trifolium pratense,* were used as phytometers, with seeds originating from the same source. At the end of the experiment, various plant traits were measured from 24 plants per species from each experimental plot.

The results of this research showed that fungicide treatment decreased the presence of arbuscular mycorrhizal hyphae and vesicles in *Dactylis glomerata*. In *Trifolium pratense*, hyphal colonization decreased after the application of molluscicides. At the same time, some positive effects were observed due to the removal of herbivores and pathogens; for instance, fungicide treatment increased the aboveground biomass of *Trifolium pratense*.

These findings indicate that the impact of pesticides extends beyond the pest control and may significantly alter interactions between non-target organisms and plants in natural ecosystems. Since the effects of pesticides on arbuscular mycorrhiza are plant species-specific and influenced by various factors, the potential environmental risks and expected benefits should be carefully weighed before applying chemical pesticides.

Tänusõnad

Soovin tänada oma juhendajat Kadri Kooremit kasulike nõuannete, toetava suunamise ja abistava tagasiside eest käesoleva töö valmimisel.

Lisaks soovin tänada oma töörühma kaaslasi Tõnist, Anna-Mariat, Karinit, Monikat ja Paulat, kes olid abiks juureproovide analüüsimisel.

Viimaks soovin tänada oma peret, sõpru ja elukaaslast toetuse ning motivatsiooni eest lõputöö teekonnal.

Kasutatud kirjandus

Abbott, L. K., & Robson, A. D. (1985). Formation of External Hyphae in Soil by Four Species of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *New Phytologist*, *99*(2), 245–255. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1985.tb03653.x

Abreu, M. E., & Munné-Bosch, S. (2007). Photo- and antioxidant protection and salicylic acid accumulation during post-anthesis leaf senescence in Salvia lanigera grown under Mediterranean climate. *Physiologia Plantarum*, *131*(4), 590–598. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.00985.x

Ae, N., Arihara, J., Okada, K., Yoshihara, T., & Johansen, C. (1990). Phosphorus Uptake by Pigeon Pea and Its Role in Cropping Systems of the Indian Subcontinent. *Science*, *248*(4954), 477–480. https://doi.org/10.1126/science.248.4954.477

Ahuja, I., Kissen, R., & Bones, A. M. (2012). Phytoalexins in defense against pathogens. *Trends in Plant Science*, *17*(2), 73–90. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.11.002

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

Araújo, M. F., Castanheira, E. M. S., & Sousa, S. F. (2023). The Buzz on Insecticides: A Review of Uses, Molecular Structures, Targets, Adverse Effects, and Alternatives. *Molecules*, *28*(8), 3641. https://doi.org/10.3390/molecules28083641

Barna, B., Fodor, J., Harrach, B. D., Pogány, M., & Király, Z. (2012). The Janus face of reactive oxygen species in resistance and susceptibility of plants to necrotrophic and biotrophic pathogens. *Plant Physiology and Biochemistry*, *59*, 37–43. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.01.014

Barton, K. E., & Koricheva, J. (2010). The Ontogeny of Plant Defense and Herbivory: Characterizing General Patterns Using Meta-Analysis. *The American Naturalist*, *175*(4), 481–493. https://doi.org/10.1086/650722

Beddows, A. R. (1959). Dactylis glomerata L. *The Journal of Ecology*, *47*(1), 223. https://doi.org/10.2307/2257254

Bernal, J. S., & Medina, R. F. (2018). Agriculture sows pests: How crop domestication, host shifts, and agricultural intensification can create insect pests from herbivores. *Current Opinion in Insect Science*, *26*, 76–81. https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.01.008

BioRender. (2026). *BioRender* [Software]. Science Suite Inc. https://biorender.com

Boller, B., Posselt, U. K., & Veronesi, F. (Toim). (2010). *Fodder Crops and Amenity Grasses*. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0760-8

Brundrett, M. C., & Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, *220*(4), 1108–1115. https://doi.org/10.1111/nph.14976

Carlsen, S. C. K., Understrup, A., Fomsgaard, I. S., Mortensen, A. G., & Ravnskov, S. (2008). Flavonoids in roots of white clover: Interaction of arbuscular mycorrhizal fungi and a pathogenic fungus. *Plant and Soil*, *302*(1–2), 33–43. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9452-9

Clarke, R. G., & Eagling, D. R. (1994). Effects of pathogens on perennial pasture grasses. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, *37*(3), 319–327. https://doi.org/10.1080/00288233.1994.9513070

Davies, W. (1938). Vegetation of Grass Verges and Other Excessively Trodden Habitats. *Journal of Ecology*, *26*, 38–49.

De Silva, P. M. C. S., Pathiratne, A., & Van Gestel, C. A. M. (2009). Influence of temperature and soil type on the toxicity of three pesticides to Eisenia andrei. *Chemosphere*, *76*(10), 1410–1415. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.06.006

Delgado-Baquerizo, M., Reich, P. B., Trivedi, C., Eldridge, D. J., Abades, S., Alfaro, F. D., Bastida, F., Berhe, A. A., Cutler, N. A., Gallardo, A., García-Velázquez, L., Hart, S. C.,

Hayes, P. E., He, J.-Z., Hseu, Z.-Y., Hu, H.-W., Kirchmair, M., Neuhauser, S., Pérez, C. A., … Singh, B. K. (2020). Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature Ecology & Evolution*, *4*(2), 210–220. https://doi.org/10.1038/s41559-019-1084-y

Divekar, P. A., Narayana, S., Divekar, B. A., Kumar, R., Gadratagi, B. G., Ray, A., Singh, A. K., Rani, V., Singh, V., Singh, A. K., Kumar, A., Singh, R. P., Meena, R. S., & Behera, T. K. (2022). Plant Secondary Metabolites as Defense Tools against Herbivores for Sustainable Crop Protection. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(5), 2690. https://doi.org/10.3390/ijms23052690

Douglas, M. R., & Tooker, J. F. (2012). Slug (Mollusca: Agriolimacidae, Arionidae) Ecology and Management in No-Till Field Crops, With an Emphasis on the mid-Atlantic Region. *Journal of Integrated Pest Management*, *3*(1), C1–C9. https://doi.org/10.1603/IPM11023

El-Abeid, S. E., Balabel, N. M., & Messiha, N. A. S. (2025). Mutual Relations Between Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Ralstonia solanacearum in Potato Brown Rot Disease. *Potato Research*, *68*(3), 2631–2661. https://doi.org/10.1007/s11540-024-09834-w

Eom, A.-H., Wilson, G. W. T., & Hartnett, D. C. (2001). Effects of ungulate grazers on arbuscular mycorrhizal symbiosis and fungal community structure in tallgrass prairie. *Mycologia*, *93*(2), 233–242. https://doi.org/10.1080/00275514.2001.12063153

Falk, K. L., Kästner, J., Bodenhausen, N., Schramm, K., Paetz, C., Vassão, D. G., Reichelt, M., Von Knorre, D., Bergelson, J., Erb, M., Gershenzon, J., & Meldau, S. (2014). The role of glucosinolates and the jasmonic acid pathway in resistance of *Arabidopsis thaliana* against molluscan herbivores. *Molecular Ecology*, *23*(5), 1188–1203. https://doi.org/10.1111/mec.12610

Farhaoui, A., Taoussi, M., Laasli, S.-E., Legrifi, I., El Mazouni, N., Meddich, A., Hijri, M., & Lahlali, R. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi and their role in plant disease control: A state-of-the-art. *The Microbe*, *8*, 100438. https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100438

Fernández-Aparicio, M., García-Garrido, J. M., Ocampo, J. A., & Rubiales, D. (2010). Colonisation of field pea roots by arbuscular mycorrhizal fungi reduces *Orobanche* and *Phelipanche* species seed germination. *Weed Research*, *50*(3), 262–268. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00771.x

Fierer, N., Strickland, M. S., Liptzin, D., Bradford, M. A., & Cleveland, C. C. (2009). Global patterns in belowground communities. *Ecology Letters*, *12*(11), 1238–1249. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01360.x

Fiorilli, V., Martínez-Medina, A., Pozo, M. J., & Lanfranco, L. (2024). Plant Immunity Modulation in Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis and Its Impact on Pathogens and Pests. *Annual Review of Phytopathology*, *62*(1), 127–156. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-121423-042014

Ford, J. L., & Barrett, B. A. (2011). Improving red clover persistence under grazing. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 119–124. https://doi.org/10.33584/jnzg.2011.73.2838

Gange, A. C., & West, H. M. (1994). Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and foliar-feeding insects in *Plantago lanceolata* L. *New Phytologist*, *128*(1), 79–87. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb03989.x

Gehring, C., & Bennett, A. (2009). Mycorrhizal Fungal–Plant–Insect Interactions: The Importance of a Community Approach. *Environmental Entomology*, *38*(1), 93–102. https://doi.org/10.1603/022.038.0111

Giovannetti, M., Mari, A., Novero, M., & Bonfante, P. (2015). Early Lotus japonicus root transcriptomic responses to symbiotic and pathogenic fungal exudates. *Frontiers in Plant Science*, *6*. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00480

Giovannetti, M., Turrini, A., Strani, P., Sbrana, C., Avio, L., & Pietrangeli, B. (2006). Mycorrhizal Fungi in Ecotoxicological Studies: Soil Impact of Fungicides, Insecticides and Herbicides. *Prevention Today*, *2*, 47–61.

Hage-Ahmed, K., Rosner, K., & Steinkellner, S. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi and their response to pesticides. *Pest Management Science*, *75*(3), 583–590. https://doi.org/10.1002/ps.5220

Hale, K. R. S., Curlis, J. D., Auteri, G. G., Bishop, S., French, R. L. K., Jones, L. E., Mills, K. L., Scholtens, B. G., Simons, M., Thompson, C., Tourville, J., & Valdovinos, F. S. (2024). A highly resolved network reveals the role of terrestrial herbivory in structuring aboveground food webs. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *379*(1909), 20230180. https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0180

Henderson, I., & Triebskorn, R. (2002). Chemical control of terrestrial gastropods. G. M. Barker (Toim), *Molluscs as crop pests* (1. tr, lk 1–31). CABI Publishing. https://doi.org/10.1079/9780851993201.0001

Insecticide Resistance Action Committee. (2024). *IRAC Mode of Action Classification Scheme* (11.1). IRAC. https://irac-online.org/documents/moa-classification/

Jakobsen, I., Murmann, L. M., & Rosendahl, S. (2021). Hormetic responses in arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry*, *159*, 108299. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108299

Javot, H., Penmetsa, R. V., Terzaghi, N., Cook, D. R., & Harrison, M. J. (2007). A *Medicago truncatula* phosphate transporter indispensable for the arbuscular mycorrhizal

symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(5), 1720–1725. https://doi.org/10.1073/pnas.0608136104

Jiang, D., Tan, M., Wu, S., Zheng, L., Wang, Q., Wang, G., & Yan, S. (2021). Defense responses of arbuscular mycorrhizal fungus-colonized poplar seedlings against gypsy moth larvae: A multiomics study. *Horticulture Research*, *8*(1), 245. https://doi.org/10.1038/s41438-021-00671-3

Jiang, Y., Wang, W., Xie, Q., Liu, N., Liu, L., Wang, D., Zhang, X., Yang, C., Chen, X., Tang, D., & Wang, E. (2017). Plants transfer lipids to sustain colonization by mutualistic mycorrhizal and parasitic fungi. *Science*, *356*(6343), 1172–1175. https://doi.org/10.1126/science.aam9970

Johnson, N. C., Graham, J., & 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

Joubert, A., Bataille-Simoneau, N., Campion, C., Guillemette, T., Hudhomme, P., Iacomi-Vasilescu, B., Leroy, T., Pochon, S., Poupard, P., & Simoneau, P. (2011). Cell wall integrity and high osmolarity glycerol pathways are required for adaptation of Alternaria brassicicola to cell wall stress caused by brassicaceous indolic phytoalexins. *Cellular Microbiology*, *13*(1), 62–80. https://doi.org/10.1111/j.1462-5822.2010.01520.x

Jung, S. C., Martinez-Medina, A., Lopez-Raez, J. A., & Pozo, M. J. (2012). Mycorrhiza-Induced Resistance and Priming of Plant Defenses. *Journal of Chemical Ecology*, *38*(6), 651–664. https://doi.org/10.1007/s10886-012-0134-6

Kaurinovic, B., Popovic, M., Vlaisavljevic, S., Schwartsova, H., & Vojinovic-Miloradov, M. (2012). Antioxidant Profile of Trifolium pratense L. *Molecules*, *17*(9), 11156–11172. https://doi.org/10.3390/molecules170911156

Kempel, A., Adamidis, G. C., Anadón, J. D., Atkinson, J., Auge, H., Avtzis, D., Bachelot, B., Bashirzadeh, M., Bota, J. L., Classen, A., Constantinou, I., Crawley, M., De Bellis, T., Dostal, P., Ebeling, A., Eisenhauer, N., Eldridge, D. J., Encina, G., Estrada, C., … Allan, E. (2025). The Bug-Network (BUGNET): A Global Experimental Network Testing the Effects of Invertebrate Herbivores and Fungal Pathogens on Plant Communities and Ecosystem Function in Open Ecosystems. *Ecology and Evolution*, *15*(10), e72111. https://doi.org/10.1002/ece3.72111

Khan, S., Milham, P. J., Eltohamy, K. M., Jin, Y., Wang, Z., & Liang, X. (2022). Phytate exudation by the roots of Pteris vittata can dissolve colloidal FePO4. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(9), 13142–13153. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16534-2

Kodešová, R., Kočárek, M., Kodeš, V., Drábek, O., Kozák, J., & Hejtmánková, K. (2011). Pesticide adsorption in relation to soil properties and soil type distribution in regional scale. *Journal of Hazardous Materials*, *186*(1), 540–550. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.040

Koide, R., Li, M., Lewis, J., & Irby, C. (1988). Role of Mycorrhizal Infection in the Growth and Reproduction of Wild vs. Cultivated Plants. I. Wild vs. Cultivated Oats. *Oecologia*, *77*(4), 537–543.

Krall, H., Kukk, T., Kull, T., Kuusk, V., Leht, M., Oja, T., Pihu, S., Reier, Ü., Zingel, H., & Tuulik, T. (2010). *Eesti taimede määraja* (kolmas, parandatud trükk). Eesti Loodusfoto; Eesti Maaülikool.

Kukk, T. (2024). *Eesti taimede kukeaabits*. Kirjastus Varrak.

Kumar, P. (2020). A Review—On Molluscs as an Agricultural Pest and Their Control. *International Journal of Food Science and Agriculture*, *4*(4), 383–389. https://doi.org/10.26855/ijfsa.2020.12.004

Kästner, J., Von Knorre, D., Himanshu, H., Erb, M., Baldwin, I. T., & Meldau, S. (2014). Salicylic Acid, a Plant Defense Hormone, Is Specifically Secreted by a Molluscan Herbivore. *PLoS ONE*, *9*(1), e86500. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086500

Köninger, J., Labouyrie, M., Ballabio, C., Dulya, O., Mikryukov, V., Romero, F., Franco, A., Bahram, M., Panagos, P., Jones, A., Tedersoo, L., Orgiazzi, A., Briones, M. J. I., & Van Der Heijden, M. G. A. (2026). Pesticide residues alter taxonomic and functional biodiversity in soils. *Nature*, *650*(8101), 367–373. https://doi.org/10.1038/s41586-025-09991-z

Laznik, Ž., Križman, M., Senekovič, J., Trdan, S., & Urbanek Krajnc, A. (2026). Slug Herbivory Induces Systemic Redox and Volatile Responses in Cabbage That Drive Chemotaxis of Slug-Parasitic Nematodes. *Agronomy*, *16*(3), 350. https://doi.org/10.3390/agronomy16030350

Li, J., Delgado-Baquerizo, M., Wang, J.-T., Hu, H.-W., Cai, Z.-J., Zhu, Y.-N., & Singh, B. K. (2019). Fungal richness contributes to multifunctionality in boreal forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, *136*, 107526. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107526

Macar, O., Kalefetoğlu Macar, T., Çavuşoğlu, K., Yalçın, E., & Acar, A. (2023). Assessing the combined toxic effects of metaldehyde mollucide. *Scientific Reports*, *13*(1), 4888. https://doi.org/10.1038/s41598-023-32183-6

Manresa-Grao, M., Pastor-Fernández, J., Sanchez-Bel, P., Jaques, J. A., Pastor, V., & Flors, V. (2022). Mycorrhizal Symbiosis Triggers Local Resistance in Citrus Plants Against Spider Mites. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 867778. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.867778

Marschner, H., & Dell, B. (1994). Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil*, *159*(1), 89–102. https://doi.org/10.1007/BF00000098

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

Menta, C. (2012). Soil Fauna Diversity—Function, Soil Degradation, Biological Indices, Soil Restoration. G. A. Lameed (Toim), *Biodiversity Conservation and Utilization in a Diverse World*. InTech. https://doi.org/10.5772/51091

Mithöfer, A., & Boland, W. (2012). Plant Defense Against Herbivores: Chemical Aspects. *Annual Review of Plant Biology*, *63*(1), 431–450. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103854

Moll, J., Gogos, A., Bucheli, T. D., Widmer, F., & Van Der Heijden, M. G. A. (2016). Effect of nanoparticles on red clover and its symbiotic microorganisms. *Journal of Nanobiotechnology*, *14*(1), 36. https://doi.org/10.1186/s12951-016-0188-7

Moreira, X., Castagneyrol, B., García-Verdugo, C., & Abdala-Roberts, L. (2021). A meta-analysis of insularity effects on herbivory and plant defences. *Journal of Biogeography*, *48*(2), 386–393. https://doi.org/10.1111/jbi.14003

Nagy, R., Drissner, D., Amrhein, N., Jakobsen, I., & Bucher, M. (2009). Mycorrhizal phosphate uptake pathway in tomato is phosphorus-repressible and transcriptionally regulated. *New Phytologist*, *181*(4), 950–959. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02721.x

Oerke, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, *144*(1), 31–43. https://doi.org/10.1017/S0021859605005708

Okiobe, S. T., Meidl, P., Koths, T., Olschewsky, D., Rillig, M. C., & Lammel, D. R. (2022). Root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi is reduced in tomato plants sprayed

with fungicides. *Frontiers in Agronomy*, *4*, 1028195. https://doi.org/10.3389/fagro.2022.1028195

Pagano, M. C., Kyriakides, M., & Kuyper, T. W. (2023). Effects of Pesticides on the Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis. *Agrochemicals*, *2*(2), 337–354. https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020020

Papantoniou, D., Chang, D., Martínez-Medina, A., van Dam, N. M., & Weinhold, A. (2022). Root symbionts alter herbivore-induced indirect defenses of tomato plants by enhancing predator attraction. *Frontiers in Physiology*, *13*, 1003746. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1003746

Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: The mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, *6*(10), 763–775. https://doi.org/10.1038/nrmicro1987

Peay, K. G., Kennedy, P. G., & Talbot, J. M. (2016). Dimensions of biodiversity in the Earth mycobiome. *Nature Reviews Microbiology*, *14*(7), 434–447. https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.59

Pesticides use and trade. (2025). FAO. https://doi.org/10.4060/cd5968en

Pichersky, E., & Lewinsohn, E. (2011). Convergent evolution in plant specialized metabolism. *Annual Review of Plant Biology*, *62*, 549–566. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103814

Pierpoint, W. S. (2000). Why should plants make medicines? *The Biochemist*, *22*(3), 37–40.

Pusztahelyi, T., Holb, I. J., & Pócsi, I. (2015). Secondary metabolites in fungus-plant interactions. *Frontiers in Plant Science*, *6*. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00573

Rae, R., Verdun, C., Grewal, P. S., Robertson, J. F., & Wilson, M. J. (2007). Biological control of terrestrial molluscs using *Phasmarhabditis hermaphrodita*—Progress and prospects. *Pest Management Science*, *63*(12), 1153–1164. https://doi.org/10.1002/ps.1424

Rasmann, S., Bennett, A., Biere, A., Karley, A., & Guerrieri, E. (2017). Root symbionts: Powerful drivers of plant above- and belowground indirect defenses. *Insect Science*, *24*(6), 947–960. https://doi.org/10.1111/1744-7917.12464

Rasmann, S., Köllner, T. G., Degenhardt, J., Hiltpold, I., Toepfer, S., Kuhlmann, U., Gershenzon, J., & Turlings, T. C. J. (2005). Recruitment of entomopathogenic nematodes by insect-damaged maize roots. *Nature*, *434*(7034), 732–737. https://doi.org/10.1038/nature03451

Riedo, J., Wettstein, F. E., Rösch, A., Herzog, C., Banerjee, S., Büchi, L., Charles, R., Wächter, D., Martin-Laurent, F., Bucheli, T. D., Walder, F., & Van Der Heijden, M. G. A. (2021). Widespread Occurrence of Pesticides in Organically Managed Agricultural Soils—The Ghost of a Conventional Agricultural Past? *Environmental Science & Technology*, *55*(5), 2919–2928. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06405

Royal Botanic Gardens, Kew. (s.a.). *Species Fungorum* [Taksonoomiline andmebaas]. Species Fungorum. Salvestatud 15. aprill 2026 https://www.speciesfungorum.org/names/Names.asp

Ryser, P., & Aeschlimann, U. (1999). Proportional dry-mass content as an underlying trait for the variation in relative growth rate among 22 Eurasian populations of *Dactylis glomerata* s.l. *Functional Ecology*, *13*(4), 473–482. https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00349.x

Schierenbeck, M., Fleitas, M. C., & Simón, M. R. (2023). The Interaction of Fungicide and Nitrogen for Aboveground Biomass from Flag Leaf Emergence and Grain Yield Generation under Tan Spot Infection in Wheat. *Plants*, *12*(1), 212. https://doi.org/10.3390/plants12010212

Schoonhoven, L. M., Loon, J. J. A. van, & Dicke, M. (2010). *Insect-plant biology* (2. ed., reprinted). Oxford Univ. Press.

Schouteden, N., De Waele, D., Panis, B., & Vos, C. M. (2015). Arbuscular Mycorrhizal Fungi for the Biocontrol of Plant-Parasitic Nematodes: A Review of the Mechanisms Involved. *Frontiers in Microbiology*, *6*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01280

Siemann, E., Carson, W. P., Rogers, W. E., & Weisser, W. W. (2008). Reducing Herbivory Using Insecticides. W. W. Weisser & E. Siemann (Toim), *Insects and Ecosystem Function* (Kd 173, lk 303–327). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74004-9_15

Singh, B. K., & Pedrinho, A. (2026). Pesticide cocktails negatively affect soil biodiversity. *Nature*, *650*(8101), 299–301. https://doi.org/10.1038/d41586-026-00039-4

Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed). Academic Press.

Soudzilovskaia, N. A., Vaessen, S., Barcelo, M., He, J., Rahimlou, S., Abarenkov, K., Brundrett, M. C., Gomes, S. I. F., Merckx, V., & Tedersoo, L. (2020). FungalRoot: Global online database of plant mycorrhizal associations. *New Phytologist*, *227*(3), 955–966. https://doi.org/10.1111/nph.16569

Strong, D. R., Lawton, J. H., Southwood, R., & Strong, D. R. (1984). *Insects on plants: Community patterns and mechanisms*. Harvard University Press.

Zhang, Y., Meng, X., Yang, Y., Li, H., Wang, X., Yang, B., Zhang, J., Li, C., Millar, N. S., & Liu, Z. (2016). Synergistic and compensatory effects of two point mutations conferring target-site resistance to fipronil in the insect GABA receptor RDL. *Scientific Reports*, *6*(1), 32335. https://doi.org/10.1038/srep32335

Zubrod, J. P., Bundschuh, M., Arts, G., Brühl, C. A., Imfeld, G., Knäbel, A., Payraudeau, S., Rasmussen, J. J., Rohr, J., Scharmüller, A., Smalling, K., Stehle, S., Schulz, R., & Schäfer, R. B. (2019). Fungicides: An Overlooked Pesticide Class? *Environmental Science & Technology*, *53*(7), 3347–3365. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04392

Trouvé, R., Drapela, T., Frank, T., Hadacek, F., & Zaller, J. G. (2014). Herbivory of an invasive slug in a model grassland community can be affected by earthworms and mycorrhizal fungi. *Biology and Fertility of Soils*, *50*(1), 13–23. https://doi.org/10.1007/s00374-013-0827-1

Turcotte, M. M., Davies, T. J., Thomsen, C. J. M., & Johnson, M. T. J. (2014). Macroecological and macroevolutionary patterns of leaf herbivory across vascular plants. *Proceedings. Biological Sciences*, *281*(1787), 20140555. https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0555

Veresoglou, S. D., & Rillig, M. C. (2012). Suppression of fungal and nematode plant pathogens through arbuscular mycorrhizal fungi. *Biology Letters*, *8*(2), 214–217. https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.0874

Větrovský, T., Kolaříková, Z., Lepinay, C., Awokunle Hollá, S., Davison, J., Fleyberková, A., Gromyko, A., Jelínková, B., Kolařík, M., Krüger, M., Lejsková, R., Michalčíková, L., Michalová, T., Moora, M., Moravcová, A., Moulíková, Š., Odriozola, I., Öpik, M., Pappová, M., … Kohout, P. (2023). GlobalAMFungi: A global database of arbuscular mycorrhizal fungal occurrences from high-throughput sequencing metabarcoding studies. *New Phytologist*, *240*(5), 2151–2163. https://doi.org/10.1111/nph.19283

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

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

Wang, M., Wang, Z., Guo, M., Qu, L., & Biere, A. (2023). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and herbivore infestation depend on availability of soil water and nutrients. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1101932. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1101932

Wang, Z., Yun, S., An, Y., Shu, L., Li, S., Sun, K., & Zhang, W. (2025). Effect of fungicides on soil respiration, microbial community, and enzyme activity: A global meta-analysis (1975–2024). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *289*, 117433. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117433

Wang, X., Jiang, N., Liu, J., Liu, W., & Wang, G.-L. (2014). The role of effectors and host immunity in plant–necrotrophic fungal interactions. *Virulence*, *5*(7), 722–732. https://doi.org/10.4161/viru.29798

Wardle, D. A., Bardgett, R. D., Klironomos, J. N., Setälä, H., Van Der Putten, W. H., & Wall, D. H. (2004). Ecological Linkages Between Aboveground and Belowground Biota. *Science*, *304*(5677), 1629–1633. https://doi.org/10.1126/science.1094875

Wetzel, W. C., Inouye, B. D., Hahn, P. G., Whitehead, S. R., & Underwood, N. (2023). Variability in Plant–Herbivore Interactions. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *54*(1), 451–474. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102221-045015

Wijayawardene, N. (2020). Outline of Fungi and fungus-like taxa. *Mycosphere*, *11*(1), 1060–1456. https://doi.org/10.5943/mycosphere/11/1/8

Wilbur, H., Alba, C., Norton, A., & Hufbauer, R. (2013). The effect of insect herbivory on the growth and fitness of introduced Verbascum thapsus L. *NeoBiota*, *19*, 21–44. https://doi.org/10.3897/neobiota.19.5123

Xin, G., Ye, S., Wu, E., Wang, Y., & Sugawara, K. (2012). Seasonal Dynamics in Arbuscular Mycorrhizal Fungal Colonization and Spore Numbers in the Rhizosphere of Dactylis glomerata L. and Trifolium repens L. *Pakistan Journal of Botany*, *2*(4), 1485–1492.

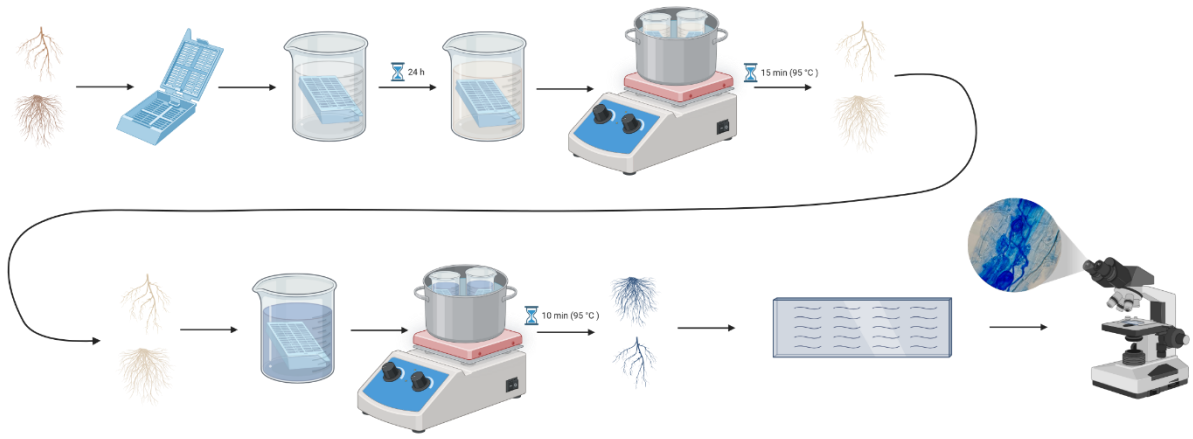
Yeary, W., Fulcher, A., Zhu, H., Klingeman, W., & Grant, J. (2018). Spray Penetration and Natural Enemy Survival in Dense and Sparse Plant Canopies Treated with Carbaryl: Implications for Chemical and Biological Control1. *Journal of Environmental Horticulture*, *36*(1), 21–29. https://doi.org/10.24266/0738-2898-36.1.21

Lisad

Lisa 1. Katsealade asukohariigid, geograafilised koordinaadid ja absoluutsed kõrgused.

Katseala	Riik	Koordinaadid	Kõrgus üle merepinna (m)
Sillukse	Eesti	58°37'19.70"N 23°32'46.60"E	15,25
Bruech	Šveits	46°46'30.21"N 9°48'43.77"E	1535,86
Clavadeler Alp	Šveits	46°46'11.78"N 9°49'57.53"E	2090,23
Jatzhorn	Šveits	46°45'37.90"N 9°51'28.07"E	2481,23

Lisa 2. Juureproovide analüüsi skeem (BioRender, 2026).



Lihtlitsents

Mina, Jana Katre Ojasoo,

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

„Pestitsiidide mõju arbuskulaarsele mükoriisale looduslikes kooslustes“, mille

juhendaja on Kadri Koorem (PhD),

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 Commonsi 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.

Jana Katre Ojasoo

21.05.2026