

Maaperän raskasmetallien yhteisvaikutukset kahden yleisen ruohovartisen kukkakasvin kelpoisuuteen ja pölyttävävierailuihin

Biologian (ekologia ja evoluutiobiologia)
pro gradu -tutkielma

Laatija:
Pasi Ahola

8.1.2026
Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Tutkinto-ohjelma, oppiaine: Filosofian maisterin tutkinto, biologia

Tekijä: Pasi Ahola

Otsikko: Maaperän raskasmetallien yhteisvaikutukset kahden yleisen ruohovartisen kukkakasvin kelpoisuuteen ja pölyttäjävierailuihin

Ohjaajat: Satu Ramula ja Annika Nylund

Sivumäärä: 50 sivua + 1 sivu (liite)

Päivämäärä: 8.1.2026

Raskasmetallisaastuminen on erityisesti kaupunkiekosysteemien ympäristöongelma, sillä liikennepäästöt kerryttävät haitallisia metalleja maaperään. Raskasmetallit imeytyvät maaperästä kasveihin ja kulkeutuvat edelleen ravintoketjussa ylemmille trofiatasoille, kuten hyönteispölyttäjiin, jotka hankkivat ravinnokseen kukkapalkkioita – siitepölyä ja mettä. Saastuneissa elinympäristöissä kasviyksilöiden kelpoisuus ja kasvipopulaatioiden demografinen kohtalo riippuvat paitsi kasvullisesta menestyksestä myös kukkakasvien kyvystä houkuttaa ja ylläpitää pölyttäjaverkostoja. Bioottinen pölytys voi häiriintyä, jos metallit heikentävät kasvien houkuttelevuutta vaikuttamalla kukkaominaisuuksiin tai jos hyönteispölyttäjät karttavat saastuneita kukkia. Selvitin, miten kenttärealistiset maaperän raskasmetallipitoisuudet vaikuttavat Suomen liikenneympäristöissä yleisten kukkakasvien, peltosaunion (*Tripleurospermum inodorum*) ja valkoapilan (*Trifolium repens*), kelpoisuusominaisuuksiin (itävyys, kasvu, biomassa ja kukinta) ja niiden houkuttelevuuteen pölyttäjille (pölyttäjävierailujen määrä ja kesto sekä pölyttäjeyhteisökoostumus). Tutkin kukkakasvien menestymistä täysin satunnaistetulla 2 × 3 tekijällisellä lohkokokeella, jonka maaperäkäsittelyjen (kontrolli, tienvarsi, metallisulatto) metallipitoisuudet (As, Cu, Ni, Pb) perustuivat Suomen liikenne- ja metallisulattoympäristön maaperäarvoihin. Koska valkoapilan kukinta oli heikkoa, tutkin vain peltosaunioiden houkuttelevuutta pölyttäjille systemaattisella pölyttäjäseurannalla niityllä aurinkoisina päivinä. Tienvarsiympäristöille tyypilliset metallipitoisuudet heikensivät peltosaunioiden kasvua ja kukintaa. Pölyttäjät eivät erottaneet raskasmetalleja sisältävässä maaperässä kasvaneita kasveja kontrollikasveista, sillä peltosauniot houkuttelivat yksilömäärällisesti ja taksonomisesti yhdenmukaisen joukon pölyttäjiä kaikissa käsittelyissä. Tienvarsikäsittelyn peltosauniot olivat kuitenkin pienempiä ja ne tuottivat vähemmän kukintoja verrattuna muihin käsittelyihin, mikä todennäköisesti vähentää niiden houkuttelevuutta pölyttäjille, jos ne kasvavat houkuttelevampien kukkakasvien läheisyydessä. Kukkakärpäset (Syrphidae) ja muut kaksisiipiset hylkäsivät tienvarsikäsittelyn peltosauniokukinnot muita käsittelyjä nopeammin, mikä saattaa johtua raskasmetallien vaikutuksista kukkapalkkioiden laatuun ja/tai määrään. Sen sijaan valkoapilat sietivät raskasmetallikuormitusta peltosauniota paremmin kasvullisten ominaisuuksien kannalta, mikä voi johtua adaptaatioista abiottiseen stressiin, kasvi–mikrobimutualismista ja monivuotisesta elinkierrosta. Metallisulatto- ja tienvarsikäsittelyt lisäsivät vastaavassa järjestyksessä peltosaunioiden ja valkoapiloiden kokonaiskuivapainoa kontrolliin verrattuna, mikä saattaa viitata kasvua stimuloivaan hormeettiseen vaikutukseen. Tulosteni perusteella näillä kukkakasveilla on ominaisuuksia, jotka mahdollistavat niiden menestymisen raskasmetallipitoisessa maaperässä. Lisätutkimus on tarpeen raskasmetallien vaikutuksista valkoapilan koko elinkiertoon ja houkuttelevuuteen pölyttäjille. Tulokset peltosaunion osalta herättävät huolta, että saastuneissa elinympäristöissä menestyvät kasvilajit voivat osoittautua ekologisiksi ansoiksi, jos ne houkuttelevat hyönteispölyttäjiä terveyden kannalta haitallisiin elinpiireihin.

Avainsanat: Maaperän raskasmetallit, kasvien kelpoisuus, kasvi–pölyttäjävurorovaikutukset, kukkaominaisuudet, hyönteispölytys, *Tripleurospermum inodorum*, *Trifolium repens*

Master's thesis

Subject: Biology

Author: Pasi Ahola

Title: Joint effects of soil heavy metals on the fitness and pollinator visitation of two common flowering herbs

Supervisors: Satu Ramula and Annika Nylund

Pages: 50 pages + 1 page (appendices)

Date: 8.1.2026

Soil heavy metal contamination is persistent in urban ecosystems, where traffic emissions accumulate ecotoxic metals in soils. Plants absorb heavy metals from the soil into their organs, which enables metal transfer to higher trophic levels, such as insect pollinators that rely on pollen and nectar for nutrition. In contaminated habitats, the fitness of individual plants and demographic fate of plant populations depend not only on vegetative performance but also on plants ability to attract and sustain pollinator networks. Biotic pollination may be disrupted if metals reduce plant attractiveness by altering floral traits or if insect pollinators avoid contaminated flowers. Here, I investigated how field-realistic soil heavy metal mixtures affect the fitness traits (germination, growth, biomass and flowering) and pollinator attractiveness (number and duration of pollinator visits and pollinator community composition) of two flowering herbs that are common in traffic environments in Southern Finland: scentless mayweed (*Tripleurospermum inodorum*) and white clover (*Trifolium repens*). I examined plant performance using a fully randomized 2 × 3 factorial block experiment, in which soil treatments (control, roadside, smelter) contained metal mixtures (As, Cu, Ni, Pb) simulating concentration levels measured in soils from traffic and metal smelter environments in Finland. Because *T. repens* flowered poorly, I assessed pollinator attractiveness only for *T. inodorum* using systematic pollinator observations conducted in a meadow during sunny and calm days. Metal concentrations typical of roadside environments reduced the growth and flowering of *T. inodorum*. Pollinators did not distinguish metal-treated plants from control plants, as *T. inodorum* received similar numbers of pollinator visits across all treatments, and pollinator community composition remained consistent when analysed at the family and order levels. However, roadside-treated *T. inodorum* plants were smaller (shoot length and total dry biomass) and produced fewer inflorescences than those grown in the other treatments, which likely reduces their attractiveness to pollinators when they are growing near more attractive conspecific or heterospecific plant species. Hoverflies (Syrphidae) and other dipterans spent less time on inflorescences of the roadside-treated *T. inodorum*, which may be due to effects of heavy metals on the quality and/or quantity of floral rewards. In contrast, *T. repens* tolerated heavy metal exposure better than *T. inodorum* in terms of vegetative growth, potentially due to adaptations to abiotic stress, plant–microbe mutualisms, and its perennial life cycle. Smelter and roadside treatments increased the total dry biomass of *T. inodorum* and *T. repens*, respectively, compared to the control which may indicate a growth-stimulating hormetic effect. Based on my results, these flowering herbs possess traits that enable them to persist in soils contaminated with heavy metals. Further research is needed to reveal the effects on these heavy metals on the performance of perennial *T. repens* across life stages, as well as on its attractiveness to pollinators. Meanwhile, findings on *T. inodorum* raise concerns that pollinators may be exposed to sublethal concentrations of heavy metals and that plant species persisting in contaminated environments may function as ecological traps by attracting pollinators to detrimental habitats that might reduce their fitness.

Key words: Soil heavy metals, plant fitness, plant–pollinator interactions, insect pollination, floral traits, *Tripleurospermum inodorum*, *Trifolium repens*

Sisällysluettelo

1	Johdanto	6
1.1	Kasvi kohtaa pölyttäjän	6
1.2	Liikenneympäristöjen raskasmetallikuormitus	7
1.3	Raskasmetallien vaikutukset kukkakasveihin	8
1.3.1	Kukkaominaisuudet ja kukkapalkkiot	10
1.3.2	Kukintafenologia	11
1.3.3	Kukintojen houkuttelevuus pölyttäjille	11
1.4	Tutkimuskysymykset ja hypoteesit	13
2	Menetelmät ja aineisto	14
2.1	Tutkimuslajit	14
2.1.1	<i>Tripleurospermum inodorum</i>	14
2.1.2	<i>Trifolium repens</i>	14
2.2	Koeasetelma	15
2.2.1	Kasvatuskoe	15
2.2.2	Pölyttäjäseuranta	16
2.3	Tilastolliset analyysit	17
2.3.1	Kasvien kelpoisuus	17
2.3.2	Pölyttäjäaineisto	18
3	Tulokset	20
3.1	Kasvien kelpoisuus	20
3.1.1	Itävyys ja vegetatiivinen kasvu	20
3.1.2	Biomassa	22
3.1.3	Kukintafenologia ja avoimien kukintojen määrä	23
3.2	Kasvi-pölyttäjävuorovaikutukset	25
3.2.1	Pölyttäjävierailujen määrä	25
3.2.2	Pölyttäjävierailujen kesto	26
3.2.3	Pölyttäjäyhteisön koostumus	26
4	Pohdinta	28
4.1	Yksivuotisen peltosaunion (<i>T. inodorum</i>) menestyminen	28
4.2	Monivuotisen valkoapilan (<i>T. repens</i>) menestyminen	30
4.3	Hormeesi ja metalliresistenssi	33

4.4	Pölyttäjävierailujen määrä peltosaunioilla	35
4.5	Pölyttäjävierailujen kesto peltosaunioilla	37
4.6	Pölyttäjäyhteisön koostumus peltosaunioilla	39
4.7	Johtopäätökset	40
	Kiitokset	41
	Viitteet	42
	Liitteet	51
	Liite 1. Koeasetelma	51

1 Johdanto

1.1 Kasvi kohtaa pölyttäjän

Hyönteispölytteisten kukkakasvien siementuotanto edellyttää kukkavierailuja hyönteisiltä, jotka siirtävät siitepölyhiukkasia heteiltä emiön luotille. Vastineeksi kukkavierailusta kasvi tarjoaa hyönteiselle ravintoa kukkapalkkioina, yleisimpinä siitepölyä, mettä tai molempia. Tätä mutualistiseksi luonnehdittavaa vuorovaikutusta kutsutaan bioottiseksi pölytykseksi, ja pölytyspalvelun tuottavaa hyönteistä nimitetään pölyttäjäksi (Willmer 2011). Kukkakasvit kilpailevat kukillaan pölyttäjistä edistääkseen ristipölytystä, joka vähentää sisäsiittoisuutta, parantaa jälkeläisten geneettistä monimuotoisuutta ja edelleen kasvipopulaation elinvoimaisuutta (Willmer 2011 s. 503–523). Pölyttäjien houkuttelua ja pölytysmenestystä säätelevät lukuisat kukkaominaisuudet (muoto, koko, väri ja tuoksu), kukkapalkkioiden laatu ja määrä sekä kukintojen määrä, sijainti, asento ja kestävyys (Raguso 2008; Willmer 2011). Käytännössä näiden kukkaominaisuuksien muuntelusta on kehittynyt nykyinen kukkakasvien hämmästyttävän monimuotoinen, noin 300 000:n lajin kukkaloisto.

Kasvit ja pölyttäjät muodostavat joko yleisluonteisia tai erikoistuneita suhteita. Yleisluonteiset eli generalistikukat (tai kukinnot) ovat usein säteittäissymmetrisiä, ja niiden kukkapalkkiot ovat helposti saavutettavissa useille pölyttäjähönteisille, kuten kaksisiipisille (Diptera) (Willmer 2011 s. 307–308; Orford ym. 2015). Näille soveltuvat erityisesti asterikasvien (Asteraceae) ja sarjakukkaisten (Apiaceae) avometiset kukkamuodot sekä sarja- ja mykerökukinnot (Ollerton ym. 2007). Erikoistuneet vuorovaikutussuhteet taas edellyttävät kasvien ja pölyttäjien morfologioiden tarkkaa yhteensopivuutta. Tällöin kasvi on erikoistunut houkuttelemaan vain rajattua joukkoa pölyttäjätaksoneita – äärimmillään vain yhtä lajia. Nämä kasvit tuottavat tavallisesti epäsymmetrisiä tai kaksikylikissymmetrisiä kukkia, joiden pitkätorviset teriöt ja mesikannukset vaativat pölyttäjältä erityisiä ominaisuuksia, kuten pitkiä imukärsiä tai kieliä. Useat hernekasviheimon (Fabaceae) kätkömetiset kukat ovat pitkäkielisten mesipistiäisten mielikukkia (Willmer 2011 s. 261–287).

Kasvi–pölyttäjämutilismia pidetään ekologisesti keskeisimpänä lajien välisenä vuorovaikutuksena. Kukkakasvit ovat ravintoketjujen perusta, ja yli 90 % kukkivista kasveista, mukaan lukien monet viljelykasvit, tarvitsevat hyönteispölytyksen lisääntyäkseen (Ollerton ym. 2011; Orford ym. 2015; Willmer 2011 s. 607). Erilaiset ympäristömyrkyt ja saasteet, kuten raskasmetallit, tunnistetaan hyönteis- ja kasviyhteisöjä sekä pölytyspalveluita uhkaaviksi tekijöiksi (Heliölä ym. 2021; Ruas ym. 2022). Kukkakasvien ja pölyttäjähönteisten esiintymistä, niiden välistä ajallis-paikallista kohtaamista ja kukkien houkuttelevuutta säätelevät tekijät vaikuttavat kasvi–pölyttäjävuo- rovaikutusten tiheyteen ja laatuun (Will-

mer 2011 s. 620; Gérard ym. 2020; Bennett ym. 2020; Heliölä ym. 2021). Pölytyspalveluiden heikkeneminen johtaa kasvien siitepölyrajoitteisuuteen eli riittämättömään geenivirtaan kasviyksilöiden välillä. Tämä voi heikentää erityisesti erikoistuneiden kasvilajien lisääntymistä ja suosia generalistisuhteita sekä tuuli- ja itsepölytteisiä lajeja, mikä saattaa yksipuolistaa kasviyhteisöjä (Bennett ym. 2020).

1.2 Liikenneympäristöjen raskasmetallikuormitus

Raskasmetallit ovat hajoamattomia ympäristömyrkkijä ja merkittävä abioottinen stressitekijä useille maa- ja vesiekosysteemien kasveille, eläimille ja mikro-organismeille (Scott ym. 2023; Musah 2025). Niille ei ole täysin vakiintunutta määritelmää, mutta tavallisimmin niillä tarkoitetaan eliöille haitallisia, ekotoksisia metalli- ja puolimetallialkuaineita tai niiden yhdisteitä, joiden tiheys on yli 4–5 g cm⁻³ (Duffus 2002). Suomessa eniten raskasmetallipäästöjä aiheuttavat energiantuotanto ja maantieliikenne (Syke 2024). Kuormitus korostuu kaupunkiekosysteemeissä, joissa raskasmetalleja kertyy liikenneympäristöjen maaperään muun muassa autojen osien ja asfaltin mekaanisesta kulumisesta sekä pakokaasuista (Phillips ym. 2021), jolloin niiden pitoisuudet ylittävät maa- ja kallioperän keskimääräiset luontaiset taustapitoisuudet (De Silva ym. 2021). Euroopassa tienvarsien maaperän pintakerrosten yleisimpiä (puoli)metallialkuaineita ovat lyijy (Pb), kadmium (Cd), arseeni (As: puolimetalli), elohopea (Hg), kupari (Cu), nikkeli (Ni), sinkki (Zn) ja kromi (Cr) (Werkenthin ym. 2014; Nousiainen 2024), joista neljää ensimmäistä pidetään eliöille haitallisimpina (Musah 2025). Werkenthin ym. (2014) tutkimuskatsauksen mukaan liikenteen metallipäästöt ovat runsaimmillaan pintamaassa (0–5 cm) ensimmäisen viiden metrin etäisyydellä ajoradasta. Pitoisuudet vähenevät syvemmillä maaperässä ja etäämmällä tienvarresta (Werkenthin ym. 2014 ja artikkelin viitteet; Phillips ym. 2021). Metallit liikkuvat liikenneympäristöissä hulevesissä maaston kaltevuuksien mukaan (Werkenthin ym. 2014), ja niiden liukoisuutta ja biosaataavuutta eli kulkeutumista ravintoketjuissa määrittävät muun muassa maaperän koostumus (erityisesti maalaji, raekoko ja orgaanisen aineksen määrä) sekä hapetus-pelkistysolosuhteet ja pH-arvo (Zia ym. 2018; Scott ym. 2023). Tärkeä bioottinen säätelytekijä ovat maaperässä elävät kasvien mikrobimutaalittit (mm. typensitojabakteerit ja mykorritsasienet eli sienijuuret), jotka voivat lievittää raskasmetallistressiä ja parantaa isäntäkasvien kelpoisuutta (Rizvi & Khan 2018; Wang ym. 2022; Tan ym. 2023; Yuan ym. 2024). Tienvarsien maaperä on tyypillisesti emäksistä, mikä voi vähentää biosaataavien metallien osuutta maaperässä (De Silva ym. 2021; Bartkowiak ym. 2024).

Tienreunat, pientareet ja radanvarret ovat lineaarisia, kapeita, reunavaikutteisia (uus)elinympäristöjä, jotka muodostavat verkostoja maaseutu- ja kaupunkimaisemissa (Gardiner ym. 2018). Tieverkostojen viheralueita on ehdotettu kaupunkiluonnon monimuotoisuuden kohentajiksi niiden ollessa laaja-alainen ja tiheä maankäyttömuoto (Skaldina ym. 2024): Esimerkiksi Suomessa tieverkon pituus on noin 454 000 kilometriä (Väylävirasto 2025). Tienvarret ylläpitävät parhaimmillaan monimuotoisia luonnonkasviyhteisöjä, jotka tarjoavat resursseja (ravintoa, pesäpaikkoja ja isäntäkasveja) (pölyttäjä)hyönteisille,

edistävät populaatioiden kytkeytyneisyyttä ja kohentavat kaupunkiluonnon monimuotoisuutta ja ympäristön viihtyisyyttä (Phillips ym. 2020; Twerd ym. 2021; Meinzen ym. 2024; Skaldina ym. 2024). Osa Pohjoismaiden perinteisistä niittyjen ja kotojen kasvi- ja hyönteislajeista on löytänyt tyysijan tienvarista säännöllisen niiton ansiosta, mutta vaateliammat perinnebiotooppilajit ovat harvalukuisia tai puuttuvat tyystin (Oldén ym. 2021). Suojelubiologisena kääntöpuolena tienvarsielinympäristöt ovat haastavia ruohovartisille kukkakasveille ja pölyttäjille, sillä ne altistuvat paitsi raskasmetalleille myös liikenteen muille päästöille, kuten typen oksideille (NO_x), otsonille (O₃), pienhiukkasille, lämpötilavaihteiluille, turbulenssille sekä valo- ja melusaasteelle (Phillips ym. 2020, 2021). On riski, että tienvarsiympäristöt osoittautuvat niin kutsutuiksi ekologisiksi ansoiksi (Battin 2004), jos ne houkuttelevat hyönteispölyttäjiä lisääntymisen, levittäytymisen ja terveyden kannalta haitallisiin elinpiireihin (Gardiner ym. 2018; Horstmann 2024).

Raskasmetallit kulkeutuvat maaperästä kasvien juuristoon ja edelleen maanpäällisiin varsiin, lehtiin sekä kukkaelimiin ja hedelmiin (bioakkumulaatio) (Hladun 2011, 2015; Xun ym. 2017). Raskasmetalleja pääsee kasvien juuristoon maaveden mukana ravinteidenoton yhteydessä pintamaan karike- ja humuskerroksesta sekä syvemmistä pohjakerroksista, joissa metallikuormitus voi vaihdella kerroksittain (Gurevitch ym. 2021 s. 89–95). Mitä enemmän maaperässä on raskasmetalleja, sitä enemmän niitä yleensä kertyy kasvibiomassaan (Li ym. 2025). Metallien imeytyminen ja kulkeutuminen johtosolukossa eri kasvinosiin on kuitenkin kasvilaji- ja metallikohtaista (Pietrelli ym. 2022; Scott & Gardiner 2025), ja jopa fylogeneettisesti läheisten sisarlajien assimilaatiokyvyt voivat poiketa toisistaan (Meindl & Ashman 2015). Huomattava kasviversojen altistustaakka on ilman kuiva- ja märkälasseuma (Stancic ym. 2022), ja kaupunkiympäristössä kasvien ulkopinnoille kertyy huomattavasti enemmän metallipartikkeleita kuin ympäröivällä maaseudulla (Subpiramanyam ym. 2021, Pinto-Zevallos ym. 2025). Raskasmetallit siirtyvät ravintoketjussa primaarituottajilta ylemmille trofiatasoille (biomagnifikaatio), kuten pölyttäjä- ja kasvinsyöjähyönteisiin, jotka käyttävät ravinnokseen saastunutta kasvibiomassaa (Scott 2023). Yleinen altistusreitti ovat saastuneet kukkapalkkiot: siitepöly ja mesi, joita pölyttäjähyönteiset käyttävät omana ja/tai jälkeläistensä yksinomaaisena ravintona (Hladun 2015; Scott ym. 2023; Scott & Gardiner 2025). Tienvarsien kasviyhteisöt voivatkin olla merkittävä altistumisreitti niillä eläville niveljalkaisille (Meinzen ym. 2024).

1.3 Raskasmetallien vaikutukset kukkakasveihin

Raskasmetalleilla voi olla neutraaleja, hyödyllisiä tai haitallisia vaikutuksia kasvien kehitykselle ja lisääntymiselle. Hivenainemetallit, kuten kupari (Cu), nikkeli (Ni) ja sinkki (Zn), tukevat optimipitoisuuksina elintoimintoja, kuten pigmenttien biosynteesiä ja entsyymiaktiivisuutta, mutta nämäkin alkuaineet ovat usein haitallisia liiallisina määrinä (Musah 2025). Puolestaan esimerkiksi arseenilla (As),

kadmiumilla (Cd) ja lyijyllä (Pb) ei tiedetä olevan biologisia toimintoja kasveissa (Musah 2025). Metallialtistuminen häiritsee kasvien fysiologisia ja biokemiallisia toimintoja elinkierron eri vaiheissa, mistä voi olla haittaa kasvin kelpoisuudelle – elossasäilyvyydelle, kasvulle ja lisääntymismenestykselle. Myrkkyyvaikutuksiin lukeutuvat muun muassa haihdunnan, kaasujenvaihdon, ravinteiden oton ja yhteyttämistehon heikkeneminen sekä hapettumisstressi (Atta ym. 2023; Musah 2025). Bae ym. (2016) idätyskokeessa raskasmetallialtistus (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) heikensi tienvarsilla esiintyvien ruohovartisten hernekasvien itävyyttä ja taimettumista lisäten kuolleisuutta laji- ja metallikohtaisesti. Myöhemmissä elinkiertovaiheissa kasvit voivat säädellä kasvutapaansa ympäristökijöiden mukaan, ja niillä on tapana allokoida enemmän biomassaa juuristoonsa stressaavissa olosuhteissa: korkeaa juuri–versosuhdetta pidetäänkin kasvua tukevana sopeumana abioottiseen stressiin (tarkasteltu: Qi ym. 2019). Toisaalta raskasmetallien myrkkyyvaikutukset voivat ylittää tämän sopeuman voimakkuudellaan, jolloin juurien kasvu rajoittuu versojen kasvu voimakkaammin (Yang ym. 2010; Bae ym. 2016). Juuriston makro- ja mikromorfologisia muutoksia sekä juuribiomassan vähenemistä on raportoitu useissa tutkimuksissa (Potters ym. 2007; Bini ym. 2012; Hladun ym. 2015; Rizvi & Khan 2018). Tutkimuksissa on havaittu myös versobiomassan ja pituuskasvun rajoittumista. Esimerkiksi kupari (Cu) vähentää versojen ja juurien tuore- ja kuivabiomassaa retiisillä (*Raphanus sativus*) (Hladun 2015) ja kadmium (Cd) auringonkukkien (*Helianthus annuus*) pituuskasvua (Sivakoff ym. 2024).

Toisaalta tiettyjen kasvilajien on raportoitu ylläpitävän tai jopa parantavan kasvukykyään ei-välttämättömien raskasmetallien vaikutuksesta. Tällaista ilmiötä kutsutaan hormeesiksi tai hormeettiseksi vaikutukseksi (Dhiman ym. 2024). Se ilmenee siten, että matalat saastepitoisuudet stimuloivat tiettyä kasvuominaisuutta tai tuottavuutta, kun taas korkeammat pitoisuudet aiheuttavat myrkkyyvaikutuksia ja heikentävät menestymistä (Carvalho ym. 2020; Li ym. 2020; Dhiman ym. 2024). Positiivista vastetta on selitetty muun muassa stressivastegeenien ilmentymisellä, muutoksilla kasvien biokemiallisissa reaktioissa (kasvihormonit, antioksidanttijärjestelmä, reaktiiviset happilajit), maaperän abioottisissa olosuhteissa ja kasvien ravinnetaloudessa sekä taudinaiheuttajien ja kasvinsyöjäpaineen vähenemisellä (Carvalho ym. 2020; Putra & Müller 2023; Dhiman ym. 2024). Hormeettiseen vasteeseen johtavan metallipitoisuuden määrittäminen on haastavaa, sillä vasteet vaihtelevat kasvilajeittain ja metalleittain, ja ilmiötä monimutkaistavat erityisesti metalli-ionien keskinäiset yhteisvaikutukset sekä maaperän edafiset eli fysikaalis-kemialliset ominaisuudet (Carvalho ym. 2020; Dhiman ym. 2024). Tunnetaan myös joukko hyperakkumulaattoreiksi kutsuttuja kasveja (Baker & Brooks 1989), jotka ovat sopeutuneet runsaasti metallipitoisuuksiin erilaisin detoksifikaatio- ja eritysmekanismien, joiden avulla ne ottavat jopa satoja kertoja enemmän metalleja solukoihinsa kuin kasvit keskimäärin (esim. *Silene vulgaris*, *Taraxacum officinale*, *Thlaspi arvense*) (Bhat ym. 2025). Myös kasvilajin sisäinen vaihtelu raskasmetallien sietokyvyssä on mahdollista, koska saastuneiden alueiden kasvipopulaatioissa voi tapahtua hajottavan valintapaineen tuloksena paikallissopeutumista eli geneettistä eriytymistä ekotyypiksi, joka on sopeutunut paikallisiin ympäristöoloihin (Baker 1987; Jiménez-Ambriz ym. 2007).

1.3.1 Kukkaominaisuudet ja kukkapalkkiot

Useimpien koppisiemenisten kukat ovat pölyttäjien houkutteluun erikoistuneita lisääntymiselimiä, joissa kasvi tuottaa pölytyttyään siemeniä sisältäviä hedelmiä (Willmer 2011). Kullekin kasvilajille ominaiset kukkien visuaaliset (koko, muoto, väri, kuviointi, kontrasti) ja kemialliset ominaisuudet (tuoksu, meden koostumus) ovat signaaleja, joista pölyttäjä tunnistaa ravintokasvinsa. Tuoksut houkuttelevat pölyttäjät kauempaa kukkien lähetyville, ja näköetäisyydellä visuaaliset vihjeet ohjaavat pölyttäjän meden ja siitepölyn ääreen. Avoimien kukkien määrällä on olennainen merkitys pölyttäjien houkuttelussa, ja viehättävin kukkarakenne on yleensä kukinto (Willmer 2011 s. 493–498). Vaikka kukkien määrä on positiivisesti yhteydessä pölyttäjien kukkavierailutiheyteen ja siementuottoon, suurten kukintojen tuottaminen lisää todennäköisyyttä naapuripölytykseen (yksikotisen kasvin eri kukkien välinen pölytys), mikä lisää itsesiitoksen haittoja eikä tuota hedelmöitystä itsesteriileillä kasveilla (Willmer 2011 s. 66, 496). Korkeakasvuiset ja suurikukkaiset kasviyksilöt houkuttelevat tehokkaasti pölyttäjiä, jolloin ne saavat usein enemmän kukkavierailuja kuin matalat ja pienikukkaiset yksilöt (Conner & Rush 1996; Willmer 2011; Fornoff ym. 2016; Hernández-Villa ym. 2020). Pölyttäjät myös vierailevat todennäköisemmin kukilla, jotka tuottavat runsaasti kukkapalkkioita (Willmer 2011 s. 190–220; Leonhardt 2024), ja useimmiten meden laatu ja määrä on siitepölyä tärkeämpi houkutin (Fowler ym. 2016; Fornoff ym. 2016). Kukkien lukumäärän ja kukkapalkkioiden laadun välille voi muodostua allokaatiokustannus: kukkien tuotannon lisääntymisen on esimerkiksi havaittu vähentävän meden sokeripitoisuutta (Michael ym. 2025).

Metallien kertyminen maaperästä kukkaelimiin voi heikentää kasvien jälkeläistuottoa ja kelpoisuutta kahdella tavalla: joko häiritsemällä kukkien fysiologiaa tai epäsuorasti vähentämällä pölyttäjähönteisten kukkavierailuja (Xun ym. 2017, 2018). Metallit konsentroituvat kasvilajikohtaisesti eri kukkaelimiin, kuten kukkapohjuksiin, ponsiin, sikiäimiin, vartaloon ja luottiin (Jakovljević ym. 2024), verho- ja terälehtiin (Sánchez-Mata ym. 2014) sekä meteen ja siitepölyyn (Meindl ym. 2014; Xun ym. 2017). Maaperän raskasmetallit voivat heikentää paitsi versojen pituuskasvua myös pienentää teriöiden halkaisijaa ja terälehtien pinta-alaa (Hladun ym. 2011; Sivakoff & Gardiner 2017; Sivakoff ym. 2024) ja vähentää kasviyksilön kukkien lukumäärää (Chaudhry & Khan 2006). Toisaalta metalleilla ei aina ole vaikutusta suuntaan tai toiseen, vaikka ne jakautuvat kaikkiin kasvinosiin (Hladun ym. 2015; Ribeiro ym. 2025), mikä viittaa tällaisten lajien sopeutumiseen raskasmetallistressiin. Tutkimuksissa on raportoitu metallien haitallisista vaikutuksista kasvien jälkeläistuottoon (hedelmien ja siementen lukumäärä ja biomassa) (Shekari ym. 2019 ja artikkelin viitteet), mikä voi johtua vegetatiivisen kasvun rajoittumisesta (Atta ym. 2023), siementen abortoitumisesta (Hladun 2013) tai vähenevistä kukkavierailuista (Meindl & Ashman 2013, 2014, 2015; Sivakoff ym. 2024). Maaperän raskasmetallien vaikutuksia kukkien tuoksuihin ja edelleen houkuttelevuuteen ei tietääkseni ole tutkittu lainkaan.

Meden ja siitepölyn määrä ja niiden kemialliset ominaisuudet ovat tärkeässä asemassa pölyttäjien houkuttelussa, ja kukan pölytysbiologian kannalta oikeanlainen määrä elinkelpoisia ja yhteensopivia siitepölyhiukkasia on välttämätöntä hedelmöitykselle (Willmer 2011). Altistuksen tiedetään vähentävän siitepölyn määrää kamomillalla (*Matricaria chamomilla*) (Zarinkamar ym. 2021) ja heikentävän siitepölyhiukkasten itämistä ja siten siementuottoa ristikukkaiskasveilla (Meindl & Ashman 2017). Toisaalta metallikäsittelyiden on havaittu muuttavan kaksikotisen kasvin sukupuolijakaumaa hedekukkavoittoiseksi (Shekari ym. 2019), mikä mahdollisesti lisää siitepölyn tarjontaa pölyttäjille. Medentuotantoon vaikuttavat ennen kaikkea edafiset tekijät, säätila, kukan tuoreus ja vuorokaudenaika. Li ja muut (2025) havaitsivat, että kadmiumpitoisessa (Cd) maaperässä peltokaalit (*Brassica campestris*) tuottivat vähemmän mettä kontrollikasveihin verrattuna. Pölyttäjien vaatimukset meden sokeripitoisuuden ja viskositeetin suhteen vaihtelevat: esimerkiksi perhosten (Lepidoptera) kelautuvalle imukärsälle sopii vain laimeahko, juokseva mesi (Willmer 2011 s. 323–324; Leonhardt ym. 2024).

1.3.2 Kukintafenologia

Kukinta on olennainen elinkierto vaihe, sillä se kytkeytyy pölyttäjien runsauteen, siementuottoon ja siementen leviämiseen. Onnistunut pölytys vaatii vähintäänkin hyönteispölytteisten kasvien kukintajaksojen ja niiden pölyttäjien fenologisen päällekkäisyyden (Willmer 2011 s. 483–494). Raskasmetallistressi voi aiheuttaa kasveilla fenologisia muutoksia, kuten edistää tai viivästyttää kukinnan alkamista tai muuttaa kukintajakson kestoa ja voimakkuutta (Saikkonen ym. 1998; Khan & Chaundry 2006, 2010; Shekari ym. 2019). Shekarin ja muiden (2019) tutkimuksessa kadmium (Cd) ja lyijy (Pb) viivästyttivät vihaneskurkun (*Cucumis sativus*) kukintaa ja vähensivät hedelmien ja siementen tuottoa (siemenmassa ja -määrä). Seleenin (Se) sen sijaan lievitti kadmiumin (Cd) ja lyijyn (Pb) vaikutuksia nopeuttaen kukinnan alkamista. Kukintafenologiset muutokset voivat johtaa pölyttäjien ja ravintokasvien ajalliseen eriytymiseen (Gérard ym. 2020). Tällaisesta ajallisesta kasvi-pölyttäjäsynchronian katkeamisesta kärsivät vakavimmin lyhytikäiset ja nopeaelinkiertoiset, erikoistuneet lajiparit.

1.3.3 Kukintojen houkuttelevuus pölyttäjille

Meindlin & Ashmanin (2015) *elemental filter* -hypoteesin mukaan kukkapalkkioihin kertyvät raskasmetallit voivat rajoittaa pölyttäjävierailuja sekä muovata pölyttäjäverkostoja vaikuttamalla kukilla vierailijan pölyttäjäyhteisön koostumukseen (osa lajeista ei reagoi metalleihin tai sietävät niitä). Toisaalta pölyttäjävierailut voivat vähentyä, jos metallit heikentävät kasvien houkuttelevuutta muilla tavoin esimerkiksi vaikuttamalla kasvin toiminnallisiin piirteisiin tai kukkaominaisuuksiin, kuten kukintafenologiaan, kukkien määrään ja kokoon, kukkamorfologiaan, tuoksuun tai väritykseen. Joka tapauksessa vähentyvät kukkavierailut heikentävät bioottisen pölytyksen tehokkuutta. Valtaosa kirjallisuudesta puoltaa pölyttäjävierailujen vähenemistä tai vierailujen keston lyhenemistä metallikäsittelyillä kukkakasveilla.

Sivakoff tutkijaryhmineen (2024) havaitsi, että maaperän runsas kadmiumpitoisuus (50 mg Cd kg^{-1}) rajoitti auringonkukkien (*H. annuus*) pituuskasvua ja siementuottoa sekä vähensi paitsi kimalaisten (*Bombus* spp.) kukkavierailuja myös niiden vierailujen kestoa. Samansuuntainen vaikutus ilmeni maaperän lyijykäsittelyssä (80 mg Pb kg^{-1}), joka rajoitti niin ikään auringonkukkien pituuskasvua, mykeröiden pinta-alaa ja kimalaisten kukkavierailujen kestoa kontrolliin verrattuna (Sivakoff & Gardiner 2017). Li ja muut (2025) puolestaan osoittivat, että huomattavasti alhaisempi kadmiumpitoisuus kuin Sivakoff ym. (2024) tutkimuksessa riitti vähentämään tarhamehiläisten (*A. mellifera*) vierailumääriä peltokaalin (*Brassica campestris*) kukilla: vierailut vähenivät lineaarisesti, kun maaperän kadmiumpitoisuus nousi asteittain ($0,60\text{--}1,76 \text{ mg Cd kg}^{-1}$). Maaperän nikkeli-kuormituksella ($200 \text{ mg Ni kg}^{-1}$) ei sen sijaan ollut vaikutusta Ni-hyperakkumulaattori *Streptanthus polygaloides* -ristikukkaiskasvin kukkamorfologiaan tai kukkapalkkioiden määrään, mutta kuormitus vähensi hietamehiläisten (Halictidae: *Lasioglossum*) ja kukkakärpästen (Syrphidae) kukkavierailuja (Meindl & Ashman 2014). Maaperän seleenikäsittelyillä ($0,51 \text{ mg Se l}^{-1}$; $1,53 \text{ mg Se l}^{-1}$) ei ollut vaikutusta retiisiin (*R. sativus*) pääpölyttäjän, tarhamehiläisen (*A. mellifera*), kukkavierailutiheyteen, mutta käsittelyt vähensivät kasveihin kohdistuvaa kasvinsyöjäpainetta (Hladun ym. 2013). Tietääkseni ainoan osin päinvastaisen tuloksen aiempiin tutkimuksiin nähden esittivät Xun ja muut (2018), jotka kokeessaan lisäsivät raskasmetalleja (Cu, Ni, Pb, Zn) *Hosta ensata* -kasvin meteen itsenäisinä käsittelyinään. Käsitellyissä kukissa pölyttäjien (pitkäkieliset kimalaiset ja mehiläiset) vierailut yllättäen lisääntyivät samalla kun mesivarkaiden (lyhytkieliset kimalaiset) vierailut vähenivät. Hyödyllisetkin pölyttäjät tosin hylkäsivät käsitellyt kukat kontrollikukkia nopeammin.

Edellä mainitut tutkimukset eivät ole juurikaan tuottaneet tietoa raskasmetallien mahdollisista yhteisvaikutuksista kasvi-pölyttäjäsuhteisiin. Ainoastaan Phillipsin ja muiden (2021) tutkimuksessa tarhamehiläiset ja ampiaiset kartoivat syöttölaitteita, joiden sakkaroosiliuokseen oli lisätty raskasmetalliseos (Cd, Cu, Pb, Sb, Zn) tienvarsikasvillisuudesta mitatuilla pitoisuuksilla. Vielä ei kuitenkaan tiedetä, miten liikenteen raskasmetallipäästöt vaikuttavat, jos lainkaan, Suomen liikenneympäristöjen pölyttäjäystävällisten kukkakasvien kelpoisuuteen, niiden kykyyn houkuttaa pölyttäjiä sekä kasveilla vierailevan pölyttäjäyhteisön koostumukseen ja diversiteettiin. Skaldina tutkijaryhmineen (2024) selvitti, että Etelä-Suomen kaupunkien liikenneympäristöjen kasvisto on hieman kaupunkia ympäröivien alueiden kasvistoa yhdenmukaisempaa, ja yleisimpien luonnonkukkakasvien peittävyudet ovat niukkoja, korkeimmillaankin alle 10 %. Lisäksi kasvien peittävyudet kasvoivat lineaarisesti etäisyyden kasvaessa tienvarsista, mitä saattaa selittää tienvarsien reunavyöhykkeen raskasmetalligradientti. Raskasmetallikuormituksella nimittäin on tutkimusten mukaan kasvien peittävyksiin nähden päinvastainen trendi eli kuormitus vähenee etäisyyden kasvaessa tienvarsista (Werkenthin 2014).

1.4 Tutkimuskysymykset ja hypoteesit

Tässä opinnäytetyössä tutkin, miten raskasmetallit vaikuttavat Suomen liikenneympäristöissä yleisten kukkakasvien kelpoisuuteen ja niiden houkuttelevuuteen pölyttäjille. Valitsin mallilajeiksi peltosaunio (*Tripleurospermum inodorum*) ja valkoapilan (*Trifolium repens*), joita tavataan yleisenä Etelä-Suomen kaupunkien liikenneympäristöissä (Skaldina ym. 2024). Olin kiinnostunut kenttärealististen saastepitoisuuksien yhteisvaikutuksista, jollaisia kasvit luonnossa todellisuudessa kohtaavat. Tuottamaani tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi arvioitaessa näiden kasvilajien soveltuvuutta viheraluesuunnitteluun, jossa tavoitteena on säilyttää ja tuottaa monimuotoisia, hyönteispölyttäjiä houkuttelevia luonnonkasviyhteisöjä. Päättämiskysymykseni ovat seuraavanlaiset: 1) Millaisia vaikutuksia raskasmetallikuormituksella on kasvien itävyyteen, kasvuun ja kukintaan? 2) Miten kasvien raskasmetallikuormitus vaikuttaa pölyttäjien kukkavierailujen määrään ja vierailujen kestoon sekä pölyttäjien yhteisökoostumukseen?

Hypoteesini ovat, että raskasmetallit heikentävät paitsi kasvien itävyyttä myös vegetatiivista kasvua eli kasvien kokoa (versokorkeus ja biomassa). Odotan, että kasvien kukinta viivästyy ja heikkenee raskasmetallien vaikutuksesta, koska vegetatiivisen kasvun heikkeneminen tyypillisesti myös vähentää kasvien panostusta suvulliseen lisääntymiseen (Gurevitch 2021 s. 143–151; Chen ym. 2023). Arvioin, että näissä kelpoisuusominaisuuksiin liittyvissä vaikutusten voimakkuuksissa on kasvilajikohtaisia eroja, sillä esimerkiksi valkoapila voi monivuotisena kasvina säädellä lisääntymisstrategiaansa panostamalla joko suvuttomaan tai suvulliseen lisääntymiseen (Ehmet ym. 2021), ja lisäksi valkoapilan tiedetään hankkivan juuristoonsa mikrobisymbiontteja, jotka voivat lievittää isäntäkasvin raskasmetallistressiä (Wang ym. 2022; Yuan 2024).

Oletan, että metallikuormitus vähentää kukkakasvien houkuttelevuutta ja siten pölyttäjien kukkavierailuja, kun pölyttäjille on tarjolla saasteettomia kontrollikukkia. Lisäksi arvioin, että kuormitus supistaa kukilla vierailevan pölyttäjyhteisön monimuotoisuutta. Metallikäsitellyt kasvit eivät todennäköisesti kuitenkaan ole täysin luotaantyöntäviä, koska ristipölytteiset peltosaunio- ja valkoapilapopulaatiot menestyvät liikenneympäristöissä. Tästä syystä odotan, että myös käsitellyt kasvit saavat kukkavierailuja, mutta niillä vierailevat pölyttäjät saattavat kuitenkin hylätä kukat kontrollikukkia nopeammin. Kasvien houkuttelevuuteen arvioin vaikuttavan positiivisesti yhtäältä kukkaominaisuudet, kuten kukintojen lukumäärä ja koko, mutta myös kasvien korkeus.

2 Menetelmät ja aineisto

2.1 Tutkimuslajit

2.1.1 *Tripleurospermum inodorum*

Peltosaunio tai saunakukka (*Tripleurospermum inodorum* (L.) Schultz Bip.) on yksivuotinen, toisinaan ylitalvinen 10–100 cm korkea ruohovartinen asterikasvi (Asteraceae). Tätä muinaistulokasta tavataan Suomessa ainakin tienvarsilla, joutomailla, kesannoilla ja rikkakasvina pelloilla (Mossberg ym. 2007). Peltosauniolla on klassinen avoin mykerökukinto, jota reunustavat fertiilit naaraspuoliset valkoiset laitakukat, ja kaksineuvoiset keltaiset kehräkukat sijaitsevat keskellä kukintoa (kuva 1A). Kukintojen määrä on yksilöittäin 1–20. Laji on yleensä itsesteriili, mutta myös itsepölytteisiä populaatiota on löydetty (Kay 1994). Peltosaunion pääpölyttäjiä ovat kaksisiipiset (Diptera), kuten lukuisat kukkakärpäset (Syrphidae), jotka vierailevat kukinnoissa erityisesti siitepölyravinnon perässä (Kay 1994; Lysenkov 2009; Blackmore ym. 2014). Myös tietyt mesipistiäisryhmät, kuten erakkomehiläiset, vierailevat peltosaunion kukinnoilla (Wood ym. 2015). Korkeakasvuiset ja runsaskukkaiset monokulttuurikasvustot houkuttelevat myös kimalaisia (*Bombus* spp.) ja mehiläisiä (*Apis* spp.) pölyttäjikseen (oma havainto). Saastuneen alueen peltosauniopopulaatioiden otannassa selvisi, että kasvi ottaa ainakin kuparia (Cu), nikkeliä (Ni) ja lyijyä (Pb) maaperästä solukoihinsa (Tózsér ym. 2019).



Kuva 1. A) Parvikirvari (Syrphidae: *Episyrphus balteatus*) peltosaunion (*Tripleurospermum inodorum*) kukinnolla ja B) kivikkokimalainen (Apidae: *Bombus lapidarius*) valkoapilan (*Trifolium repens*) kukinnolla. © Pasi Ahola 2025 (Canon EF-S 60 mm F/2.8 Macro USM).

2.1.2 *Trifolium repens*

Valkoapila (*Trifolium repens* L.) on monivuotinen 10–30 cm korkea maanmyötäinen palkokasvi (Fabaceae), jota tavataan yleisenä tienvarsilla, nurmikoilla, pelloilla ja joutomailla (Mossberg ym.

2007). Se hyötyy juuristonsa mikrobimutualisteista (mm. typensitojabakteerit), jotka auttavat sitä menestymään vähäravinteisissa ja stressaavissa olosuhteissa (Jach ym. 2022; Oleńska ym. 2022; Wang ym. 2022; Yuan ym. 2024). Valkoapila lisääntyy sekä suvullisesti pölytyttyään siemenistä että suvuttomasti tuottamalla rametteja juurehtimalla varren nivelkohdista. Pitkäperäinen ja pallomainen, valkoinen kukinto kostuu tuoksuvista syväteriöisistä perhokukista (kuva 1B), jotka tuottavat runsaasti mettä ja houkuttelevat pääpölyttäjiin lukuisia mesipistiäisiä, kuten hunajamehiläisiä (*Apis* spp.) ja kimalaisia (*Bombus* spp.) sekä vähemmissä määrin erakkomehiläisiä, kukkakärpäsiä ja perhosia (Ferrante ym. 2025). Maaperän raskasmetallit kulkeutuvat juuristoon, varsiin, lehtiin ja kukkaelimiin: esimerkiksi Scott ja muut (2025) mittasivat valkoapiloiden ($n = 307$) medestä arseenia (As), kadmiumia (Cd), kromia (Cr) ja lyijyä (Pb) yhteensä keskimäärin $42,92 (\pm 12,50)$ keskivirhe) $\mu\text{g/L}$.

2.2 Koeasetelma

2.2.1 Kasvatuskoe

Järjestin manipulaatiokokeen kesä–elokuussa 2025 Turun yliopiston kasvitieteellisellä puutarhalla, joka sijaitsee Ruissalon saarella ($23,1 \text{ km}^2$) Lounais-Suomessa hemiboreaalaisella kasvillisuusvyöhykkeellä (N $60^{\circ}26'00''$, E $22^{\circ}10'23''$). 2×3 tekijällisessä kasvatuskokeessa oli kolme maaperäkäsittelyryhmää (kontrolli, tienvarsi, metallisulatto) ja kaksi kasvilajia (peltosaunio, valkoapila). Manipulaatiokäsittelyiden (tienvarsi, metallisulatto) metallipitoisuudet perustuivat Kuopion liikenneympäristöjen (liikenteenjakat) maaperästä (0–5 cm) mitattuihin maksimiarvoihin (ks. Nousiainen 2024) ja Harjavallan metallisulaton läheisyydessä (0–11 km) mitattujen maaperäarvojen keskiarvoihin (ks. Ruiz ym. 2018) (kootusti taulukossa 1).

Taulukko 1. Kokeen manipulaatiokäsittelytasojen (metallisulatto ja tienvarsi) raskasmetallipitoisuudet ilmoitettuna mikrogrammoina grammaa maaperän kuivapainoa kohti ($\mu\text{g g}^{-1}$, dw). M/T-suhde ilmoittaa, kuinka monta kertaa suurempi tai pienempi metallisulattoarvo on suhteessa tienvarsiarvoon.

	As	Cu	Ni	Pb
metallisulatto (M)	5,26	279,97	51,28	19,12
tienvarsi (T)	3,15	57,85	13,54	41,83
suhde (M/T)	1,6	4,8	3,8	0,4

Aloitin kokeen kesäkuun alussa (4.6.) valmistamalla kutakin kasvualustaa 35 litraa sekoittamalla 1:2 hiekkaa ja turvepohjaista multaa (Kekkilän Puutarhamulta; pH 6,2; NKP-yleislannoitus) muovisäveissa (65 l). Lisäsin raskasmetallikemikaalit (NaAsO_2 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 1,5 litrassa vesijohtovettä manipulaatiokäsittelyihin, ja kontrollimaaseokseen lisäsin saman verran vesijohtovettä. Sekoitin kaikki maaseokset läpikotaisin säveissaan, ja annoin niiden tasaantua 48 tuntia. Jaoin maaseokset 0,5 litran muoviruukkuihin ($\varnothing = 11 \text{ cm}$), kastelin ne perusteellisesti ja kylvin viisi siementä kuhunkin ruukkuun mullan pinnalle siten, että jokainen kasvilaji \times käsittely -yhdistelmä toistui 30 kertaa ($n = 180$). Peltosaunio siemenet olivat peräisin luonnonpopulaatioista Turusta, ja val-

koapilan siemenet olivat GreenCaren 'Rivendal'-lajiketta. Vähentääkseni mahdollisten ympäristötekijöiden (gradientti- ja reunavaikutus) aiheuttamaa virhevaihtelua, järjestin ruukut aluslautasineen täysin satunnaistettuun lohkorakenteeseen (10 lohkoa, ruukkuvälit ~ 20 cm, naapurilohkojen välit ~ 50 cm) vettä läpäisemättömälle 35 m² suojapeitteelle (5 m × 7 m) isoilta kasvinsyöjiltä suojattuun aitaukseen (kuva liitteessä 1).

Laskin itäneiden siementen lukumäärän ruukuissa kuuden vuorokauden välein kylvöstä 18:nteen vuorokauteen asti, jolloin itävyys oli hiipunut useimmissa ruukuissa. Harvensin taimet yhteen havaintoyksikköön per ruukku. Kuudessa ruukussa ei ollut ainuttakaan itänyttä siementä mutta halusin jatkaa kasvun tutkimista tasapainoisella otoskoolla, joten tein näihin käsittelyiden sisäiset istutukset muista saman käsittelyn ruukuista. Harvennuksen yhteydessä mittasin kasvien alkukorkeuden, ja tein toistomittauksia kasvien kasvusta vielä kolmesti kokeen aikana (30.6., 18.7. ja 11.8.). Mittasin korkeudet mittanauhalla verson tyvestä verson korkeimpaan kohtaan pyöristettynä lähimpään 0,5 senttimetriin. Kun ensimmäiset kukkanuput puhkesivat, aloitin kukintafenologian havainnoinnin kirjaamalla päivittäin muistiin aika-tapahtuma-aineiston jokaisesta uudesta kukkivasta kasvista (kukkiva = 1, kukkimaton = 0). Kokeen päätteeksi (11.8.) huuhtelin varovasti juuristot mullasta ja erottelin verso- ja juuribiomassan puutarhasaksilla omiin paperipusseihinsa biomassamittauksia varten. Kuivasin biomassan paperipusseissa kuivausuunissa (65 °C, 48 t), minkä jälkeen punnitsin täysin kuivuneiden juurien ja versojen kuivapainot (mg) digitaalisella tarkkuusvaa'alla. Valitsin kuivapainon vastemuuttujaksi tuorepainon sijaan, sillä kuivapaino on tuorepainoa vakioidumpi mitta. Erottelin kasvinosat, koska olin kiinnostunut käsittelyiden vaikutuksista kasvien juuri-versoallokointiin (juuri-versosuhde = juurikuivapaino / versokuivapaino). Viisi valkoopilaa oli menehtynyt kokeen aikana, joten analyyseissä niiden toistot olivat $n_{\text{kontrolli}} = 29$, $n_{\text{tienvarsi}} = 30$ ja $n_{\text{metallisulatto}} = 26$.

2.2.2 Pölyttäjäseuranta

Tutkiakseni pölyttäjävierailujen määrää, vierailujen kestoa ja pölyttäjäyhteisön koostumusta käsitellyillä kukkakasveilla järjestin systemaattisen pölyttäjäseurannan Ruissalossa niityllä elokuun alkupuolella neljänä aurinkoisena, tyynenä poutapäivänä (4.8., 6.8., 7.8. ja 9.8.) noin klo 9–16.00. Pölyttäjäseurantojen aikana lämpötilojen vaihteluväli oli 16,8–27,5 °C, ja keskituulen nopeuden vaihteluväli oli 1–6,4 m/s (Ilmatieteen laitos 2025). Pölyttäjäseurantaniityllä kukkineet, peittävyydeltään yleisimmät kukkakasvit (1 × 1 m kasvuruuduilla, n = 8) olivat alsikeapila (*Trifolium hybridum*: 35,2 %), niittynätkelmä (*Lathyrus pratensis*: 12,7 %), siankärsämö (*Achillea millefolium*: 10,5 %), syysmaitiainen (*Scorzoneroidees autumnalis*: 9,5 %) ja hiirenvirna (*Vicia cracca*: 8,4 %). Ennen varsinaista kokeen pölyttäjäseurantaa mittasin pölyttäjien kukkavierailuaikoja sekuntikellolla aurinkoisena päivänä villoilla pelto- ja valkoapiloilla ja määrittääkseni lyhyen ja pitkän kukkavierailuajan raja-arvon sekunteina. Pelto- ja valkoapiloilla määrittääkseni lyhyen ja pitkän kukkavierailuajan raja-arvon sekunteina (keskiarvo ± keskihajonta (otoskoko)) olivat kukkakärpäksillä

9,5 ± 10,9 s (n = 100); muilla kaksisiipisillä 23,6 ± 23,1 s (n = 25); kimalaisilla 4,1 ± 2,8 s (n = 97); hunajamehiläisillä 4,6 ± 2,9 s (n = 105); erakkomehiläisillä 5,2 ± 2,7 s (n = 10). Valkoapiloiden kukilla vierailuajat olivat kimalaisilla 4,6 ± 2,9 s (n = 61) ja hunajamehiläisillä 5,1 ± 3,6 s (n = 58). Näiden havaintojen ja vierailuaikojen vaihteluvälin perusteella valitsin kaksiluokkaisen vastemuuttujan raja-arvoksi kaksi sekuntia (lyhyt ≤ 2 s = 0, pitkä > 2 s = 1).

Valitettavasti jouduin käyttämään pölyttäjäseurannoissa vain peltosaunioita, koska valkoapiloiden kukinta oli heikkoa ja metallikäsittelyihin vinoutunutta ($n_{\text{kontrolli}} = 1$, $n_{\text{tienvarsi}} = 5$, $n_{\text{metallisulatto}} = 4$). Järjestin kukkivia peltosaunioita niitylle neljään pölyttäjäseurantalohkoon siten, että jokaisessa lohkoissa oli $3 \times 3 \times 3$ koeyksikköä kustakin käsittelystä (kontrolli, tienvarsi, metallisulatto) satunnaisessa järjestyksessä. Tienvarsikäsittelyssä peltosaunioiden kukinta oli niukkaa, joten siirsin yhteensä neljää samaa koeyksikköä lohkoista toiseen 10 minuutin havaintojaksojen välillä (ensimmäisen päivän jälkeen käytössä oli kolme samaa koeyksikköä). Valitsin lohkoihin ilmiänsuultaan (versojen korkeus, kukintojen lukumäärä ja teriön halkaisija) mahdollisimman samankaltaisia koeyksiköitä, koska olin kiinnostunut erottavatko pölyttäjät kukinnot käsittelyiden perusteella. Satunnaistin niiden järjestyksen lohkoissa (ruukkuvälit 20 cm, naapurilohkojen välit 5 m). Tarkkailin jokaista lohkoa 10 minuutin ajan kymmenesti päivässä neljänä päivänä ja kirjasin muistiin jokaisen pölyttäjävierailun (pölyttäjän laskeutuminen mykerölle), kukkavierailun keston (0, 1) ja pölyttäjätyyppin (kukkakärpänen, muu kaksisiipinen, kimalainen, hunajamehiläinen, erakkomehiläinen, perhonen, kovakuoriainen, lude, suorasiipinen). Laskin pölyttäjän siirtymisen saman kasviyksilön kukinnosta toiseen uudeksi vierailuksi. Jokaisen pölyttäjäseurantapäivän päätteeksi kirjasin muistiin avoimien kukintojen lukumäärän per kasvi, teriöiden halkaisijan (mm) työntömitalla ja kasvien korkeuden (cm) mittanauhalla.

2.3 Tilastolliset analyysit

2.3.1 Kasvien kelpoisuus

Tutkin raskasmetallien vaikutuksia peltosaunioita ja valkoapilan kelpoisuusominaisuuksiin (itävyys, itämisaika [neliöjuurimuunnettu], verson korkeus [logaritmuunnettu], kokonaiskuivapaino [logaritmuunnettu], juuri–versosuhde [logaritmuunnettu]) yleistetyllä lineaarisella sekamallilla (GLMM) ja lineaarisilla sekamalleilla (LMM) R Studion versiolla 4.5.1 (R Core Team 2025). Käytin GLMM-mallia binomijakaumalla ja logit-linkkifunktiolla itävyystodennäköisyyksien tutkimiseen (glmmTMB::glmmTMB; Brooks ym. 2017) ja LMM-malleja itämisaikoihin, kasvuun, kokonaiskuivapainoihin ja juuri–versosuhteisiin (lme4::lmer; Bates ym. 2015). Toistomittausmalleissa (itävyys ja kasvu) käytin käsittelyä (kontrolli, tienvarsi, metallisulatto), lajia (peltosaunio, valkoapila), aikaa (vrk kylvöstä) ja niiden kolmisuuntaista ja kaikkia kaksisuuntaisia yhdysvaikutuksia kiinteinä luokittelevina tekijöinä. Muissa malleissa (itämisaika, kuivapaino, juuri–versosuhde) kiinteinä tekijöinä olivat käsit-

tely, laji ja niiden kaksisuuntainen yhdysvaikutus. Jokainen malli sisälsi lohkon (koeyksiköiden ryhmitely koeasetelmassa) satunnaistekijänä. Käsittelyllä oli merkitsevä vaikutus kasvien alkukorkeuteen ($F_{df,ddf} = 5,379_{2,165}$; $P = 0,005$), joten en käyttänyt alkukorkeutta kasvumallin kovariaattina. Käytin biomassamallissa vastemuuttujana kokonaiskuivapainoa, koska juuri- ja versokuivapainojen välillä oli voimakas positiivinen korrelaatio ($r = 0,78$; $t_{173} = 16,6$; $P < 0,001$). Tarkastin GLMM-mallin oletukset visuaalisesti jäännösvaihtelukuvaajista ja dispersiotestillä (DHARMA; Hartig 2024), enkä todennut yli-dispersiota (dispersiofaktori = 0,95). Tarkastin LMM-mallien oletukset visuaalisesti jäännösvaihtelukuvaajista, ja totesin vastemuuttujien neliöjuuri- ja logaritimuunnosten täyttävän jäännösten normaalijakaumaoletuksen (ks. yllä mainitut). Testasin GLMM-mallin kiinteiden tekijöiden merkitsevyyden tyyppin III χ^2 -testillä (car::Anova; Fox & Weisberg 2019), ja LMM-malleissa käytin F-testejä, joissa laskin vapausasteet Kenward–Roger-menetelmällä (lmerTest::anova; Kuznetsova ym. 2017). Tein parittaisvertailut Tukeyn testillä (emmeans::emmeans; Lenth 2025) varianssianalyseissä paljastuneille yli kaksitasoisille tilastollisesti merkitseville ($P < 0,05$) selittäjille.

Tutkin peltosaunion kumulatiivista kukintatodennäköisyyttä epäparametrisellä elinaika-analyysillä, joka sopii aineistolle, joka sisältää oikealta sensuroituja havaintoja (osa kasviyksilöistä ei kukkinut kokeen loppuun mennessä). Aineisto ei sisältänyt vasemmalta sensuroituja havaintoja (yksikään kasviyksilö ei menehtynyt ennen kukintaa). Tuotin elinaikakäyrät käsittelyittäin Kaplan–Meier-menetelmällä (survival::survfit; Therneau 2024), ja testasin käsittelyryhmien välistä tilastollista eroa logrank-testillä (Mantel–Cox-testi) (survival::survdiff; Therneau 2024). Tutkin paljastunutta merkitsevää eroa käsittelyryhmien elinaikakäyrien parittaisvertailuilla (Benjamini–Hochberg-korjaus) (survminer::pairwise_survdiff; Kassambara ym. 2025). Kyseinen elinaika-analyysi ei huomioi lohkoa satunnaistekijänä, mutta oletan lohko vaikutuksen vähäiseksi, sillä edellä kuvatuissa sekamalleissa lohko selitti korkeimmillaan 1,7 % vaihtelusta. Tutkin peltosaunion avoimien kukintojen lukumääriä käsittelyryhmittäin Poisson-jakaumaan ja log-linkkifunktioon perustuvalla GLMM-mallilla (lme4::glmer; Bates ym. 2015), jonka oletukset (dispersio = 1,02) ja merkitsevyydet tutkin samoin kuin yllä mainituissa GLMM-malleissa.

2.3.2 Pölyttäjäaineisto

Tarkastelin raskasmetallikuormituksen vaikutusta pölyttäjien kukkavierailujen määrään ja vierailujen kestoon peltosaunioilla yleistetyillä lineaarisilla sekamalleilla (GLMM) (glmmTMB::glmmTMB; Brooks ym. 2017). Kasviyksilö ja pölyttäjäseurantalohko olivat satunnaistekijöinä kaikissa toistomittausmalleissa. Selitin pölyttäjävierailujen lukumääriä negatiiviseen binomijakaumaan ja log-linkkifunktioon perustuvalla toistomittausmallilla, jonka kiinteiksi tekijöiksi valitsin käsittelyn (kontrolli, tienvarsi, metallisulatto), vuorokaudenajan (aamupäivä/iltapäivä) ja niiden yhdysvaikutuksen sekä seuranta-päivän (1–4), avoimien kukintojen lukumäärän, teriön halkaisijan ja kasvien korkeuden. Sisällytin

analyysiin kaikki havaitsemani pölyttäjät. Pölyttäjävierailuaikojen tutkimiseksi sovitin kaksi eri binomijakaumaan ja logit-linkkifunktioon perustuvaa toistomittausmallia: toisen peltosaunion pääpölyttäjille eli kaksisiipisille (kukkakärpäset ja muut kaksisiipiset) sekä toisen mallin mesipistiäisille (erakkomehiläiset ja hunajamehiläiset). Harvalukuisimmat pölyttäjryhmät (*Bombus* spp. [n = 9], Coleoptera [n = 5], Heteroptera [n = 12], Lepidoptera [n = 5], Orthoptera [n = 1]) jätin huomiotta vierailuaika-analyyseissä vähäisten havaintojen ja mallien sovittamisongelmien vuoksi. Molemmissa vierailuaikamalleissa (kaksisiipiset ja mesipistiäiset) käytin vierailuajan (lyhyt ≤ 2 s = 0, pitkä > 2 s = 1) kiinteinä selittäjinä käsittelyä, pölyttäjryhmää ja niiden yhdysvaikutusta sekä seurantapäivää (1–4), vuorokaudenaikaa (aamupäivä/iltapäivä), kukintojen määrää ja teriöiden halkaisijaa.

Tutkin kaikki pölyttäjäaineistomallit mahdollisten jakaumapoikkeamien, ylidispersion tai selittävien tekijöiden kollineaarisuuden varalta, eikä niissä ilmennyt ongelmia (dispersiofaktorit = 0,96–1,01; päävaikutusten VIF-arvot $\leq 1,72$) (DHARMA, Hartig 2024; performance::check_collinearity, Lüdecke ym. 2021). Päädyin yllä mainittuihin malleihin vertailemalla sekä yksinkertaisempien että monimutkaisempien mallien selitysasteita Nakagawan R^2 -menetelmällä (performance::r2_nakagawa; Lüdecke ym. 2021) ja tarkastelemalla kilpailevien mallien Akaiken informaatiokriteeriarvoja (AIC). Näiden perusteella poistin malleista kukintojen tuoreus -muuttujan (aika kukinnon avautumisesta vuorokausina), joka ei parantanut mallien sovittamista. Testasin kiinteiden tekijöiden merkitsevyydet tyypin III χ^2 -testillä (car::Anova; Fox & Weisberg 2019), ja kaksisiipisaineiston vierailuaika-analyyseissä ilmenneelle käsittelyn merkitsevyydelle tein parittaisvertailun Tukeyn testillä (emmeans::emmeans; Lenth 2025). Tutkin raskasmetallien vaikutusta peltosaunioiden pölyttäjyhteisön monimuotoisuuteen Shannon–Weaverin diversiteetti-indeksillä (H'), joka mittaa paitsi lajimäärää (engl. *richness*) myös yksilöiden lukumäärää (engl. *abundance*) ja yksilöiden jakautumista lajien kesken (engl. *evenness*). Kaava 1 esittää kyseisen diversiteetti-indeksin matemaattisen kaavan, jossa s = taksonien kokonaismäärä yhteisössä ja p_i = taksonin i osuus kaikista yksilöistä:

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln(p_i) \quad (1)$$

Tällöin mitä korkeampi diversiteetti-indeksin (H') arvo on, sitä monimuotoisempi yhteisö on. Laskin diversiteetti-indeksit käsittelyittäin kullekin pölyttäjäseurantaan osallistuneelle koeyksikölle (vegan::diversity, Oksanen ym. 2025), ja vertasin niiden keskiarvoja t-testillä metallisulatto- ja kontrollikäsittelyiden välillä, sillä tienvarsikäsittelystä oli vain neljä toistoa. Kuvailin pölyttäjyhteisöjen koostumusta käsittelyittäin ei-metrisellä moniulotteisella skaalauksella (NMDS), jossa käytin Bray–Curtis-etäisyyksiä ja kahta ulottuvuutta (stressiarvo = 0,17) (vegan::metaMDS; Oksanen ym. 2025). Sisällytin monimuuttuja-analyyseihin kaikki havaitsemani pölyttäjät (n = 1917). Käytin tiedonhaun tukena Elsevierin Scopus AI-tekoälytyökalua perehtyessäni tutkielman aihepiireihin.

3 Tulokset

3.1 Kasvien kelpoisuus

3.1.1 Itävyys ja vegetatiivinen kasvu

Käsittely ja mittauskerta selittivät kasvien itävyyttä, ja niiden välinen yhdysvaikutus oli lähes merkitsevä (taulukko 2; kuva 2A, B). Ensimmäisellä mittauskerralla (6 vrk kylvöstä) peltosaunioiden itävyys oli 62,1 % korkeampi tienvarsikäsitelyssä kuin metallisulattokäsittelyssä, mutta kontrolliryhmän itävyys ei eronnut kummastakaan käsittelyryhmästä (kuva 2A). Seuraavina mittauskertoina (12 ja 18 vrk kylvöstä) peltosaunioiden itävyydet tasoittuivat eikä käsittelyryhmien välillä ilmennyt merkitseviä eroja (kuva 2A). Valkoapilan itävyyksissä ei sen sijaan ollut käsittelyryhmien välisiä eroja millään mittauskerralla (kuva 2B). Käsittelyillä ei ollut vaikutusta kummankaan kasvin itämisaikaan (lopulliseen itävyyteen kulunut aika), mutta itämisaajoissa oli merkitsevä lajikohtainen ero (taulukko 2) peltosaunioita saavuttaessa lopullisen itävyyden noin kaksi vuorokautta valkoapilaa aiemmin (peltosaunioita keskiarvo \pm keskivirhe = $9,16 \pm 0,26$; valkoapilan keskiarvo \pm keskivirhe = $11,01 \pm 0,28$).

Käsittelyiden vaikutus kasvien kasvuun riippui voimakkaasti sekä mittauskerrasta että lajista, ja lisäksi kasvien kasvussa oli lajikohtaisia eroja ajan kuluessa (kaksisuuntaiset yhdysvaikutukset, taulukko 2; kuva 2C, D). Tienvarsikäsitely heikensi toisena mittauskertana (44 vrk kylvöstä) peltosaunioiden kasvua kontrolli- ja metallisulattokäsittelyihin verrattuna, ja samansuuntainen negatiivinen vaikutus voimistui entisestään viimeisellä mittauskerralla (68 vrk kylvöstä), jolloin kontrolli- ja metallisulattoryhmän kasvit olivat järjestyksessä 58 % ja 77 % kookkaampia tienvarsikäsitelyyn verrattuna (kuva 2C). Kontrolli- ja metallisulattoryhmän peltosaunioiden keskiarvojen välillä ei ollut merkitseviä eroja millään mittauskerralla (kuva 2C). Käsittelyiden vaikutukset ilmenivät valkoapilan kasvussa vain ensimmäisellä mittauskerralla (27 vrk kylvöstä), jolloin metallisulattokäsittelyssä kasvit olivat 29,2 % lyhyempiä kuin tienvarsikäsitelyssä, mutta kontrolliryhmän keskiarvossa ei ollut merkitsevää eroa kumpaankaan edellä mainittuun (kuva 2D). Lopullisissa korkeuksissa ei ilmennyt käsittelyryhmien välisiä merkitseviä eroja (kuva 2D).

Taulukko 2. Yleistety (GLMM) ja yleisten (LMM) lineaaristen sekamallien tulokset käsittelyn, lajin ja ajan vaikutuksista peltosaunion (*T. inodorum*) ja valkoapilan (*T. repens*) itämistodennäköisyyteen ja kasvuun sekä käsittelyn ja lajin vaikutuksista niiden itämisaikaan, kokonaiskuivapainoon ja juuri-versosuhteeseen. Mallien satunnaistekijöinä olivat lohko ja toistomittausmalleissa lisäksi kasviyksilö. df ja ddf ilmoittavat tuossa järjestyksessä osoittajan ja nimittäjän vapausasteet. Merkitsevät vaikutukset ($P < 0,05$) on lihavoitu. Marginaalisesti merkitsevät vaikutukset ($P < 0,1$) on merkitty asteriskilla (*).

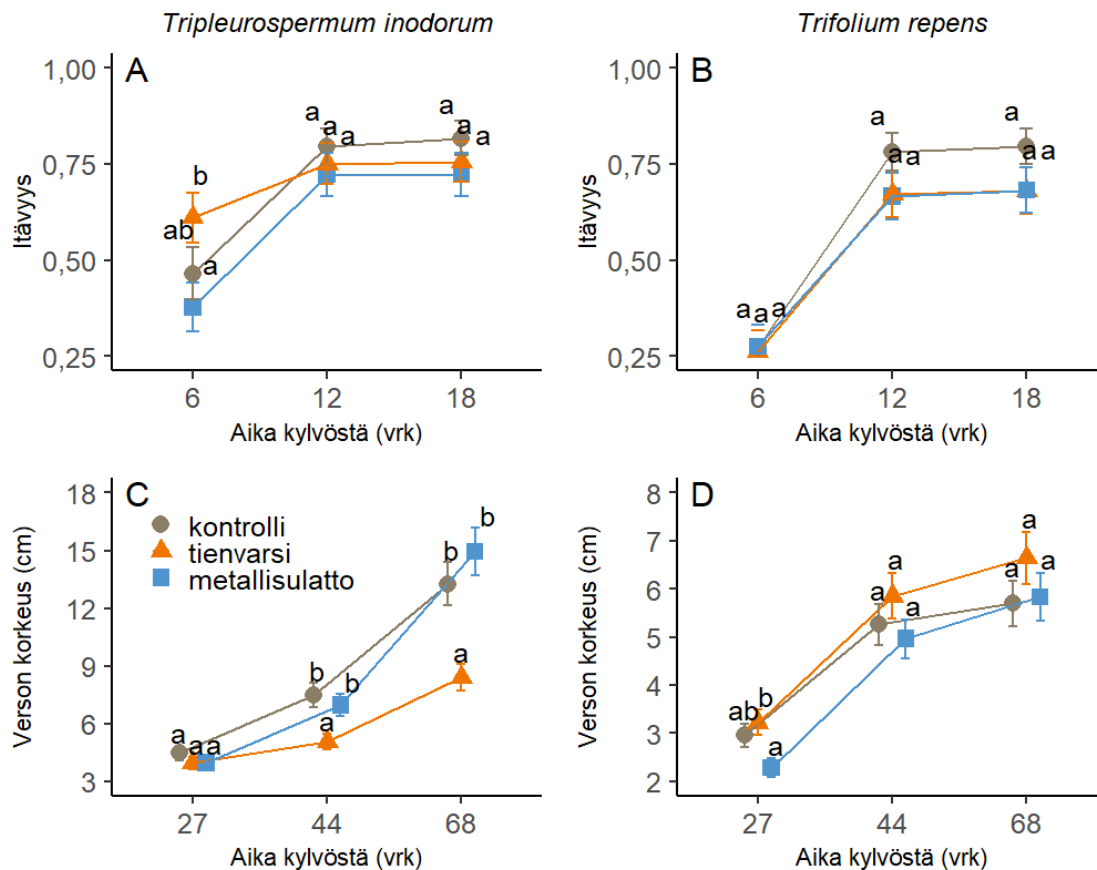
Selittäjä	Itävyys		log(Verson korkeus)		sqrt(Itämisaika)		log(Kuivapaino)		log(Juuri:verso)	
	χ^2_{df}	<i>P</i>	$F_{df,ddf}$	<i>P</i>	$F_{df,ddf}$	<i>P</i>	$F_{df,ddf}$	<i>P</i>	$F_{df,ddf}$	<i>P</i>
Käsittely (3 tasoa)	6,204 ₂	0,044	1,332 _{2,165}	0,266	1,445 _{2,165}	0,239	4,460 _{2,160}	0,013	0,806 _{2,160}	0,448
Laji (2 tasoa)	1,441 ₁	0,229	61,779 _{1,165}	<0,001	22,760 _{1,165}	<0,001	93,891 _{1,160}	<0,001	5,835 _{1,160}	0,016
Aika (3 tasoa)	38,391 ₂	<0,001	338,522 _{2,343}	<0,001						
Käsittely × laji	3,478 ₂	0,175	9,240 _{2,165}	<0,001	0,059 _{2,165}	0,943	14,173 _{2,160}	<0,001	6,204 _{2,160}	0,002
Käsittely × aika	8,625 ₄	0,071*	5,554 _{4,343}	<0,001						
Laji × aika	0,549 ₂	0,759	24,209 _{2,343}	<0,001						
Käsittely × laji × aika	3,353 ₄	0,500	1,839 _{4,343}	0,121						

Taulukko 3. Logrank-testin ja parittaisvertailujen tulokset käsittelyiden vaikutuksesta peltosaunioiden (*T. inodorum*) kumulatiiviseen kukintatodennäköisyyteen. Merkitsevät vaikutukset ($P < 0,05$) on lihavoitu. Marginaalisesti merkitsevät vaikutukset ($P < 0,1$) on merkitty asteriskilla (*).

Käsittely	N	Havaittu (H)	Odotettu (O)	(H-O) ² /O	(H-O) ² /Varianssi
kontrolli	30	17	11,7	2,39	3,450
tienvarsi	30	9	16,5	3,38	5,808
metallisulatto	30	16	13,8	0,34	0,528

Logrank-testi: $\chi^2 = 6,4$; df = 2; P = **0,04**

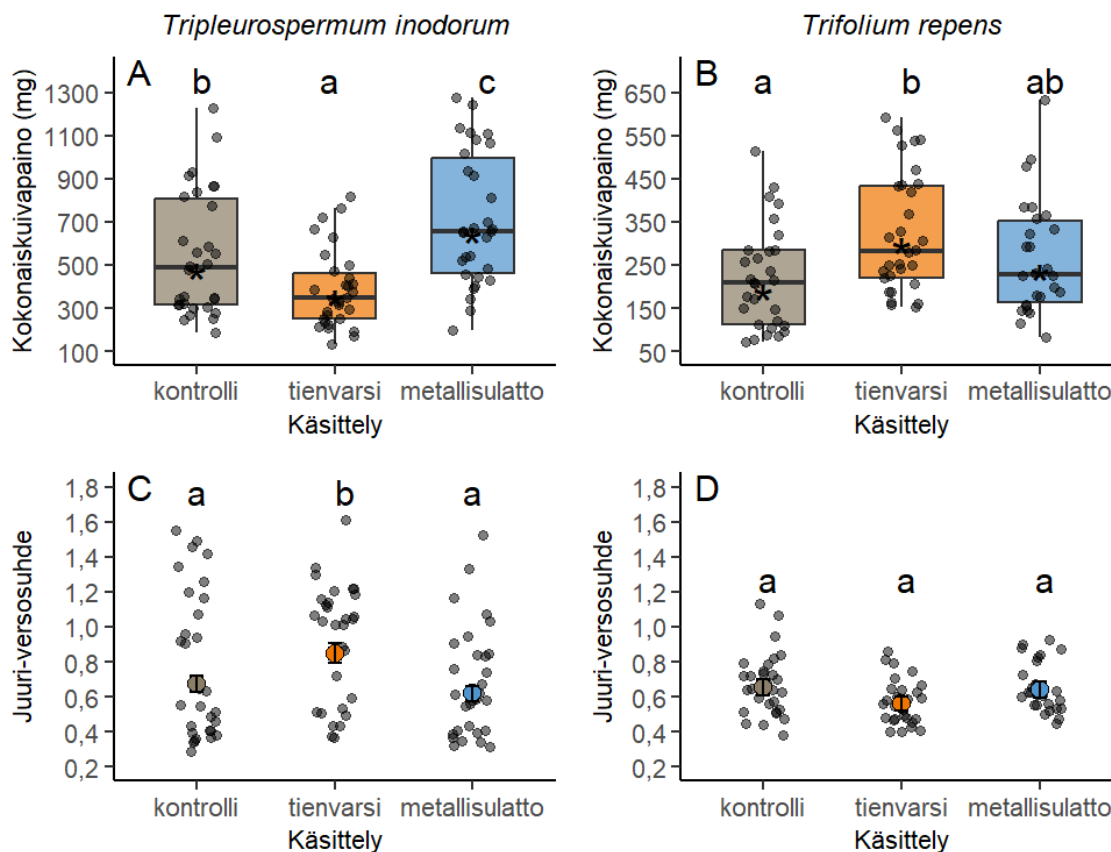
Parittaisvertailut	P
kontrolli–metallisulatto	0,523
kontrolli–tienvarsi	0,046
tienvarsi–metallisulatto	0,077*



Kuva 2. Parittaisvertailujen tulokset käsittelyryhmien (kontrolli, tienvarsi, metallisulatto) vaikutuksista peltosaunioiden (*T. inodorum*) itävyyteen (A) ja kasvuun (C) sekä valkoapiloiden (*T. repens*) itävyyteen (B) ja kasvuun (D) ajan funktiona (vuorokausina kylvöstä). Eri kirjainsymbolit osoittavat logaritmiasteikolta takaisinmuunnettujen keskiarvojen (\pm keskivirhe) merkitsevät erot käsittelyryhmien välillä ($P < 0,05$; Tukeyn testi).

3.1.2 Biomassa

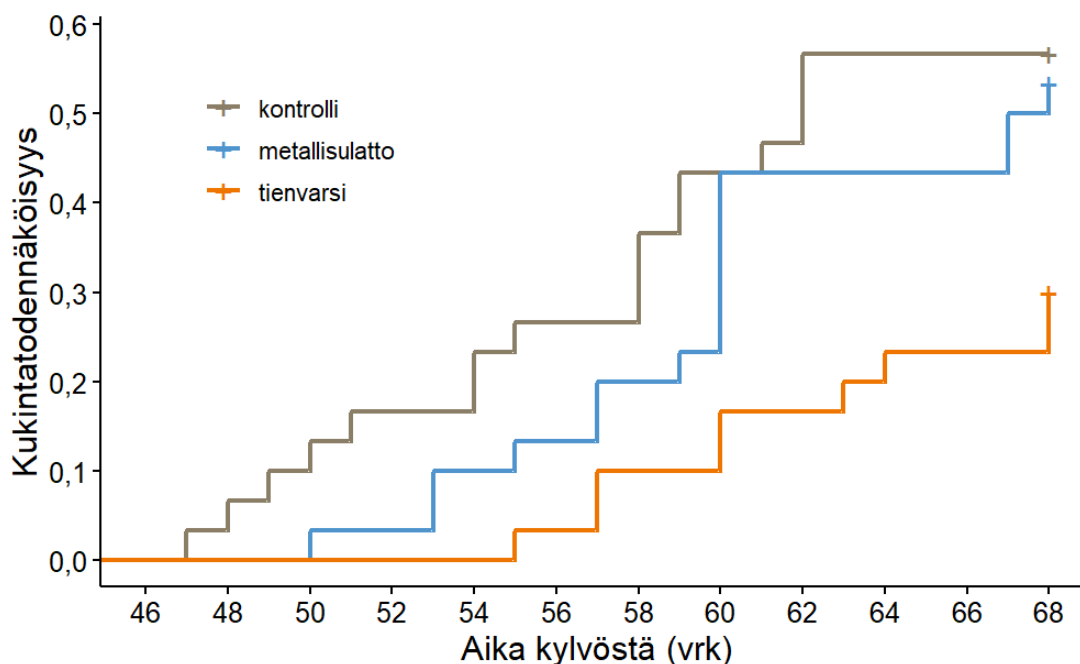
Käsittelyiden vaikutukset kasvien kokonaiskuivapainoon ja juuri–versosuhteeseen vaihtelivat kasvila-jeittain (merkitsevät kaksisuuntaiset yhdysvaikutukset, taulukko 2; kuva 3). Tienvarsi- ja metallisulattokäsittelyt aiheuttivat erisuuntaiset vaikutukset peltosaunioiden kuivapainoihin kontrolliin verrattuna: peltosaunioidet tuottivat tienvarsikäsittelyssä 26,9 % vähemmän biomassaa kuin kontrollissa, mutta metallisulattokäsittelyssä ne tuottivat 35,2 % enemmän biomassaa kuin kontrollissa (kuva 3A). Näin ollen tienvarsikäsittelyssä peltosaunioidet olivat keskimäärin 45,9 % kevyempiä metallisulattokäsittelyyn verrattuna (kuva 3A). Sen sijaan tienvarsikäsittely lisäsi valkoapiloiden biomassaa 56 % kontrolliin verrattuna, mutta metallisulattokäsittely ei eronnut merkitsevästi kummastakaan käsittelystä (kuva 3B). Peltosaunioiden juuri–versosuhte oli tienvarsikäsittelyssä 26,3 % suurempi kuin kontrollissa ja 37,1 % suurempi kuin metallisulattokäsittelyssä (kuva 3C). Jälkimmäisten keskiarvoissa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa (kuva 3C). Käsittelyillä ei ollut vaikutusta valkoapilan juuri–versosuhteeseen, ja yksittäiset havaintoarvot ryhmittäytyivät keskiarvojen lähetyville (kuva 3D).



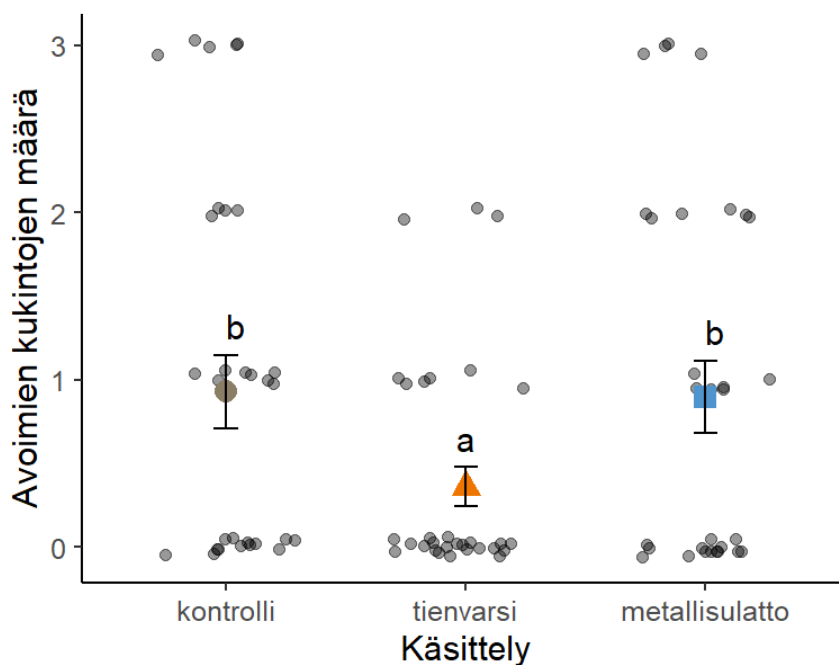
Kuva 3. Käsittelyiden (kontrolli, tiensarsi, metallisulatto) vaikutukset peltosaunioiden (*T. inodorum*) kokonaiskuivapainoihin (A) ja juuri–versosuhteisiin (C) sekä valkoapiloiden (*T. repens*) kokonaiskuivapainoihin (B) ja juuri–versosuhteisiin (D). Kokonaiskuivapainojen logaritmiasteikolta takaisinmuunnetut keskiarvot on ilmoitettu asteriskein (*), ja laatikkokuvaajien ala- ja ylärajat kuvaavat ala- ja yläneljänneksiä, vaakaviiva mediaania ja pystyviivat kokonaiskuivapainojen minimi- ja maksimiarvoja. Juuri–versosuhteet on ilmoitettu takaisinmuunnetuilla keskiarvoilla (\pm keskivirhe). Harmaat pisteet kuvaavat yksittäisiä havaintoarvoja, ja eri kirjainsymbolit osoittavat parittaisvertailujen tuottamat tilastollisesti merkitsevät keskiarvojen erot käsittelyryhmien välillä ($P < 0,05$; Tukeyn testi).

3.1.3 Kukintafenologia ja avoimien kukintojen määrä

Elin aika-analyysin logrank-testi paljasti käsittelyn merkitsevän vaikutuksen peltosaunioiden (*T. inodorum*) kukkimistodennäköisyyteen (taulukko 3). Käsittelyryhmien parittaisvertailut osoittivat, että kumulatiivinen kukintatodennäköisyys oli matalampi tiensarsikäsittelyssä kuin kontrollissa ja marginaalisesti matalampi tiensarsikäsittelyssä kuin metallisulattokäsittelyssä (taulukko 3; kuva 4). Metallisulattoryhmän kukinta ei eronnut kontrollista (taulukko 3). Tienvarsikäsittelyssä peltosaunioiden kukinta alkoi muita ryhmiä myöhemmin, eteni hitaammin (loiva Kaplan–Meier-käyrä) ja lopullinen kukintatodennäköisyys (30 %) jäi metallisulatto- ja kontrollikäsittelyä alhaisemmaksi, jotka saavuttivat järjestyksessä 53 %:n ja 57 %:n kukintatodennäköisyyden kokeen loppuun mennessä (kuva 4). Peltosauniot tuottivat kokeen loppuun mennessä tiensarsiryhmässä vähemmän avoimia kukintoja kuin kontrolli- ja metallisulattoryhmässä, jotka eivät eronneet toisistaan ($\chi^2_{df=2} = 8,952$; $P = 0,011$; kuva 5).



Kuva 4. Elinaika-analyysillä tuotetut Kaplan–Meier-käyrät kuvaavat peltosaunioiden (*T. inodorum*) enustettua kumulatiivista kukintatodennäköisyyttä ajan funktiona käsittelyryhmittäin (kontrolli, tienvarsi, metallisulatto). Plusmerkit (+) käyrien päätepisteissä ilmoittavat, että aineisto sisältää oikealta sensuroituja havaintoja. Analyysin aika-tapahtuma-aineisto on kerätty vuorokausina likipitäen ensimmäisestä kukinta-ajankohdasta (47 vuorokautta kylvöstä) aina kokeen viimeiseen päivään asti (68 vuorokautta kylvöstä).



Kuva 5. Peltosaunioiden (*T. inodorum*) avoimien kukintojen keskiarvot (\pm keskivirhe) eri käsittelyissä (kontrolli, tienvarsi, metallisulatto) kokeen viimeisenä päivänä (68 vuorokautta kylvöstä). Eri kirjainsymbolit osoittavat log-asteikolta takaisinmuunnettujen keskiarvojen merkitsevät erot käsittelyryhmien välillä ($P < 0,05$; Tukeyn testi). Harmaat pisteet esittävät yksittäiset havaintoarvot.

3.2 Kasvi-pölyttäjävurorovaikutukset

3.2.1 Pölyttäjävierailujen määrä

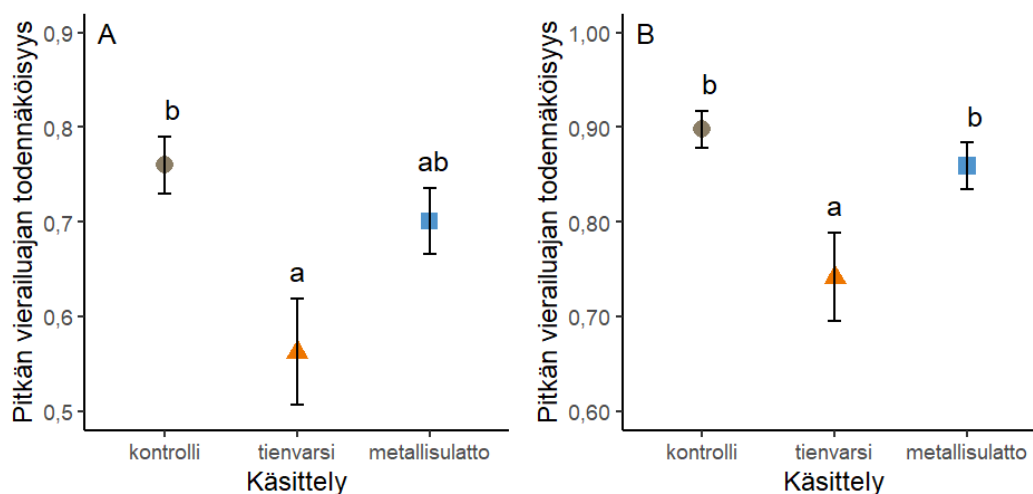
Havainta yhteensä 1917 kasvi-pölyttäjävurorovaikutusta. Käsittelyllä, vuorokaudenajalla ja niiden yhdysvaikutuksella sekä seurantapäivällä ei ollut vaikutusta peltosaunioiden (*T. inodorum*) kaikkien havaittujen pölyttäjien kukkavierailujen määrään, mutta kukkavierailuja selittivät positiivisesti kasvin korkeus (mallin vakiotermi = -2,23; kulmakerroin = 0,03), teriön halkaisija (kulmakerroin = 0,04) ja erityisesti avoimien kukintojen lukumäärä, jonka positiivinen vaikutus oli edellä mainituista voimakkain (kulmakerroin = 0,26) (taulukko 4). Pölyttäjät siis vierailivat useammin kookkailla, suuriteriöisillä kasveilla, ja erityisesti useampikukintoiset kasvit houkuttelivat huomattavasti enemmän pölyttäjiä käsittelystä, vuorokaudenajasta ja seurantapäivästä huolimatta.

Taulukko 4. Yleistettyjen lineaaristen sekamallien (GLMM) tulokset peltosaunioiden (*T. inodorum*) pölyttäjien kukkavierailumäärästä ja -vierailuajoista. Pölyttäjäseurantalohko ja kasviyksilö olivat satunnais-tekijöinä kaikissa toistomittausmalleissa. Vierailuajamallin Diptera-aineisto sisältää kukkakärpäset ja muut kaksisiipiset. Hymenoptera-aineisto sisältää hunaja- ja erakkomehiläiset. Tilastollisesti merkitsevät selittävät muuttujat on lihavoitu (χ^2 -testi; $P < 0,05$), ja marginaalisesti merkitsevät selittävät muuttujat ($P < 0,1$) on merkitty asteriskilla (*). df ilmoittaa osoittajan vapausasteet.

Vastemuuttuja	Aineisto	Selittäjä	χ^2	Df	P
Kukkavierailut (lkm.)	Kaikki pölyttäjät	Käsittely (3 tasoa)	3,575	2	0,167
		Vuorokaudenaika (2 tasoa)	0,662	1	0,415
		Seurantapäivä (4 tasoa)	0,915	3	0,821
		Teriön halkaisija	16,028	1	<0,001
		Avoimien kukintojen lkm.	12,575	1	<0,001
		Kasvin korkeus (cm)	4,807	1	0,028
		Käsittely \times vuorokaudenaika	3,551	2	0,169
Vierailuaika	Diptera	Käsittely (3 tasoa)	10,111	2	0,006
		Pölyttäjärühmä (2 tasoa)	20,994	1	<0,001
		Vuorokaudenaika (2 tasoa)	14,765	1	<0,001
		Seurantapäivä (4 tasoa)	6,396	3	0,094*
		Teriön halkaisija	0,084	1	0,770
		Avoimien kukintojen lkm.	0,535	1	0,464
		Käsittely \times pölyttäjärühmä	0,572	2	0,750
Vierailuaika	Hymenoptera	Käsittely (3 tasoa)	1,856	2	0,395
		Pölyttäjärühmä (2 tasoa)	1,354	1	0,244
		Vuorokaudenaika (2 tasoa)	6,792	1	0,009
		Seurantapäivä (4 tasoa)	1,869	3	0,599
		Teriön halkaisija	0,696	1	0,404
		Avoimien kukintojen lkm.	0,740	1	0,389
		Käsittely \times pölyttäjärühmä	1,698	2	0,427

3.2.2 Pölyttäjävierailujen kesto

Peltosaunioiden pääpölyttäjien, kaksisiipisten (Diptera), kukkavierailuaikaa selittivät käsittely, pölyttäjäryhmä ja vuorokaudenaika, ja lisäksi seurantapäivän vaikutus oli marginaalinen (taulukko 4). Kukkakärpäset hylkäsivät kukinnot nopeimmin tienvarsikäsittelyssä, joka vähensi merkittävästi kukkakärpästen pitkien kukkavierailuaikojen (yli 2 sekuntia) todennäköisyyttä kontrolliin verrattuna, mutta metallisulattokäsittelyn todennäköisyys ei eronnut kummastakaan edellisestä (kuva 6A). Muilla kaksisiipisillä pitkien kukkavierailuaikojen todennäköisyys oli merkittävästi alhaisempi tienvarsikäsittelyssä verrattuna sekä kontrolliin että metallisulattokäsittelyyn, mutta jälkimmäisten todennäköisyydet eivät eronneet toisistaan (kuva 6B). Muut kaksisiipiset siis hylkäsivät tienvarsikäsittelyn kukinnot kaikista nopeimmin, mutta ne viettivät yleisesti pidemmän ajan kukinnoilla kuin kukkakärpäset (muut kaksisiipiset keskiarvo \pm keskivirhe = $0,84 \pm 0,02$ ja kukkakärpäset = $0,67 \pm 0,02$). Pitkät kukkavierailut olivat todennäköisempiä iltapäivällä kuin aamupäivällä niin kukkakärpäksillä kuin muilla kaksisiipisillä ($\beta = 0,462$; *odds ratio* eli vetosuhde = 1,58). Pistiäisten (Hymenoptera) kukkavierailuaikaa selitti merkittävästi vuorokaudenaika (taulukko 4): hunaja- ja erakkomehiläisten pitkät vierailuajat olivat todennäköisempiä iltapäivällä kuin aamupäivällä ($\beta = 1,68$; *odds ratio* eli vetosuhde = 5,36) käsittelystä, pölyttäjäryhmästä, seurantapäivästä ja kasviominaisuuksista huolimatta.

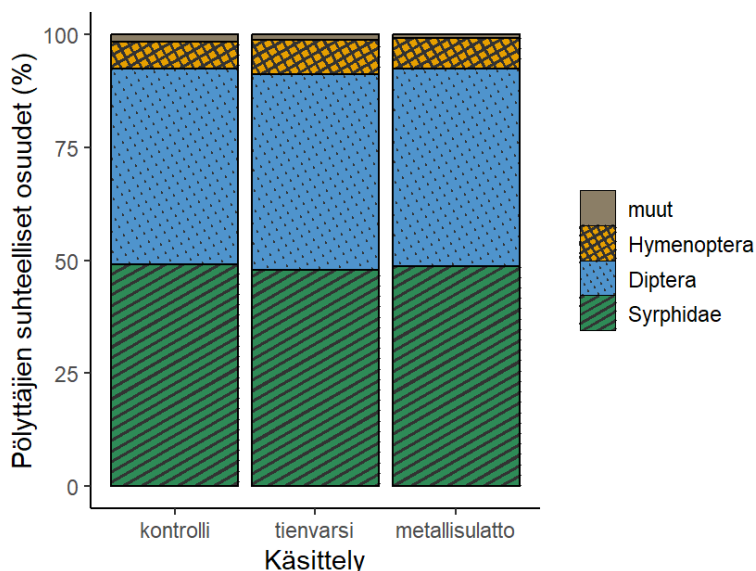


Kuva 6. Pitkän kukkavierailuajan (yli 2 sekuntia) ennustettu todennäköisyys peltosaunioilla (*T. inodorum*) käsittelyryhmittäin A) kukkakärpäksille ja B) muille kaksisiipisille. Eri kirjainsymbolit osoittavat logit-asteikolta takaisinmuunnettujen keskiarvojen (\pm keskivirhe) tilastollisesti merkitsevät erot käsittelyryhmien välillä ($P < 0,05$; Tukeyn testi).

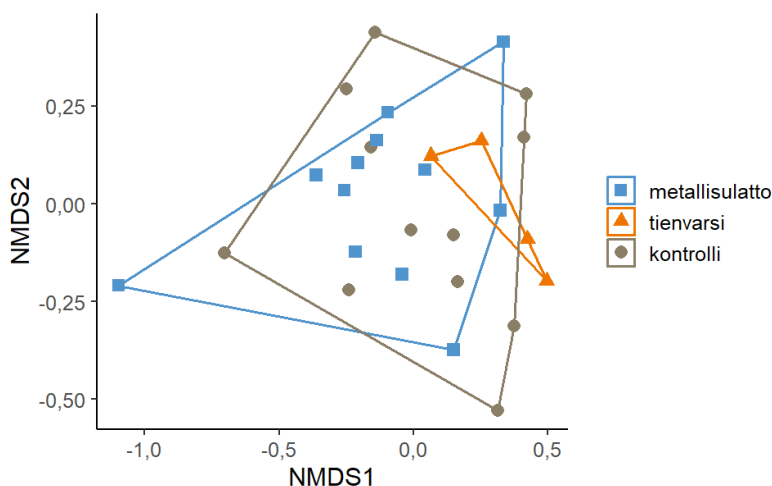
3.2.3 Pölyttäjyhteisön koostumus

Peltosaunioiden pölyttäjyhteisöt olivat yhdenmukaisia kaikissa kolmessa käsittelyryhmässä. Kukkakärpäset ja muut kaksisiipiset muodostivat hallitsevat pölyttäjyhteisöt yli 90 %:n suhteellisilla osuuksilla, kun taas pistiäisten ja muiden taksonien suhteelliset osuudet jäivät alle 10 %:iin kaikissa käsitte-

lyissä (kuva 7). Metallisulatto- ja kontrolliryhmän pölyttäjäyhteisöjen diversiteeteissä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa (Shannonin indeksien t-testi: $t_{df} = -0,427_{21,98}$; $P = 0,674$). Eri käsittelyiden otosyksiköt sijoittuvat NMDS-ordinaatioavaruudessa päällekkäin eikä selkeää eriytyvää ryhmittymistä ole havaittavissa, mikä niin ikään viittaa käsittelyryhmien pölyttäjäyhteisöjen samankaltaisuuteen (kuva 8). Tienvarsiryhmä erottuu ordinaatiossa tosin pienempänä kuviona, mikä johtuu siitä, että se sisältää vähemmän otosyksiköitä kuin muut ryhmät (kuva 8).



Kuva 7. Neljän pölyttäjäseurantapäivän aikana (klo 9–16.00) peltosaunioiden (*T. inodorum*) kukinnoilla havaittujen pölyttäjien ($n = 1917$) suhteelliset osuudet käsittelyittäin. Syrphidae = kukkakärpäset; Diptera = muut kaksisiipiset; Hymenoptera = *Apis* spp., *Bombus* spp., erakkomehiläiset; Muut = Coleoptera, Heteroptera, Lepidoptera, Orthoptera.



Kuva 8. Peltosaunioiden (*T. inodorum*) pölyttäjäyhteisökoostumuksen Bray–Curtis-etäisyyksiin perustuva otosyksiköiden sijoittuminen ordinaatioavaruuteen ei-metrisessä monikulotteisessa skaalauksessa (NMDS: stressi 0,17). Suljetut monikulmiot (konveksit peitteet) on piirretty rajaamaan otosyksiköt käsittelyittäin siten, että ne havainnollistavat käsittelyiden välisiä eroja ja ryhmien sisäistä vaihtelua pölyttäjäyhteisökoostumuksessa (*Apis* spp., *Bombus* spp., erakkomehiläiset, Coleoptera, Diptera, Syrphidae, Lepidoptera, Orthoptera).

4 Pohdinta

Tulokseni osoittavat, että kenttärealistisilla maaperän raskasmetallipitoisuuksilla on sekä haitallisia että hyödyllisiä vaikutuksia kasvien kelpoisuusominaisuuksiin. Vaikutusten suunta ja voimakkuus ovat riippuvaisia metallipitoisuuksista ja kasvilajista. Hypoteesit metallien negatiivisista vaikutuksista kasvien kelpoisuuteen saivat tukea, kun liikenneympäristöille ominaiset metallipitoisuudet heikensivät peltosaunioiden kasvua ja kukintaa. Sen sijaan hypoteesien vastaisesti metallisulatto- ja tienvarsiympäristöjä simuloivat metallipitoisuudet lisäsivät vastaavassa järjestyksessä peltosaunioiden ja valkoapiloiden kokonaiskuivapainoa kontrolliin verrattuna. Hypoteesit pölyttäjävierailujen vähenemisestä ja pölyttäjyhteisön diversiteetin supistumisesta eivät saaneet tukea peltosaunioilta, sillä ne houkuttelivat kaikissa käsittelyissä yksilömääriltään ja taksonomialtaan homogeenisen joukon pölyttäjiä. Toisaalta käsittelyllä oli negatiivinen vaikutus peltosaunioiden houkuttelevuuteen kukkavierailuaikoja tarkasteltaessa, kun niiden pääpölyttäjät, kaksisiipiset, hylkäsivät tienvarsikäsitellyn kukinnot muita ryhmiä nopeammin.

4.1 Yksivuotisen peltosaunio (*T. inodorum*) menestyminen

Tienvarsikäsitely heikensi johdonmukaisesti peltosaunioita menestymistä: Kasvit jäivät lyhyemmiksi, kokonaiskuivapainoiltaan kevyemmiksi ja kukkimiskyvyltään heikommiksi verrattuna muihin käsittelyryhmiin. Vain 30 % kasveista kukkivat ja ne tuottivat vähemmän avoimia kukintoja per kasvi, ja kukinnan eteneminen oli hitaampaa kuin muissa käsittelyissä. Kukinta on yksivuotisten kasvien elinkierroksen viimeinen vaihe, jonka onnistumista määrittää usein resurssien, kuten ravinteiden saatavuus (Willmer 2011 s. 489). Peltosauniot olivat silminnähden stressaantuneita. Etenkin kukkimattomat kasvit jäivät mataliksi ruusukkeiksi, joiden pariliuskaiset lehdet olivat kloroottisia (lehtivihreän puutteesta johtuva kellastuminen ja/tai punertaminen) enkä havainnut kukkanappuja edes kokeen lopussa. Nämä tulokset viittaavat yhteyttämistehon heikkenemiseen, mikä voi johtua esimerkiksi ravinnepuutoksista tai häiriöistä vedenkuljetuksessa ja kaasujenvaihdossa (Musah 2025). Tulokset ovat linjassa aiempien tutkimusten kanssa, joissa raskasmetallit ovat aiheuttaneet epäsuotuisia seurauksia kasvien pituuskasvulle (Atta ym. 2023; Sivakoff ym. 2024), kokonaiskuivapainolle (Hladun 2015; Rizvi & Khan 2018) sekä kukinnan alkamiselle (Khan & Chaundry 2006, 2010; Shekari ym. 2019) ja tuotettujen kukintojen määrälle (Saikkonen ym. 1998; Hladun ym. 2011). Koska lyijy (Pb) ei ole välttämätön hivenravinne, on mahdollista, että nimenomaan lyijy on ollut merkittävä myrkyvaikutusten aiheuttaja peltosaunioilla tienvarsikäsitelyssä, jossa sen pitoisuus oli kaksinkertainen metallisulattokäsittelyyn nähden. Sivakoff & Gardiner (2017) havaitsivatkin, että lyijykäsitellyssä maaperässä (80 mg Pb kg⁻¹) kasvaneet asterikasvit (*H. annuus*) olivat lyhyempiä ja mykeröiltään pienempiä kuin kontrollikasvit.

Peltosauniot panostivat biomassansa suhteellisesti enemmän juuristoon kuin versoihin tienvarsikäsitelyssä. Kyseinen tulos on ristiriidassa aiempien havaintojen kanssa, joissa raskasmetallit heikensivät

juurien kasvua versojen kasvua voimakkaammin (esim. Rizvi & Khan 2018). Aiemmissä tutkimuksissa metallikäsittelyt ovat sekä lisänneet kasvien suhteellista panostusta juuristoon (Xiong ym. 2006) että vähentäneet sitä (Ryser & Emerson 2007; Yurkevich ym. 2024). Havaittu juuri–versosuhteen kasvu saattaa liittyä kasvien ravinnetalouteen, koska kasvit säätelevät kasvua ja kelpoisuuttaan jakamalla biomassaa plastisesti ensisijassa niihin kasvinosiin, jotka vastaavat minimitekijän eli rajoittavimman resurssin hankkimisesta (*Optimal partitioning* -hypoteesi: Qi ym. 2019 mutta ks. Liu ym. 2021). Metallit voivat aiheuttaa kasvien ravinnepuutoksia esimerkiksi vähentämällä niiden biosaatavuutta maaperässä tai kilpailemalla niiden sitoutumispaikoista juuristossa (Zia ym. 2018; Kou ym. 2025), jolloin kasvit todennäköisesti lisäävät juuristokasvuun ravinteidenoton tehostamiseksi, mikä johtaa allokatiokustannuksena versojen biomassan vähenemiseen. Vaihtoehtoisesti kyseessä voi olla allometrinen kasvuvaste, jossa kasvinosien väliset biomassasuhteet vaihtelevat kasvin koon ja kehitysvaiheen mukaan (Liu ym. 2021).

Yksivuotinen peltosaunio ei kykene vegetatiiviseen lisääntymiseen, vaan populaatioiden säilyminen perustuu suvulliseen lisääntymiseen eli vuosittaiseen siementuottoon. Peltosaunioyksilöt tuottavatkin parhaimmillaan tuhansittain pähkylöitä, jotka talvehtivat lähellä emokasvia, koska niissä ei ole muille asterikasveille tyypillisiä pitkän matkan leviämissopeumia (Kay 1994; Lutman 2002). En mitannut keskeistä kelpoisuuskomponenttia – jälkeläistuottoa – mutta heikentynyt kasvu ja kukkiminen eittämättä vähentävät kasvien siementuottoa. Yksivuotisen kasvin tasaikäisissä populaatioissa siementuotto jakautuu usein epätasaisesti eri kokoisten yksilöiden kesken, ja kookkaammat kasvit kukkivat tyypillisesti pienempiä yksilöitä todennäköisemmin (Gurevitch 2021 s. 143–151; Chen ym. 2023). Siksi kasvun heikkeneminen pienentää nettolisääntymisnopeutta eli yhden yksilön elinaikanaan tuottamaa jälkeläismäärää. Peltosauniopopulaatio voi palautua siemenistä, jotka säilyvät maaperässä useiden vuosien ajan (Kay 1994), mutta mikäli vähitellen hupeneva siemenpankki ei saa riittävää lisäystä kasviyksilöiden ja siementuotannon vähentyessä, käy populaation säilyvyys ja kasvu epätodennäköisemmäksi (Syrjänen & Rytteri 1998 s. 48–64). Sen lisäksi, että raskasmetallit voivat rajoittaa kasvin siementuottoa, voivat ne myös heikentää jälkeläisten laatua, kuten siemenpainoa, kokoa ja hedelmällisyyttä (Carvalho 2020).

Peltosauniot säilyttivät kasvu- ja kukkimiskykynsä sekä houkuttelevuutensa pölyttäjille metallisulattokäsittelyssä kontrolliin verrattuna, mikä viittaa siihen, että lajin on ehkä mahdollista lisääntyä vastavissa olosuhteissa luonnossa. Yllättävästi peltosauniot tuottivat enemmän biomassaa (35,2 %) metallisulattokäsittelyssä kuin kontrollissa. Näiden versokorkeuksissa ei ollut merkitseviä eroja, mutta lehtiominaisuudet (mm. lukumäärä, pituus ja pinta-ala) ja varsiominaisuudet (mm. läpimitta) ovat voineet lisätä biomassaa. Metallisulattokäsittely sisälsi viisinkertaisen määrän kuparia (Cu) ja noin nelinkertaisen määrän nikkeliä (Ni) verrattuna tienvarsikäsittelyyn. Nämä ovat kasveille välttämättömiä hivenravinteita, jotka osallistuvat esimerkiksi yhteyttämispigmenttien ja entsyymien biosynteesiin (Musah 2025). Vain pieni osuus maaperän kokonaismetallipitoisuuksista on kasvien saatavilla, koska metalli-

ionit sitoutuvat maaperän epäorgaanisiin ja orgaanisiin yhdisteisiin (Zia ym. 2018). Tästä syystä korkeatkin kuparin ja nikkelin kokonaispitoisuudet voivat olla kasveille haitattomia tai jopa hyödyllisiä, jos kemiallisesti biosaavatavat metalliosuudet ovat toimittaneet kasviravinteiden virkaa ympäristömyrkkujen sijaan. Myös manipulaatiokäsittelyissä käyttämäni kuparisulfaatti (CuSO_4) sisältää sulfaatti-ioneja (SO_4^{2-}), jotka ovat kasveille biosaavia, välttämättömiä hivenravinteita (Gurevitch ym. 2021 s. 102). Samaan aikaan kun kasvien koko edistää houkuttelevuutta pölyttäjille, voi se myös altistaa voimakkaammalle kasvinsyöjäpaineelle (Schlinkert ym. 2016). Kasvinsyönti saattaa vähentää tai lisätä kasvibiomassaa (Gurevitch ym. 2021 s. 298–302), ja teoriassa on mahdollista, että kontrollikasvit sopisivat metallipitoisia kasveja paremmin kasvinsyöjien ravinnoksi, sillä kasvisolukoihin kertyneet metallit saattavat karkottaa kasvinsyöjiä ja taudinaiheuttajia (*Elemental defence* -hypoteesi: Putra & Müller 2023). En kuitenkaan havainnut selkeitä merkkejä selkärangattomien aiheuttamista kasvinsyöjätuhoista (lehtien pureskeluvauriot, toukkakäytävät, apikaalidormanssin purkautuminen) kokeen aikana kummallakaan lajilla yksittäisiä koekasveja lukuun ottamatta.

On mielenkiintoista pohtia, missä määrin hyöty tiettyssä demografisessa piirteessä linkittyy populaatiodynamiikkaan. Vaikka metallisulattokäsittely lisäsi peltosaunion kokonaiskuivapainoa, vaikutus ei yletynyt peltosaunion pituuskasvuun, kukkivien yksilöiden lukumäärään, mykerökukintojen lukumäärään per kasvi eikä pölyttäjien menestyksekkäämpään houkutteluun. Tästä syystä pidän epätodennäköisenä, että tämä biomassanmuodostus olisi lopulta erityisen hyödyllistä yksivuotisen peltosaunion populaatioiden kasvun kannalta. Tiedostan kuitenkin, että myös mykerökukintojen koolla sekä tuotettujen siementen laadulla ja koolla voi olla olennainen merkitys kasvien kelpoisuudelle (Willmer 2011, Carvalho 2020).

4.2 Monivuotisen valkoapilan (*T. repens*) menestyminen

Valkoapila menestyi peltosauniota paremmin metallikäsittelyissä, jotka eivät heikentäneet valkoapilan itävyyttä, kasvien lopullista korkeutta tai biomassan tuottoa. Tätä menestymistä voivat selittää ainakin valkoapilalle kehittynyt sietokyky raskasmetallipitoiseen maaperään, monivuotinen elomuoto ja toisaalta mutualistiset kasvi–mikrobisuhteet. Ensinnäkin metallisaasteet kohdistavat abioottisen valintapaineen kasveille ja suosivat sopeumia kantavien yksilöiden selviytymistä, lisääntymistä ja populaatioiden kasvua esimerkiksi kaupunki- ja teollisuusalueilla (Baker 1987; Salinitro ym. 2021; Oleńska ym. 2022). Palkokasveja (Fabaceae) tavataankin metallisaastuneissa elinympäristöissä, kuten Puolan kaisvosjätealueilla (Oleńska ym. 2022; Jach ym. 2022). Valkoapilan on havaittu ilmentävän hyvää sietokykyä ainakin kadmiumille (Cd), lyijylle (Pb), nikkelille (Ni) ja kuparille (Cu) fysiologisten sopeumien avulla. Kasvi voi vältellä metallien imeytymistä ja kulkeutumista kasvinosien välillä varastoimalla ja eristämällä niitä juuriston soluseiniin tai solunesterakkuloihin (Oleńska ym. 2022), ja lisäksi sillä on havaittu kykyjä metallien detoksifikaatioon (Wu ym. 2022).

Valkoapilat tuottivat eniten biomassaa tienvarsikäsitelyssä, mutta versokorkeus pysyi yhdenmukaisena kaikissa käsittelyissä. Biomassan lisääntyminen voi liittyä esimerkiksi lehtien ja varsien lukumäärän, pinta-alan ja paksuuden kasvuun tai toisaalta esimerkiksi juurinystyröiden lukumäärän lisääntymiseen, joita en kokeessa mitannut. On mahdollista, että tällainen ensimmäisen kasvukauden biomassanmuodostus voimistaa seuraavien kasvukausien selviytymistä ja kasvua, jos valkoapilat kykenevät talvehdittuaan tehokkaampaan kasvuunlähtöön, rönsyilyyn tai kukintaan (Nölke ym. 2021; Ehmet 2021). Yksittäisiä valkoapiloita lukuun ottamatta ne eivät kukkineet kasvatuskokeen (68 vrk) aikana. Monivuotisille kasveille on tyypillistä, että kukinta alkaa vasta kun riittävä koko (esim. lehtipinta-ala, lehtien määrä, versokorkeus) on saavutettu (Kawarasaki & Hori 1999; Ehmet ym. 2021). Kasvukausi on voinut olla liian lyhyt valkoapilan kukkia, sillä en esikasvattanut kasveja. Toisaalta alkukesän keskimääräistä sateisempaa ja kylmempää säätä seuranneen pitkän hellejakson yhdistelmä on luultavasti aiheuttanut ympäristöstressiä koekasveille, jolloin monivuotisuus voi mahdollistaa lisääntymisen lykkäämisen myöhemmäksi suotuisampaan ajankohtaan (Ehmet ym. 2021). Jotta voisin arvioida valkoapilan menestymistä tarkemmin, olisi tarpeellista tutkia kasvuparametrejä peräkkäisinä kasvukausina.

Valkoapilalla on kaksi vaihtoehtoista lisääntymisstrategiaa: suvullinen (seksuaalinen) ja suvuton (aseksuaalinen) lisääntyminen. Ensin mainittu tarkoittaa kukintaa ja siementuottoa, ja jälkimmäisestä on kyse, kun emokasvi (genetti) tuottaa perimältään identtisiä klooneja (rametti), jotka kasvattavat jälkijuuria ja pysyvät kiinni emokasvissa rönsyjen avulla (Ehmet ym. 2021). Se kumpaan lisääntymistapaan kasvin kannattaa panostaa riippuu ympäristöolosuhteista, kuten ravinteiden saatavuudesta, ympäristöstressistä ja esimerkiksi pölytyspalveluiden saatavuudesta (Ehmet ym. 2021). Suvuton lisääntyminen on yksi keino kasviyksilön selviytymiseksi ja populaatiokoon ylläpitämiseksi epäsuotuisissa olosuhteissa, kun taas suvullinen lisääntyminen mahdollistaa geneettisen monimuotoisuuden ja pitkän matkan leviämisen (Gurevitch ym. 2021; Ehmet ym. 2021). Molempia lisääntymistapoja käyttävät kasvit ovat hyvin sopeutuneita perustamaan vakaita populaatioita uusilla kasvupaikoilla. Klonaalisilla kasveilla, kuten valkoapila, ramettien välinen fysiologinen yhteys mahdollistaa yhteyttämistuotteiden, veden ja ravinteiden jakamisen, mistä voi olla kelpoisuushyötyjä koko kloonille. Tällaisesta yhteydestä voi olla erityistä hyötyä stressaavissa ja tilallisesti heterogeenisissä ympäristöissä, jos osa rameteista kasvaa suotuisimmilla ympäristölaikuilla kuin toiset (Li ym. 2011; Gurevitch ym. 2021 s. 147–148). Tienvarsiympäristöt ovat tyypillisesti vaihtelevia muun muassa raskasmetalligradienttien, maalajin, orgaanisen aineksen, kosteuden ja kaltevuuksien suhteen (Werkenthin ym. 2014; De Silva ym. 2021; Bartkowiak ym. 2024), mikä saattaa suosia kloonalista kasvutapaa.

Keskeinen sopeuma on valkoapilan juuriston mikrobisymbiontit, jotka lieventävät isäntäkasvin metallistressiä ja parantavat sen kelpoisuutta. Valkoapila kykenee muokkaamaan paitsi ritsosfääriin eli juuria

ympäröivän maaperän myös juurien sisäistä mikrobistoa ja muodostamaan hyödyllisiä suhteita niin bakteerien kuin mykorrhizasientien kanssa (Oleńska ym. 2022; Wang ym. 2022; Yuan 2024). Valkoopila voikin hyötyä samaan aikaan useammasta mikrobisuhteesta: esimerkiksi Oleńska kollegoineen (2022) vertaili metallisaastealueen ja saasteettoman alueen valkoopilapopulaatioita ja tunnistivat juurinystyräbakteerikannan (*Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii*), mykorrhizasientien ja valkoopilan keskinäisen symbioosin, jonka turvin tällainen kolmiosainen metaorganismi sopeutuu metallisaastuneisiin elinympäristöihin. Bakteerisymbionttien fasilitoiva vaikutus perustuu esimerkiksi metalli-ionien liikkuvuuden estämiseen tai niiden pelkistämiseen (Oleńska ym. 2022; Jach ym. 2022), ja mykorrhizasienet auttavat paitsi veden ja ravinteiden otossa mutta voivat myös sitoa metalleja sienirihmastoonsa (Luo ym. 2014). Valkoopilalla on useiden palkokasvien tavoin kilpailuetunaan kyky sitoa ilmakehän typpeä (N₂) maaperään typensitojabakteerien avulla (Jach ym. 2022). Onkin syytä olettaa, että valkoopiloilla on ollut kokeen aikana enemmän typpiravinnetta käytettävissään kuin peltosaunioilla, sillä useimmilla koekasveilla oli kasvi–bakteerisuhdetta ilmentäviä juurinystyröitä. Tämäkin voi osaltaan selittää valkoopiloiden menestystä kokeessa, sillä typpi on keskeinen ravinne, joka tukee kasvua ja kasvien puolustuskykyä (a)bioottisiin stressitekijöihin (Jach ym. 2022). Ei ole varmaa missä määrin tämä symbioosi on lisännyt typen määrää maaperässä kokeen aikana, jos ollenkaan, mutta on kuitenkin osoitettu, että maaperän typpilisäykset voivat vähentää arseenin (As), kuparin (Cu), nikkelin (Ni) ja lyijyn (Pb) biosaatavuutta esimerkiksi kemiallisen kompleksimuodostuksen seurauksena (Li ym. 2019). Valkoopiloiden juuri- ja versobiomassan jakautumisessa ei ollut eroja maaperäkäsittelyiden välillä, mikä niin ikään viitanee sen sopeutumiseen edafiseen ympäristövaihteluun.

Metallisulattokäsittely hidasti valkoopilan kasvua ensimmäisessä mittauksessa (27 vrk kylvöstä), mutta ei seuraavissa mittauksissa (44 ja 68 vrk kylvöstä). Yksi syy tähän voi olla, että valkoopila hyötyi mikrobisuhteistaan vasta myöhemmissä kasvuvaiheissa, kun juuristo ja juurinystyrät olivat kehittyneet ja mikrobiomi ehtinyt muovautua. Kasvien ja mikrobien välinen kemiallinen signaalointi juuristossa voi vaihdella kasvin kehitysvaiheittain, ja kasvit kykenevät muodostamaan uusia mikrobisuhteita elinkaarensa aikana (Alekkett ym. 2022). Koekasvit ovat voineet solmia uusia mikrobisuhteita (niin hyödyllisiä kuin haitallisia) kokeen aikana ilmasta, ympäröivästä maaperästä ja kasteluvdestä. Aiemmissä tutkimuksissa on havaittu, että metallikuormituksesta kärsivät valkoopilat hankkivat juurieritteidensä (proliini ja stigmasteroli) avulla *Microbacterium*-bakteereja symbioosisuhteeseen, joka edistää isäntäkasvin biomassan tuottoa sekä versojen ja juurten kasvua (Yuan 2024). Lisäksi Wang kollegoineen (2022) selvitti, että lyijykäsittelyjen valkoopiloiden juurien sisäinen mikrobiyhteisö koostui niin ikään kasvua edistävästä ja metallitoleranteista mikrobeista. Vaihtoehtoisesti kasvatuskokeessa olisi voitu käyttää suo-raan tienvarsien tai metallisulattoympäristön maaperää, jolloin sen fysikaaliset, kemialliset ja biologiset ominaisuudet olisivat vastanneet paremmin luonnollista ympäristöä. Tällöin kontrollikäsittelyn valmistaminen olisi kuitenkin ollut haastavaa, ja metallipitoisuudet olisi pitänyt mitata.

Mielenkiintoinen tulos on, että valkoapilat tuottivat tienvarsikäsitelyssä enemmän biomassaa kuin kontrollikäsitelyssä. Tälle ei välttämättä löydy tyydyttävää selitystä pelkästään mikrobivuorovaikutuksista, sillä Yuan kollegoineen (2024) havaitsi, että metallikäsitelyissä maaperissä (500 ja 1000 mg Zn kg⁻¹) mikrobien kanssa kasvaneet valkoapilat tuottivat enemmän biomassaa kuin mikrobeita kasvatetut kasvit, mutta ilman metallikuormitusta valkoapilat hyötyivät mikrobisuhteestaan kaikkein eniten. Mikrobivuorovaikutusten sijaan toisenlainen ilmiö – hormoneesi – tarjoaa johdonmukaisen selityksen valkoapiloiden ja myös peltosaunioiden kohonneelle biomassantuotolle eri metallikäsitelyissä verrattuna kontrolliin.

4.3 Hormeesi ja metalliresistenssi

Hormeesi viittaa kaksivaiheiseen ilmiöön, jossa raskasmetallien matalat pitoisuudet laukaisevat kasveissa adaptiivisia hyödyllisiä vaikutuksia, kun taas suuremmat pitoisuudet heikentävät suorituskykyä ja aiheuttavat myrkyvaikutuksia (tarkasteltu: Dhiman ym. 2024). Hyödylliset vaikutukset liittyvät useimmiten morfologisiin, fysiologisiin ja biokemiallisiin ominaisuuksiin, jotka kytkeytyvät selviytymiseen, kasvuun ja lisääntymiseen (Li ym. 2020; Dhiman ym. 2024). Näin on esimerkiksi Salinitron ja muiden (2020) tutkimuksessa kaupungeissa yleisten, kosmopoliittien 1-vuotisten kasvilajien, mäkilitukan (*Cardamine hirsuta*), kylänurmikan (*Poa annua*) ja pihatähtimön (*Stellaria media*), tapauksessa. Siinä kadmium (Cd) ja kromi (Cr) lisäsivät kasvilajikohtaisesti juuri- ja versobiomassaa jopa 2–20 kertaiseksi, nivelkohtien lukumäärää, yhteyttämspigmenttien pitoisuuksia (klorofylli a + b ja karotenoidit) sekä lehtipinta-alaa kontrolliin verrattuna. Kirjoittajat esittävätkin, että raskasmetallisaastuminen saattaa olla erityisesti kaupunkikasviyhteisöjen lajistollista kokoonpanoa suodattava abioottinen tekijä, josta hyötyvät kaupunkiympäristön maltillisiin metallipitoisuuksiin sopeutuneet ruderaatti- ja häiriölajit (Salinitro ym. 2020). Raskasmetallisopeutuneiden kasvilajien yleistyessä ja muiden lajien vähentyessä on riskinä kuitenkin kasviyhteisön diversiteetin köyhtyminen ja homogenisoituminen ja samalla mahdollisesti pölyttäjäresurssien jatkuvuuden vaarantuminen (Ruas ym. 2022). Voisi olla perusteltua tarkastella raskasmetallien vaikutuksia kasvilajeihin, jotka eivät tyypillisesti menesty tällaisissa ympäristöissä.

Tällaisia hormoneettisia vasteita ei tule tulkita yksinomaan hyödyllisiksi, sillä sen epälineaarinen luonne ja lukuisat muuttujat vaikeuttavat ekologista riskinarviointia. Ensinnäkin hormoneettinen hyötyvaikutus vaihtelee kasvilajista toiseen, ja myös yksittäisen kasvilajin elinkierron mukaan (Dhiman 2024). Toiseksi vaste on annos- ja metallikohtaista, mitä havainnollistaa esimerkiksi lehtisalaatilla (*Lactuca sativa*) tehty kasvatuskoe (40 vrk), jossa maaperän kuparikäsittely aiheutti hormoneettisen vaikutuksen (merkittävä tuorepainon ja lehtivihreän lisääntyminen kontrolliin verrattuna) 250 mg Cu kg⁻¹ pitoisuudella, ja lyijykäsittelyn hormoneettinen vaikutus ilmeni 500 mg Pb kg⁻¹ pitoisuudella (Li ym. 2021). Lyijyn myrkyvaikutukset ilmenivät vasta viisi kertaa korkeammassa pitoisuudessa (2500 mg Pb kg⁻¹) ku-

parin myrkyvaikutuksiin nähden ($500 \text{ mg Cu kg}^{-1}$) (Li ym. 2021). Kolmanneksi vaihtelevat ympäristöolot voivat kääntää hormeettisen vaikutuksen hyödyllisestä haitalliseksi ennalta-arvaamattomasti. Raskasmetalleilla ei ollut vaikutusta peltosaunion ja valkoapilan lopullisiin itävyyksiin tai itämisaikoihin, mutta altistumisajankohta ja altistuminen koko elinkaaren ajan on myös yksi hormeesiin vaikuttavista muuttujista (Dhiman ym. 2024). Niinpä tulokseni voivat olla luotettavampia ja luonnonympäristöihin yleistettävämpiä kuin sellaisten tutkimusten, joissa kasvit on altistettu metallikäsittelyille vasta itämisen ja varhaisen kasvun jälkeen (esim. Meindl ym. 2014; Hladun ym. 2015; Sivakoff ym. 2024) tai kukinnan aikaan (Xun ym. 2017).

Ympäristön saastetaakka muodostuu useiden eri raskasmetallien yhdistelmästä. Metallipitoisuudet ja niiden suhteelliset osuudet voivat vaihdella esimerkiksi tienvarsilla pienellä mittakaavalla (Bartkowiak ym. 2024), johon vaikuttavat erityisesti liikennetiheys ja esimerkiksi ajoneuvojen kiihdytysten ja jarrutusten määrät (De Silva ym. 2021). Metallien yhdistelmällä saattaa olla voimakkaampi myrkyllinen vaikutus kuin yksittäisillä metalleilla, jos niillä on additiivisia eli kasautuvia tai synergistisiä eli toisiaan voimistavia vuorovaikutuksia. Toisaalta yhteisvaikutus voi myös tuottaa antagonistisen eli lieventävän vasteen: yhden metalli-ionin imeytyminen juuristoon voi vähentää tai estää toisen metalli-ionin imeytymistä, koska ionit kilpailevat samoista sitoutumispaikoista (Kou ym. 2025). Koun ja muiden (2025) tutkimuksessa kadmium–lyijy-seoksen matala pitoisuus aiheutti näiden ionien additiivisia myrkyvaikutuksia vehnällä (*Triticum aestivum* L.), mutta korkeammilla pitoisuuksilla vaikutus kääntyi antagonistiseksi: kadmiumin (Cd) imeytyminen ja myrkyvaikutus väheni, kun lyijyn (Pb) pitoisuus kasvoi. Samankaltaisia ilmiöitä on raportoitu myös riisillä (*Oryza sativa* L.), jossa lyijyn ja kadmiumin ionipitoisuuksien erojen kasvaessa havaittiin synergistisiä ja additiivisia vasteita (Kou ym. 2023). Molemmat tutkimukset siis korostavat, että metalli-ionien keskinäiset lievittävät, voimistavat ja kasautuvat yhteisvaikutukset riippuvat sekä kokonaispitoisuuksista että ionien suhteellisista osuuksista. Asiaa monimutkaistavat edelleen raskasmetallien ja pääravinteiden (mm. N, P, K) sekä hivenravinteiden (mm. Mn, Zn, Cu) väliset vuorovaikutukset. Raskasmetallit voivat säädellä välttämättömien pää- ja hivenravinteiden imeytymisessä ja niiden jakautumista kasvinosien välillä (Ribeiro ym. 2025). Näiden mineraaliravinteiden pitoisuuksien on havaittu lisääntyvän joissakin kasveissa raskasmetallien vaikutuksesta, mikä saattaa olla yksi mekanismi hormeettisen vasteen syntymiseen (Liu ym. 2021; Dhiman ym. 2024).

Yllä mainitut raskasmetallien ja ravinteiden vuorovaikutukset ovat voineet tuottaa käsittelykohtaisia eroja peltosaunion ja valkoapilan menestymisessä. Kasvualustan ja kasvinosien metalli- ja ravinnepitoisuuksien mittaaminen varmistaisi halutun käsittelypitoisuuden, valottaisi kasvien mahdollisia ravinnepuutoksia ja paljastaisi, kuinka paljon metalleja kulkeutuu maaperästä versoihin (bioakkumulaatiofaktori), tiettyyn kasvinosaan (biokonsentraatio) ja juurista versoihin (translokaatiofaktori) (Tózsér ym. 2019). Kasvien yhteyttämispigmenttien (klorofylli a + b, karotenoidit) kemiallisella analyysillä taas saadaan ulkoisia kasvuparametrejä tarkempi kuva kasvien yhteyttämistehosta (esim. Salinitro ym. 2020).

Tulokseni viittaavat, että peltosauniolla ja valkoapilla on ominaisuuksia, jotka mahdollistavat menestymisen raskasmetallipitoisessa maaperässä. Kyse voi olla geneettisestä sopeutumisesta tai ilmiön jousitavuudesta (fenotyypinen plastisuus), koska nämä kaksi mekanismia mahdollistavat kasvien sopeutumisen ympäristövaihteluun (Gurevitch ym. 2021 s. 238–246). Ainakin peltosaunio on yksivuotisten rikkakasvien tavoin kooltaan ja kasvupaikkatekijöiltään fenotyypisesti plastinen ja lisäksi sen genotyypeissä on suhteellisen paljon vaihtelua populaatioiden välillä mutta myös populaation sisällä (Kay 1994; Čertner ym. 2019). Sietokyvyn kehittyminen raskasmetalleille on yksi esimerkki kasvipopulaatioiden nopeasta paikallissopeutumisesta (Baker 1987). Metalliresistentti kasvi kykenee kasvamaan ja lisääntymään joko välttelemällä raskasmetalleja tai sietämällä stressin vaikutukset (Baker 1987). Tällaisen sopeutumisen olemassaoloa voidaan selvittää vertailemalla saastuneiden ja saasteettomien alueiden kasvipopulaatioiden jälkeläisten menestymistä yhtenevissä kasvuolosuhteissa (ns. *common garden experiment*) (esim. Jiménez-Ambriz ym. 2007). Mikäli saastealueiden emokasvien jälkeläiset menestyvät metallikäsittelyissä paremmin kuin saasteettomien alueiden emokasvien jälkeläiset, voidaan tätä pitää näyttönä paikallissopeutumisesta. Myös ei-geneettiset maternaalivaikutukset voivat tuottaa jälkeläisten kelpoisuutta parantavia, ylisukupolvisia vaikutuksia. Ympäristöstressiä kokenut emokasvi voi esimerkiksi varustaa siemeniä välttämättömillä ravinteilla, hormoneilla ja ravintoaineilla ja/tai muokata siementen endofyyttistä mikrobioyhteisöä tavalla, joka edistää niiden itämistä ja taimien varhaista kehitystä stressaavissa kasvuolosuhteissa (Carvalho 2020; Gurevitch ym. 2021 s. 245). Myös kasvien alkuperä voi vaikuttaa tuloksiini, sillä luonnonpopulaatiosta kerätyt peltosaunio siemenet ovat voineet sopeutua paikallisiin ympäristöolosuhteisiin, kun taas kaupallista alkuperää olevan valkoapilan stressin-, tallauksen- ja kuivuudenkestävyys on jalostustyön tulosta.

4.4 Pölyttäjävierailujen määrä peltosaunioilla

Manipulatiivinen kenttäkoe osoittaa, että vaikka peltosauniot kärsivät maaperän raskasmetallien (As, Cu, Ni, Pb) myrkyvaikutuksista, ne kykenevät ylläpitämään pölyttäjiä houkuttelevia kukintoja. Odotusten vastaisesti maaperän kenttärealistiset raskasmetalliseokset eivät vähentäneet peltosaunioiden houkuttelevuutta kaikkien pölyttäjien vierailumääriä tarkasteltaessa, sillä peltosauniot saivat keskimäärin yhtä paljon pölyttäjävierailuja jokaisessa käsittelyssä. Koska valitsin pölyttäjäseurantalohkoihin mahdollisimman samankaltaiset koekasvit, tulos viittaa, että pölyttäjät eivät erota kukintoja käsittelyjen perusteella. Tienavarsikäsittelyssä kasvit olivat pienempiä ja niissä oli vähemmän kukintoja, mikä todennäköisesti kuitenkin vähentää niiden houkuttelevuutta pölyttäjille, jos ne kasvavat houkuttelevampien kasvien yhteydessä. Pölyttäjien pitkän matkan houkuttelu ja vierailupäätökset toimivat kasvuston tasolla (Willmer 2011; Fowler ym. 2016), joten vähentyneet kukinnot esimerkiksi tienvarsilla (kokeen tulos) voivat vähentää pölyttäjävierailuja kokonaisen laikun tasolla.

Osin samansuuntaisen tuloksen raportoi Hladun kollegoineen (2013), kun maaperän seleeni (Se) ei vähentänyt retiisin (*Raphanus sativus*) pääpölyttäjän (*A. mellifera*) pölyttävierailuja, vaikka seleeniä keriyti maaperästä kukkaelimiin jopa $219 \pm 28 \text{ mg Se kg}^{-1}$. Tarhamehiläiset (*A. mellifera*) ja erakkomehiläiset (Halictidae) eivät karttaneet myöskään kadmiumpitoisessa (Cd) maaperässä kasvatettuja auringonkukkia (Sivakoff ym. 2024), ja tarhamehiläisten on havaittu käyttävän laboratorio-oloissa arseenia (As), lyijyä (Pb) ja sinkkiä (Zn) sisältävää ravintoa (Monchanin ym. 2022). En mitannut peltosaunioiden kukintojen tai kukkapalkkioiden metallipitoisuuksia, mutta ainakin kupari (Cu) ja nikkeli (Ni) imeytyvät ja liikkuvat maaperästä peltosaunion johtosolukossa varsiin ja lehtiin, kun taas lyijy (Pb) sitoutuu pääasiassa juuristoon ainakin neutraalissa maaperässä ($\text{pH} \approx 7$) (Tózsér ym. 2019). Jos kasvit säilyttävät kasvukykyensä, lisääntymismenestyksensä ja houkuttelevuutensa saasteista huolimatta, on mahdollista, että ne toimivat haitallisena altistumisreittinä pölyttäjilleen (Hladun ym. 2015). Tällöin kasvit voivat toimia ekologisina ansoina (Battin 2004), jos ne houkuttelevat hyönteispölyttäjiä terveyden kannalta haitallisiin elinpiireihin (Gardiner ym. 2018; Horstmann 2024). Luonnonympäristöissä raskasmetalleja päätyy kasvien maanpäällisille pinnoille ilmasta märkä- ja kuivalaskeumana, mikä voi myös heikentää kasvien houkuttelevuutta pölyttäjille (Bartkowiak ym. 2024; Pinto-Zevallos ym. 2025).

Tulokseni on ristiriidassa tutkimustulosten kanssa, joissa erityisesti mesipistiäisten pölyttävierailut ovat vähentyneet metallikäsitellyillä kukkakasveilla (Meindl & Ashman 2013, 2014; Li ym. 2025). Aineistossani korostuivat kaksisiipiset, ja aiemmin on havaittu, että nikkelpitoisessa ($200 \text{ mg Ni kg}^{-1}$) maaperässä kasvaneet ristikukkaiskasvit houkuttelivat 50 % vähemmän kaksisiipisiä kontrolliin verrattuna (Meindl & Ashman 2014). Yksi syy tulokseeni voi olla, että peltosaunion pääasiallinen kukkapalkkio on siitepöly (Tózsér ym. 2019), ja useimmiten meden laatu ja määrä on siitepölyä tärkeämpi houkutin niin pölyttävierailumääriä kuin pölyttäjien monimuotoisuutta tarkasteltaessa (Fowler ym. 2016; Fornoff ym. 2016; Willmer 2011). Toisaalta yleisluonteiset kasvi–pölyttäjäsuhteet saattavat olla myös joustavampia kuin pitkälle erikoistuneet suhteet (Willmer 2011). Peltosauniot ovat voineet hyötyä samassa pölyttäjälohkossa sijainneista runsaskukintoisempien lajitooverien houkuttelevuudesta tai toisaalta myös niityllä kukkineista muista kukkakasveista.

Kuten odotin, peltosaunioiden kukintojen lukumäärän, teriön halkaisijan ja kasvien korkeuden sekä pölyttävierailujen määrän välillä oli positiivinen korrelaatio. Tulosteni perusteella avoimien kukintojen lukumäärä (0–3) oli pölyttävierailumäärien keskeisin selittäjä. Nämä havainnot voidaan selittää sillä, että runsaskukintoiset kasvit ja suuret kukinnot erottuvat pölyttäjille parhaiten, kun koheneva varsi kurottaa kukinnot päätteiseksi huiskiloksi pölyttäjien näkyville (Hernández-Villa ym. 2020). Vaihtoehtoisesti suurten kukintojen houkuttelevuus voi johtua siitä, että ne tarjoavat runsaammin resursseja kuin pienikokoisemmat kasvit (Willmer 2011; Leonhardt ym. 2024). Versojen korkeudella ei ollut kovinkaan voimakasta positiivista vaikutusta vierailujen lukumäärään, mutta osa kaksisiipisistä vieraileekin matalilla kasveilla lähellä maanpintaa, missä mikroilmasto voi olla sopivampi vaihtolämpöiselle hyönteiselle

(Willmer 2011 s. 308). Kukintojen koon ja lukumäärän kokeellisilla manipulaatioilla on selvitetty, että nimenomaan ne ovat keskeiset kukkakärpäsiä (Syrphidae) ja muita kaksisiipisiä (Diptera) houkuttelevat ominaisuudet ainakin yksivuotisella peltoretikalla (*Raphanus raphanistrum*) (Conner & Rush 1996) ja monivuotisella asterikasvilla (Kawarasaki & Hori 1999). Naapuripölytys lienee tyypillistä peltosaunioilla, koska kaksisiipiset vierailevat saman kasvivyksilön eri kukinnoilla usein edestakaisin (oma havainto). Tällainen pölyttäjäkäyttäytyminen voi olla haitallista itsesteriileille peltosaunioille, koska omat yhteensopimattomat siitepölyhiukkaset estävät toisten yhteensopivien peltosaunioyksilöiden siitepölyhiukkasten kiinnittymisen ja itämisen luotilla. Itsepölytteisissä peltosauniopopulaatioissa naapuripölytys taas voi johtaa itsesiitoksen haittoihin.

Vaikka kasvien houkuttelevuus ja pölytyspalvelut säilyvät raskasmetalleista huolimatta, kasvien jälkeäistuotto voi silti häiriintyä. Metallien tiedetään nimittäin heikentävän siitepölyhiukkasten itämistä, siiteputken kasvua ja elinkelpoisuutta (Meindl & Ashman 2017; Xun ym. 2017), sekä siementen kehitystä (Hladun ym. 2013; Xun ym. 2017; Shekari ym. 2019). Tällaisia suoria kelpoisuusvaikutuksia voidaan tutkia pölytysmanipulaatiokokeella (bioottisen pölytyksen estäminen ja käsinpölytys), kuten on tehty esimerkiksi ristikukkaiskasveilla (Hladun ym. 2013), kurkkukasvilla (Xun ym. 2017) ja auringonkukilla (Sivakoff ym. 2024). Xun ja muut (2017) tutkivat maaperän metallien (Zn, Cu, Ni, Pb) suoria vaikutuksia kaksikotisen kurkkukasvin koiras- ja naaraskelpoisuuteen. He havaitsivat siitepölyhiukkasten heikentynyttä elinkelpoisuutta (fluoresenssi-testi), ja lisäksi kontrollikasvien siitepölyllä käsinpölytetyt emikasvit tuottivat kevyempiä siemeniä metallikäsittelyssä kuin kontrollissa.

4.5 Pölyttäjävierailujen kesto peltosaunioilla

Kaksisiipiset (Diptera) mukauttivat käyttäytymistään viettämällä vähemmän aikaa tienvarsikäsitellyn peltosauniokukinnoilla. Havainto vertautuu osin Xun ym. (2017) sekä Sivakoff & Gardiner (2017) tuloksiin, joissa pölyttäjävierailumäärät pysyivät tasaisina, mutta vierailujen kesto lyheni raskasmetalleilla käsitellyillä kasveilla kontrolliin verrattuna. Myös Xun kollegoineen (2018) havaitsi, että hunajamehiläisten keskimääräinen vieailuaika väheni kontrollista (yli 8 s) alle kuuteen sekuntiin ja kimalaisten kontrollista (yli 12 s) alle 6–8 sekuntiin kupari-, nikkeli- ja lyijykäsittelyissä. Tienvarsikäsitellyn peltosauniot saattavat kärsiä lievistä siitepölyrajoitteisuudesta, koska vierailun lyheneminen yksittäisellä kukinnolla voi vaikuttaa vierailun tehokkuuteen ja pölytystulokseen (Ne’eman ym. 2010; Kendall ym. 2022). Xunin ja muiden (2017) kokeessa maaperän metallikäsittelyt (Zn, Cu, Ni, Pb) lyhensivät hunajamehiläisten (*A. mellifera*) kukkavierailujen kestoja kaksikotisen kurkkukasvin kukilla, mikä heikensi siementuottoa, koska pölyttäjät irrottivat vähemmän siitepölyä hedekukilta ja siirsivät sitä vähemmän emikukille. Osa pölyttäjistä ei ilmeisesti aina kykene erottamaan saastunutta ja puhdasta ravintoa toisistaan ennen tarkempaa ravinnon tarkastelua. Tällöin pölyttäjät saattavat aistia metallialkuaineet hajun tai

maun perusteella vasta kukkavierailun aikana ja hylätä kukan nopeasti (Meindl & Ashman 2013, 2014; Hladun ym. 2015; Sivakoff & Gardiner 2017; Sivakoff ym. 2024).

On mahdollista, että kaksisiipispölyttäjävierailujen keston lyhenemisen taustalla on raskasmetallien vaikutukset peltosaunioiden kukkapalkkioiden tuoksuun tai makuun. Kaksisiipisillä (Diptera) tiedetäänkin olevan kolmiväriänsä sekä tuoksujen aistimiseen erikoistuneita elimiä tuntosarvissa ja erityisesti soke-riyhdisteiden maistamiseen erikoistuneita elimiä suuosissa, raajoissa ja siivissä (Willmer 2011 s. 304–307; Fleischer 2018; Xiao ym. 2023). Itse asiassa mahlakärpästen (*Drosophilidae: Drosophila*) ja hyttysten (*Culicidae: Aedes*) ravinto- ja munintapreferenssikokeessa kävi ilmi, että kaksisiipiset välttelevät metalli-ioneja (mm. 0,01–10 mM Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}) sisältävän sakkaroosiliuoksen kuluttamista ja siihen munimista laboratorio-oloissa, koska ionit stimuloivat kitkerän maun aistivia hermosoluja ja inhiboivat makeaa aistivia hermosoluja (Xiao ym. 2023). Näin ollen metalli-ioneja sisältävä mesi voi karkottaa kaksisiipisiä erityisesti kitkerän maun vuoksi ja toisaalta siirtää mieltymystä saasteettomaan, makeammalta maistuvaan meteen. Jälleen tämä ajatus sisältää oletuksen, että raskasmetalleja on ensinnäkin kulkeutunut maaperästä peltosaunioiden kukkaelimiin kaksisiipisten aistittavissa olevin määrin. Toisaalta raskasmetallit saattavat vähentää kasvin kukkapalkkioiden määrää (Zarinkamar ym. 2021; Li ym. 2025), jolloin pölyttäjävierailun kesto mahdollisesti lyhenee pölyttäjän siirtyessä etsimään houkuttelevampaa tai palkitsevampaa kukintoa. Lisäksi kaksisiipisryhmien kukkauskollisuuksissa on eroja (Willmer 2011 s. 312), joten niiden on ehkä helppo valita houkuttelevampia yksilöitä myös kasvilajien välillä. On tosin syytä huomioida, että pölyttäjäseurantaan osallistui vain neljä eri kasviyksilöä tienvarsikäsitelystä, joten tulos voi heijastaa näiden kasviyksilöiden erityispiirteitä varsinaisen käsittelyvaikutuksen sijaan. Kukkapalkkioiden laadun ja määrän lisäksi pölyttäjävierailujen keston vaikuttavat myös kukkien tuoreus, kilpailevat kukkakasvit ja esimerkiksi aiempien pölyttäjävierailujen määrä kukinnoilla (Willmer 2011; Kendall ym. 2022).

Kaksisiipisten ja mesipistiäisten pitkät kukkavierailuajat peltosaunioilla olivat käsittelystä riippumatta todennäköisempiä iltapäivällä kuin aamupäivällä. Tähän todennäköisyyteen syy on yksittäisten kukkien avautuminen ja siitepölyn huipputarjonnan lisääntyminen kohti iltapäivää. Eri kasvilajit säätelevät pölyttäjävierailuja ja pölyttäjäaktiivisuutta kukkapalkkioiden vuorokausirytmillä (Štenc ym. 2023) erityisesti lajienvälisen kilpailun vähentämiseksi (Willmer 2011 s. 506–523). Peltosaunioiden siitepöly on helposti saatavilla pölyttäjille, kun mykerökukintojen torvikukat vapauttavat siitepölyä emiön luotille varhaisen aamun aikana (Kay 1994). Siitepöly on pääasiainen palkkio, mutta peltosauniot tuottavat vähäisiä määriä mettä (~0,03 μL /kehräkukka) (Kay 1994). Štenc ym. (2023) havainnoivassa tutkimuksessa yhdessä esiintyvien kukkakasvien (*Succisa pratensis*, *Centaurea jacea*, *Trifolium hybridum*) siitepölyn tarjonta oli eriytynyt aamu- ja iltapäiville, ja esimerkiksi ahdekaunokin (*Centaurea jacea*) siitepölytarjonta huipentui iltapäivisin, jolloin myös kukkakärpästen vierailut niillä olivat runsaimmillaan. En havainnut aamu- ja iltapäivän välisiä eroja pölyttäjävierailumäärissä, mutta pölyttäjät

ovat voineet viihtyä palkitsevimmillä kukinnoilla pidempään iltapäivällä. Seurantapäivällä (1–4) oli lähes merkitsevä vaikutus kaksisiipisten vierailuaikoihin ($P = 0,094$), joten tähän trendiin on voinut vaikuttaa esimerkiksi vuorokausien välinen valonmäärä sekä lämpötila- ja kosteusvaihtelu ja siten saataavuus kukkapalkkioissa (Willmer 2011 s. 247–249). Kukkakärpästen (Syrphidae) kukkavierailuajat olivat yleisesti lyhyempiä peltosaunioilla kuin muiden kaksisiipisten. Tämä tulos ei ole yllättävä, sillä useat kukkakärpäset ovat kehittyneet paitsi ilmiasultaan myös käyttäytymiseltään mallilajiensa mesipistiäisten kaltaisiksi, tehokkaiksi ja systemaattisiksi kukkakäsittelijöiksi (Willmer 2011 s. 312, 316; Orford ym. 2015).

4.6 Pölyttäjäyhteisön koostumus peltosaunioilla

Peltosaunioiden pölyttäjäyhteisökoostumus pysyi vakaana eri käsittelytasoissa, kuten käy ilmi yhdenmukaisista suhteellisista osuuksista, NMDS-ordinaatioiden päällekkäisyydestä ja Shannonin indekseistä (metallisulatto vs. kontrolli). Tämä osoittaa, että raskasmetallialtistus ei suodattanut pölyttäjäyhteisöä ainakaan lahko- ja heimotasolla tarkasteltuna. Hallitsevat ryhmät olivat kukkakärpäset (Syrphidae) ja muut kaksisiipiset (Diptera), mikä ei ole yllättävää, sillä kaksisiipisillä on synnynnäinen mieltymys säteittäissyymetriisiin, avoimiin ja valkoisiin kukintoihin, joissa keltainen keskusta ilmentää runsasta siitepölypalkkiota (Willmer 2011 s. 308). Siinä missä peltosauniota pidetään haitallisena ja torjuttavana viljelymaiden rikkakasvina (Lutman 2002; Ringselle ym. 2025), näyttää se pölyttäjävierailumäärien perusteella olevan suhteellisen houkutteleva ja tärkeä ravintokasvi kaksisiipisille. Sitä paitsi koekasvit saivat runsaasti pölyttäjävierailuja siitäkkin huolimatta, että seurantaniityllä yksi pölyttäjistä kilpaileva päälaaji oli syysmaitiainen (*Scorzoneroides autumnalis* syn. *Leontodon autumnalis*), joka houkutteli runsaasti kaksisiipisryhmiä, erakkomehiläisiä, kimalaisia, tarhamehiläisiä ja perhosia (oma havainto).

Teoriassa tietyt pölyttäjärühmät olisivat voineet vältellä metallikäsiteltyjä peltosaunioita toisia pölyttäjärühmiä enemmän ja suosia vierailuja ensisijassa kontrollikasveilla. Näin oli esimerkiksi Sivakoffin ja muiden (2024) kokeessa, jossa maaperän kadmium (50 mg Cd kg^{-1}) vähensi kimalaisia (*Bombus* spp.), mutta ei muita pölyttäjärühmiä auringonkukilla (*H. annuus*). On ehdotettu, että kukkapalkkioiden runsaat metallipitoisuudet saattavat seuloa pölyttäjäyhteisöä sellaisiin pölyttäjälajeihin, jotka eivät joko reagoi metalleihin tai sietävät niitä (*Elemental filter* -hypoteesi: Meindl & Ashman 2015). Kun jonkin taksonin yksilömäärä vähenee yhteisössä, yhteisön tasaisuus heikkenee, vaikka lajimäärä pysyy ennallaan (ks. Shannon–Weaverin diversiteetti-indeksi: ala-luku 2.3.2). Tällöin myös diversiteetti vähenee, sillä yhteisön monimuotoisuuteen vaikuttavat lajimäärä, yksilömäärä sekä lajien suhteelliset osuudet (Gurevitch ym. 2021 s. 341). Voisi ajatella, että toiset pölyttäjät olisivat herkempiä saasteille kuin toiset, koska esimerkiksi kimalaiset (*Bombus* spp.) aistivat tuoksua kukkien muotoja ja värejä täsmällisemmin – ne tunnistavat jopa lajityypillisiä kukkatuoksua ja assosioivat tuoksua visuaalisiin signaaleihin (Willmer 2011 s. 407–412). Osittain tästäkin syystä olisi tarpeellista saada tietoa raskasmetallien vaikutuksesta

mesikasvina tunnetun valkoapilan pääpölyttäjälajistoon. Tarkastelin pölyttäjyhteisöjä lahko- ja heimotasolla, koska tällainen luokittelu on mahdollista tehdä kentällä luotettavasti ilman näytteidenkeräystä. Olin kiinnostunut monimuotoisuudesta helposti hahmotettavalla ja yleisellä tasolla. Toisaalta pölyttäjien ryhmittely heimo- ja lahkotasolle voi häivyttää ekologisesti keskeistä informaatiota diversiteetistä ja sen vaikutuksesta pölytystulokseen. Havaitsin esimerkiksi toiminnallisilta ominaisuuksiltaan (mm. koko, karvaisuus, kielenpituus) ja käyttäytymiseltään vaihtelevan joukon (kukka)kärpäsiä ainakin suvuista *Bombylius*, *Episyrphus*, *Eristalis*, *Meliscaeva*, *Syrphus* ja *Volucella*, joiden vierailut ovat voineet jakautua epätasaisesti käsittelyryhmien välillä. Aiemmin on huomattu, että yksittäisen pölyttäjälajin merkitys pölytystehokkuudelle voi olla merkittävä riippumatta niiden runsaudesta: esimerkiksi pääasiassa kaksisiipispölytteinen sarjakukkainen (Apiaceae) tuotti eniten siemeniä *Eristalis tenax* -kukkakärpäsen pölyttämänä, vaikka kyseinen laji ei ollut runsaslukuisin vierailija (Pérez-Bañón ym. 2007).

4.7 Johtopäätökset

Metallisulattokäsittely ei heikentänyt peltosaunion kasvua tai kukintaa, ja valkoapila kasvoi menestyksekkäästi kaikissa maaperämetallikäsittelyissä. Tämä herättää kysymyksen, kestävätkö kasvit vielä korkeampia metallipitoisuuksia kuin käyttämäni kotimaiset pitoisuudet. Vaikka Suomen pääkaupunkiseudun vilkasliikenteisten teiden saastetaakka on oletettavasti paikoin suurempaa kuin tässä tutkimuksessa, Euroopassa ja maailmanlaajuisesti liikenne- ja kaivosjätealueiden maaperän metallipitoisuudet ylittävät usein Suomessa mitatut tasot, erityisesti lyijyn osalta (Werkenthin ym. 2014; De Silva ym. 2021; Oleńska ym. 2022). Euroopan tienvarsien lyijyn maksimiarvoksi mitattiin $1769 \mu\text{g Pb g}^{-1}$ ja mediaaniarvoksi $106,0 \mu\text{g Pb g}^{-1}$ (tarkasteltu: Werkenthin ym. 2014), kun taas maailmanlaajuisessa katsauksessa lyijyn määrät tienvarsien maaperässä on $143 \pm 53 \mu\text{g Pb g}^{-1}$ (keskiarvo \pm keskivirhe) vaihteluvälin ollessa $35\text{--}6292 \mu\text{g Pb g}^{-1}$. Tulokseni ja aiempi kirjallisuus (Jach ym. 2022; Oleńska ym. 2022) viittaavat, että hernekasvit (Fabaceae) sietävät raskasmetallistressiä erityisen hyvin, ja monivuotinen elinkierto voi tarjota kilpailuedun raskasmetallipitoisessa maaperässä yksivuotisiin kasveihin nähden. Vaikka lisätutkimusta tarvitaan valkoapilan houkuttelevuudesta pölyttäjille raskasmetallipitoisessa maaperässä, niin se voi olla muiden palkokasvien muassa varteenotettava vaihtoehto pölyttäjäystävällisiin luonnonkasviyhteisöihin saastealueilla. Pölyttäjävierailumääriä tarkasteltaessa peltosaunion pölyttäjät eivät erottaneet käsiteltyjä (tienvarsi ja metallisulatto) kukintoja kontrollikukinnoista, mikä voi turvata lajin pölytyspalveluja saastuneissa ympäristöissä, mutta vahvistaa samalla huolta kasvillisuuden muodostamasta ekologisesta ansasta pölyttäjille. Toisaalta kaksisiipiset saattavat osittain suojautua kukkaelinten raskasmetalleilta hylkäämällä kukinnot kontrollikukkia nopeammin. Peltosaunion heikentynyt kasvu ja kukinta tienvarsikäsittelyssä tarjoaa mahdollisen selityksen kasvien niukoista peittävyyksistä tienvarsien läheisyydessä (Skaldina ym. 2024). Peltosaunioiden pienempi koko ja kukintojen väheneminen todennäköisesti heikentävät kasvien houkuttelevuutta pölyttäjille silloin, kun ne kasvavat ja kilpailevat pölyttäjistä houkuttelevampien lajitoverien tai muiden houkuttelevampien kasvilajien lähetyvillä.

Kiitokset

Satu Ramula ja Annika Nylund – lämpimät kiitokset mielenkiintoisen tutkimusaiheen tarjoamisesta sekä avustanne ja neuvoistanne työn eri vaiheissa. Tutkimusta oli huojentavaa tehdä tietäen, että asiantuntevaa tukea oli vaivatta saatavilla suunnittelusta kenttätöihin, analyyseihin ja kirjoittamisprosessiin saakka.

Kiitos Suomen Biologian Seura Vanamo ry, Suomen Hyönteisseura ry sekä Vuokon Luonnonsuojelusäätiö tutkielmani taloudellisesta tukemisesta. Kiitän myös Kotimaisten kielten keskuksen (Kotus) asiantuntijoita vastauksista kielenhuoltokysymyksiini ja Kielitoimiston ohjepankki -verkkosivun ylläpitämisestä.

Turussa 5.1.2026

Pasi Ahola

Viitteet

- Aleklett K., Rosa D., Pickles B. J. & Hart M. M. (2022) Community assembly and stability in the root microbiota during early plant development. *Frontiers in Microbiology* 13: e826521. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.826521>
- Alloway B. J. (2012) *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. 3. painos. Springer, Alankomaat. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Atta M. I., Zehra S. S., Ali H., Ali B., Abbas S. N., Aimen S., Sarwar S., Ahmad I., Hussain M., Al-Ashkar I., Elango D. & El Sabagh A. (2023) Assessing the effect of heavy metals on maize (*Zea mays* L.) growth and soil characteristics: plants-implications for phytoremediation. *PeerJ* 11: e16067. <https://doi.org/10.7717/peerj.16067>
- Bae J., Benoit D. L. & Watson A. K. (2016) Effect of heavy metals on seed germination and seedling growth of common ragweed and roadside ground cover legumes. *Environmental Pollution* 213: 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.11.041>
- Baker A. J. M. & Brooks R. R. (1989) Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1: 81–126.
- Baker A. J. M. (1987) Metal Tolerance. *The New Phytologist* 106: 93–111. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb04685.x>
- Bartkowiak A., Lemanowicz J., Rydlewska M. & Sowiński P. (2024) The impact of proximity to road traffic on heavy metal accumulation and enzyme activity in urban soils and dandelion. *Sustainability* 16: e812. <https://doi.org/10.3390/su16020812>
- Bates D., Maechler M., Bolker B., Walker S. (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67: 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Battin J. (2004) When good animals love bad habitats: ecological traps and the conservation of animal populations. *Conservation Biology* 18: 1482–1491. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00417.x>
- Bennett J. M., Steets J. A. & Burns J. H. (2020) Land use and pollinator dependency drives global patterns of pollen limitation in the anthropocene. *Nature Communications* 11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17751-y>
- Bhat B. A., Rather M. A., Bilal T., Nazir R., Qadir R. U. & Mir R. A. (2025) Plant hyperaccumulators: a state-of-the-art review on mechanism of heavy metal transport and sequestration. *Frontiers in Plant Science* 16: e1631378. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1631378>
- Bini C., Wahsha M., Fontana S. & Maleci L. (2012) Effects of heavy metals on morphological characteristics of *Taraxacum officinale* Web growing on mine soils in NE Italy. *Journal of Geochemical Exploration* 123: 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.07.009>
- Blackmore L. M., Goulson D., Stewart A. & Bezemer M. (2014) Evaluating the effectiveness of wild-flower seed mixes for boosting floral diversity and bumblebee and hoverfly abundance in urban areas. *Insect Conservation and Diversity* 7: 480–484. <https://doi.org/10.1111/icad.12071>
- Brooks M. E., Kristensen K., Benthem K. J., Magnusson A., Berg C. W., Nielsen A., Skaug H. J., Maechler M. & Bolker B. M. (2017) glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *The R Journal* 9: 378–400. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>
- Carvalho M. E. A., Castro P. R. C. & Azevedo R. A. (2020) Hormesis in plants under Cd exposure: from toxic to beneficial element? *Journal of Hazardous Materials* 384: e121434. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121434>

- Čertner M., Kúr P., Kolář F. & Suda J. (2019) Climatic conditions and human activities shape diploid–tetraploid coexistence at different spatial scales in the common weed *Tripleurospermum inodorum* (Asteraceae). *Journal of Biogeography* 46: 1355–1366. <https://doi.org/10.1111/jbi.13629>
- Chaudhry N. Y. & Khan A. S. (2006) Improvement of pistillate flowers yield with GA₃ in heavy metals treated plants. *Plant Growth Regulation* 50: 211–217.
- Chen M., Zhang T.-L., Hu C.-G. & Zhang J.-Z. (2023) The role of drought and temperature stress in the regulation of flowering time in annuals and perennials. *Agronomy* 13: e3034. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123034>
- Conner J. K. & Rush S. (1996) Effects of flower size and number on pollinator visitation to wild radish, *Raphanus raphanistrum*. *Oecologia* 105: 509–516. <https://doi.org/10.1007/BF00330014>
- Daniel-Ferreira J., Fourcade Y., Bommarco R., Wissman J. & Öckinger E. (2023) Communities in infrastructure habitats are species rich but only partly support species associated with semi-natural grasslands. *The Journal of Applied Ecology* 60: 837–848. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14378>
- De Silva S., Ball A. S., Indrapala D. V. & Reichman S. M. (2021) Review of the interactions between vehicular emitted potentially toxic elements, roadside soils, and associated biota. *Chemosphere* 263: e128135. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128135>
- Dhiman S., Singh A. D., Kour J., Kumar V. & Bhardwaj R. (2024) Heavy metal-induced phyto-hormetic morpho-physio-biochemical adjustments: a critical review. *Journal of Plant Growth Regulation* 43: 4426–4469. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11408-6>
- Duffus J. H. (2002) “Heavy metals” a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry* 74: 793–807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
- Ehmet N., Wang Y., Zhao X., Chen D. W., Sun K. & Hou Q.-Z. (2021) Adaptive response of reproductive characteristics of *Trifolium repens* on time scale. *Flora* 285: e151923. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2021.151923>
- Ferrante M., Kirsch F. & Westphal C. (2025) Stable pollinator communities in different white clover populations suggest potential win-win scenarios for crop yield and biodiversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 378: 109295. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109295>
- Fleischer J., Pregitzer P., Breer H. & Krieger J. (2018) Access to the odor world: olfactory receptors and their role for signal transduction in insects. *Cellular and Molecular Life Sciences* 75: 485–508. <https://doi.org/10.1007/s00018-017-2627-5>
- Fornoff F., Klein A. M., Hartig F., Benadi G., Venjakob C., Schaefer H. M. & Ebeling A. (2016) Functional flower traits and their diversity drive pollinator visitation. *Oikos* 126: 1020–1030. <https://doi.org/10.1111/oik.03869>
- Fowler R., Rotheray E. & Goulson D. (2016) Floral abundance and resource quality influence pollinator choice. *Insect Conservation and Diversity* 9. <https://doi.org/10.1111/icad.12197>
- Fox J. & Weisberg S. (2019) An R companion to applied regression. Third edition, Sage, Thousand Oaks CA. <https://www.john-fox.ca/Companion/>
- Gardiner M. M., Riley C. B., Bommarco R. & Öckinger E. (2018) Rights-of-way: a potential conservation resource. *Frontiers in Ecology and the Environment* 16: 149–158. <https://doi.org/10.1002/fee.1778>
- Gérard M., Vanderplanck M., Wood T. & Michez D. (2020) Global warming and plant–pollinator mismatches. *Emerging Topics in Life Sciences* 4: 77–86. <https://doi.org/10.1042/ETLS20190139>
- Gurevitch J., Scheiner S. M. & Fox G. A. (2021) *The ecology of plants*. 3. painos. Sinauer Associates/Oxford University Press, Massachusetts.

- Hartig F. (2024) DHARMA: residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models. R package version 0.4.7. <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMA> [viimeksi käytetty 11.10.2025].
- Heliölä J., Kuussaari M. & Pöyry J. (2021) *Pölyttäjien tila Suomessa. Kansallista pölyttäjästrategiaa tukeva taustaselvitys*. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 34, Helsinki.
- Hernández-Villa V., Vibrans H., Uscanga-Mortera E. & Aguirre-Jaimes A. (2020) Floral visitors and pollinator dependence are related to foral display size and plant height in native weeds of central Mexico. *Flora* 262: e151505. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.151505>
- Hladun K. R., Parker D. R. & Trumble J. T. (2011) Selenium accumulation in the floral tissues of two Brassicaceae species and its impact on floral traits and plant performance. *Environmental and Experimental Botany* 74: 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.05.003>
- Hladun K. R., Parker D. R. & Trumble J. T. (2015) Cadmium, copper, and lead accumulation and bioconcentration in the vegetative and reproductive organs of *Raphanus sativus*: implications for plant performance and pollination. *Journal of Chemical Ecology* 41: 386–395. <https://doi.org/10.1007/s10886-015-0569-7>
- Hladun K. R., Parker D. R., Tran K. D. & Trumble, J. T. (2013) Effects of selenium accumulation on phytotoxicity, herbivory, and pollination ecology in radish (*Raphanus sativus* L.). *Environmental Pollution* 172: 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.08.009>
- Horstmann S., Auffret A. G., Herbertsson L., Klatt B. K., Müller S. & Öckinger E. (2024) Traffic intensity and vegetation management affect flower-visiting insects and their response to resources in road verges. *The Journal of Applied Ecology* 61: 1955–1967. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14692>
- Ilmatieteen laitos (2025) Havaintojen lataus -verkkosivu. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus> [Viitattu 15.10.2025]
- Jach M. E., Sajnaga E. & Ziaja M. (2022) Utilization of legume-nodule bacterial symbiosis in phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. *Biology* 11: e676. <https://doi.org/10.3390/biology11050676>
- Jakovljević K., Mišljenović T., Brueckner D., Jacquet J., Michaudel G. & Ent A. (2024) Elemental localization in inflorescences of the hyperaccumulators *Noccaea praecox* and *Noccaea caerulea* (Brassicaceae). *Ecological Research* 39: 588–595. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12473>
- Jiménez-Ambríz G., Petit C., Bourrié I., Dubois S., Olivieri I. & Ronce O. (2007) Life history variation in the heavy metal tolerant plant *Thlaspi caerulescens* growing in a network of contaminated and noncontaminated sites in southern France: role of gene flow, selection and phenotypic plasticity. *The New Phytologist* 173: 199–215. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01923.x>
- Kassambara A., Kosinski M. & Biecek P. (2025) survminer: drawing survival curves using 'ggplot2'. R package version 0.5.1. <https://CRAN.R-project.org/package=survminer> [viimeksi käytetty 11.10.2025]
- Kawarasaki S. & Hori Y. (1999) Effect of flower number on the pollinator attractiveness and the threshold plant size for flowering in *Pertya triloba* (Asteraceae). *Plant Species Biology* 14: 69–74. <https://doi.org/10.1046/j.1442-1984.1999.00008.x>
- Kay Q. O. N. (1994) *Tripleurospermum inodorum* (L.) Schultz Bip. (*Matricaria inodora* L., *Matricaria maritima* auct. p.p. non-L., *Matricaria perforata* Mérat, *Tripleurospermum perforatum* (Mérat) Wagenitz, *Tripleurospermum maritimum* (L.) Schultz Bip. p.p. non-L.). *The Journal of Ecology* 82: 681–697.

- Kendall L., Stavert J., Gagic V., Hall M. & Rader R. (2022) Initial floral visitor identity and foraging time strongly influence blueberry reproductive success. *Basic and Applied Ecology* 60: 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.02.009>.
- Khan A. S. & Chaudhry N. Y. (2010) Feloiginic effects of IAA for improving pistillate and staminate flowering in some cucurbits under Pb stress. *Pakistan Journal of Botany* 42: e1835.
- Kou M., Hou J., Chen C., Xiong J., Wei R., Wang M. & Tan W. (2023) Quantitative analysis of dose interval effect of Pb-Cd interaction on *Oryza sativa* L. root. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 252: e114622. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114622>
- Kou M., Wang Z., Wang M., Benedetti M. F., Avena M. J., Fang L. & Tan W. (2025) Cadmium and lead ions interaction: a model for assessing combined heavy metal contamination in soils for food safety risk evaluation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 298: e118324. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118324>
- Kuznetsova A., Brockhoff P. B., Christensen R. H. B. (2017) lmerTestPackage: tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software* 82: 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- Lenth R. (2025) emmeans: estimated marginal means, aka least-squares means. R version 1.11.2–8. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans> [viimeksi käytetty 12.10.2025]
- Leonhardt S. D., Chui S. X. & Kuba K. (2024) The role of non-volatile chemicals of floral rewards in plant-pollinator interactions. *Basic and Applied Ecology* 75: 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2024.01.002>
- Li D., Liu J., Yuan Y., Chen J. & Mu J. (2025) Cadmium contaminants in pollen and nectar are variably linked to the growth and foraging behaviors of honey bees. *Insects* 16: e306. <https://doi.org/10.3390/insects16030306>
- Li J., Qiu Y., Zhao Q., Chen D., Wu Z., Peng A., Niazi N. K., Trakal L., Sakrabani R., Gao B., Wang H. & Wu W. (2020) Lead and copper-induced hormetic effect and toxicity mechanisms in lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in a contaminated soil. *The Science of the Total Environment* 741: e140440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140440>
- Li Q., Liu X., Yue M., Tang W.-T. & Meng Q.-C. (2011) Response of physiological integration in *Trifolium repens* to heterogeneity of UV-B radiation. *Flora*. 206: 712–719. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2010.11.013>
- Li R., Tan W., Wang G., Zhao X., Dang Q., Yu H. & Xi B. (2019) Nitrogen addition promotes the transformation of heavy metal speciation from bioavailable to organic bound by increasing the turnover time of organic matter: An analysis on soil aggregate level. *Environmental Pollution* 255: e113170. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113170>
- Liu R., Yang X., Gao R., Hou X., Huo L., Huang Z., Cornelissen J. H. C. & Veski P. (2021) Allometry rather than abiotic drivers explains biomass allocation among leaves, stems and roots of *Artemisia* across a large environmental gradient in China. *The Journal of Ecology* 109: 1026–1040. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13532>
- Lüdecke D., Ben-Shachar M. S., Patil I., Waggoner P. & Makowski D. (2021) performance: an R package for assessment, comparison and testing of statistical models. *Journal of Open Source Software* 6: e3139. <https://doi.org/10.21105/joss.03139>
- Luo Z.-B., Chenhan W., Chao Z., Hong L., Lipka U. & Polle A. (2014) The role of ectomycorrhizas in heavy metal stress tolerance of host plants: plant biotic and abiotic interactions. *Environmental and Experimental Botany* 108: 47–62.
- Lutman P. J. W. (2002) Estimation of seed production by *Stellaria media*, *Sinapis arvensis* and *Tripleurospermum inodorum* in arable crops. *Weed Research* 42: 359–369. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2002.00296.x>

- Lysenkov S. N. (2009) Visitation rates and pollinator sets at the periphery and central parts of single-species plant patches. *Entomological Review* 89: 891–895. <https://doi.org/10.1134/S0013873809080028>
- Meindl G. A. & Ashman T.-L. (2013) The effects of aluminum and nickel in nectar on the foraging behavior of bumblebees. *Environmental Pollution* 177: 78–81. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.017>
- Meindl G. A. & Ashman T.-L. (2014) Nickel accumulation by *Streptanthus polygaloides* (Brassicaceae) reduces floral visitation rate. *Journal of Chemical Ecology* 40: 128–135. <https://doi.org/10.1007/s10886-014-0380-x>
- Meindl G. A. & Ashman T.-L. (2015) Effects of floral metal accumulation on floral visitor communities: introducing the elemental filter hypothesis. *American Journal of Botany* 102: 379–389. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400468>
- Meindl G. A. & Ashman T.-L. (2017) Effects of soil metals on pollen germination, fruit production, and seeds per fruit differ between a Ni hyperaccumulator and a congeneric nonaccumulator. *Plant and Soil* 420: 493–503. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3425-4>
- Meindl G. A., Bain D. J. & Ashman T.-L. (2014) Variation in nickel accumulation in leaves, reproductive organs and floral rewards in two hyperaccumulating Brassicaceae species. *Plant and Soil* 383: 349–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2184-8>
- Meinzen T. C., Burkle L. A. & Debinski D. M. (2024) Roadside habitat: boon or bane for pollinating insects? *Bioscience* 74: 54–64. <https://doi.org/10.1093/biosci/biad111>
- Michael D., Joshi K. & Krishna S. (2025) Habitat factors and traits shape plant-pollinator interactions in a semi-arid landscape. *Ecology and Evolution* 25: e129. <https://doi.org/10.1186/s12862-025-02463-y>
- Monchanin C., Gabriela de Brito Sanchez M., Lecouvreur L., Boidard O., Méry G., Silvestre J., Le Roux G., Baqué D., Elger A., Barron A. B., Lihoreau M. & Devaud J.-M. (2022) Honey bees cannot sense harmful concentrations of metal pollutants in food. *Chemosphere* 297: e134089. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134089>
- Mossberg B., Stenberg L. & Vuokko S. (2007) *Maastokasvio*. Tammi, Helsinki.
- Musah B. I. (2024) Effects of heavy metals and metalloids on plant-animal interaction and biodiversity of terrestrial ecosystems—an overview. *Environmental Monitoring and Assessment*: 197: e12. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13490-5>
- Ne’eman G., Jürgens A., Newstrom-Lloyd L., Potts S. G. & Dafni A. (2010) A framework for comparing pollinator performance: effectiveness and efficiency. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 85: 435–451. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2009.00108.x>
- Nölke I., Tonn B. & Isselstein J. (2021) Seasonal plasticity is more important than population variability in effects on white clover architecture and productivity. *Annals of Botany* 128: 73–82. <https://doi.org/10.1093/aob/mcab040>
- Nousiainen T. (2024) Raskasmetallien vaikutukset maaperän selkärangattomien eliöyhteisöihin Kuopion kaupunkialueen liikennesaarekkeilla. Ympäristötieteen pro gradu -tutkielma. Itä-Suomen yliopisto, Luonnontieteiden, metsätieteiden ja tekniikan tiedekunta.
- Oksanen J., Simpson G., Blanchet F. ym. (2025) vegan: community ecology package. R package version 2.71, <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> [viimeksi käytetty 11.10.2025]
- Oldén A., Pitkämäki T., Halme P., Komonen A., Raatikainen K. J. & Overbeck G. (2021) Road verges provide alternative habitats for some, but not all, meadow plants. *Applied Vegetation Science* 24: 3. <https://doi.org/10.1111/avsc.12594>
- Oleńska E., Małek W., Sujkowska-Rybikowska M., Szopa S., Włostowski T., Aleksandrowicz O., Swiecicka I., Wójcik M., Thijs S. & Vangronsveld J. (2022) An alliance of *Trifolium repens*—*Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii*—mycorrhizal fungi from an old Zn-Pb-Cd rich waste

- heap as a promising tripartite system for phytostabilization of metal polluted soils. *Frontiers in Microbiology* 13: e853407. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.853407>
- Ollerton J., Killick A., Lamborn E., Watts S. & Whiston M. (2007) Multiple meanings and modes: on the many ways to be a generalist flower. *Taxon* 56: 717–728. <https://doi.org/10.2307/25065855>
- Ollerton J., Winfree R. & Tarrant S. (2011) How many flowering plants are pollinated by animals. *Oikos* 120: 321–326. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18644.x>
- Orford K., Vaughan I. & Memmott J. (2015) The forgotten flies: the importance of non-syrphid Diptera as pollinators. *Biological Sciences* 282: 1–6. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.2934>
- Pérez-Bañón C., Petanidou T. & Marcos-García M. (2007) Pollination in small islands by occasional visitors: the case of *Daucus carota subsp. commutatus* (Apiaceae) in the Columbretes archipelago, Spain. *Plant Ecology* 192: 133–151. <https://doi.org/10.1007/s11258-006-9233-1>
- Phillips B. B., Bullock J. M., Gaston K. J., Hudson-Edwards K. A., Bamford M., Cruse D., Dicks L. V., Falagan C., Wallace C., Osborne J. L. & Stanley M. (2021) Impacts of multiple pollutants on pollinator activity in road verges. *The Journal of Applied Ecology* 58: 1017–1029. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13844>
- Phillips B. B., Bullock J. M., Osborne J. L., Gaston K. J. & Manning P. (2020) Ecosystem service provision by road verges. *The Journal of Applied Ecology* 57: 488–501. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13556>
- Pietrelli L., Menegoni P. & Papetti P. (2022) Bioaccumulation of heavy metals by herbaceous species grown in urban and rural sites. *Water, Air, and Soil Pollution* 233: e141. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05577-x>
- Pinto-Zevallos D. M., Skaldina O. & Blande J. D. (2025) Effects of atmospheric pollutants on volatile-mediated insect ecosystem services. *Global Change Biology* 31: e70034. <https://doi.org/10.1111/gcb.70034>
- Potters G., Pasternak T. P., Guisez Y., Palme K. J. & Jansen M. A. K. (2007) Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends in Plant Science* 12: 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.01.004>
- Putra R. & Müller C. (2023) Extending the elemental defence hypothesis in the light of plant chemodiversity. *The New Phytologist* 239: 1545–1555. <https://doi.org/10.1111/nph.19071>
- Qi Y., Wei W., Chen C. & Chen L. (2019) Plant root-shoot biomass allocation over diverse biomes: a global synthesis. *Global Ecology and Conservation* 18: e00606. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00606>
- R Core Team (2025) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Raguso R. A. (2008) Wake up and smell the roses: the ecology and evolution of floral scent. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 39: 549–569. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095601>
- Ribeiro E. S., Pereira M. P., de Castro E. M., de Resende Baroni G., de Pádua M. P. & Pereira F. J. (2025) Pb tolerance in *Echinodorus grandiflorus* through the maintenance of root growth, nutrient uptake, and changes in the root cortical anatomy. *Acta Physiologiae Plantarum* 47: e22. <https://doi.org/10.1007/s11738-025-03773-w>
- Ringselle B., Stankovic M., Andersson L. & Ninkovic V. (2025) Sub-second low-energy electrical application effectively controls small but not established plants of scentless mayweed (*Tripleurospermum inodorum*), wild oat (*Avena fatua*) and couch grass (*Elymus repens*). *Weed Research* 65: e70010. <https://doi.org/10.1111/wre.70010>

- Rizvi A. & Khan Mohd S. (2018) Heavy metal induced oxidative damage and root morphology alterations of maize (*Zea mays* L.) plants and stress mitigation by metal tolerant nitrogen fixing *Azotobacter chroococcum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 157: 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.063>
- Ruas R. de B., Costa L. M. S. & Bered F. (2022) Urbanization driving changes in plant species and communities – A global view. *Global Ecology and Conservation* 38: e02243. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02243>
- Ruiz S. R., Espín S., Sánchez-Virosta P., Salminen J.-P., Lilley T. M. & Eeva T. (2017) Vitamin profiles in two free-living passerine birds under a metal pollution gradient – A calcium supplementation experiment. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 138: 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.12.037>
- Ryser P. & Emerson P. (2007) Growth, root and leaf structure, and biomass allocation in *Leucanthemum vulgare* Lam. (Asteraceae) as influenced by heavy-metal-containing slag. *Plant and Soil* 301: 315–324. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9451-x>
- Saikkonen K., Koivunen S., Vuorisalo T. & Mutikainen P. (1998) Interactive effects of pollination and heavy metals on resource allocation in *Potentilla anserina* L. *Ecology* 79:1620–1629. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1998\)079\[1620:IEOPAH\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1998)079[1620:IEOPAH]2.0.CO;2)
- Salinitro M., Mattarello G., Guardigli G., Odajiu M. & Tassoni A. (2021) Induction of hormesis in plants by urban trace metal pollution. *Scientific Reports* 11: e20329. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99657-3>
- Sánchez-Mata D., de la Fuente V., Rufo L., Rodríguez N. & Amils R. (2014) Localization of nickel in tissues of *Streptanthus polygaloides* Gray (Cruciferae) and endemic nickel hyperaccumulators from California. *Biological Trace Element Research* 157: 75–83. <https://doi.org/10.1007/s12011-013-9868-4>
- Schlinkert H., Westphal C., Clough Y., Grass I., Helmerichs J. & Tschardt T. (2016) Plant size affects mutualistic and antagonistic interactions and reproductive success across 21 Brassicaceae species. *Ecosphere* 7: 12. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1529>
- Scott S. B. & Gardiner M. M. (2025) Trace metals in nectar of important urban pollinator forage plants: a direct exposure risk to pollinators and nectar-feeding animals in cities. *Ecology and Evolution* 15: e71238. <https://doi.org/10.1002/ece3.71238>
- Scott S. B., Sivakoff F. S., Meuti M. E. & Gardiner M. M. (2023) Metals could challenge pollinator conservation in legacy cities. *Journal of Insect Conservation* 27: 361–375. <https://doi.org/10.1007/s10841-023-00474-y>
- Shekari L., Aroiee H., Mirshekari A. & Nemati H. (2019) Protective role of selenium on cucumber (*Cucumis sativus* L.) exposed to cadmium and lead stress during reproductive stage role of selenium on heavy metals stress. *Journal of Plant Nutrition* 42: 529–542. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1554075>
- Sivakoff F. S. & Gardiner M. M. (2017) Soil lead contamination decreases bee visit duration at sunflowers. *Urban Ecosystems* 20: 1221–1228. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0674-1>
- Sivakoff F. S., McLaughlin R. & Gardiner M. M. (2024) Cadmium soil contamination alters plant-pollinator interactions. *Environmental Pollution* 356: e124316. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124316>
- Skaldina O., Nylund A. & Ramula S. (2024) Neglected puzzle pieces of urban green infrastructure: richness, cover, and composition of insect-pollinated plants in traffic-related green spaces. *Landscape Ecology* 39: e80. <https://doi.org/10.1007/s10980-024-01881-5>
- Stancic Z., Fiket Z. & Vujevic D. (2022) Can urban grassland plants contribute to the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Molecules* 27: e6558. <https://doi.org/10.3390/molecules27196558>

- Štenc J., Janošík L., Matoušková E., Hadrava J., Mikát M. & Janovský Z. (2023) Pollinator visitation closely tracks diurnal patterns in pollen release. *American journal of botany*: e16179. <https://doi.org/10.1002/ajb2.16179>
- Subpiramaniyam S., Boovaragamoorthy G. M., Kaliannan T., Krishna K., Hong S.-C., Yi P.-I., Jang S.-H. & Suh J.-M. (2021) Assessment of foliar dust deposition and elemental concentrations in foliar dust and long rows of grand tamarind leaves along two major roads of Coimbatore, India. *Chemosphere* 264: e128444. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128444>
- Suomen ympäristökeskus (2024). Päivitetty 2.10.2024. Ilman epäpuhtauksien päästöt Suomessa -verkkosivu. <https://www.ymparisto.fi/fi/saasteettomuus-ja-ymparistoriskit/ilmansuojelu/ilman-epapuhtauksien-paastot-suomessa> [Viitattu 11.2.2025]
- Syrjänen K. & Rytteri T. (1998) *Uhanalaisten kasvien seuranta*. Suomen ympäristökeskus.
- Tan Q., Guo Q., Wei R., Zhu G., Du C. & Hun H. (2023) Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on bioaccumulation and bioavailability of As and Cd: a meta-analysis. *Environmental Pollution* 316: e120619. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120619>
- Therneau T. (2024) A package for survival analysis in R. R package version 3.8–3. <https://CRAN.R-project.org/package=survival> [viimeksi käytetty 9.10.2025]
- Tózsér D., Tóthmérész B., Harangi S., Baranyai E., Lakatos G., Fülöp Z. & Simon E. (2019) Remediation potential of early successional pioneer species *Chenopodium album* and *Tripleurospermum inodorum*. *Nature Conservation* 36: 47–69. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.36.32503>
- Twerd L., Sobieraj-Betlińska A. & Szefer P. (2021) Roads, railways, and power lines: are they crucial for bees in urban woodlands? *Urban Forestry & Urban Greening* 61: e127120. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127120>
- Väylävirasto (2025). Päivitetty 5.3.2025. Tieverkko -verkkosivu. <https://vayla.fi/vaylista/tieverkko> [Viitattu 29.4.2025]
- Wang L., Gong L., Gan D., Li X., Yao J., Qu J., Cong J. & Zhang Y. (2022) Diversity, function and assembly of the *Trifolium repens* L. root-associated microbiome under lead stress. *Journal of Hazardous Materials* 438: e129510. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129510>
- Werkenthin M., Kluge B. & Wessolek G. (2014) Metals in European roadside soils and soil solution – a review. *Environmental Pollution* 189: 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.025>
- Willmer P. (2011) *Pollination and floral ecology*. Princeton university press, New Jersey.
- Wood T. J., Holland J. M. & Goulson D. (2015) Pollinator-friendly management does not increase the diversity of farmland bees and wasps. *Biological Conservation* 187: 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.04.022>
- Wu F., Fan J., Ye X., Yang L., Hu R., Ma J., Ma S., Li D., Zhou J., Nie G. & Zhang X. (2022) Unravelling cadmium toxicity in *Trifolium repens* L. seedling: insight into regulatory mechanisms using comparative transcriptomics combined with physiological analyses. *International Journal of Molecular Sciences* 23: e4612. <https://doi.org/10.3390/ijms23094612>
- Xiao S., Baik L. S., Shang X. & Carlson J. R. (2023) Meeting a threat of the Anthropocene: taste avoidance of metal ions by *Drosophila*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119: e2204238119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2204238119>
- Xiong Z.-T., Liu C. & Geng B. (2006) Phytotoxic effects of copper on nitrogen metabolism and plant growth in *Brassica pekinensis* Rupr. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 64: 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.02.003>
- Xun E., Zhang Y., Zhao J. & Guo J. (2017) Translocation of heavy metals from soils into floral organs and rewards of *Cucurbita pepo*: Implications for plant reproductive fitness. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 145: 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.045>

- Xun E., Zhang Y., Zhao J. & Guo J. (2018) Heavy metals in nectar modify behaviors of pollinators and nectar robbers: Consequences for plant fitness. *Environmental Pollution* 242: 1166–1175. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.128>
- Yang Y., Wei X., Lu J., You J., Wang W. & Shi R. (2010) Lead-induced phytotoxicity mechanism involved in seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 73: 1982–1987. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.08.041>
- Yuan X., Liu Y., Wang S., L Y., Li Y., Chen J. & Duan C. (2024) *Trifolium repens* L. recruits root-associated *Microbacterium* species to adapt to heavy metal stress in an abandoned Pb-Zn mining area. *The Science of the Total Environment* 946: e174057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174057>
- Yurkevich M., Kurbatov A. & Ikkonen E. (2024) Effect of secondary paper sludge on physiological traits of *Lactuca sativa* L. under heavy-metal stress. *Plants* 13: e1098. <https://doi.org/10.3390/plants13081098>
- Zarinkamar F., Moradi A. & Davoodpour M. (2021) Ecophysiological, anatomical, and apigenin changes due to uptake and accumulation of cadmium in *Matricaria chamomilla* L. flowers in hydroponics. *Environmental Science and Pollution Research International* 28: 55154–55165. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14000-7>
- Zhang Q., Gong M., Liu K., Chen Y., Yuan J. & Chang Q. (2020) *Rhizoglossus intraradices* improves plant growth, root morphology and phytohormone balance of *Robinia pseudoacacia* in arsenic-contaminated soils. *Frontiers in Microbiology* 11: e1428. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01428>
- Zia A., van den Berg L., Ahmad M. N., Riaz M., Zia D. & Ashmore M. (2018) Controls on accumulation and soil solution partitioning of heavy metals across upland sites in United Kingdom. *Journal of Environmental Management* 222: 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.076>

Liitteet

Liite 1. Koeasetelma



Liite 1. 2×3 tekijällinen täysin satunnaistettu lohkokoe ($n = 180$) sisälsi kolme maaperäkäsittelyä (tienvarsi, metallisulatto ja kontrolli) sekä kaksi kasvilajia (peltosaunio ja valkoapila). Käsittely-lajiyhdistelmät esiintyivät yhtä monta kertaa jokaisessa kymmenessä lohkoissa.