

*Teaduspreemia põllumajandusteaduste alal
tööde tsükli „Innovaatilise RNAi tehnoloogia
arendamine ja looduse hüvede rakendamine
jätkusuutlikus põllumajanduses“ eest.*

Eve Veromann



Foto: Birgit Püve

INNOVAATILISE RNAI TEHNOLOOGIA ARENDAMINE JA LOODUSE HÜVEDE RAKENDAMINE JÄTKUSUUTLIKUS PÕLLUMAJANDUSES

Elurikkus, looduse hüved ja põllumajandus

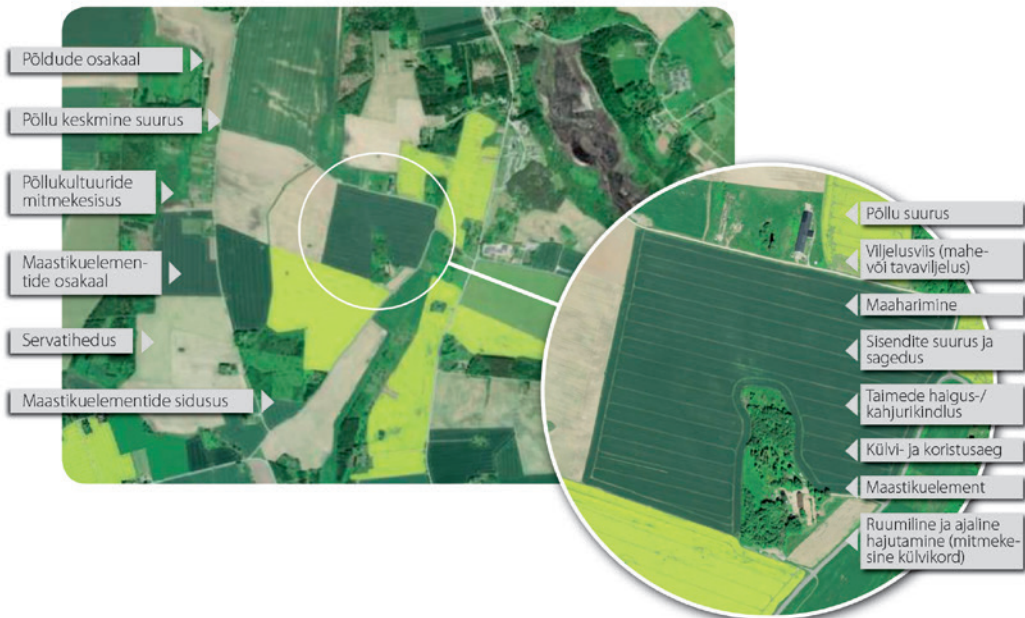
Põllumajanduse dilemma on see, et ühelt poolt sõltub see otseselt looduse hüvedest, teisalt aga on üks suurimaid elurikkuse hävitajaid, millest omakorda looduse hüved sõltuvad. Millenniumi ökosüsteemide hindamise (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) aruande kohaselt on looduse hüved ehk ökosüsteemiteenused mitmesugused keskkonnakaitselised, sotsiaalsed ja majanduslikud hüved, mida loodus inimkonnale pakub. Looduse hüvede tugiteenused on näiteks mulla teke, fotosüntees, aineriing ja reguleerivad teenused näiteks tolmeldamine, kahjuritõrje, vee-, õhu- ja mullakvaliteedi regulatsioon, tuule- ja vee-erosiooni ärahoidmine, üleujutuste puhverdamine; varustusteenused, näiteks toidu, vee ja puidu pakkumine jne. Kõik nimetatud hüved on elutähtsad põllumajanduse toimimiseks.

Elurikkus on toimivate ökosüsteemide aluseks. Ainult elurikkad ja mitmekesised kooslused on paindlikud ning isereguleeruvad erinevate häiringute, sealhulgas ka kliimamuutuste suhtes. Kahjuks on elurikkus, mis on kujunenud 3,8 miljardi aasta pikkuse evolutsiooni tulemusena, tohtus vähenemise keerises. Ohustatud on mitte ainult haruldaste maismaa- ja vee-elustiku esindajad. Ka täiesti tavaliste liikide arvukus on alarmeerivalt langenud (Ceballos jt, 2015; Hallmann jt, 2017; Kremen, Merenlender, 2018; Newbold jt, 2015).

Maailma kasvav rahvastik on jõuga võtnud lõivu looduselt, et end toita, majandust edendada ja tehnikat arendada. Valginnastumine, karjäärid, kaevandused ning tehnoloogia- ja tööstuspargid on hõivanud massiivsed alad jäädavalt põllumajanduselt ära, mis omakorda on võtnud lõivu looduslikelt kooslustelt, niitudelt ja metsadelt (Hooke, Martín-Duque, 2012). Looduse säilitamiseks ja kaitseks on loodud loodus- ja maastikukaitsealad, kehtestatud mitmesuguseid piiranguid, loodud direktiive ja meetmeid, kuid me ei saa liikide säilitamises ainult looduskaitsealade peale lootma jääda. Kui väljaspool looduskaitsealasid asuvad elupaigad on degradeerunud ja nende hulk drastiliselt vähenenud, siis ähvardab liigirikkuse kadu ka looduskaitsealasid (Halley jt, 2016). Põllumajanduslik maakasutus ja tootmise intensiivistumine on üks peamisi elurikkuse hävitajaid (Beckmann jt, 2019; Dainese jt, 2019; Newbold jt, 2015; Rigal jt, 2023; Sánchez-Bayo, Wyckhuys, 2019).

Globaalsest asustatavast maast moodustavad põllumajandusmaad umbes 45% (FAO, 2019). Haritavast maast kannatab degradeerumise all 80% (Prävälje jt, 2021). Seega on igasugune positiivne muutus põllumajandusmaastikul tähtis ja globaalse mõjuga. Taastades ja rajades uusi poollooduslikke alasid põllumajandusmaastikule ning taastades nende vahelise sidususe, saab kujundada n-ö töötavaid maastikke. Need sisaldavad põlde ja metsatukki, niite, põllusaari, vooluveekogusid ja veesilmi, mis töötavad nii liikumiskoridoridena erinevate elupaikade vahel kui ka erinevate organismide elupaikadena ja looduse hüvede pakkujana. Kõrgekvaliteedilistel mosaiiksetel maastikel sidusate erinevate elementidega on kriitiline roll elurikkuse säilitamisel nii *in situ* kui ka soodustades liikide levikut ja pakkudes migratsiooniteid (Mendenhall jt, 2014).

Elurikkust põllul mõjutavad paljud tegurid nii maastiku kui ka talu ja tootja tasandil, millest sõltuvad põllule jõudvate loodusehüvede kvaliteet, hulk ja mitmekesisus (joonis 1). Maastiku tasandil on oluline tähtsus põldude osakaalul ja suurusel, kasvatatavate põllukultuuride mitmekesisusel. Üldise suhteliselt vaese elurikkuse tingimustes, nagu agroökosüsteemid tavaliselt on, omab igasugune mitmekesisuse lisamine kriitilist tähtsust, sh ka liigilise, sordilise ja tõulise mitmekesisuse lisamine. On suur vahe, kas kasvatada sajal hektaril ühte kultuuri või kümnet erinevat kultuuri ja sorti. Üks liik või sort soodustab ainult



Joonis 1. Elurikkust põllul mõjutavad erinevad tegurid maastiku tasandil (vasakul) ja põllu tasandil (paremal). Agrokemikaalide kasutamise intensiivsus, taimede kahjuri- ja haiguskindlus, külvikorra mitmekesisus ja maaharimine mõjutavad komplekselt nii põllu kui maastiku tasandil (autori joonis).

talle omaste taimtoiduliste lüljalgsete masspaljunemist, mis võib viia kahjurite puhanguteni. Paljude erinevate kultuuride kasvatamine samal pindalal sellist eelist ühele liigile ei anna.

Olulise tähtsusega on maastikuelementide osakaal, nende sidusus ja servatihe-
dus. Rohtsed õitsvate looduslike taimedega põlluservad toetavad kahjuritõrjet
ja suurendavad tolmeldamisteenust (Albrecht jt, 2020; Boecking, Veromann,
2020; Gallé jt, 2019; Holland jt, 2020a, 2020b; Kovács jt, 2019; Maccagnani jt,
2020). Selleks et tagada põldudel looduslik kahjuritõrje ja tolmeldamise hüve,
peaksid erinevad mitteharitavad alad ja poollooduslikud elupaigad moodustama
vähemalt 20–25% (Gallé jt, 2020; Tsharntke jt, 2005; Vilumets jt, 2023).

Põllu tasandil on olulised tegurid põllu suurus, külvikorra mitmekesisus,
maaharimise intensiivsus ja viljelusviis, taimede kahjuri- ja haiguskindlus,
kasutatavate agrokemikaalide sagedus ja hulk ning maastikuelementide olemas-
olu. Mahepõllumajanduslikult majandatavad alad soodustavad elurikkust, sest
seal ei kasutata sünteetilisi väetiseid ja taimekaitsevahendeid. Mahepõldudel on
üldine elurikkus suurem, mis tagab lüljalgsete suurema liigirikkuse ja arvukuse
ning sellega seotud kahjuritõrje- ja tolmeldamisteenuse parema pakkumise (nt
ülevaateartikkel Lichtenberg jt, 2017). Mitmekesine pikaajaline külvikord on
jätkusuutliku taimekasvatuse alustala. Sellega tagatakse mullaviljakuse säili-
mine, haigus- ja kahjuripuhangute vältimine ning umbrohtude allasurumine.
Loomulikult mõjutavad agrokemikaalide kasutuse intensiivsus, integreeritud
taimekaitse (ITK) strateegia kasutamine, külvikorra mitmekesisus ja maa-
harimine elurikkust komplekselt nii põllu kui ka maastiku tasandil.

Integreeritud taimekaitse

Vaatamata sellele, et ITK on juba alates 2014. aastast Euroopa Liidus kohustuslik
taimekaitsestrateegia, ei ole see taimekasvatases vajalikul määral rakendunud
(Hokkanen, 2015). Põhjuseks on sünteetilistele pestitsiididele alternatiivsete
valikute puudumine ja nende vähene uuritus, keskkonnasõbralike meetodite
teadmistemahukus, rakendamise keerukus, suurem tööjõu nõudlus jne.

ITK alussambaks on ennetavad meetmed, mis põhinevad elurikkuse ja looduse
hüvede soodustamisel. Selleks et muuta põllumajandustootmist jätkusuutli-
kumaks, on Euroopa põllumajanduspoliitika „Talust taldrikule“ liikunud
keskkonnasõbraliku ja loodust säästvama taimekaitse arendamise ja sünteetiliste
sisendite vähendamise suunas. Strateegia üks eesmärke on sünteetiliste väetiste
kasutamise vähendamine. Uurisime, kuidas mõjutavad erinevad väetustasemed
rapsi peamiste kahjurite, hiilamardikate (*Brassicogethes*) parasiteeritust ehk
kahjurite looduslike vaenlaste edukust. Leidsime, et keskkonda vähem koormav
madalam väetamine soodustab parasiteerituse taset (Zolotarjova jt, 2022).

Süntetiliste pestitsiidide alternatiiviks on taimsetel eeterlikel õlidel baseeruvad tõrjevahendid, mille potentsiaali on taas aktiivselt uurima hakatud. Hindasime seitsme taimse eeterliku õli erinevate kontsentratsioonide mõju rapsi peamiste kahjurite, naeri-hiilamardika (*B. aeneus*) ja kõdra-peitkärsaka (*Ceutorhynchus obstrictus*) suremusele ja mobiilsusele (Sulg jt, 2023; Willow jt, 2020b). Hindasime taimsete eeterlike õlide mõju ka parasitoididele mudelorganismi *Nasonia vitripennis*'e näitel (Sulg jt, 2023). Leidsime, et kaneelikoore (*Cinnamomum verum*) eeterlik õli oli kõige efektiivsem hiilamardika vastu ning kaneelikoore ja köömne (*Cuminum cuminum*) eeterlikud õlid kõdra-peitkärsakate vastu, kuid samas ka surmavad parasitoididele. Seega on ülioluline hinnata ka looduslikel õlidel baseeruvate tõrjevahendite riski mittesihtorganismidele.

Uus väljakutse põllumajandustootjatele on uute kahjuriliikide ilmumine põldudele. Kliimamuutus on toonud kaasa pehmemad talved ning uued lõunapoolse levikuga liigid on areaali laiendanud ja suudavad nüüd edukalt talvituda. Üheks selliseks liigiks on rapsi vartes kaevandav talvise aktiivsusega peitkärsakas (*Ceutorhynchus sulcicollis*). Eesti tingimustes jõudis ta esmakordselt kahjuri staatusesse kaks aastat tagasi ja võib lumeta soojade talvede tingimustes kujuneda uueks kahjuriks ka Põhjamaades (Sulg jt, 2022).

Intensiivne põllumajanduslik tegevus vähendab agro-ökosüsteemide elurikkust. ITK aluseks olev ennetav tõrje põhineb aga põllumajandusmaastiku bioloogilisel mitmekesisusel. Meie uurimustöödest on selgunud, et poollooduslikud ja mitteharitavad alad põllumajandusmaastikul soodustavad tolmeldajate ja kahjurite looduslike vaenlaste arvukuse ja mitmekesisuse kasvu ning suurendavad reguleerivaid looduse hüvesid põldudel (Albrecht jt, 2020; Boecking, Veromann, 2020; Holland jt, 2020a, 2020b; Maccagnani jt, 2020; Sulg jt, 2024; Vahter jt, 2022).

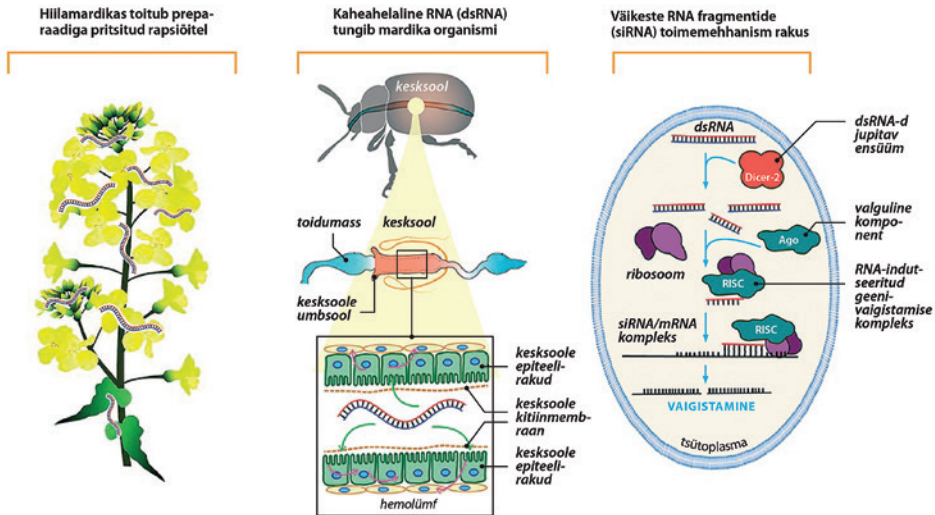
Arvestades põllumajandusmaastikku kujundades tolmeldajate elu- ja toitumistingimusi, saab oluliselt parandada nii meemesilaste kui ka looduslike mesilaste poolt pakutavat tolmeldamishüve. Tolmeldamise defitsiit võib olla üks olulistest saaki vähendavatest teguritest (Holland jt, 2020b). Põldude rohtsed õitsvate taimedega servaalad panustavad nii tolmeldamise kui kahjuritõrje hüvesse põllul, samas ei suurenda kahjurite arvukust põldudel (Albrecht jt, 2020). See on oluline teave kõikidele tootjatele, kuna hirm mitteharitavatelt aladelt põllule levivate kahjurite ees on üks põhjus, miks selliseid maastikuelemente eemaldatakse. Esmakordselt õnnestus meil empiirilisel tõestada, et kahjurite ja nende looduslike vaenlaste arvukust saab mõjutada põldude ruumilise-ajalise paiknemisega manipuleerides. Planeerides rapsipõllu eelmise aasta põllust kaugemale kui 500 m, saab vähendada rapsikahjurite arvukust. Seejuures nende parasiteerituse tase ei vähene ja seega panustatakse ennetavasse tõrjesse (Vilumets jt, 2023).

Massihävitusrelvast snaipriks

Põllumajanduses kasutatavad taimekaitsevahendid, sealhulgas putukamürgid, on peamisi elurikkuse vähenemise ja hävimise põhjusi nii põllumajandus- kui ka loodusmaastikus (nt Goulson, 2020). Mitmed alarmeerivad uuringud käsitlevad putukate globaalset arvukust ja liigilist mitmekesisust (Goulson, 2020, 2021; Kehoe jt, 2020; Ulyshen and Horn, 2023). Kindlasti on igaüks meist ka ise märganud, et kevadel-suvel on autode esiklaasid pärast sõitu palju puhtamad kui paarkümmend aastat tagasi. Saksamaal on viimase 27 aasta jooksul lendavaid putukaid nende looduskaitsealadel 76% vähem; seejuures kesksuvel lausa 82% vähem (Hallmann jt, 2017). Selline laialt levinud putukate biomassi vähenemine on eriti alarmeeriv veel seetõttu, et kaitsealadel peaks elurikkus ja ökosüsteemide funktsioneerimine olema paremini kaitstud. Katastroofilise vähenemise üheks oluliseks põhjuseks peetakse põllumajanduse intensiivistumist – pestitsiidide kasutamist, väetiste kasutamise suurenemist, sagedasi agrotehnika töid ja nende tööde perioodi pikenemist. Kevaditi minnakse varem põllule ja sügiseti lõpetatakse põllutööd hiljem. Mõnel pool Saksamaal saab põllutöid teha ka aastaringselt.

ITK põhimõte on kasutada sünteetilisi pestitsiide ainult viimase abinõuna, kui ennetavad meetmed ei ole olnud tõhusad. Põllumajanduses laialt kasutatavad insektitsiidid ehk putukamürgid ei ole kahjurite liigipõhised. Need on mürgised paljudele erinevatele, sealhulgas ka kasulikele organismidele (Ara, Haque, 2021; Godfray jt, 2014; Raimets jt, 2018; Schulz jt, 2021). Ohtusid mittesihtrühma organismidele saab küll vähendada, näiteks pritsimise aega valides. Päevasel ajal ilusa ilmaga on õitsvate kultuuridega põldudel näiteks palju mesilasi, nii looduslikke kui meemesilasi, parasitoide, liblikaid, lepatriinusid, kärbsed jne. Tehes kahjuritõrjet öisel ajal, saab vähendada tolmeldajate otsesest kokkupuudet putukatõrjevahendiga. Samas on videvikus ja öisel ajal aktiivsed paljud röövtoidulised putukad, nagu jooksiklased ja lühitiiblased, kes on väga olulised taimekahjurite looduslikud vaenlased põldudel. Seega vähendades ohte ühele rühmale, suurendame teiste haavatavust, lihtsalt liigutame riski ühelt kasurite rühmalt teisele. Lisaks sellele võivad paagisegus põldudele viidavad taimekaitsevahendite segude jäägid, millega kasulikud organismid (nii mesilased kui ka parasitoidid) pärast pritsimist võivad põllul kokku puutuda, olla neile sünergiliselt mürgised (Willow jt, 2019). Teisisõnu, insektsitsiid ja fungitsiid koos olid mürgisemad kui neid üksikult kasutades, mis omakorda tähendab, et $1 + 1$ ei olegi alati 2. See kõik viitab vajadusele arendada sihtrühmaspetsiifilisi pestitsiide.

Säilitades ja soodustades looduslikku kahjuritõrjet põldudel, saab jätkusuutlikusse kahjuritõrjesse integreerida uusi võimalusi ja meetodeid, mis on mittesihtrühma putukatele ohutud. Perspektiivne on uudsete biotehnoloogiliste võtete kasutamine põllumajanduses. Nende hulgas on näiteks geenivaigistustehnoloogia (nn RNA interferentsi ehk RNAi tehnoloogia) rakendamine potentsiaalselt liigispetsiifiliste kahjuritõrjevahendite loomiseks. Andrew Fire ja Craig C. Mello said 2006. aastal



Joonis 2. Kahjurputukas sööb taime peale pritsitud preparaati. See jõuab putuka seedetrakti. Seal liigub kaheahelaline RNA (*double-stranded* RNA, dsRNA) raku tsütoplasmasse, kus see n-ö tuntakse ära ja lõigatakse väikesteks fragmentideks (siRNA). Fragmentid harutatakse lahti üksikahelateks. Need ahelad integreeruvad geenivaigistuse kompleksi ja paaruvad sihiks oleva RNA ahelaga. Sellele RNA-le tekitatud lõige takistab sihtmärgiks oleva valgu sünteesi (modifitseeritud Joga jt, 2016).

Nobeli preemia RNAi-alaste tööde eest, mille nad publitseerisid juba 1998. aastal (Fire jt, 1998). Alates selle avastamisest, et RNAi tehnoloogia on potentsiaal reguleerida geenide avaldumist, on selle tehnoloogia rakendamine arenenud suure hooga. RNAi-d teatakse kui täpset, efektiivset ja stabiilset geenivaigistamise mehhanismi, mis esineb enamikus eukarüootides. RNAi mehhanismid põhinevad lühikese ahelaga (20–24 nukleotiidi) RNA fragmentidel (nn microRNA ehk miRNA või nn *small interfering* RNA ehk siRNA), mis takistavad geenide aktivatsiooni ja vaigistavad valgusünteesi organismides (Kleter, 2020) (joonis 2).

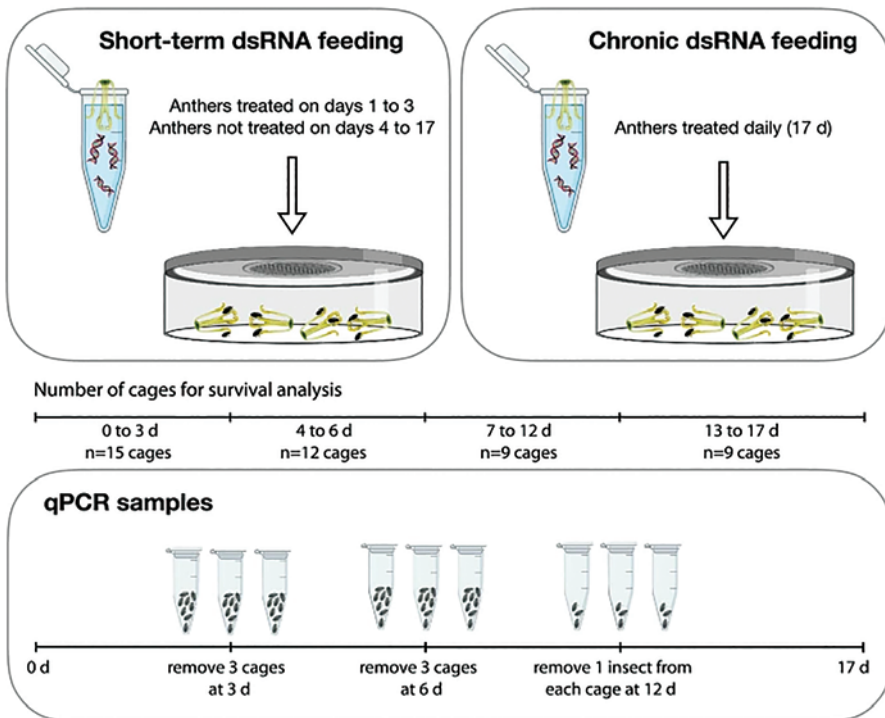
Kui kasutame selle omaduse ära ja leiame geeni, mille vaigistamine on vaid sellele kahjurile surmav, siis saamegi luua potentsiaalselt liigispetsiifilise tõrjevahendi, mis on ohutu kõigile teistele põllul sibavatele organismidele. See on suur samm edasi massihävitusel põhinevate putukamürkide muutmisel täpsuslaskuriteks, snaipriteks, mis on sihitud ainult kindlale kahjuriliigile.

Selle idee realiseerimine nn posttranskriptorse geenivaigistuse meetodil RNAi abil on tõhus tööriist integreeritud ja loodussõbralikus taimekaitses, kõrge potentsiaaliga ka väiketootjatele (Willow, Veromann, 2022), et tagada globaalne toiduohutus ja elurikkus põllumajandusmaastikus (Willow jt, 2021d, 2022). RNAi tehnoloogial baseeruv taimekaitses saab olla nii taimesisene (geneetiliselt muundatud (GM) taimed) kui ka -väline (preparaadiga pritsimine) (Taning jt, 2020).

Juba on olemas transgeenne RNAi-papaia sort, mis on resistentne papaia rõngasviirusele (ingl *ringspot virus*). See sort päästis Havai papaiaatööstuse hävimisest. Viirus on väga agressiivne, vähendab oluliselt viljade kvaliteeti, saagi suurust ja taimede kasvu ning ähvardas istandused hävitada (Kuo, Falk, 2020). Samuti on Bayeri kompanii loonud GM-maisi, mis kasutab RNAi lähenemist (Head jt, 2017).

Kiire areng on toimunud RNAi-põhiste taimekaitsepreparaatide loomisel. Pritsimispreparaadid kahjurputukate vastu on kuum teema ja maailma paljude teaduslaborite fookuses. Suur samm edasi tehti hiljuti. Esmakordselt maailmas registreeriti 2023. aasta detsembris USA keskkonnaametis dsRNA preparaati (aktiivainega Ledprona) kartulimardika tõrjeks. Preparaat registreeriti biotõrjepreparaatide nimekirjas, viidates selle kasutamise lubamisele mahepõllumajanduses.

Kuigi edulugu kartulimardika näol on juba olemas, ei ole kõik mardikad sama vastuvõtlikud dsRNA-le (Willow, Veromann, 2021). Tuleb põhjalikult uurida erinevaid RNAi sihtmärke, et leida, millised kõige paremini sobituvad ITK strateegiasse (Willow jt, 2021d).



Joonis 3. *Brassicogethes aeneus*’e valmikute dsRNA-ga (ds α COP (*coatomer subunit alpha*) kontsentratsioonidega 0.5, 2.5 ja 5 μ g/ μ L ja dsGFP (*green fluorescent protein*, roheline fluorestseeruv proteiin) 5 μ g/ μ L) töödeldud tolmukate toitmisalase ülesehitus: lühiaegne (3 päeva) ja krooniline (17 päeva) (Willow jt, 2021a).

Koostöös Guy Smaghe ja Kristof de Schutteri (Genti ülikool, Belgia) töörühma teadlastega saime esimesed tulemused hiilamardika tõrjevahendi väljatöötamisel. Leidsime, et RNAi kaudu nn *coatomer*-proteiini kompleks-I vaigistamine sisuliselt tappis naeri-hiilamardika (Willow jt, 2020a, 2021a, 2021b, 2021c). Üliolulise aspektina lisaks dsRNA mikrosüstimise kaudu saadud geenivaigistava ja sellele järgneva surmava mõju tõestamisele (Willow jt, 2021c) õnnestus tõestada ka suukaudse dsRNA manustamisel geenivaigistuse surmav toime hiilamardika valmikutele (Willow jt, 2020a) ja vastsetele (Willow jt, 2021b). Selgitasime välja, et igapäevane söötmine dsRNA-ga oli võrreldes lühiaegse söötmiskatsega (vt eksperimendi skeem joonisel 3) oluliselt suurema surmava mõjuga hiilamardika valmikutele. See tulemus viitab geenitehnoloogia abil loodud RNAi kultuuride potentsiaalsele eelisele (Willow jt, 2021a). Võrreldes kontrollvariandiga olid letaalsed mõlemad toitmisiisid, nii lühiaegne kui ka krooniline. Viimasel juhul osutusid surmavaks ka suhteliselt madalad ja potentsiaalselt põllurelevantssed kontsentratsioonid. Kuigi taimedele pritsitud dsRNA liigub taimekudedesse edasi, ei ole taimede pritsimine dsRNA-ga hiilamardikatele piisavalt surmava toimega (Willow jt, 2023), mistõttu dsRNA stabiilsemaks ja efektiivsemaks muutmiseks tuleb teha täiendavaid uuringuid ning leida kõige efektiivsemad lahendused.

Kokkuvõtteks

Rakendades ITK strateegia põhitähta – elurikkusel baseeruvat ennetavat tõrjet ja panustades teaduse esirinna meetodi, RNAi strateegia kasutamisele, et disainida liigispetsiifilisi kahjuritõrje preparaate –, saab põllumajandus olla elurikkust säilitades edukas toidutootja ja täita strateegia „Talust taldrikule“ ambitsioonikad eesmärgid.

Tänuõnad

Olen südamest tänulik oma fantastilisele töörühmale, koostööpartneritele, kraadiõppuritele ja kolleegidele, kellega koos on mitu puuda soola ära söödud, rõõme ja muresid jagatud ning tasapisi *per aspera ad astra* jõutud. Minu eriline tänu kuulub Riina Kaasikule, Jonathan Willow'le, Silva Vilumetsale, Gabriella Kovácsile, Liina Soonvaldile, Triin Kallavusele, Guy Smaghe'le, Clauvis Taningile, Kristof De Schutterile. Suur tänu kõikidele kaasautoritele nii Eestis kui välismaal! Uuringuid on toetanud järgmised projektid: Eesti teadusagentuuri personaalne uurimistoetus PRG1056, Euroopa Liidu FP7 grant 311879 QuESSA, Horisont 2020 grant 862731 FRAMEwork, ERA-Net Coordinated Integrated Pest Management (C-IPM) projekt IPM4Meligethes.

VIITED

Albrecht, M., Kleijn, D., Williams, N. M., Tschumi, M., Blaauw, B. R., Bommarco, R., Campbell, A.J., Dainese, M., Drummond, F. A., Entling, M. H., Ganser, D., Groot, G. A. de, Goulson, D., Grab, H., Hamilton, H., Herzog, F., Isaacs, R., Jacot, K., Jeanneret, P., Jonsson, M., Knop, E., Kremen, C., Landis, D. A., Loeb, G. M., Marini, L., McKerchar, M., Morandin, L., Pfister, S. C., Potts, S. G., Rundlöf, M., Sardiñas, H., Sciligo, A., Thies, C., Tschardt, T., Venturini, E., Veromann, E., Vollhardt, I. M. G., Wäckers, F., Ward, K., Wilby, A., Woltz, M., Wratten, S., Sutter, L. 2020. The effectiveness of flower strips and hedgerows on pest control, pollination services and crop yield: a quantitative synthesis. *Ecology Letters*, 23(10), 1488–1498, <https://doi.org/10.1111/ele.13576>

Ara, Z. G., Haque, A. R. 2021. A comprehensive review on synthetic insecticides: toxicity to pollinators, associated risk to food security, and management approaches. *Journal of Biosystems Engineering*, 46, 254–272, <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00104-y>

Beckmann, M., Gerstner, K., Akin-Fajiyiye, M., Ceașu, S., Kambach, S., Kinlock, N. L., Phillips, H. R. P., Verhagen, W., Gurevitch, J., Klotz, S., Newbold, T., Verburg, P. H., Winter, M., Seppelt, R. 2019. Conventional land-use intensification reduces species richness and increases production: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 25(6), 1941–1956, <https://doi.org/10.1111/gcb.14606>

Boecking, O., Veromann, E. 2020. Bee pollination of crops: A natural and cost-free ecological service. – Smagghe, G., Boecking, O., Maccagnani, B., Mänd, M., Kevan, P. G. (eds), *Entomovectoring for Precision Biocontrol and Enhanced Pollination of Crops*. Springer, Cham, 53–62, https://doi.org/10.1007/978-3-030-18917-4_3

Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M., Palmer, T. M. 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1(5), e1400253, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253>

Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., Carvalheiro, L. G., Chaplin-Kramer, R., Gagic, V., Garibaldi, L.A., Ghazoul, J., Grab, H., Jonsson, M., Karp, D. S., Kennedy, C. M., Kleijn, D., Kremen, C., Landis, D. A., Letourneau, D. K., Marini, L., Poveda, K., Rader, R., Smith, H. G., Tschardt, T., Andersson, G. K. S., Badenhausser, I., Baensch, S., Bezerra, A. D. M., Bianchi, F. J. J. A., Boreux, V., Bretagnolle, V., Caballero-Lopez, B., Cavigliasso, P., Četković, A., Chacoff, N.P., Classen, A., Cusser, S., da Silva e Silva, F. D., de Groot, G. A. Dudenhöffer, J. H., Ekroos, J., Fijen, T., Franck, P., Freitas, B. M., Garratt, M. P. D., Gratton, C., Hipólito, J., Holzschuh, A., Hunt, L., Iverson, A. L., Jha, S., Keasar, T., Kim, T. N., Kishinevsky, M., Klatt, B. K., Klein, A-M., Krewenka, K. M., Krishnan, S., Larsen, A. E., Lavigne, C., Liere, H., Maas, B., Mallinger, R. E., Pachon, E. M.,

Martínez-Salinas, A., Meehan, T. D., Mitchell, M. G. E., Molina, G. A. R., Nesper, M., Nilsson, L., O'Rourke, M. E., Peters, M. K., Plečáček, M., Potts, S. G., Ramos, D. de L., Rosenheim, J. A., Rundlöf, M., Rusch, A., Sáez, A., Scheper, J., Schleuning, M., Schmack, J. M., Sciligo, A. R., Seymour, C., Stanley, D. A., Stewart, R., Stout, J. C., Sutter, L., Takada, M. B., Taki, H., Tamburini, G., Tschumi, M., Viana, B. F., Westphal, C., Willcox, B. K., Wratten, S. D., Yoshioka, A., Zaragoza-Trello, C., Zhang, W., Zou, Y., Steffan-Dewenter, I. 2019. A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, 5(10), eaax0121, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax012>

Fire, A., Xu, S., Montgomery, M. K., Kostas, S. A., Driver, S. E., Mello, C. C. 1998. Potent and specific genetic interference by double-stranded RNA in *Caenorhabditis elegans*. *Nature*, 391, 806–811, <https://doi.org/10.1038/35888>

Gallé, R., Geppert, C., Földesi, R., Tscharntke, T., Batáry, P. 2020. Arthropod functional traits shaped by landscape-scale field size, local agri-environment schemes and edge effects. *Basic and Applied Ecology*, 48, 102–111, <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.09.006>

Gallé, R., Happe, A-K., Baillod, A. B., Tscharntke, T., Batáry, P. 2019. Landscape configuration, organic management, and within-field position drive functional diversity of spiders and carabids. *Journal of Applied Ecology*, 56(1), 63–72, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13257>

Godfray, H. C. J., Blacquière, T., Field, L. M., Hails, R. S., Petrokofsky, G., Potts, S. G., Raine, N. E., Vanbergen, A. J., McLean, A. R. 2014. A restatement of the natural science evidence base concerning neonicotinoid insecticides and insect pollinators. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1786), 20140558, <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0558>

Goulson, D. 2020. Pesticides, corporate irresponsibility, and the fate of our planet. *One Earth*, 2(4), 302–305, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.03.004>

Goulson, D. 2021. The insect apocalypse: 'Our world will grind to a halt without them'. *The Observer*.

Halley, J. M., Monokrousos, N., Mazaris, A. D., Newmark, W. D., Vokou, D. 2016. Dynamics of extinction debt across five taxonomic groups. *Nature Communications*, 7, 12283, <https://doi.org/10.1038/ncomms12283>

Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörrer, T., Goulson, D., de Kroon, H. 2017. More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE* 12(10), e0185809, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>

Head, G. P., Carroll, M. W., Evans, S. P., Rule, D. M., Willse, A. R., Clark, T. L., Storer, N. P., Flannagan, R. D., Samuel, L. W., Meinke, L. J. 2017. Evaluation of SmartStax and SmartStax PRO maize against western corn rootworm and

northern corn rootworm: efficacy and resistance management. *Pest Management Science*, 73(9), 1883–1899, <https://doi.org/10.1002/ps.4554>

Hokkanen, H. M. T. 2015. Integrated pest management at the crossroads: Science, politics, or business (as usual)? *Arthropod-Plant Interactions*, 9, 543–545, <https://doi.org/10.1007/s11829-015-9403-y>

Holland, J. M., Jeanneret, P., Moonen, A-C., van der Werf, W., Rossing, W. A. H., Antichi, D., Entling, M. H., Giffard, B., Helsen, H., Szalai, M., Rega, C., Gibert, C., Veromann, E. 2020a. Approaches to identify the value of seminatural habitats for conservation biological control. *Insects*, 11(3), 195, <https://doi.org/10.3390/insects11030195>

Holland, J. M., Sutter, L., Albrecht, M., Jeanneret, P., Pfister, S. C., Schirmel, J., Entling, M. H., Kaasik, R., Kovacs, G., Veromann, E., Bartual, A. M., Marini, S., Moonen, A-C., Szalai, M., Helsen, H., Winkler, K., Lof, M. E., van der Werf, W., McHugh, N. M., Smith, B. M., Wallis, D. W., Cresswell, J. E. 2020b. Moderate pollination limitation in some entomophilous crops of Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 302, 107002, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107002>

Hooke, R. LeB., Martín-Duque, J. F. 2012. Land transformation by humans: A review. *GSA Today*, 22(12), 4–10, <https://doi.org/10.1130/GSAT151A.1>

Joga, M. R., Zotti, M. J., Smagghe, G., Christiaens, O. 2016. RNAi efficiency, systemic properties, and novel delivery methods for pest insect control: What we know so far. *Frontiers in Physiology*, 7, 553, <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00553>

Kehoe, R., Frago, E., Sanders, D. 2020. Cascading extinctions as a hidden driver of insect decline. *Ecological Entomology*, 46(4), ean.12985, <https://doi.org/10.1111/een.12985>

Kleter, G. A. 2020. Food safety assessment of crops engineered with RNA interference and other methods to modulate expression of endogenous and plant pest genes. *Pest Management Science*, 76(10), 3333–3339, <https://doi.org/10.1002/ps.5957>

Kovács, G., Kaasik, R., Lof, M. E., van der Werf, W., Kaart, T., Holland, J. M., Luik, A., Veromann, E. 2019. Effects of land use on infestation and parasitism rates of cabbage seed weevil in oilseed rape. *Pest Management Science*, 75(3), 658–666, <https://doi.org/10.1002/ps.5161>

Kremen, C., Merenlender, A. M. 2018. Landscapes that work for biodiversity and people. *Science*, 362(6412), eaau6020, <https://doi.org/10.1126/science.aau6020>

Kuo, Y-W., Falk, B. W. 2020. RNA interference approaches for plant disease control. *BioTechniques*, 69(6), 469–477, <https://doi.org/10.2144/btn-2020-0098>

Lichtenberg, E. M., Kennedy, C. M., Kremen, C., Batáry, P., Berendse, F., Bommarco, R., Bosque-Pérez, N. A., Carvalheiro, L. G., Snyder, W. E.,

Williams, N. M., Winfree, R., Klatt, B. K., Åström, S., Benjamin, F., Brittain, C., Chaplin-Kramer, R., Clough, Y., Danforth, B., Diekötter, T., Eigenbrode, S. D., Ekroos, J., Elle, E., Freitas, B. M., Fukuda, Y., Gaines-Day, H. R., Grab, H., Gratton, C., Holzschuh, A., Isaacs, R., Isaia, M., Jha, S., Jonason, D., Jones, V. P., Klein, A-M., Krauss, J., Letourneau, D. K., Macfadyen, S., Mallinger, R. E., Martin, E. A., Martinez, E., Memmott, J., Morandin, L., Neame, L., Otieno, M., Park, M. G., Pfiffner, L., Pocock, M. J. O., Ponce, C., Potts, S. G., Poveda, K., Ramos, M., Rosenheim, J. A., Rundlöf, M., Sardiñas, H., Saunders, M. E., Schon, N. L., Sciligo, A. R., Sidhu, C. S., Steffan-Dewenter, I., Tschardt, T., Veselý, M., Weisser, W. W., Wilson, J. K., Crowder, D. W. 2017. A global synthesis of the effects of diversified farming systems on arthropod diversity within fields and across agricultural landscapes. *Global Change Biology*, 23(11), 4946–4957, <https://doi.org/10.1111/gcb.13714>

Maccagnani, B., Veromann, E., Ferrari, R., Boriani, L., Boecking, O. 2020. Agroecosystem design supports the activity of pollinator networks. – Smagghe, G., Boecking, O., Maccagnani, B., Mänd, M., Kevan, P. G. (eds), *Entomovectoring for Precision Biocontrol and Enhanced Pollination of Crops*. Springer, Cham, 1–17, https://doi.org/10.1007/978-3-030-18917-4_1

Mendenhall, C. D., Karp, D. S., Meyer, C. F. J., Hadly, E. A., Daily, G. C. 2014. Predicting biodiversity change and averting collapse in agricultural landscapes. *Nature*, 509, 213–217, <https://doi.org/10.1038/nature13139>

Millennium Ecosystem Assessment 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington DC.

Newbold, T., Hudson, L. N., Hill, S. L. L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R. A., Börger, L., Bennett, D. J., Choimes, A., Collen, B., Day, J., De Palma, A., Díaz, S., Echeverria-Londoño, S., Edgar, M. J., Feldman, A., Garon, M., Harrison, M. L. K., Alhusseini, T., Ingram, D. J., Itescu, Y., Kattge, J., Kemp, V., Kirkpatrick, L., Kleyer, M., Correia, D. L. P., Martin, C. D., Meiri, S., Novosolov, M., Pan, Y., Phillips, H. R. P., Purves, D. W., Robinson, A., Simpson, J., Tuck, S. L., Weiher, E., White, H. J., Ewers, R. M., Mace, G. M., Scharlemann, J. P. W., Purvis, A. 2015. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520(7546), 45–50, <https://doi.org/10.1038/nature14324>

Prävălie, R., Patriche, C., Borrelli, P., Panagos, P., Roșca, B., Dumitrașcu, M., Nita, I-A., Săvulescu, I., Birsan, M-V., Bandoc, G. 2021. Arable lands under the pressure of multiple land degradation processes. A global perspective. *Environmental Research*, 194, 110697, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110697>

Raimets, R., Karise, R., Mänd, M., Kaart, T., Ponting, S., Song, J., Cresswell, J. E. 2018. Synergistic interactions between a variety of insecticides and an ergosterol biosynthesis inhibitor fungicide in dietary exposures of bumble bees (*Bombus terrestris* L.). *Pest Management Science*, 74(3), 541–546, <https://doi.org/10.1002/ps.4756>

Rigal, S., Dakos, V., Alonso, H., Auniņš, A., Benkő, Z., Brotons, L., Chodkiewicz, T., Chylarecki, P., de Carli, E., del Moral, J. C., Domşa, C., Escandell, V., Fontaine, B., Foppen, R., Gregory, R., Harris, S., Herrando, S., Husby, M., Ieronymidou, C., Jiguët, F., Kennedy, J., Klvaňová, A., Kmecl, P., Kuczyński, L., Kurlavičius, P., Kålås, J. A., Lehtikoinen, A., Lindström, Å., Lorrillière, R., Moshøj, C., Nellis, R., Noble, D., Eskildsen, D. P., Paquet, J.-Y., Péliissié, M., Pladevall, C., Portolou, D., Reif, J., Schmid, H., Seaman, B., Szabo, Z. D., Szép, T., Florenzano, G. T., Teufelbauer, N., Trautmann, S., van Turnhout, C., Vermouzek, Z., Vikstrøm, T., Voříšek, P., Weiserbs, A., Devictor, V. 2023. Farmland practices are driving bird population decline across Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 120(21), e2216573120, <https://doi.org/10.1073/pnas.2216573120>

Ritchie, H., Roser, M., 2019. Land Use. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/land-use> [viidatud 10.03.2024].

Sánchez-Bayo, F., Wyckhuys, K. A. G. 2019. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8–27, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>

Schulz, R., Bub, S., Petschick, L. L., Stehle, S., Wolfram, J. 2021. Applied pesticide toxicity shifts toward plants and invertebrates, even in GM crops. *Science*, 372(6537), 81–84, <https://doi.org/10.1126/science.abe1148>

Sulg, S., Kaasik, R., Kallavus, T., Veromann, E. 2023. Toxicity of essential oils on cabbage seedpod weevil (*Ceutorhynchus obstrictus*) and a model parasitoid (*Nasonia vitripennis*). *Frontiers in Agronomy*, 5, <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1107201>

Sulg, S., Kaasik, R., Willow, J., Veromann, E. 2022. Blue stem weevil (*Ceutorhynchus sulcicollis*) – a potential threat to oilseed rape production. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 72(1), 1–3, <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1977380>

Sulg, S., Kovács, G., Willow, J., Kaasik, R., Smagghe, G., Lövei, G. L., Veromann, E. 2024. Spatiotemporal distancing of crops reduces pest pressure while maintaining conservation biocontrol in oilseed rape. *Pest Management Science*, 80(5), 2250–2259, <https://doi.org/10.1002/ps.7391>

Zolotarjova, V., Rimmel, T., Kännaste, A., Kaasik, R., Niinemets, Ü., Veromann, E. 2022. Pollen beetle offspring is more parasitized under moderate nitrogen fertilization of oilseed rape due to more attractive volatile signal. *Scientific Reports*, 12, 14294, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18030-0>

Taning, C. N. T., Mezzetti, B., Kleter, G., Smagghe, G., Baraldi, E. 2021. Does RNAi-based technology fit within EU sustainability goals? *Trends in Biotechnology*, 39(7), 644–647, <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.11.008>

- Tscharntke, T., Klein, A. M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., Thies, C. 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity – ecosystem service management. *Ecology Letters*, 8(8), 857–874, <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00782.x>
- Ulyshen, M., Horn, S. 2023. Declines of bees and butterflies over 15 years in a forested landscape. *Current Biology*, 33(7), 1346–1350.e3, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.02.030>
- Vahter, T., Sepp, S.-K., Astover, A., Helm, A., Kikas, T., Liu, S., Oja, J., Öpik, M., Penu, P., Vasar, M., Veromann, E., Zobel, M., Hiiesalu, I. 2022. Landscapes, management practices and their interactions shape soil fungal diversity in arable fields – Evidence from a nationwide farmers’ network. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108652, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108652>
- Vilumets, S., Kaasik, R., Lof, M., Kovács, G., Holland, J., Veromann, E. 2023. Landscape complexity effects on *Brassicogethes aeneus* abundance and larval parasitism rate: a two-year field study. *Scientific Reports*, 13, 22373, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49690-1>
- Willow, J., Cook, S. M., Veromann, E., Smagghe, G. 2022. Uniting RNAi technology and conservation biocontrol to promote global food security and agrobiodiversity. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 871651, <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.871651>
- Willow, J., Kallavus, T., Soonvald, L., Caby, F., Silva, A.I., Sulg, S., Kaasik, R., Veromann, E. 2023. Examining spray-induced gene silencing for pollen beetle control. *Journal of Natural Pesticide Research*, 5, 100036, <https://doi.org/10.1016/j.napere.2023.100036>
- Willow, J., Silva, A., Veromann, E., Smagghe, G. 2019. Acute effect of low-dose thiacloprid exposure synergised by tebuconazole in a parasitoid wasp. *PLoS One*, 14(2), e0212456, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212456>
- Willow, J., Soonvald, L., Sulg, S., Kaasik, R., Silva, A. I., Taning, C. N. T., Christiaens, O., Smagghe, G., Veromann, E. 2020a. First evidence of bud feeding-induced RNAi in a crop pest via exogenous application of dsRNA. *Insects*, 11(11), 769, <https://doi.org/10.3390/insects11110769>
- Willow, J., Soonvald, L., Sulg, S., Kaasik, R., Silva, A. I., Taning, C. N. T., Christiaens, O., Smagghe, G., Veromann, E. 2021a. RNAi efficacy is enhanced by chronic dsRNA feeding in pollen beetle. *Communications Biology*, 4, 1–8, <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01975-9>
- Willow, J., Soonvald, L., Sulg, S., Kaasik, R., Silva, A. I., Taning, C. N. T., Christiaens, O., Smagghe, G., Veromann, E. 2021b. Anther-feeding-induced RNAi in *Brassicogethes aeneus* larvae. *Frontiers in Agronomy*, 3, 633120, <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.633120>

Willow, J., Sulg, S., Kaurilind, E., Silva, A. I., Kaasik, R., Smagghe, G., Veromann, E. 2020b. Evaluating the effect of seven plant essential oils on pollen beetle (*Brassicogethes aeneus*) survival and mobility. *Crop Protection*, 134, 105181, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105181>

Willow, J., Sulg, S., Taning, C. N. T., Silva, A. I., Christiaens, O., Kaasik, R., Prentice, K., Lövei, G. L., Smagghe, G., Veromann, E. 2021c. Targeting a coatomer protein complex-I gene via RNA interference results in effective lethality in the pollen beetle *Brassicogethes aeneus*. *Journal of Pest Science*, 94, 703–712, <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01288-6>

Willow, J., Taning, C. N. T., Cook, S. M., Sulg, S., Silva, A. I., Smagghe, G., Veromann, E. 2021d. RNAi Targets in Agricultural Pest Insects: Advancements, Knowledge Gaps, and IPM. *Frontiers in Agronomy*, 3, 794312, <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.794312>

Willow, J., Veromann, E. 2021. Highly variable dietary RNAi sensitivity among Coleoptera. *Frontiers in Plant Science*, 12, 790816, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.790816>

Willow, J., Veromann, E. 2022. Integrating RNAi technology in smallholder farming: Accelerating Sustainable Development Goals. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 868922, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.868922>

Eve Veromann

Sündinud 27. mail 1961 Paides

1979 Paide 3. keskkool (praegune Paide Hillar Hanssoo põhikool)

1986 Tartu ülikool, bioloogia (MSc)

2003 Eesti maaülikool, entomoloogia (MSc)

2007 Eesti maaülikool, entomoloogia (PhD)

Töötanud Eesti teaduste akadeemia zooloogia ja botaanika instituudis; alates 2007. aastast Eesti maaülikoolis teadurist professorini. Täiendanud end entomoloogia alal Imperial College'is Suurbritannias ja Uus-Meremaal, õpetanud Euroopa Liidu riikides erinevatel ERASMUS-e kursustel jätkusuutlikku põllumajandust. Praegu Eesti maaülikooli täisprofessor. Juhendanud 4 doktori-, 31 magistritööd ja paljusid bakalaureusetöid. Avaldanud 117 teadusartiklit (WoS).

Eve Veromann on pälvinud 2007. aastal diplomi üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil bio- ja keskkonnateaduste valdkonnas doktoriõppe astmes, 2015 Eesti maaülikooli tänukirja silmapaistva panuse eest ülikooli rahvusvahelisse õppesse ning 2018 Eesti maaülikooli teenetemedali.