

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Botaanika osakond

Mihkel Annusver

Kasvutiheduse mõju odra- ja kaerataimede juurtetoodangule ning saagikusele liigiti ja sorditi

Magistritöö (30 EAP)

Bioloogia ja ökoinnovatsioon

Juhendajad: Susanna Vain, MSc

Kaasjuhendaja: prof Kristjan Zobel

Tartu 2023

Kasvutiheduse mõju odra- ja kaerataimede juurtetoodangule ning saagikusele liigiti ja sorditi

Maailm läheneb kiirelt tulevikule, kus väga suur osa inimkonnast pole toiduga kindlustatud. Kuna põllukultuuride juuri on üpriski vähe uuritud, võiks üks potentsiaalsetest lahendustest saamaks rohkem saaki samalt maa-alalt, tulla just juurte sihipärasest aretusest. Varasemalt on tehtud uuringuid, milles mõni käsitleb ka otra ja kaera, mis viitavad võimalikule lõivusuhtele taimede juuretoodangu ning saagikuse vahel, seda siis kui tajutakse naabertaime olemasolu. Selleks et uurida, kas lõivusuhte taga on konkurents või midagi muud ja kas see erineb liigi või sordi siseselt põllumajanduslikult oluliste liikide nagu oder ja kaer puhul, viidi läbi potikatse. Katses kasvatati kummagi liigi kolme eri juurkäitumisega sort kolmel eri tihedusel. Tulemustest ilmnes, et sortide generatiivsete organite kasv erineb sortidel ka üksi kasvades. Samuti tuli välja, et juurtesse investeeriv odrasort tootsid tõesti rohkem juuri konkurents ilmnedes, kuid see ei vähendanud sordi seemnesaaki ega koristusindeksi vaid hoopis tõstis seda. Kaera puhul sellist tulemust ei leitud. Ainsaks statistiliselt oluliseks sisukaks tulemuseks osutus fokaaltaime kõrgus, mis juurtesse investeeriva sordi puhul oli oluliselt kõrgem ülejäänud kahest sordist, viidates suuremale konkurentsivõimele. Tulemused viitavad sortide eri omadustele juurte ja saagi tootmisele eri kasvutihedustel ning võib oletada, kas selliste tulemuste taga pole mitte konkurents, vaid juuretootlikkuse tunnuse plastilisus. See teadmine aitab paremini mõista, tõlgendada ja rakendada taimede juurtega toimuvaid protsesse põldudel, saamaks suuremat terasaaki.

Märksõnad: oder, kaer, põllumajandus, taimedevaheline konkurents, juured, saagikus, ühisvara tragöödia

CERCS teaduseriala kood: B270 Taimeökoloogia

The impact of sowing density on root production and yield in different barley and oat varieties

A future, where a lot of people do not have food security is approaching fast. Because plant roots are quite an under-researched topic, the means to produce more yield from the same amount of land might come from that area of research. There have been studies, some of which also look at oat and barley, indicating the existence of a trade-off when a neighbouring plant is detected. To find out if the reason behind the possible trade-off is competition between plants or something else and if the manifestation criteria differ within the species or between cultivar, an experiment

was conducted. During the experiment, varieties of each species with three different rooting behaviours were grown at three different densities. Results show that the growth of generative organs of the varieties differs when a plant is grown alone. Furthermore, it was discovered that the barley cultivar investing in roots did indeed produce more roots when competition occurred, but this did not reduce the yield or harvest index of the cultivar, but which increased instead. No such result was found for oats. The only statistically significant and interesting result turned out to be the height of the focal plant, which was significantly higher for the root-investing cultivar than for the other two varieties, indicating greater competitiveness. The results suggest different characteristics of the varieties for root and yield production at different growth densities, and one can speculate if this occurred not due to competition, but because of root production plasticity instead. This knowledge will help to better understand, interpret and harness plant root processes in plant breeding for higher grain yields.

Keywords: barley, oat, crops, interplant competition, roots, yield, the tragedy of the commons

CERCS research field code: B270 Plant ecology

Sisukord

1. Kirjanduse ülevaade	5
1.1 Kliimatiline, majanduslik ja põllumajanduslik olukord maailmas.....	5
1.1.1 Toidu ja põllumajandusmaa nappus lähitulevikus	5
1.1.2 Väetiste ja taimekaitsevahendite roll ning tulevik põllumajanduses.....	6
1.1.3 Energeetika probleemid	8
1.1.4 Praegused lahendused põllumajanduse efektiivsuse tõstmiseks	10
1.1.5 Rakendamata potentsiaal põllumajanduses	13
1.2. Konkurents ja taimede käitumine	14
1.2.1 Kohasus – oluline parameeter taimeökoloogias	14
1.2.2 Konkurentsi vormid taimedel ning konkurentsi mõju.....	15
1.2.3 Mänguteooria, ESS, Ühisvara tragöödia.....	18
1.3. Põllumajandus ja ökoloogia.....	21
1.3.1 Taimearetus ja agronoomia	21
1.3.2 Tehtud katsed ning nende kehtivus	22
1.3.3 Ökoloogia tuleviku põllumajanduse keskpunktina.	25
1.3.4 Ülevaade kaerast	26
1.3.5 Ülevaade odrast	27
1.3.6 Bakalaureuse töö „Odra- ja kaerataimede juurte toodangu mõju saagikusele“ kokkuvõte	28
2. Katseline osa. Materjal ja metoodika.....	31
3. Tulemused.	34
4. Arutelu.....	48
4.1 Tulemuste analüüs	48
4.2 Järeldused.....	52
Kokkuvõte.....	54
Summary	56
Tänuavaldused	58
Kasutatud materjalid.....	59
Taotlus lõputöö avaldamisele piirangute kehtestamiseks ja lõputöö kaitsmise kinniseks kuulutamiseks.	74
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	76

1. Kirjanduse ülevaade

1.1 Kliimaatiline, majanduslik ja põllumajanduslik olukord maailmas

1.1.1 Toidu ja põllumajandusmaa nappus lähitulevikus

Iseenesest mõistetavalt ei saa ilma piisava toiduta elada täisväärtuslikku elu. Sellele vaatamata elab 2016. aasta seisuga 11% protsenti maailma elanikest (st 815 miljonit inimest) olukorras, kus neil pole piisavalt toidupoolist (Prosekov & Ivanova, 2018). Inimese populatsioon maailmas küündib praegu 7,6 miljardini ning prognooside kohaselt peaks see sajandi keskpaigaks jõudma 10 miljardini (Baillie & Zhang, 2018). Populatsiooni kasv toob endaga kaasa ka senisest suurema nõudluse toidu ja vee järele, mis hinnangute kohaselt peaks rohkem kui kahekordistuma (Baillie & Zhang, 2018). See on probleemiks mitmel olulisel põhjusel. Esiteks napib inimkonna jaoks toitu juba praeguse rahvaarvu juures ning tootlikkuse kasv jääb alla jätkusuutlikkuse piiri (Anten & Vermeulen, 2016; Pörtner *et al.*, 2022). Teiseks suureks kitsaskohaks on põllumajanduseks sobiva maismaapinna puudujääk. Kui kogu elamiskõlbliku maa hulk on 106 miljonit km², siis umbes pool sellest (48 miljonit km²) on juba praegu põllumajanduslikult kasutuses (Ritchie & Roser, 2013). Enamus veel puutumata aladest asuvad Lõuna-Ameerikas ja Aafrikas ning on praegu suuresti metsade all, mille ökosüsteemide hävitamisel oleks rängad tagajärjed (Fischer *et al.*, 2001; Ritchie & Roser, 2013). Kuna need kooslused on elurikkuse vaatepunktist äärmiselt olulised, siis ei ole nende põllumaaga asendamine jätkusuutlik lahendus eeltoodud probleemidega tegelemiseks (Baillie & Zhang, 2018). Sellest tulenevalt on teretulnud igasugused meetodid, millega oleks võimalik samalt (st juba olemasolevalt) maaühikult saada rohkem saaki.

Aastaks 2050 ennustatakse ka planeedi temperatuuri kasvu 2°C võrra, mis võib viia ligi 50 miljonit inimest näljaohu ja seda peamiselt just temperatuuri kasvu põllumajanduslike mõjude tõttu (Yerlikaya *et al.*, 2020). Kliima soojenemisel on põllumajandusele mitmeid negatiivseid efekte, alustades veetaseme tõusuga kaasnevast maakaotusest ning lõpetades põudade, tormide ja üleujutustega. Pärssivat mõju avaldab ka kliimamuutustest tulenev üldine kahju ökosüsteemidele ning elurikkuse kadu (Watkiss *et al.*, 2005). Lisaks võib kliima soojenemine viia suuremate saagikaotusteni kahjurite ulatuslikuma leviku (Deutsch *et al.*, 2018) ja katastroofiliste sündmuste, nagu näiteks maastikupõlengud, tõttu (Pennisi, 2018). Kahjurite mõju kasv tuleneb nende populatsioonide arvukuse kasvust, mis on põhjustatud neile sobivamate elamistingimuste

tekkimisest kliima soojenemise tulemusel (Deutsch *et al.*, 2018). Ennustatavad kahjud küündivad 10 – 25 protsendini oluliste liikide nagu riis, nisu ja mais, saagikusest iga tõusva kraadi kohta ning puutumata ei jää tõenäoliselt ka muud põllumajanduslikult olulised liigid (Deutsch *et al.*, 2018). Maastikupõlengute sagenemist seostatakse kliima soojenemisest tingitud kuivusega ning samuti põlengute režiimi muutuste ja kasvavate süsinikuemissioonidega (de Groot *et al.*, 2013).

Süsinikuemissioonide koha pealt on põllumajandus ise üks suurimate kasvuhooonegaaside heitmetega sektoritest (Lamb *et al.*, 2021), olles globaalselt 52% inimtekkelise metaani ja 84% diämmastikoksiidi emisiooni allikaks (P. Smith *et al.*, 2008). Põllumajandus on osa AFLOU (*agriculture, forestry and other land uses*) nimelisest klastrist, mis hõlmab endas põllumajandust, metsandust ja muud maakasutust. See klaster, millest põllumajandus ja sellega seotud tegevused on väga märkimisväärne osa, paiskab õhku 21,3% kogu maailma kasvuhooonegaasidest (Lamb *et al.*, 2021).

1.1.2 Väetiste ja taimekaitsevahendite roll ning tulevik põllumajanduses

Üheks variandiks, mille kaudu on potentsiaalselt võimalik suurendada olemasolevalt põllumaalt saadavat saagikust, on väetised ja pestitsiidid. Väetised on ühed peamised vahendid, mis võimaldavad põllumajanduses saada rohkem ja kvaliteetsemat saaki (Savci, 2012). Viimaste aastakümnetega on vastusena üha kasvavale toidunõudlusele hakatud väetisi kordades rohkem kasutama (Savci, 2012). Umbes 30 - 50% praegusest põllumajandustoodangust saadakse just tänu väetistele (W. Stewart *et al.*, 2005). Kahjuks on keemiliste väetiste ülekasutamisel aga halb mõju nii keskkonnale kui ka inimeste tervisele (Savci, 2012). Savci (2021) toob probleemidena välja raskemetallide saastet, muldade sooldumist, vee eutrofeerumist ning suurenenud kasvuhooonegaaside heidet, mis on põhjustatud keemiliste väetiste üle- ja valesti kasutamisest (Savci, 2012). Et vähendada väetisekasutuse negatiivseid mõjusid, jõustus 2007. aastal Euroopa Liidus määrus, millega võeti rangema kontrolli alla lämmastikväetised (Pérez-Ramírez, 2007) ning 2019. aastal võttis Euroopa Liit vastu määruse, millega reguleeriti kaadmiumi sisaldavaid väetisi, soosides rohkem orgaanilisi alternatiive (Huygens *et al.*, 2019; Marini *et al.*, 2020). Tulevikus on oodata veel karmimaid regulatsioone sellele, kui palju ja milliseid väetisi on lubatud kasutada.

Viimaste aastakümnete jooksul on põllumajandustoodangu mahu hoogsas kasvus mänginud olulist rolli ka taimekaitsevahendid (Skevas *et al.*, 2013). Aastal 2007 kasutati maailmas 39,4 miljardi USA dollari väärtuses taimekaitsevahendeid ehk kokku 2,4 miljoni tonni jagu (Grube *et al.*, 2011). Kuigi teadaolevalt kasutatavate taimekaitsevahendite koguhulk kõigub aasta-aastalt ja sõltub sellest, mis uuringutele toetuda, on siiski võimalik täheldada kasvavat trendi. Viimase kümne aasta jooksul on kasv olnud peaaegu 50% ja taimekaitsevahendeid raporteeritakse kasutatavat kogu maailmas vahemikus 2 - 4,1 miljonit tonni (Grube *et al.*, 2011; Maggi *et al.*, 2019; Sabzevari & Hofman, 2022; Sharma *et al.*, 2019; United Nations Environment Programme, 2022). ÜRO Toidu- ja Põllumajandusorganisatsiooni andmete järgi (FAO, 2022) kasutati aastal 2020 2,7 miljonit tonni taimekaitsevahendeid, 41,1 miljardi dollari väärtuses. Sama andmestik kajastab, et ühele pinnaühikule kantavate pestitsiidide hulk on kasvanud 1,2-lt kilogrammilt hektari kohta 1,8-le (FAO, 2022).

Ehkki taimekaitsevahendid evivad põllumajanduses positiivset mõju just taimede tervisele ja saagikusele mõeldes, kaasnevad suure kasutamismahuga omad probleemid. Põhiprobleemiks peetakse asjaolu, et paljud taimekaitsevahendid võivad potentsiaalselt olla ohtlikud nii keskkonnale kui ka inimestele (Skevas *et al.*, 2013). Ühe negatiivse keskkonnamõjuna võib näiteks välja tuua, et liigne pestitsiidide kasutamine võib viia kasulike kahjuritest toituvate liikide hävimiseni (Pimentel *et al.*, 1992). Veelgi katastroofilisemat mõju avaldab pestitsiidide ülekasutamine elurikkusele (Schmitz *et al.*, 2014), olles otseseks ohuks tolmeldajatele (näiteks mesilased), kes on ökosüsteemide funktsioneerimise üheks alustalaks (Ekroos *et al.*, 2020). Kui tolmeldajad (Aizen *et al.*, 2022) või muud kasulikud organismid, näiteks mullaorganismid (Plaas *et al.*, 2019), peaksid välja surema ja põllupidajad oleksid sunnitud neid muude meetmetega asendama, viiks see lisaks ökosüsteemide lõhkumisele ka suure majandusliku kahjuni. Näiteks küündis 2000-ndatel ainuüksi USA-s pestitsiidide tõttu vähenenud tolmeldamisest tulenev kahju kuni nelja miljardi dollarini (Pimentel, 2005). Ka viimastel aastatel ei ole olukord paranenud. Näiteks saab tuua Saksamaa, kus tolmeldamise vähenemise tõttu tekkinud majanduslik kahju on endiselt hinnanguliselt 3,8 miljardit eurot aastas (Lippert *et al.*, 2021).

Majanduslikke kahjusid toob pestitsiidide üle- ja valesti kasutamine ka muudes eluvaldkondades. Suureks probleemiks peetakse näiteks tõika, et pestitsiidid või nende jääkproduktid võivad jõuda

põhja- ja pinnavette (Pimentel *et al.*, 1992; Sharpley *et al.*, 2001). See on probleem, arvestades, et pestitsiidid omavad toksilisi kõrvalmõjusid inimeste ja kariloomade tervisele ning muule elusloodusele (Pimentel *et al.*, 1992; Schulz *et al.*, 2002). Uuringutest (Fantke *et al.*, 2012) on selgunud, et näiteks aastal 2003 põhjustas taimekaitsevahendite kasutamine Euroopas 78,4 miljoni euro jagu tervisekulutusi.

Kõik eelmainitu ja pestitsiidide üha kasvav kasutusmaht on viinud järjest karmimate kontrollmeetmete rakendamiseni pestitsiidide kasutamise üle (Skevas *et al.*, 2013). Karmim kontroll on hea, kui aluseks võtta planeedi eluslooduse tervis või majanduslike kahjude vältimine, kuid tähendab ka seda, et toidunõudluse puudujääki ei saa korvata lihtsalt suurema koguse väetise ja taimekaitsevahenditega, vähemalt mitte nende praegusel kujul. 2022. aastal esitas Euroopa Komisjon määruse ettepaneku, et asendada hetkel kehtiv 2009. aasta direktiiv (European Parliament, Council of the European Union, European Commission, 2021). Selle muudatusega loodetakse soodustada toksiliste pestitsiidide kasutamise vähendamist läbimõelduma kahjuritõrje ja muude keemiliste pestitsiidide alternatiivide abil. Samuti karmistatakse väetiste kasutamise regulatsiooni keskkondlikult tundlikes piirkondades. Tundlikeks piirkondadeks loetakse näiteks avalikud pargid, aiad, alad sportimiseks ja vaba aja veetmiseks, aga ka linnaruumi alad, mida külastab nõrgema tervisega elanikkond jne (European Parliament, Council of the European Union, European Commission, 2021). Spetsiifiliselt keskkondlikult tundlikeks aladeks peetakse näiteks piirkondi, mis on seotud joomiskõlbuliku vee, kaitsealade ning ohustatud liikidega. Eelnevast lähtuvalt on näha, et tulevikus ei saa loota ainult väetistele ja taimekaitsevahenditele, vaid tuleb nendele lisaks leida uusi lahendusi, millega samalt maaühikult rohkem saaki saada.

1.1.3 Energeetika probleemid

Põllumajandussektor on väga tundlik energiahindade muutuste suhtes, olgu põhjuseks siis otsene tarbimine (nt laudad, kuivatid) või kaudne tarbimine, mille alla saab liigitada nt väetiste tootmise, mis vajab samuti suurt hulka energiat (Sands *et al.*, 2011). Siiaamaani on energiat toodetud peamiselt fossiilkütuste ja muude taastumatute ressurside arvelt. Kliimamuutustest tulenevatest regulatsioonidest energia tootmisele ning üha kasvavast nõudlusest tingituna on energia hinnad kiirelt tõusnud (Rajagopal & Zilberman, 2007). Kõrgemad hinnad viivad madalama tootlikkuse ja

lõpp-produkti kallinemiseni (Sands *et al.*, 2011), mis omakorda vähendab toidu kättesaadavust inimestele. Tõusvad energiahinnad mõjutavad ka vee kättesaadavust ning hinda, põhjustades põllumajanduses veelgi suuremaid tagasilööke (Zilberman *et al.*, 2008). 20% maailma põllumajandusmaad vajab toimimiseks pidevat kastmist ja niisutamist. Sellistel aladel on peamiseks energiahinnatõusu allikaks vee transport, juhtimine ja irrigatsiooniks kasutamine (Zilberman *et al.*, 2008). Iga riigi energia- ja kliimasituatsioon on erinev, kuid peamised energiakasutajad on tavaliselt alati niisutamine ja põllumajandustehnika (Pelletier *et al.*, 2011). Kokku toodetakse säärast kastmist ja niisutamist kasutades 40% kogu maailma toidust.

1.1.4 Praegused lahendused põllumajanduse efektiivsuse tõstmiseks

Vastukaaluks eelpoolmainitud probleemidele on tekkinud mitmeid uusi lahendusi ja lähenemisi. Esimeseks selliseks lahenduseks on näiteks tehisintellekti ja masinõppimise kasutamine, et optimeerida põllule kulutatavaid ressursse ning ennustada saagikust (Liakos *et al.*, 2018). Vaadates probleemi laiemalt, saab küsimust „Mis põllukultuuri oleks kõige mõistlikum külvata?“ kohelda kui paljude parameetritega puslet, mis on arvutitel võimalik masinõppimist rakendades n-ö lahendada, valides kindlale põllule välja spetsiifilistest vajadustest lähtuvalt parimad põllukultuurid (Kumar *et al.*, 2015).

Teiseks lahenduseks on nii-öelda täppispõllumajandus – põlluressursside, nagu vee, väetise, mulla ja külvitiheduse optimeerimine, maksimeerides tootlikkust ning kvaliteeti nii, et süsteem oleks keskkonnasõbralik (Bansod *et al.*, 2017). Selle alla kuulub näiteks droonide kasutamine, mis võimaldab põllumeestel saada täpse ülevaate põllu hetkeolukorrast enne väetiste ja taimekaitsevahendite manustamist. Droonide efektiivsuste näitlikustamiseks võib välja tuua tööga, et droon on võimeline analüüsima individuaalseid maisilehti isegi 120 meetri kõrguselt (Veroustraete, 2015). Vaatluste tulemusel saab lisada, kas drooni või muude meetmete abil, vajalikku vahendit niipalju, kui vaja, sinna, kus vaja, vähendades raiskamist ja üledoseerimist (Devi *et al.*, 2020; Veroustraete, 2015). Alternatiiviks on satelliitide kasutamine, kuid see on hetkel kallim ja kehvemini kättesaadav, kui droonid (Bansod *et al.*, 2017).

Kolmandaks probleemi mahendavaks meetodiks on taimekasvatuse sisetingimustes ja tehisvalgusega. See on paljulubav nii efektiivse ruumikasutuse (kasutatakse mitmekorruselisi kasvulavasid) kui ka aastaringse kasvatustsükli poolest (Bot, 2001). Hollandis on kasvuhoonepõllundus eriti edukas – arvutite poolt kontrollitud kasvualal saadakse seal rohkemgi saaki, kui traditsiooniline põld võimaldaks (Bot, 2001). Küll aga on see väga energiakulukas, kuna erinevalt juba niigi energiakulukast põllumajandusest lisandub sisetingimustes ka valgustusest ning sisekliima hoidmisest tulenev suur energiakulu (Bot, 2001). See tähendab, et enne taastuvenergia tootmistehnoloogia märkimisväärset arengut ei ole see meetod kliima soojenemise vältimise poolest jätkusuutlik. Viimased trendid aga näitavad, et oleme siiski juba teel jätkusuutlikemate lahenduste poole. Näiteks on arendatud paremad LED valgustid ja töötatud välja üha täpsem ning taimespetsiifilisem jälgimine ja hooldamine (Mitchell, 2022).

Simulatsioonidega on näidatud, et nõnda saaks kasvatada ka teravilju ning saada potentsiaalselt rohkem saaki (Asseng *et al.*, 2020). Praeguseks hetkeks pole seda veel kindlalt katseliselt tõestatud ning enne kui jätkusuutlikke energialahendusi, nagu näiteks päikesepaneele, edasi arendatakse, pole see efektiivne ei emissioonide vähendamise ega tootmishinna poolest. Küll aga ennustatakse, et väikesemahulised tootmispunktid kasvuhoonete näol tekivad nii mõndagi kohta (nt suurlinnadesse) juurde, kuna need toimivad ilmastikutingimustest sõltumata ning lubavad toidutootmist vahetult tarbija lähedal, vähendades transpordikuluseid ning transpordiga kaasuvaid emissioone (Asseng *et al.*, 2020).

Neljandaks lahenduseks on uute aretus- ja kasvatustehnikate rakendamine traditsioonilises põllumajanduses. Näiteks uuritakse, kas on võimalik panna taimi paremini ära kasutama vihmavett (Richards *et al.*, 2002) ning tõsta fotosünteesi efektiivsust (Faralli & Lawson, 2020). Veekasutuse efektiivsus sõltub mitmest eri tingimusest ja erineb piirkonniti. Seal, kus taim ammutab enamuse vett maapinnast, aga kus sajab vähe, saaks tõsta transpiratsiooni efektiivsust. Samas piirkonnas, kus sajab sageli, võiks vaadata, kuidas vähendada vee aurumist maapinnalt (Richards *et al.*, 2002). Kasvatustehnikate poole pealt on võimalik näiteks vahetada taimede reaskülv ühtlase külvi vastu, mis on efektiivsem umbrohtude kasvu pärssimisel (Akemo *et al.*, 2000). Samuti omab positiivset efekti kasvutiheduse tõstmine, kuid selle kasutegur sõltub sageli liigist ja sordist (Akemo *et al.*, 2000). Veel on leitud, et ka põlluridade orientatsiooni muutmine võib olla hea viis saada rohkem saaki (C. Borger *et al.*, 2016; C. P. D. Borger *et al.*, 2010). Erinevatel laiuskraadidel ja eri põllukultuuridel ning -sortidel on oma eelistused, kuid näiteks Austraalias suudeti tänu ida-lääne suunalisele külvile (eelneva põhja-lõuna suuna asemel) vähendada umbrohu biomassi 37-51% ja tõsta saagikust 24-26% (C. P. D. Borger *et al.*, 2010). Sellisel meetodikal pole suuri negatiivseid kõrvalmõjusid ning lisaks on see väga lihtne ja odav muutus, mida suurema saagikuse ning keskkonnasõbralikuma põllumajanduse poole liikudes sisse viia (C. P. D. Borger *et al.*, 2010). Küll aga võib külvisuuna muutus olla kohati ebapraktiline, tulenevalt põllumassiivi orientatsioonist, maastiku olemusest või muudest tingimustest (C. Borger *et al.*, 2016).

Viiendaks tasub mainida ka GMO-d ehk geneetiliselt muundatud organisme, mis on väga polariseeriv teema (Moseley, 2017; Trivedi *et al.*, 2016). Palju on arutletud GMOde potentsiaali

üle, saamaks samalt põlluühikult rohkem saaki, või parandada produkti säilivusaega ja vastupidavust. Praegu on enamlevinud GMO kasutusala loomade söödakasvatuseks. Sagedasem GMO on sööt, mis on vastupidavam taimekaitsevahenditele (Moseley, 2017).

GMO vastased toovad tihti välja GMO loomise ja kasutamise eetilisi probleeme ning potentsiaalseid ohte tarbija tervisele. Uuringud selles vallas käivad ja üldiselt tunnistatakse, et GMO võimalik kasupotentsiaal on kõrge (Trivedi *et al.*, 2016). Vähem räägitakse sellest, et GMO-sid reklaamitakse sageli just kolmanda maailma riikidele ja vaesematele põllupidajatele. See on aga halb, sest GMO-dega tegelemiseks vajalik investeering on suur ning tegevus ise riskantne, kuna rahalise äratasuvuse saavutamiseks tuleb ära müüa enamus saaki. Samuti on arengumaades regulatsioone vähem ja turg vabam, mis võib viia kohaliku elanikkonna ära kasutamiseni ning keskkonna ekspluaterimiseni (Moseley, 2017).

Spetsiifilisemaks minnes tasub vaadata mõnda konkreetset näidet GMO-st. Esimeseks näiteks võib tuua *Roundup Ready* nimelised põllukultuurid, mis on resistentsed glüfosaati sisaldavatele taimemürkide suhtes (Cuhra, 2015). Algselt töötati sellised põllukultuurid välja, et pidada sammu põllumajandustoodangu järele oleva nõudluse kasvuga ning glüfosaati sisaldavaid taimemürke peeti varasemalt ka ühtedeks ohutumateks. Nüüdseks on nende ohutus seadud kahtluse alla ning Chura (2015) ülevaateartiklist tuleb välja, et ohutuse osas tehtud katsed pole sageli üldse tehtud glüfosaadiga või kui on, siis halvasti (Cuhra, 2015). Seega vajab see sektor karmimat järelevalvet ja testimist.

Teiseks tuntud näiteks GMO-st oleks kuldne riis - üldine nimetus riisile, mida on geneetiliselt muundatud tootma β -karoteeni. Lisaks omapärasele kuldsele värvusele sisaldab selle taime saak rohkem provitamiin A-d ning see loodi eesmärgiga võidelda A vitamiini puudulikkuse vastu (Al-Babili & Beyer, 2005). Geenitehnoloogia oli ainus viis sellise riisi loomiseks, kuna riisi iduplasmat, mis suudaks endospermis karotenoide sünteesida, ei ole. Väljatöötamisest saati on seda riisi saatnud mõningane poleemika. Näiteks polnud algses variandis piisavalt A vitamiini ning oli tõestamata, kas tarbija on üldse võimeline seda omastama (Al-Babili & Beyer, 2005). Ette heideti ka elurikkuse vähenemist ja kardeti, et see avab ukse järgmistele GMO-dele. Arvati ka, et keegi ei hakka kuldset riisi kasvatama ning A vitamiini võib saada mujalt toidust. Viimaks seati kahtluse

alla riisi ohutus ja toodi välja vähesed uuringud seoses kasvatamise ja tarbimisega. Nüüdseks on need probleemid suuremalt jaolt lahenenud ning poolehoid kuldse riisi suhtes on kasvanud, kuigi endiselt esineb ka vastasseisu (Al-Babili & Beyer, 2005; Potrykus, 2001).

Teoorias on selline põllukultuur väga teretulnud, aidates tagada tervislikku elu tänu mikrotoitainete suuremale sisaldusele, eriti just arengumaades, kus elanikel ei pruugi olla rahalist võimalust saada teistest allikatest kätte vajalikke toitaineid (Al-Babili & Beyer, 2005; Beyer, 2010). Üldiselt vajab GMO laialdane kasutamine veel uurimist ja arendamist, kuid seda tasub mainida potentsiaalse variandina, millel silma peal hoida ning mis võib viia põllumaade efektiivsema kasutuseni.

1.1.5 Rakendamata potentsiaal põllumajanduses

Hetkeolukorra kokkuvõtteks võib öelda, et suurema toidunõudluse rahuldamine on möödapääsmatu tulevik, millega peame ühel või teisel viisil paratamatult silmitsi seisma. Samuti tuleb see saavutada vähesemate vahenditega, kui senini on olnud kasutada. Meil on küll uusi meetmeid, mis pakuvad olukorrale lahendust, kuid need pole veel piisavalt usaldusväärsed (nt GMO-dega seonduvad diskussioonid) või on niivõrd energiakulukad, et toodetav kasu ei korva kahju, mida nad ise tekitavad (nt sisekasvuhooned). Ruumiga pole samuti priisata. Seega oleks praegu parim sund otsida uusi viise, kuidas saada samalt pindalaühikult rohkem saaki. Eriti soodne oleks, kui see oleks edasiarendus millestki, mis juba eksisteerib. Kõikidest väljatoodud näidetest ja lahendustest on taimede käitumise ja ökoloogiaga seotud lahendused kõige efektiivsemad, jäädes sealhulgas ka jätkusuutlikuks. Ei ole välistatav, et väetiste ja muu kiire põllumajandusliku arengu käigus toimunu tõttu on tegelikult hulk potentsiaalseid lahendusi jäänud leidmata ning rakendamata. Mainisin põgusalt uuringuid seoses külvimeetoditega ning kasvusuundadega, kuid sellega asi ei piirdu. Üheks veel kasutamata variandiks võiks olla näiteks põllukultuuride juurte aretus. Selleks, et mõista, mis on juurearetamise potentsiaal, tuleb esmalt vaadata taimede käitumist laiemalt.

1.2. Konkurents ja taimede käitumine

1.2.1 Kohasus – oluline parameeter taimeökoloogias

Evolutsioonilises ökoloogias mõõdetakse taimede edukust sellise parameetriga nagu kohasus (*fitness*) (Krimbas, 2004; Metz, 2006). Kontseptsioon pärineb juba Darwinilt, kuid olles arenenud ajaga komplekssemaks ja täpsemaks, on eri teadusharudel sellest lähtuvalt eri vaatepunktid, mille alusel kohasust kirjeldada (Krimbas, 2004; Metz, 2006). Evolutsioonilises ökoloogias on lihtsustatult tegemist isendi või isendite hulga sigimisedukusega keskkonnas ja populatsioonis (Metz, 2006). Uuemad suunad käsitlevad käitumis- ja demograafilisi parameetreid ökoloogiliselt komplekssemates olukordades (Metz, 2006). Kokkuvõtlikult on kohasuse mõiste järgi isendi või populatsiooni eesmärk saada võimalikult palju järglasi, tagades nii oma geneetilise materjali maksimaalne edasikanduvus ja seeläbi maksimeerides šanssi püsima jääda.

Taimede puhul on asi keerulisem. Relatiivse kohasuse hindamise, st kui hea paljunemisedukusega on mingi genotüüp võrreldes kõigi teiste genotüüpidega populatsioonis, teeb keerukaks mitu asjaolu (Younginger *et al.*, 2017). Näiteks on üheks keerukuse põhjuseks see, et taimed on sageli ühekojalised, omades nii emas- kui isasorganeid ning ühte õit võib viljastada mitu seemnerakku (Campbell, 2000; Ellstrand, 1984). Õietolm, seemned ja taimetükid võivad levida vegetatiivsel paljunemisel emataimest kaugele, muutes nende sugulise ja mittesugulise paljunemise jälgimise väga keerukaks (Burczyk *et al.*, 2006; Silvertown, 2008). Lisaks ei piisa ainult seemnete loomisest, vaid seemned peavad ka edukalt kanda kinnitama. Viimaseks komplitseerivaks faktoriks on asjaolu, et mitmeaastased taimed võivad eluea jooksul paljuneda mitmeid kordi (Santos-del-Blanco *et al.*, 2013). Kogu eelmainitu tõttu on taimede täpse kohasuse hindamine raske, tüütu ja töömahukas ning enamasti piirduakse taime kasvu või biomassi hindamisega. Taime kasv ja biomass korreleeruvad sageli positiivselt taime võimekusega omastada ressursse, kasvada ning paljuneda ja annavad seega ligilähedase tulemuse kohasusele (Younginger *et al.*, 2017). Olenevalt oludest võib taim otsustada sugulise paljunemise asemel panustada rohkem vegetatiivsesse reproduktsiooni. Sellest tulenevalt oleks vaja taime täpse kohasuse leidmiseks teada nii isendi seksuaalse kui aseksuaalse järelkasvu hulka terve taime eluea jooksul. See on aga üsna ebarealistlik ning biomassi kasutamine on palju mugavam ja kiirem meetod (Younginger *et al.*, 2017).

1.2.2 Konkurentsi vormid taimedel ning konkurentsi mõju

Konkurents on (taime)koosluste tekkimise ja funktsioneerimise vundament (Gause, 2019; Tilman *et al.*, 2014). Maa peal konkureerivad taimed omavahel valguse pärast (Casper & Jackson, 1997; Devi *et al.*, 2020; Grime, 2006; Wilson, 1988). See, kui palju vahendeid tuleb investeerida pikkuskasvu ja valguse efektiivselt omastamiseks, sõltub erinevatest muutujatest. Peamisteks parameetriteks loetakse naabertaimede arvukust, seda, kui lähedal taimed üksteisele on ning suhteliste kõrguste erinevust (Ballaré *et al.*, 1991; Falster & Westoby, 2003; Givnish, 1982; G. P. Murphy & Dudley, 2007; Oksanen, 1990). Eeliskohal on kõrgeim taim, sest favoriidi võimekust valgust püüda ei takista miski, samas kui taim ise varjutab kõiki ümbritsevaid (McNickle & Dybzinski, 2013). Siiski ei ole kõrge pikkuskasv, mis aitab omandada maksimaalset valgushulka aga oma negatiivsete külgedeta. Lisaks sellele, et ressurss, mis kulus kasvule, oleks võinud minna paljunemisele, kaasneb teistest pikem olemisega võimalus herbivoorile silma jääda või väiksem vastupidavus ilmastikuoludele (nt näiteks tuul ja tormid) (Oksanen, 1990; Ryan & Yoder, 1997).

Erinevalt maapealsest konkurentsist, mis põhineb peamiselt ühel ressursil – valgusel – , konkureeritakse maa all lisaks veele veel vähemalt 20 olulise mineraalse toitaine pärast (Casper & Jackson, 1997). Maa-alune konkurents on sageli taime käekäigule palju määravam kui maapealne konkurents (Wilson, 1988) ning juurte tootmine ja ülalpidamine maapealse biomassi tootmisega võrreldes kuni kaks korda kulukam (Y. Fang *et al.*, 2011; Passioura, 1983). Sageli investeeritakse juurtesse kuni pool fotosünteesiga omandatud süsinikuvarudest (Siddique *et al.*, 1990). Ühes ülevaateartiklis näidati, et maa-alune konkurents on üldiselt suurem biomassi toodangu vähendaja, seda eriti nõrgema konkurendi arvelt. Samuti oli maa-alune konkurents seda olulisem, mida vähem on mullas toitaineid. Konkurents juurte kaudu oli ka tugevam graminoidides; lisaks on metsikud umbrohuvormid juurkonkurentsist edukamad kui aretatud põllusordid (Kiær *et al.*, 2013).

Kuigi juurte tootmine on kulukas, suudavad taimed neid vastukaaluks väga eri otstarbeil kasutada. Näiteks suudavad taimed juurte abil tajuda ressursside olemasolu või puudumist mullas ning seda teadmist ka ära kasutada. Tüüpiliselt prioritseeritakse vegetatiivset kasvu, mida on võimalik ülal pidada vähese hulga juurtega (Callaway, 2002; G. P. Murphy & Dudley, 2007; Oldroyd & Leyser, 2020). Samuti on taimed suutelised tajuma, kus asuvad takistused mullas (Novoplansky, 2019).

Osade liikide juured suudavad ka eristada, millised on enda juured, millised sugulase omad ning millised kuuluvad võõrale konkurendile (S. Fang *et al.*, 2013; Novoplansky, 2019). Veelgi enam, taim on suuteline muutma kasvustrateegiat vastavalt naabrite ja ressursside olemasolule – üksi kasvades kasvatab taim sageli laiuva juurtevõrgustiku kuid prioritiseerib naabri olemasolul naabrile lähemalolevate ressursside omastamist (Cahill *et al.*, 2010; G. P. Murphy & Dudley, 2007).

Taimed saavad ressursse mullas peamiselt kolmel viisil: juurte kasvamisel, vee ja toitainete massvoolu ja difusiooni tulemusel (Marschner, 1995). See, et juured füüsiliselt kasvavad ning liigutavad vett, toitaineid ja mulla osakesi ressursside omastamisel, on tegelikult proportsionaalselt vähetähtis, kindlustades taimetele umbes 10% ammutatavatest toitainetest (Casper & Jackson, 1997). Palju suurem hulk tuleb veest ja selles lahustunud mineraaltoitainetest, mida taim omastab lehtede transpiratsiooni ja juurte juures tekkiva lokaalse kontsentratsioonigradiendi erinevuse tõttu (Casper & Jackson, 1997). Difusioon on oluline just tahkes mullas väheliikuvate toitainete jaoks, nagu kaalium ja fosfaat, vähesemal määral ka lämmastiku jaoks. Massvool ja difusioon on omavahel tugevalt seotud ning sageli neid ei eristata (Casper & Jackson, 1997). Kontsentratsioonigradiendiga ala juurte ümber nimetatakse ammendumistsooniks (*depletion zone*) ning selles toimuvad protsessid, sealhulgas difusioon, on mõjutatud negatiivselt, kui taimede ammendumistsoonid kattuvad (Baldwin, 1976; Nye & Tinker, 1977).

Peamine viis, kuidas konkurents mullas toimub, on läbi mullaruumi hõivamise (Casper & Jackson, 1997). Kiirem kasv, rohkem juuri (biomass), peenete juurte tihedus ning nendest tulenev juurte kogupindala on kõik viisid, kuidas täita suurem mullaruum ning omastada rohkem ressursse (Casper & Jackson, 1997). Üksi kasvava taime puhul eksisteerib teatud piir, millest edasi taimel ei tasu enam juuri samasse kohta kasvatada, sest juured hakkavad konkureerima iseendaga – n-ö varastades iseendalt. Piltlikult öeldes - kui sama taime kaks juurt tahavad omastada sama ressursi, siis selle tulemusena võtab taim iseenda eest ressursse ära (Cabal *et al.*, 2020).

Sellele vaatamata on konkureerivatel taimedel rohkem ajendit kasvatada oma juuri tihedamalt. Kui üksik taim hakkaks liiga tiheda juurestiku puhul iseenda ressursse varastama, siis konkurentsi

puhul tuleb osa ressursse hoopis naabri arvelt. Samuti on ressursse omastava juurekoe kasvatamine seda kulukam, mida kaugemale taimest liikuda. Olukorras, kus juuri on odav toota ja naaber on lähedal, toodetakse konkurentsi tulemusel väga palju juuri (Cabal *et al.*, 2020). Kui aga konkurent on kaugel ja konkureerimise hind väga kõrge (juurte investeeringu ja kiirema ressursside otsalõppemise tõttu), siis juurte ületootmist ei toimu. Viimane asjaolu on oluline katsete jaoks, mis proovivad mõõta muuhulgas juurkonkurentsi (Cabal *et al.*, 2020).

Kui kõige ilmsem konkurents toimub eri liikide vahel, siis tegelikult on väga oluline pidada silmas ka liigisisest konkurentsi. Seda näeb eriti just põllukultuuride puhul, kus umbrohtude puudumisel on liigisisene konkurents ainus konkurentsi vorm (Cousens, 1985). Küll aga on umbrohud tavaliselt konkurentsis edukamad (Kiær *et al.*, 2013). Fried jt (2019) poolt maisipõldudel kasvavate umbrohtudega läbiviidud uuringust selgus, et umbrohtude sagedasemaks eeliseks konkurentsis on kiirem ressursiomastamise võime ja/või kiire koloniseerimisstrateegia. Uuringus leiti ka umbrohtude spetsiifiliselt kevadkülviga konkureerimiseks väljakujunenud omadusi nagu kuumalembus, suvine tärkamine, hiline õitsemine ja C4 fotosüntees.

Konkurents pole alati osapoolte vahel võrdne. Asümmeetriline konkurents kirjeldab olukorda, kus mõni indiviid või liik omastab teistest proportsionaalselt rohkem ressursse. Sümmeetrilise konkurentsi puhul seevastu on ressursi omastamine ja selleks kuluv panus võrdelises seoses (Freckleton & Watkinson, 2001; Schwinning & Weiner, 1998). Monokultuursel põllul on sagedasimaks asümmeetrilise konkurentsi põhjuseks agressiivsema kasvuga umbrohud või erinev tärkamisaeg nii umbrohtudega võrreldes kui ka põllukultuuri siseselt (Freckleton & Watkinson, 2001). Varem tärkaval taimel on vähem konkurentse ressursse osas; on vähem naabreid, kes teda varjutaks ja mullas vähem juuri, millega konkureerida. Seetõttu jõuab kiirem tärkaja sirguda suuremaks ning on eelispositsioonil võrreldes hiljem tärkajatega (Freckleton & Watkinson, 2001). Tihe külv tähendab intensiivsemat konkurentsi (Damgaard, 1999; Freckleton & Watkinson, 2001), mis maapealse konkurentsi puhul viib pikemakasvuliste taimedeni (Damgaard, 1999). See on loogiline tulemus, sest antud olukorras on see taime parim viis tõsta oma kohasust (Damgaard, 1999). Ressurssi, mis konkurentsi tulemusel panustati pikkuskasvu ja kõrre või varre ülevahoidmisesse, oleks taim aga ideaalis võinud hoopis suunata teradesse ehk saagikusse (Falster & Westoby, 2003). Olukorras, kus konkurents pole nii valitsev, on hoopis järglastesse

panustamine parim viis kohasuse tõstmiseks (Damgaard, 1999). See oleks põllumajandusele kasulik, kuna nii saaksime potentsiaalselt rohkem seemnesaaki. Samuti on leitud, et tihedamas külvis on konkurents umbrohtudega intensiivsem ning teraviljadel on seega hea võimalus saavutada konkurentsieelis. Seda muidugi eeldusel, et kaotatakse ka reaskülv. Kuna umbrohud tärkavad põllukultuuridega kas samal ajal või natuke hiljem, kuid kasvavad palju kiiremini, siis juhul, kui nad saavad ridade vahel konkurentsivabamalt kanda kinnitada, on põllukultuuridel raskem konkurentsist edu saavutada (Kristensen *et al.*, 2008; Weiner *et al.*, 2001). Reaskülvi asemel on katsetatud erinevaid ilma ridadeta ühtlasemaid külve või täiesti korrapäratuid külvimustreid. Uuringud näitavad, et see aitab umbrohtude vastu võitlemisel, viies muidu tihedalt külvatud ridadesisese konkurentsi laiemale pinnale ja hõivates vaba ruumi ridade vahel, mis muidu jääks vabaks umbrohtudele. Selline külvimeetod tähendaks nii suuremat potentsiaalset saagikust kui ka vähesemat kulutust umbrohtõrjeks (Olsen *et al.*, 2005; Weiner *et al.*, 2001). Lu jt (2020) on üldises ülevaateartiklis kokku võtnud erinevad uurimused, mis kinnitavad nende trendide kehtivust suurel hulgal põllukultuuridel (Lu *et al.*, 2020).

1.2.3 Mänguteooria, ESS, Ühisvara tragöödia

Nagu selgub, on nii silmale nähtavalt maa peal kui ka peidetult maa all toimumas suur hulk keerukaid protsesse. Komplitseeritud konkurentsinteraktsioonide paremaks mõistmiseks kasutatakse sageli mänguteooriat ja sellel põhinevad mudeleid, mis simuleerivad osapoolte otsuste mõju üksteisele (Osborne, 2004). Evolutsiooniline mänguteooria muudab looduse keerukate kokkupuudete ja mõjude võrgustiku matemaatiliste tehete ja valemite raamistikuks, mille kaudu on tunduvalt lihtsam erinevaid asju uurida (J. M. Smith, 1982). Edu sellises „mängus“ oleneb iseenda valitud strateegiast, teiste „mängijate“ valitud strateegiatest ning nende strateegiate esinemise sagedusest. Bioloogiliste strateegiatena käsitletakse fenotüüpe, arvestamata mõju geneetilise pärilikkuse ning geenide ja keskkonna vahel (Falster & Westoby, 2003). Uuritakse, kui edukad võivad olla eri konkurentide strateegiad enda positsiooni hoidmisel ning võõrale alale sisenemisel ja püsijäämisel (Falster & Westoby, 2003). Mänguteoreetilised mudelid on võimelised arvesse võtma ka kasvutihedusest ja kasvusagedusest tulenevaid interaktsioone. Kõige sagedamini proovitakse mudeldada situatsioone, kus mingi tunnus mõjutab taime kohasust kas positiivselt või negatiivselt või leida optimaalset strateegiat kohasuse

maksimeerimiseks (McNickle & Dybzinski, 2013). Taktika või taktikate kogum, mis on piisavalt stabiilne, et uustulija ei suuda „mänguväljale“ siseneda ega kohta kindlustada, funktsioneerib ESS-ina ehk evolutsiooniliselt stabiilse strateegiana (Falster & Westoby, 2003). Oluline on ka tõik, et kuna ESS on üks võimalikest kohasuse haripunktidest, siis iga ökosüsteem ning evolutsioon üldiselt liigub alati ESS-i suunas kehvemaid strateegiaid järjest välja vahetades (McNickle & Dybzinski, 2013).

Monokultuurilised põllud, mis maksimeerivad seemneproduksiooni, on väga haavatavad invasioonile indiviidide poolt, kes investeerivad rohkem konkurentsi (Anten & Vermeulen, 2016). Selleks indiviidiks võib olla teine liik, kes üritab põllule siseneda, või üksik indiviid, kes on suurema konkurentsivõimega. Näiteks on põllukultuuril optimaalne mitte kasvada väga kõrgeks, sest nii kulub palju vähem ressursi varre ehitamisele ja ülevalhoidmisele. Kui aga kõik taimed on madalad, on ühel kõrgel indiviidil väga kerge saavutada suur edu teiste ees. See efekt ei avaldu mitte ainult taime kõrguse, vaid ka paljude teiste tunnustega, nagu näiteks lehtede suurus, juurte mass jne. Sellist olukorda nimetatakse ühisvara tragöödiaks ning viimastel aastakümnetel on hakatud selle vastu efektiivsema taimearetuse eesmärgil rohkem huvi tundma (Anten & Vermeulen, 2016).

Algselt 1982. aastal Garret Hardini poolt toodud näide kirjeldab situatsiooni paljude karjakasvatajate ühisel lambakarjamaal. Karjamaal on teatav optimaalne lambahulk, mida pidada, kuna iga lamba lisamisel väheneb isendilt saadav kasu, samas kui lamba pidamise hind keskkonnale on konstantne. Kui karjakasvatajad teevad koostööd, suudavad nad hoida optimumi, saades igaüks maksimaalset kasu. Kui aga üks kasvataja oleks isekas ja lisaks põllule lambaid, siis tema üksi saab sellest kasu juurde, samas kui keskkonna kahjustamise hind jaguneb kõigi vahel võrdselt. Lühidalt öeldes - suur kasu sohitegijale. Kui aga karjapidajad ei usalda üksteist ega ole suutelised koostööks, siis lisavad nad kõik karjamaale lambaid juurde, viies kasud madalaks ning keskkonna kahjustamise hinna kõrgeks. Nii tekib ühisvara tragöödia (Anten & Vermeulen, 2016; Ostrom, 2008).

Sellest lähtuvalt võiks monokultuurse põllu ideaalne taim olla suure tootlikkusega, kuid vähese konkurentsivõime ja kõrge koostöövalmidusega indiviid (Donald, 1968; Zhang *et al.*, 1999).

Sordiaretus peaks sihtima just neid omadusi (Anten & Vermeulen, 2016), sest praegused põllumajanduslikud trendid juba tõstavad taimede kasvutihedust, mis oleks ideaalne keskkond sellisele ideaalsele taimele (Duvick & Cassman, 1999).

1.3. Põllumajandus ja ökoloogia

1.3.1 Taimearetus ja agronoomia

Ajalooliselt on suurema saagi saamise peamiseks meetodiks olnud aretus. Defektide elimineerimine (haiguskindlus, parem stressitaluvus jne) ja suurem saak on olnud peamisteks aretuseesmärkideks (Donald, 1968). Siiani on see põhinenud peamiselt visuaalsel hindamisel, vaadates taimede kasvu, viljade suurust ning arvu jne. Probleemiks seejuures on, et aretaja tegelikult ei tea, mis tema sordis muutus, et taim nüüd rohkem saaki kannab. Efektivsem on luua mudel, mille omadused peaksid teoorias andma rohkem saaki ning proovida aretada taime olema võimalikult palju selle mudeli moodi (Donald, 1968). Üldiselt on leitud, et tiheda külvi ja madala konkurentsivõime tandem on üks efektiivsemaid meetodeid saagikuse tõstmiseks (Stringfield, 1964). Sedasi on jõutud näiteks maisini, millel on püstisemad lehed ning mida saab seetõttu külvata tihedamalt, sest taimed ei varjuta teineteist. Muuhulgas tuleb välja, et sellel maisil on ka parem fotosünteesi efektiivsus (Lee & Tollenaar, 2007).

Suurimat edasiminekut taimearetuses tuntakse Rohelise Revolutsiooni nime all ning see toimus ajavahemikul 1966 kuni 1990 (Khush, 1999). Peamiseks põhjuseks oli 2-3 korda suurema tootlikkusega riisi ja nisu sortide aretamine, mis andis tulemuseks parema väetise omastamise, haigusteresistentsuse ning lühema, kuid vastupidavama varre. Samuti hõlmas see periood intensiivse väetiste ja pestitsiidide kasutamise hoogustumist (Denison, 2011; Hedden, 2003; Khush, 1999). Kõige selle mõjul tootis taim vähem inimese jaoks kasutatavat biomassi ning kasutas sama ressursi suurema saagi kandmiseks (Denison, 2011). On ka täheldatud, et biomass otseselt ei kasvanud ega vähenenud, kuid selle arvelt jaksavad lühemad, ent jässakamad taimed suuremat viljapead kanda (Feil, 1992). Samuti oli suureks mureks viljataimede lamandumine, sest varasemalt ei jaksanud taimed järjest suureneva massiga pähikut kanda. Lühem, kuid jässakam kõrs/vars lahendas selle mure (Hedden, 2003). Kõik need lühikese aja jooksul toimunud muutused kiirendasid põllumajanduse toodangu hoogsat kasvu.

Taime vähemmärgatavad ja raskemini mõõdetavad osad, nagu nt juured, on jäänud aga aretuses tahaplaanile (Anten & Vermeulen, 2016). Senini pole juuri otseselt aretatud, kuid Zhu jt (2019) tehtud katsest ilmnes, et nisutaimede omadus toota naabertaime olemasolul rohkem maa-alust biomassi ja vähem maapealset biomassi oli uuemates sortides vähenenud. See tähendab, et

säärane reageering on vähenenud aegamööda kaudse grupivaliku tulemusel. Tõenäoliselt on sellele protsessile mõju avaldanud ka järjest tihedam külvitihedus, mida põllumajanduses kasutatakse (Duvick & Cassman, 1999). Väga tõenäoliselt on selles vallas potentsiaali edasisele aretustööle (Zhu *et al.*, 2019). Mis põhjusel see potentsiaal ei avaldu on olnud mitmete uuringute fookuseks ning tekitanud ka hulgaliselt diskussiooni. Järgnevalt sellest arutlengi.

1.3.2 Tehtud katsed ning nende kehtivus

Mänguteoreetilisel mudelil rajatud ühisvaratragöödia katset võime näha näiteks Gersani jt (2001) poolt tehtud uuringus. Nad oletasid, et kui vabade ressursside hulk taime kohta jääb samaks, aga taimede arv kasvab, võivad taimed investeerida rohkem juurtesse ja vähem saagikusse. Seda testiti potikatsetes sojataimega, kus kaks taime jagasid kahte potti (pooled juured ühes potis, pooled teises) või kasvasid kumbki eraldi potis. Leiti, et konkureerivad isendid tootsid 85% rohkem biomassi, kui üksi kasvavad, kes tootsid samas 30% rohkem saaki. Saagikuse kasv tuli rohkematest seemnepeadest ja rohkematest seemnetest seemnepeas. Üldine biomassi hulk kahe variandi vahel ei muutunud (Gersani *et al.*, 2001).

Sarnase uurimissuunaga katses kasvasid Maina jt (2002) ube, kahes katsevariandis. Variandis A istusid kaks taime nii öelda poti äärel pooled juured ühes potis, pooled teises. Töötluses B oli igal taimel oma pott. Potijagajad tootsid 150% rohkem juuri indiviidi kohta. Poti üksikomanikud tootsid 90% rohkem saaki (kuivmass) (Maina *et al.*, 2002). Nii selles kui ka eelmises uuringus toodi välja üksi kasvavate suurem juure-võsu suhe (Gersani *et al.*, 2001; Maina *et al.*, 2002).

Nendele kahele uuringule järgneb O'Brien jt (2005) ubadega tehtud uuring. Nad leidsid, et esimestest kahest katsest jäi puudu heterogeense keskkonna komponent, mis looduses on sage. Nad tegid kaks katset, ühes kahe potiga, nagu eelnevalt kirjeldatud katsetes, teise kolme potiga, milles kummalgi taimel olid pooled juured oma potis ja pooled kolmandas potis. Lisaks sellele oli kolmepotikatsetes pooltel juhtudel kolmandas, jagatud potis, vahesein, mis välistas taimede vahelise konkurentsi. Ressursside hulk taime kohta jäi alati konstantseks. Kahepotikatse tulemused olid väga sarnased eelnevatele. Leiti, et konkureerivad taimed tootsid rohkem juuri ja vähem seemnemassi kui taimed, mis kasvasid isolatsioonis. Kolmepotikatsetes leiti, et juhul, kui eraldav sein ei olnud kasutuses ja konkurents oli lubatud, tootsid taimed 60% rohkem juuri.

Kusjuures suurem juurte toodang toimus just jagatud potis, mitte selles potis, mis oli ainult taime enda päralt. Seinaga eraldatud taimed seda tendentsi ei näidanud. Juurte levik jagatud pottides oli laiem kui üksikpottides (O'Brien *et al.*, 2005).

Kõik eelnevad uuringud järeldasid, et juurte ülekasvatamisel on tegemist ühisvara tragöödia olukorraga. Aretades vähem agressiivseid või konkurentsialtimaid taimi, peaks olema võimalik tõsta taimede saagikust, vältides samas üleliigset konkurentsi (Gersani *et al.*, 2001; Maina *et al.*, 2002; O'Brien *et al.*, 2005).

Eelkirjeldatud katsetele on ette heidetud, et nende tulemused ei pruugi olla kuigi usaldusväärsed. Seda nimelt selle pärast, et tegemist on potikatsetega ning limiteerivaks faktoriks võis saada substraadi hulk, viies ebasoodsate juurte kasvatustingimusteni või iseendaga konkureerimiseni. Taimed, kellel olid juured kahes potis, võisid kasvatada rohkem juuri mitte selle pärast, et nad konkureerisid, vaid et neil oli juurdepääs topeltkogusele ruumile (Semchenko *et al.*, 2007). Samuti võib potti jagav taim olla väiksem juba kasvu asümmeetrilise konkurentsi tõttu. See on halb, kui kasutada taimegruppide keskmist massi võrdväärseks taimede absoluutse massiga. Selle kontrollimiseks tehti Semchenko jt (2007) poolt kuue eri töötusega katse, kus kasvatati kaera. Korrati eelnevates katsetes tehtud töötusi, kus taimed kas jagasid või ei jaganud potti, kuid lisati ka uusi töötusi, et uurida juurte kommunikatsioonimehhanisme ja taimede reaktsiooni olemasoleva substraadi hulga muutusele. Selleks kasutati võrgust vaheseina, läbi mille said liikuda toitained ja juureeritised, kuid mitte juured, ning aktiivsütt, mille omadus absorbeerida orgaanilist juureeritist võis vähendada juurte kasvu (Semchenko *et al.*, 2007).

Katses ei tuvastatud ühtegi ühisvara tragöödia olukorda. Eelnevates eksperimentides (Gersani *et al.*, 2001; Maina *et al.*, 2002; O'Brien *et al.*, 2005) ilmnenud ühisvara tragöödia võis ilmned hoopis kontrollkatse (üks potis) iseeneslikust juuretootmise pärssimisest. Kui võimalik ruumala juurte kasvuks on väiksem, võib taim ise kasvatada vähem juuri. Seda järeldati just katsetest, kuhu lisati aktiivsütt, mis peaks vähendama juurte eritatavaid kemikaale. Aktiivsöe lisamine ilma jaotusteta pottidesse ei muutnud taimede massi ega juurte ja võrsete vahelist suhet. Plast- või võrkvaheseinadega pottides kasvatatud taimede jõudlus oli oluliselt suurem, kui substraadile lisati aktiivsütt, hoolimata sellest, et toitainete kättesaadavus või substraadi maht ei muutunud.

See näitab, et juureeritised mängivad signaalidena olulist rolli ning võivad kitsastes tingimustes mõjutada ka taime ennast (Semchenko *et al.*, 2007).

Samas on retrospektiivselt tehtud metanalüüsi käigus leitud, et kuigi pott mingil määral tõenäoliselt funktsioneerib limiteeriva elemendina, siis vähemalt hernestele ei oma see erilist mõju. Kusjuures võib väita, et kuus vaadeldud sorti ei reageeri naabri või potimahu manipuleerimisele, olenemata kas poti maht on 50 ml või 6300 ml (Mobley *et al.*, 2022). Tasub ka välja tuua, et Semchenko jt (2007) tegi katse hoopis teise liigiga, mis võib ka viia tulemuste erisusteni. On ka leitud, et ühisvaratragöödia, kuigi see pole soovitud käitumisviis põldude jaoks, on evolutsiooniliselt stabiilne strateegia (Smyčka & Herben, 2017). Samuti on leitud, et ühisvaratragöödiat esineb sagemini liblikõieliste taimede puhul (Smyčka & Herben, 2017), nagu seda on põld- ja sojauba ning hernes.

Cabal jt (2022) on välja toonud, et mõnes uuringus kipub ühisvaratragöödia käsitus muutuma proaktiivseks strateegiaks, millega juuri toota ja paigutada, kuigi tegelikult on tegemist taime reaktsiooniga naabrile. Ta lisab, et kuigi klassikalised omab/jagab potti katsed on head ja lihtsad, tuvastamiseks ühisvaratragöödia olemasolu, siis lisatöötused võrkude, muude eraldusmeetodite, ressursside ning metsikute liikide ja mahtudega on samuti väga olulised, tuvastamiseks ning isoleerimaks olulisi lisamehhanisme (Cabal, 2022). Näiteks viitavad hiljutise põllueksperimendi tulemused siiski lõivsuhte olemasolule juuretoodangu ja seemnesaagi vahel ning seda ka põllumajanduslikult oluliste liikide, nagu oder ja kaer, puhul (Vain *et al.*, 2023)

Üldiselt on siiski teoretiseeritud, et on raske väga palju kaugemale aretada tunnuseid, mida looduslik valik siiani miljoneid aastaid eelistanud on (st konkurentsivõime). Küll aga võib leida rakendamata potentsiaali, aretamaks põllu kogupotentsiaali üksikindiviidi kohasuse arvelt. Lihtsalt öeldes võiks grupivalik olla uus potentsiaalirohke suund, mida uurida (Weiner *et al.*, 2010). Nagu eelnevalt mainitud, peaksid kõrgel tihedusel ja ühtlaselt istutatud taimed suutma efektiivselt tegeleda umbrohtude eemal hoidmisega. Grupivaliku käigus oleks võimalik aretada ka vähem konkureerivaid taimi, kes ei satu juurtega ühisvaratragöödia lõksu ning on võimelised ka kõrgel tihedusel tootma suure koguse saaki (Hintze *et al.*, 2020; Weiner *et al.*, 2010).

1.3.3 Ökoloogia tuleviku põllumajanduse keskpunktina.

Ökoloogia ja põllumajanduse omavaheline seos ei tohiks olla kuigi vastuoluline. Tegelevad ju mõlemad eluslooduse vaatlemise, manipuleerimise ning tõlgendamisega. Tõsi, ajapikku on neil välja kujunenud eri fookuspunktid. Väga lihtsustatult võiks öelda, et ökoloogia püüab loodust mõista, et seda uurida ja säilitada ning põllumajandus püüab loodust mõista, et kanda teadmised üle tootlikkuse suurendamiseks (Jackson & Piper, 1989). Tänapäeval näeme üha suuremat eraldumist kahe poole vahel. Üheks näiteks võib tuua põllukultuuride säilenõtkuse (ingl k *resilience*), mille tõstmisel oleks hulgaliselt positiivseid mõjusid, muutmaks muidu monokultuurseid põlde vastupidavamaks erinevate kliimamuutuste ilmingute ja haigustekitajate puhangute suhtes (Lin, 2011). Tegelikuses aga asi kuhugi ei liigu, sest põllumajanduses arvatakse, et on majanduslikult optimaalsem tegeleda rohkem väheste liikide ja sortidega ning et monokultuursed põllud on produktiivsemad. Tegelikuses saaks säilenõtkust tõsta ka nii, et see ei langeta majanduslikku kasu (Lin, 2011).

Mõlemal koolkonnal oleks teineteiselt palju õppida. Ökoloogid oskaksid anda põllumajandussektorile nõu, kuidas ressursse efektiivsemalt kasutada, saada rohkem saaki ning teha põld vastupidavamaks, kasutades ära looduse enda reegleid. Põllumajandusel oleks jällegi vastu pakkuda kogemust seoses monokultuuridega, jagada teadmisi ESS-ist, taimede vastupidavusest ja reageerimisest erinevate kemikaalidele jne (Jackson & Piper, 1989). Nüüd, kus rahvastik kasvab väga kiiresti ja toiduga kindlustatus on endiselt ebakindel, peaksid mõlemad grupid oma teadmised ühendama, et jõuda kõige paremate võimalike lahendusteni.

On mitu põhjust, miks just paremaid ökoloogiaalased teadmised võiksid olla ideaalseks lahenduseks paljudele põllumajanduse probleemidele. Esiteks on põllumajandus väga mitmetahuline. Selleks, et saada palju saaki, on võimalik minna mikroskoopilisele tasemele, manipuleerides taime geene, rakke ja muud. Samuti on võimalik vaadelda individuaalset taime, selle parameetreid ja omadusi. Viimaseks tuleb vaadata põldu tervikuna ning selle rolli ning interaktsioone ümbritseva keskkonnaga (Weiner, 2003). Võib väita, et seda viimast taset (populatsioon-kooslus-ökosüsteem-biosfäär) on põllumajanduse poolt tegelikult väga vähe käsitletud. Võrdluseks tuues võib öelda, et ükski lennujaam ei funktsioneerigi hästi ilma planeerimise ja lennujuhtimiseta, vaatamata sellele, kui kõrgetasemelised lennukid seal

lendavad. Sama väidet saab kohandada ka põllumajandusele (Weiner, 2003). Väga paljudes aspektides hakkame saavutama kiirete edasiminekute läge. Traditsiooniline aretustöö on olnud efektiivne ning edasised panused samas valdkonnas võivad muidugi anda tulemusi, kuid arengud on aeglasemad ja väiksemad. Samas kõrgemad tasemed, nagu eelnevas näites „lennukorraldus“, on suuresti jäänud rakendamata (Weiner, 2003). Põllust tuleb hakata mõtlema kui ökosüsteemist, mitte monokultuursest massivist. See tähendab, et lisaks kasvavale taimele ja taimekahjurile tuleb võrrandisse haarata ka kogu ümbritsev, alustades kahjuri looduslikest vaenlastest ning lõpetades mulla ja ümbritseva keskkonna elustikuga.

Teiseks annab ökoloogia traditsioonilisele aretustööle uue vaatenurga ning, arvestades maailma hetkeolukorda, on uued ja julged lahendused igati teretulnud. Üheks selliseks näiteks on aretamine läbi rühmavaliku (Weiner, 2003). Kultiveerides vähem konkurentsialteid taimi läbi rühmavaliku, oleks teoreetiliselt võimalik saada taimed, kes maksimeerivad kollektiivset saagikust (Biernaskie, 2022; Montazeaud *et al.*, 2020). Lõppkokkuvõttes ei huvita meid põllukultuuride puhul nii väga indiviidi, kuivõrd terve põllu saak. Seega oleks eelistatud põld, mis maksimeerib kollektiivset tootlikkust üksikindiviidi tootlikkuse arvelt (Carroll *et al.*, 2014). Selleks tuleks aga evolutsioon n-ö ringi keerata, sest üldiselt soosib looduslik valik üksikindiviidi kohasust (Carroll *et al.*, 2014).

Ennustatakse, et tulevikus tuntakse põllumajandust hoopis rakendusliku ökoloogia või millegi sarnasena. Ideaalis liigub põllumajanduse hetkel väga majanduslik ehk suurima kasu saamisele suunitletud maailmavaade bioloogilisemaks. Seeläbi on võimalik optimeerida põllud suurimale võimalikule kasule, kuid lisarõhk oleks stabiilsusel ja jätkusuutlikkusel, mis on meie maailma praeguses keskkonnavalas olukorras kriitilise tähtsusega (Weiner, 2003).

1.3.4 Ülevaade kaerast

Kaer (*Avena sativa* L.) on unikaalne teravili, mis sisaldab palju toitained ning mida kasvatatakse juba üle 2000 aasta väga mitmel eesmärgil (Paudel *et al.*, 2021; Sang & Chu, 2017). Kaera kasvatatakse suures osas loomasöödana, kuid kasutatakse ka inimeste toiduna ning tervisehoius ja kosmeetikas (Lásztity, 1998; Paudel *et al.*, 2021). Kaer sisaldab inimesele kasulikku beetaglükani, mis on kolesterooli vähendava ja diabeedivastase toimega (Sang & Chu, 2017).

Kaera tarbitakse sagedasti täisteratoodetena, mida süües omastame kasulikke rasvhappeid, vitamiine, mineraale ja palju muud (Paudel *et al.*, 2021; Sang & Chu, 2017). Inimese toidus leiab teda sageli pudrus, hommikuhelvestes ja müslibatoonides (Paudel *et al.*, 2021).

Kaer pärineb Lähis-Idast, kus taim esines umbrohuna esmaste teraviljade kodustamisel. Mõni aeg hiljem jõudis algne umbrohi samuti kasvatatavate teraviljade hulka, seda eriti põhjapoolsematel aladel (J. P. Murphy & Hoffman, 1992). Võrreldes teiste maailmas kasvatatavate teraviljadega, ei ole kaer oma ülemaailmse toodangu poolest esimeste seas (Hoffman, 1995). Samuti on üldine kaera tootmine maailmas olnud kas langustrendis või äärmisel juhul stabiilne, kuna eelistatakse teravilja, mis toodab rohkem valku või mida ei ole nii kulukas transportida kui suure põhumassiga kaera (Hoffman, 1995; J. P. Murphy & Hoffman, 1992). 2021. aasta andmetel oli kaer tootlikkuselt seitsmendal kohal. Kokku kasvatati 2021. aastal 22 571 618 tonni kaera, mis moodustab maailma teraviljatoodangust umbes 0,7% ja on sealhulgas 54% vähem, võrreldes 1961 aasta toodanguga (Ritchie *et al.*, 2023).

Kaera, üheaastase pöörisõisikutega rohhtaime, kõrs on tavaliselt 60-140 cm pikkune ja leht lineaarne. Kaera puhul on tegemist kas avapöörisega või lipp-pöörisega, mis tähendab, et õisiku harud turritavad igale poole laiali või asetsevad kimbuna pööristelje lähedal. Pöörise haru tipust leiab mitmeõielise pähiku, millest tekkiv vili on tavaliselt 5-11 mm pikk. Paljudel kaera vormidel on ka ohe. Kaera külvitihedus on Eestis 550-600 idanevat seemet ruutmeetri kohta (Kaer, 2023). Eestis on kasvatatava kaera hulk teraviljadest nisu ja odra järel kolmandal kohal. Kokku oli kaera toodang 2021. aastal 77 500 tonni, mis on 6% kogu Eesti teraviljatoodangust 77% rohkem kui aastal 1992 (Ritchie *et al.*, 2023). Seega on kaer Eestis tõusva tähtsusega teraviljaliik.

1.3.5 Ülevaade odrast

Oder (*Hordeum vulgare vulgare* L.) pärineb Lähis-Idast, viljaka poolkuu regioonist, olles üks vanimaid ning esimesena kodustatud teravilju. Odra kasvatamine sai alguse juba umbes 10 000 aastat tagasi või isegi varem (Baik & Ullrich, 2008; Giraldo *et al.*, 2019; Ullrich, 2010). Kui algselt leidis oder kasutust toidutaimena, siis tänapäeval kasutatakse teda peamiselt loomasööda ning linnaseviljana (umbes 80-90% toodangust) (Baik & Ullrich, 2008; Jadhav *et al.*, 1998; Ullrich, 2010). Mõnes regioonis on oder siiski endiselt suuresti toidutaim. Huvitav on, et nagu ka kaera

puhul, on avastatud odrast inimese jaoks kasulike aineid, nagu näiteks beetaglütkaani. Need on tervisele kasulikud, vähendades kolesterooli taset ning täisteraotra seostatakse üldiselt mingil määral kiirema kõhutäituvustunde ja sellest tuleneva kaasaitava rolliga kaalulangetamisel. Sellest johtuvalt on huvi odra ja odrast valmistatavate asjade vastu taas kasvanud (Baik & Ullrich, 2008).

Oder on üks laialdasema kasutuse ja ka kasvatusena teravilja maailmas, olles maisi, riisi ja nisu järel neljandal kohal ning hõlmates u 4,7% kogu teravilja toodangust. Kogu odra tootmine oli aastal 2021. aastal 145 623 920 tonni, mis on 101% rohkem kui aastal 1961 (Ritchie *et al.*, 2023). On tõenäoline, et suur osa sellest kasvust on tänu alkoholitööstusele (Giraldo *et al.*, 2019). Odra üheks hinnatud tunnuseks on hea kohanemisvõime ebasoodsate tingimustega, nagu külm, põud ja viletsad mullad (Gürel *et al.*, 2016). Lisaks kõigele muule on oder üks enim geneetiliselt varieeruvatest teraviljadest. Leidub kaherealiste ning kuuerealiste pähikutega sorte, terad võivad olla kestaga või ilma ning varieeruda lüsiinisisalduse ja amüloositärgluse tasemelt. Sort oleneb ka lõppkasutusala, sest linnase ja toidu tarbeks on paremad erinevad omadused (Baik & Ullrich, 2008; Giraldo *et al.*, 2019; Jadhav *et al.*, 1998).

Eestis on oder oma tootlikkuse poolest teisel kohal peale nisu, moodustades 30,8% kogu teravilja toodangust. 2021. aastal toodeti Eestis 396 370 tonni otra, mis võrreldes aastaga 1992 on 32% rohkem (Ritchie *et al.*, 2023). Eestis läheb suurim osa odrasaaki loomasöödaks. Kasvatatakse peamiselt suviotra, kuid vähesemal määral ka taliotra (Oder, 2023). Odra külvitihedus on Eestis umbes 400 idanevat seemet ruutmeetri kohta, kuid varieerub kohati ka 300st 500-ni (*Suvisõjavilja: Seemned | Baltic Agro*, 2023).

1.3.6 Bakalaureuse töö „Odra- ja kaerataimede juurte toodangu mõju saagikusele“ kokkuvõte

Nüüd, kus olen lahti seletanud põllumajanduse praegused murekohad ning kirjeldanud põllutaimede vahel toimuvaid asjakohaseid interaktsioone, on paslik aeg teha kokkuvõtte minu bakalaureusetööst. Seda nimelt sellepärast, et magistrinäiteid hüpoteesid ning katse põhinevad eelneva töö tulemustel.

2021. aastal Susanna Vainu juhendamisel valminud töö uuris, kas põllumajanduslikult olulistel liikidel esineb intensiivse konkurentsi oludes lõivsuhet vegetatiivsete ja generatiivsete organite

tootmise vahel. Selleks vaatlesin kaht põllumajanduslikult olulist liiki, milleks olid oder ja kaer, mida polnud sellest samast temaatikast senini eriti uuritud.

Koostöös Maaelu Teadmuskeskusega teaduritega viidi 2019. aastal Jõgeva põllulappidel läbi katse, kus kasvatati võimalikult erinevaid odra ja kaera sorte. Kokku külvati 5x1 meetristele aladele 44 eri sorti, millest pooled olid odra ja pooled kaera sordid. Uuriti, kas nende liikide seemnesaagi ja konkurentsorganite (juur, võsu) toodangu vahel esineb lõivsuhet, mis võiks anda märku ühisvara tragöödia olukorrast. Hinnati kollektiivse saagikuse ja vegetatiivse kasvu omadusi. Selleks koguti saak, maapealne biomass ning samuti juureproovid, mida analüüsiti.

Kaera puhul osutusid saagikusele statistiliselt olulisteks negatiivseteks mõjudeks taime kõrgus ja jämedate juurte pikkus ning pindala. Odral leiti statistiliselt oluline negatiivne seos saagikusega teistsugustel tunnustel. Nendeks olid juurte eripind ja eripikkus. Viimased kaks olid kaera saagikusele positiivse mõjuga, kuid ei osutunud statistiliselt oluliseks. Odra puhul leiti veel ka statistiliselt oluline positiivne seos seemnesaagi ja põhu biomassi vahel.

Katsest, mille tulemused on avaldatud juba ka teaduartiklina (Vain et al., 2023), ilmnes, et põllukultuuridel võib esineda juurte ületootmist ning kuna juurtearetusega pole siiani palju tegeletud, omab sellele teemale keskendumine palju potentsiaali (Herder *et al.*, 2010; Kong *et al.*, 2014; Lynch, 2007; Rogers & Benfey, 2015; Zhu *et al.*, 2019). Eriti ilmekalt väljendus see kindlatel odra ja kaera sortidel. Sellest tulenevalt tahtsin uurida, kas selle fenomeni taga on konkurents või midagi muud. Plaan oli kasvatada võimalikult erineva juurekasvuga odra ja kaera sorte. Seda tuli muidugi teha mitmel eri tihedusel, et näha, kas naabri olemasolu tingib suurema juurkonkurentsi, mis viib madalama terasaagini. Selle uurimiseks seadsin kaks hüpoteesi.

1) Üksikult kasvavad sordid ei erine üksteisest liigisiselt ei saagi ega juuretoodangu poolest.

2) Rohkem konkureerivad sordid toodavad rohkem juuri ja vähem saaki taime kohta tiheda konkurentsi tingimustes.

Johtuvalt bakalaureusetöö tulemustest, valisin nii kasvatatud odra kui kaera sortide hulgast välja ühe, kes eelmises katses investeeris juurtesse, tootes neid palju, ühe kes oli oma juuretootmiselt

mõõdukas ja ühe, kes tootis vähe juuri, investeerides just terasaaki. Kokku võeti käesolevasse katsesse seega kuus sorti.

2. Katseline osa. Materjal ja metoodika

Katses uurisin odra ja kaera taimede (kummastki liigist 3 sorti) juurekasvu sõltuvust naabrite olemasolust ja rohkusest. Katsesse valisin kaerasordid Hämarik (palju juuri, vähe saaki); Peppi (keskmiselt juuri, keskmiselt saaki); Avenue (vähe juuri, palju saaki) ning odrasordid Anni (palju juuri, vähe saaki); Avalon (keskmiselt juuri, keskmiselt saaki); Montoya (vähe juuri, palju saaki). Sordid valisin oma bakalaureusetöö tulemuste põhjal.

Katseks külvasin taimed 13 cm läbimõõduga 1,2-liitrisesse potti, kus substraadina kasutasin puhast liiva, mis oli segatud väetisega. Väetisena kasutasin Baltic Agro muruväetist (N 18, P 6, K 18 ja S 2 + Mg 2). Väetist kulus 34,2 g 10 kg liivaga täidetud poti kohta. Katses oli kolm töötlust: üks taim potis, 1 fokaaltaim + 3 naabertaimet (kokku 4 taimet) potis, 1 fokaaltaim + 18 naabrit (kokku 19 taimet) potis. Tihedustöötlust võib käsitleda vastavalt ka kui üksik, hõre, tihe. Iga sordi kohta külvasi kõiki töötluste kokku 5 kordust, seega 15 potti sordi kohta, mis moodustas kokku 90 potti. See, et viidi läbi poti-, mitte põllukatse, võib mõjutada tulemusi ning tulemuste tõlgendamist põllutingimustes.

Ühe taimega pottidesse külvasin seemne poti keskele, ülejäänud töötluste jaoks kasutasin šablooni. Nelja taimega töötluste puhul külvasin fokaaltaime ümber kolm seemet, igaüks fokaaltaimest 120-kraadise nurga all ja taimedevaheline distant oli 4 cm. Tiheda töötluste puhul oli fokaaltaime ümber kolm naabrit, kelle ümber omakorda kolm naabrit jne. Ehk teisisõnu oli tegemist meekärje disainiga, kus seemned on kärjelülide tippudes. Taimedevaheline distant oli 2 cm. Tihe töötlus katses oli veidi tihedam, kui tavaline põllukülv Eestis (*Kaer, 2023; Suviteravili: Seemned / Baltic Agro, 2023*), kuid eesmärgiks oligi konkurentsitingimuste indutseerimine. Antud töötlus võiks olla efektiivne, näitamaks taimede käitumise muutust tiheda konkurentsitingimustes.

Katse külvasin 10. juunil 2021. aastal välitingimustesse Raja tänava katsebaasi, Tartu linnas. Külvamise järgselt katsin potid läbipaistvate kaantega, et linnud seemneid ära ei sööks. Idanenud taimede eest hoolitsesin vastavalt vajadusele, neid toestades, rohides ja peaaegu igapäevaselt kastes. Suve vältel tõstsin potte mitu korda juhuslikku järjekorda, et poti asetuse mõju taimede kasvule minimeerida. Tasub ka mainida, et 2021. aasta suvel võis mõjutada katset Eestis esinenud tohutu kuumalaine (Pärnpuu, 2022). Kuumalaineid, kus päevased temperatuurimaksimumid

ületasid 27°C künnist kolmel või enamal järjestikusel päeval, oli kaks tükki. Esimene leidis aset 18.–23. juunil ning teine, pikem periood, kestis 30. juunist 18. juulini. Kesk- ja Lõuna-Eestis oli mõlemal korral ka üle 30-kradiseid perioode, mida peetakse eriti rängaks kuumalaineks (Pärnpuu, 2022). Keskmine õhutemperatuur sel perioodil oli läbi aegade kõrgeim - Eesti keskmisena 18,6 °C (norm 16,4 °C) (Pärnpuu, 2022). Sama käib ka Tartu kohta, kus suve keskmine õhutemperatuur oli 18,9 °C (norm 16,7 °C) (Pärnpuu, 2022).

Suvine sademete hulk oli keskmisest madalam: 202 mm, mis moodustab 92% kliimaatilisest 218 mm normist (Pärnpuu, 2022). August oli samas keskmisest rohkem sajune (121 mm, norm 72 mm) (Pärnpuu, 2022). Kõige vähem oli sademeid juunis (31 mm), mis on 44% kliimaatilisest normist (norm 70 mm) (Pärnpuu, 2022). Katse oli enamuse ajast kaetud loortülliga, taimede kaitseks. Samuti kastsin taimi peaaegu iga päev, kuumalaine puhul iga päev. Ei saa ka välistada, et ebaharilik ja intensiivne kuumus kasvuperioodil mõjutas tehtud katset.

Sügise alguses, ajavahemikul 16.-17. september, koristasin katse pärast vilja valmimist. Terade küpsus hinnati nende kõvaduse järgi. Eraldi kogusin pähikud, taime maapealse biomassi ja juured. Kogumisel loendasin ellujäänud taimede arvu, iga taime külgvõrsete arvu ja mõõtsin iga taime pikkust. Juured loputasin liivast puhtaks, tähistasin fokaaltaime ning sügavkülmutasin hoiustamiseks. Maapeased osad kuivatasin 70°C juures 48h ja hoiustasin kuni kaalumiseni. Biomassi kogumise käigus hindasin ka visuaalselt taimede haigustesse nakatumist kvalitatiivselt, kolme palli süsteemis.

Juurte analüüsimiseks sulatasin poti juurte kogumi üles ning puhastasin fokaaltaime põhjalikult naabertaimede juurtest ja muust prahist. Suurema liiva eemaldasin voolava vee all, vältides proovi kadu peene sõela abil. Järgmiseks viisin puhastatud juurtemassi edasi veevanni, kus eraldas fokaaltaime. Kuna iga protsessi etapp toimus vajadusel juurekao vältimiseks läbi sõela ja eraldi anumad ning viidi läbi sama isiku poolt, siis peaksid proovide tulemused olema võrreldavad. Pestud juured skaneerisin Epson Perfection v700/750 Pro skanneriga. Kui fokaaltaimel oli piisavalt vähe juuri, et nad mahtusid 1-3 pildi peale, siis skaneerisin kõik taime juured. Kui aga juuri oli väga palju, skaneerisin osa neist ja ülejäänud fokaaltaime juured kogusin ning kaalusin eraldi. Hiljem ekstrapoleerisin skaneeritud juurte massi kaudu skaneeritud juurte

andmed kogu fokaaltaime juurtele. Mitte fokaaltaimede juured kogusin eraldi ja kaalusin, kuid neid ei skaneerinud. Puhastatud pildid analüüsisin, kasutades programmi WinRHIZO Pro 2008a (Regent Instruments Inc., Quebec, Canada).

WinRHIZO abil saadud andmete ning muu kaalutud biomassi põhjal sai arvutada fokaaltaime juurte pikkuse (cm), fokaaltaime ja kogu poti kollektiivse juurte, võsu ja seemnete massi (g), koristusindeksi (seemnesaak/(seemnesaak + võsu biomass)) ning juurte ja võsu suhte (juurte toodang/maapealse biomassi toodang). Arvutatud suhted logaritmisin.

Andmeid analüüsisin kasutades R-studio programmi *lme4* paketi, versiooni 1.1-32 (Bates *et al.*, 2015). Graafikute koostamisel kasutasin paketti *ggplot2*, versiooni 3.4.2 (Wickham, 2016). Nendele lisaks kasutasin komplementaarseid pakette: *car* (Fox & Weisberg, 2019) ja *dplyr* (Wickham *et al.*, 2023).

Algselt viisin tulemuste analüüsi läbi, kasutades dispersioonianalüüsiks tüüp III ANOVA testi, kus sort oli kaasatud juhusliku faktorina. Selline analüüs aga ei rahuldanud töö uurimisküsimusi. Antud katses on võimalik kummastki liigist valitud kolme sorti defineerida ka kui juurkäitumise tüübi esindajaid. Sordid on valitud eelmise katse põhjal spetsiaalselt selliselt, et üks esindaks rohkem juurtesse investeerijat, üks rohkem saaki investeerijat ja üks oleks kahe äärmuse vahepealne. Käsitledes neid sorte kui juurkäitumise tüüpe, mida on kolm tükki, võib teha analüüsi nii, et sort on mudelis fikseeritud faktor. Mudelites käsitlesin erinevaid vegetatiivseid ja generatiivseid tunnuseid sõltuva muutujana ning juurkäitumise tüüp ja tihedus olid kaasatud sõltumatute muutujatena. Analüüsisin nii sordi ja tiheduse peamõjusid kui ka nende koosmõju. Otra ja kaera analüüsisin eraldi.

3. Tulemused.

Esimese asjana paistab kohe silma, et paljude tunnuste puhul tuli statistiliselt oluliseks peamõju tihedusega. Seda võib täheldada mõlema liigi kohta nii fokaaltaime puhul kui ka kollektiivselt. Neid pole eraldi kommenteeritud, kuna tulemused olid ootuspärased. On loogiline, et kui kasvab rohkem taimi potis, siis tõuseb ka maapealse biomassi hulk poti kohta jne. Sisuliselt on huvitavamad peamõjud juurkäitumise vormi ja tihedus*juurkäitumise puhul.

Tabel 1. Dispersioonanalüüsi tulemused kaera fokaaltaime kohta. Uuritud on erinevate vegetatiivsete ja generatiivsete tunnuste (esimene tulp) sõltuvust tihedusest ja juurkäitumisest tüübist ning nende koosmõjust. Statistiliselt oluliste ($p < 0,05$) peamõjude juures on näidatud ka mõju suund, kus + markeerib positiivset seost ning – negatiivset. Statistiliselt olulised tulemused on markeeritud paksus kirjas.

	Trend		Df	F väärtus	P väärtus
Seemnesaak	-	Tihedus	1	9.871	0.0034
		Juurkäitumine	2	0.8796	0.4239
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.3291	0.7217
Taime kõrgus	-	Tihedus	1	11.9058	0.0014
	-	Juurkäitumine	2	3.7098	0.034
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.1391	0.8706
Võsu biomass	-	Tihedus	1	15.1554	0.0004
		Juurkäitumine	2	1.7337	0.1903
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.743	0.4825
Juurte biomass	-	Tihedus	1	9.5927	0.0037
		Juurkäitumine	2	0.2579	0.774
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.0727	0.93
Juurte pikkus	-	Tihedus	1	6.0948	0.0182
		Juurkäitumine	2	0.9429	0.3984
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.3018	0.7412
Juur:Võsu		Tihedus	1	0.5238	0.4737
		Juurkäitumine	2	0.4387	0.6481
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.0978	0.9071
Koristusindeks		Tihedus	1	0.6122	0.4392
		Juurkäitumine	2	1.4459	0.2492
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.3712	0.6926

Tabel 2. Dispersioonanalüüsi tulemused kaera kohta kollektiivselt terve poti kohta vaadatuna. Uuritud on erinevate vegetatiivsete ja generatiivsete tunnuste (esimene tulp) sõltuvust tihedusest ja juurkäitumise tüübist ning nende koosmõjust. Statistiliselt oluliste ($p < 0,05$) peamõjude juures on näidatud ka mõju suund, kus + markeerib positiivset seost ning – negatiivset. Statistiliselt olulised tulemused on markeeritud paksus kirjas.

	Trend		Df	F väärtus	P väärtus
Seemnesaak	+	Tihedus	1	26.097	<0,0001
		Juurkäitumine	2	0.1503	0.861
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.7683	0.4709
Taime kõrgus	-	Tihedus	1	10.5693	0.0034
		Juurkäitumine	2	1.1578	0.3311
		Tihedus*Juurkäitumine	2	1.2308	0.3099
Võsu biomass	+	Tihedus	1	52.1463	<0,0001
		Juurkäitumine	2	0.5771	0.5664
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.0051	0.9949
Juurte biomass	+	Tihedus	1	29.2367	<0,0001
		Juurkäitumine	2	0.1252	0.8826
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.7395	0.4841
Juur:Võsu		Tihedus	1	1.7566	0.193
		Juurkäitumine	2	1.2985	0.2848
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.0185	0.9817
Koristusindeks	-	Tihedus	1	6.5262	0.0148
		Juurkäitumine	2	0.4299	0.6537
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.5119	0.6034

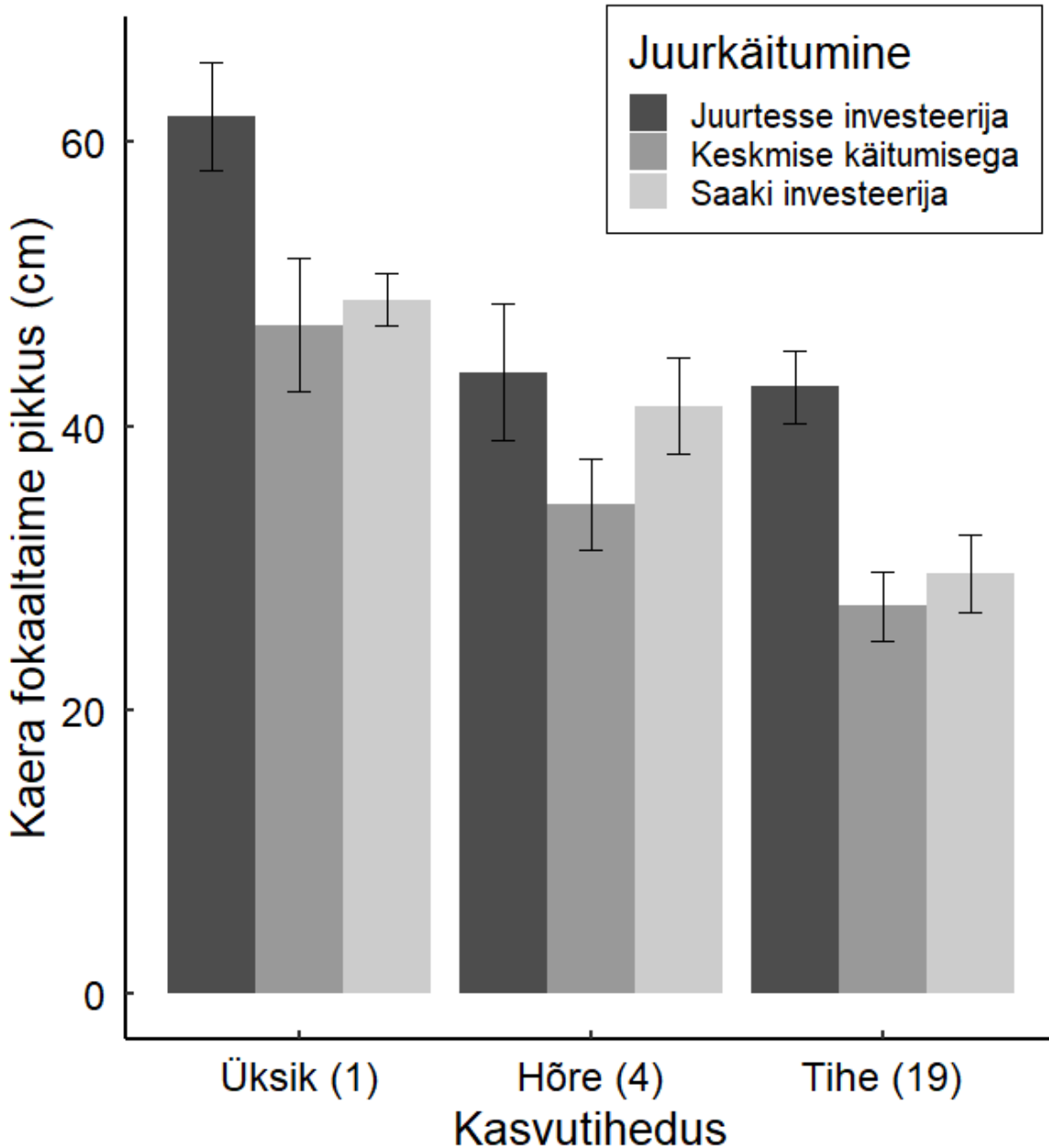
Tabel 3. Dispersioonanalüüsi tulemused odra fokaaltaime kohta. Uuritud on erinevate vegetatiivsete ja generatiivsete tunnuste (esimene tulp) sõltuvust tihedusest ja juurkäitumise tüübist ning nende koosmõjust. Statistiliselt oluliste ($p < 0,05$) peamõjude juures on näidatud ka mõju suund, kus + markeerib positiivset seost ning – negatiivset. Statistiliselt olulised tulemused on markeeritud paksus kirjas.

	Trend		Df	F väärtus	P väärtus
Seemnesaak	-	Tihedus	1	6.4585	0.0167
		Juurkäitumine	2	0.7299	0.4906
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.2147	0.8081
Taime kõrgus	-	Tihedus	1	4.2646	0.0471
		Juurkäitumine	2	1.78	0.1849
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.0273	0.9731
Võsu biomass	-	Tihedus	1	8.0457	0.0078
		Juurkäitumine	2	0.8695	0.4288
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.0379	0.9629
Juurte biomass	-	Tihedus	1	4.2507	0.0474
		Juurkäitumine	2	6.0776	0.0058
		Tihedus*Juurkäitumine	2	2.261	0.1206
Juurte pikkus	-	Tihedus	1	5.122	0.0308
		Juurkäitumine	2	0.9921	0.3823
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.4472	0.6435
Juur:Võsu	+	Tihedus	1	5.0895	0.0321
		Juurkäitumine	2	2.8969	0.0719
	+	Tihedus*Juurkäitumine	2	3.9976	0.0297
Koristusindeks		Tihedus	1	0.2743	0.6044
		Juurkäitumine	2	2.5329	0.0969
		Tihedus*Juurkäitumine	2	2.7026	0.0839

Tabel 4. Dispersioonanalüüsi tulemused odra kohta kollektiivselt terve poti kohta vaadatuna. Uuritud on erinevate vegetatiivsete ja generatiivsete tunnuste (esimene tulp) sõltuvust tihedusest ja juurkäitumise tüübist ning nende koosmõjust. Statistiliselt oluliste ($p < 0,05$) peamõjude juures on näidatud ka mõju suund, kus + markeerib positiivset seost ning – negatiivset. Statistiliselt olulised tulemused on markeeritud paksus kirjas.

	Trend		Df	F väärtus	P väärtus
Seemnesaak	+	Tihedus	1	5.9839	0.0193
		Juurkäitumine	2	1.5422	0.2274
	+	Tihedus*Juurkäitumine	2	4.1879	0.0229
Taime kõrgus	-	Tihedus	1	23.9627	<0,0001
		Juurkäitumine	2	3.0936	0.0638
		Tihedus*Juurkäitumine	2	0.8058	0.4584
Võsu biomass	+	Tihedus	1	53.901	<0,0001
		Juurkäitumine	2	0.1169	0.89
		Tihedus*Juurkäitumine	2	1.6599	0.204
Juurte biomass	+	Tihedus	1	56.9609	<0,0001
		Juurkäitumine	2	0.8592	0.4331
	+	Tihedus*Juurkäitumine	2	6.725	0.0036
Juur:Võsu		Tihedus	1	3.2363	0.0815
		Juurkäitumine	2	3.0286	0.0624
		- Tihedus*Juurkäitumine	2	3.3214	0.0489
Koristusindeks	-	Tihedus	1	8.6795	0.0055
		Juurkäitumine	2	2.8911	0.0681
	-	Tihedus*Juurkäitumine	2	4.9146	0.0128

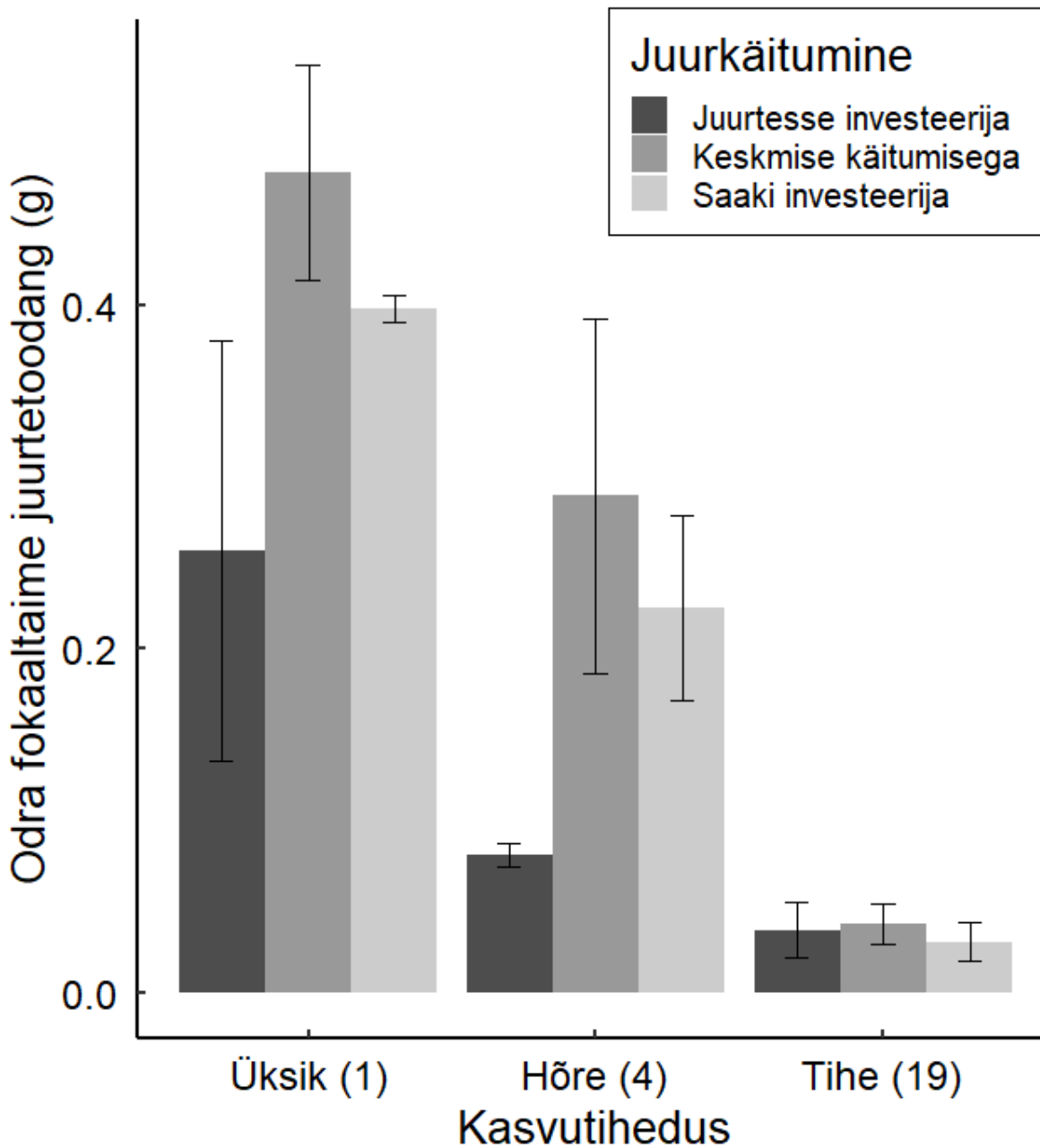
Kaera puhul vähenes tiheduse kasvades oluliselt fokaaltaime kõrgus (Joonis 1, Tabel 1). Trendi järgisid kõik kolm eri juurkäitumise tüüpi esindavat sorti. Kuigi tulemus odrataimede puhul statistiliselt oluliseks ei osutunud, siis oli ka seal täheldada samasuunalist mõju (Tabel 3). Sama võib täheldada ka kollektiivsest taimepikkusest, kuigi ka nende puhul olulisi tulemusi ei leitud kummagi liigi puhul (Tabel 2, Tabel 4).



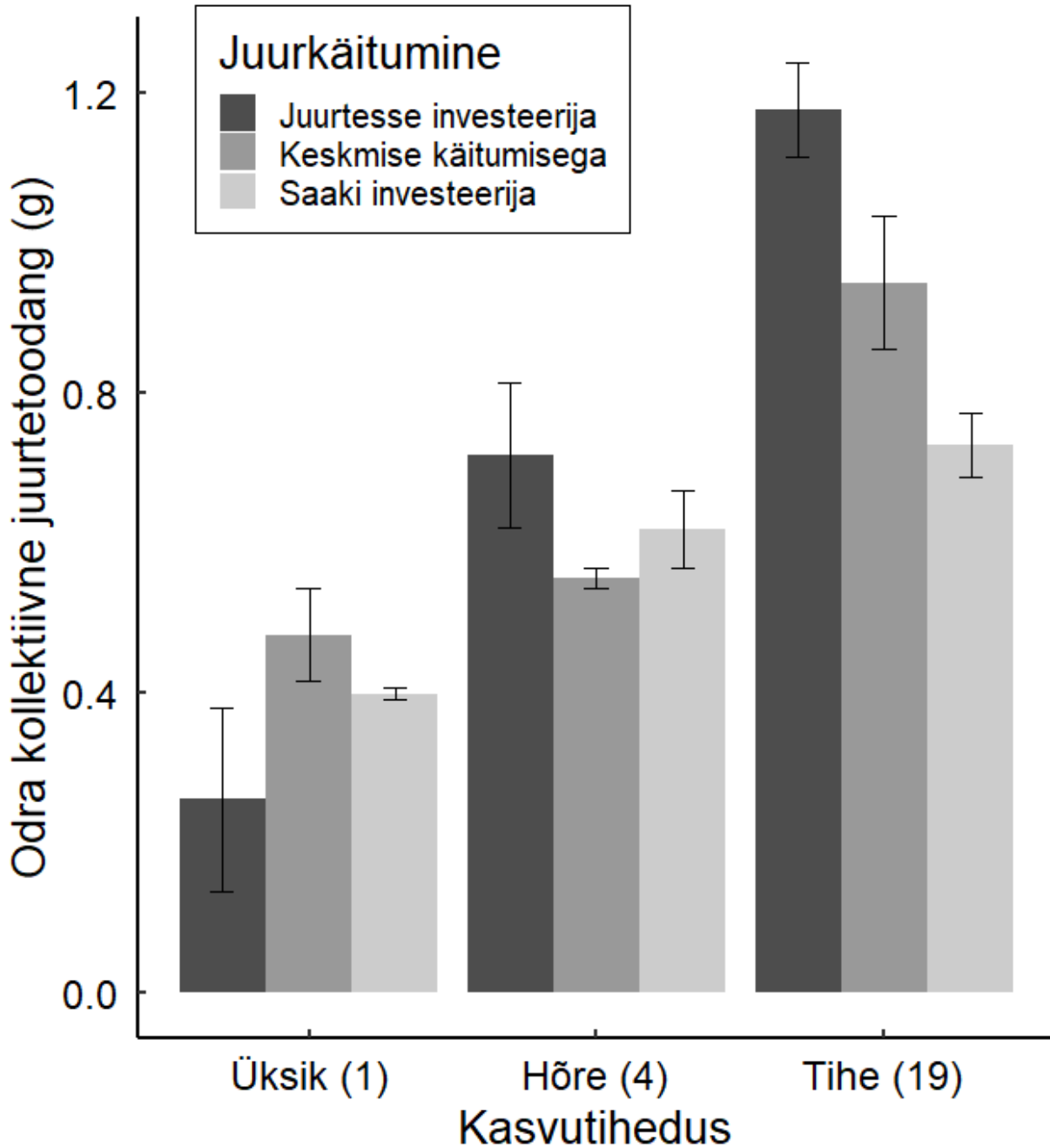
Joonis 1. Kaera eri juurkäitumisetüüpide fokaaltaime pikkus kolmel eri kasvutihedusel. Number sulgudes tiheduse nimetuse järgselt viitab külvatud taimede arvule pottides. Tulpade juures on ka näidatud keskväärtuse 95% usalduspiirid.

Odra puhul leiti olulisi seoseid rohkemate tunnustega ning need erinesid kaera omadest (Tabel 3, Tabel 4). Tiheduse kasvades vähenes fokaaltaime juuretoodang (Joonis 2) ning suurenes kollektiivne juuretoodang oluliselt (Joonis 3). Seda esines kõigi juurkäitumise tüüpide puhul. Samuti võis odra puhul täheldada fokaaltaime juur-võsu suhte kasvu juurtesse investeeriva

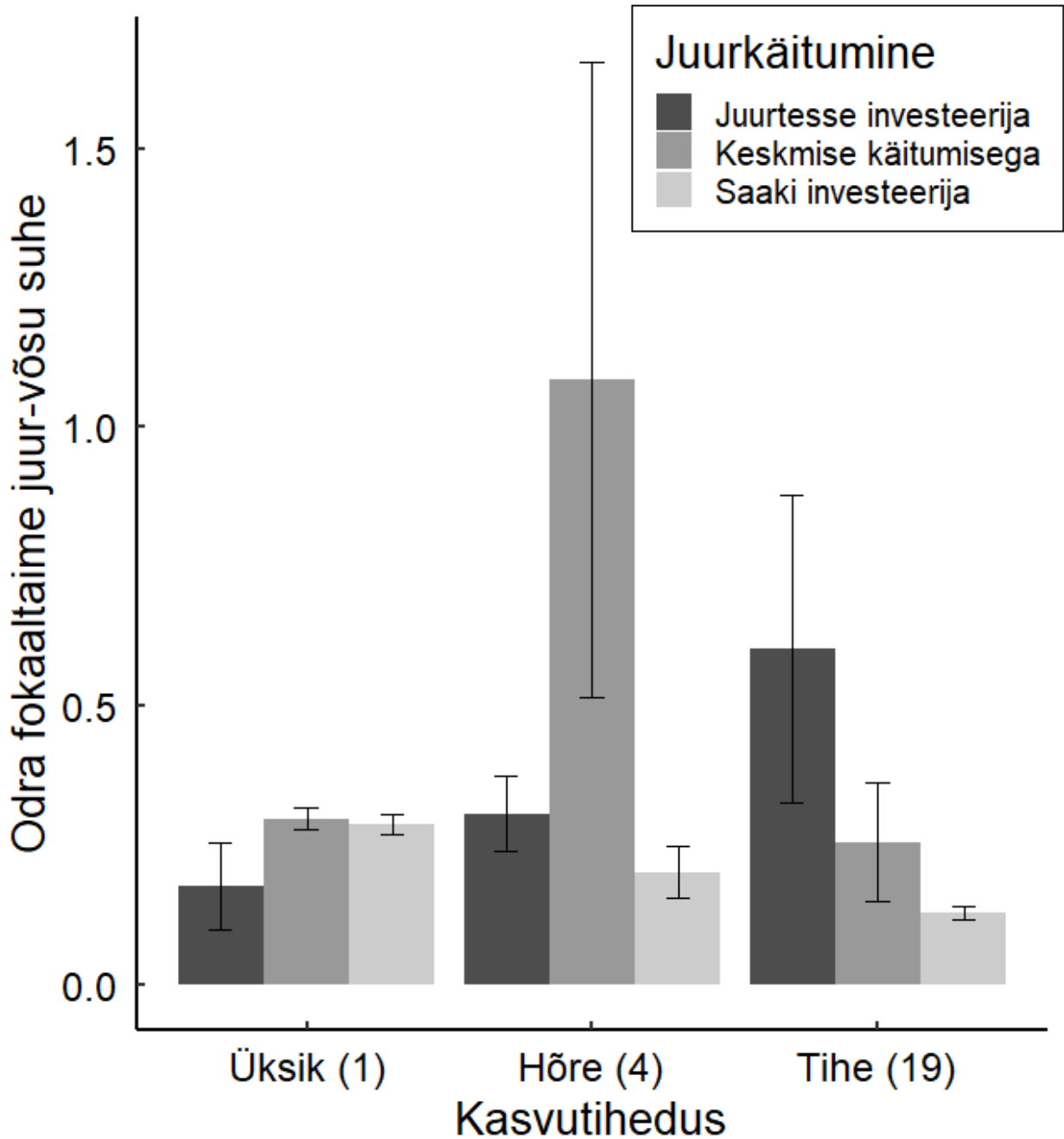
juurkäitumise vormi puhul, kuid hoopis langust keskmise- ja saaki investeeriva juurkäitumise puhul, vastavalt sellele, mida suurem oli kasvutihedus (Joonis 4). Juurkäitumise ja tiheduse interaktsioon osutus statistiliselt oluliseks ka kollektiivse juur-võsu suhte puhul (Joonis 5).



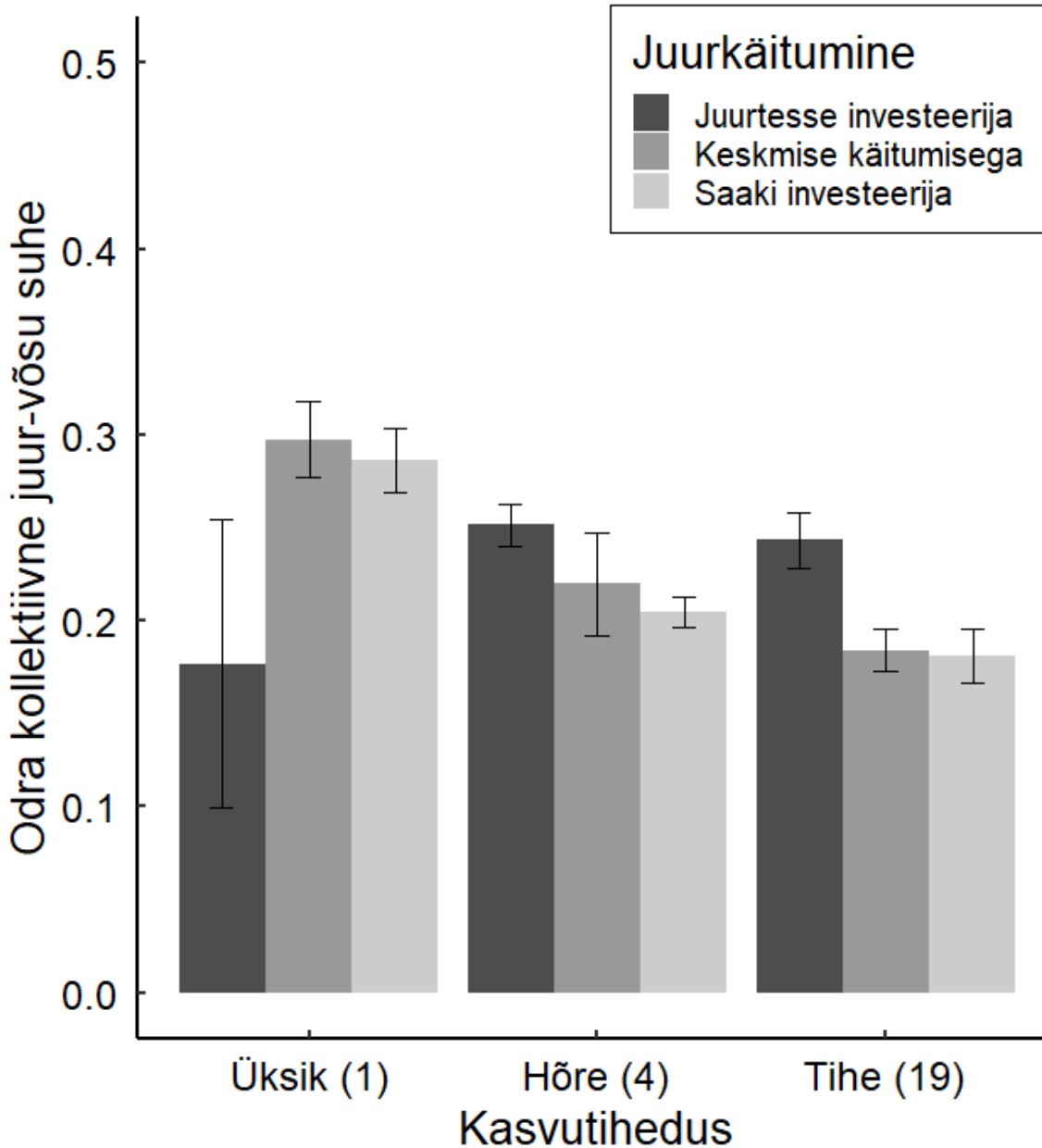
Joonis 2. Odra eri juurkäitumisetüüpide fokaaltaime juuretoodang, kolmel eri kasvutihedusel. Number sulgudes tiheduse nimetuse järgselt viitab külvatud taimede arvule pottides. Tulpade juures on ka näidatud keskväärtuse 95% usalduspiirid.



Joonis 3. Odra eri juurkäitumisetüüpide kollektiivne juuretoodang kolmel eri kasvutihedusel. Number sulgudes tiheduse nimetuse järgselt viitab külvatud taimede arvule pottides. Tulpade juures on ka näidatud keskvaartuse 95% usalduspiirid.



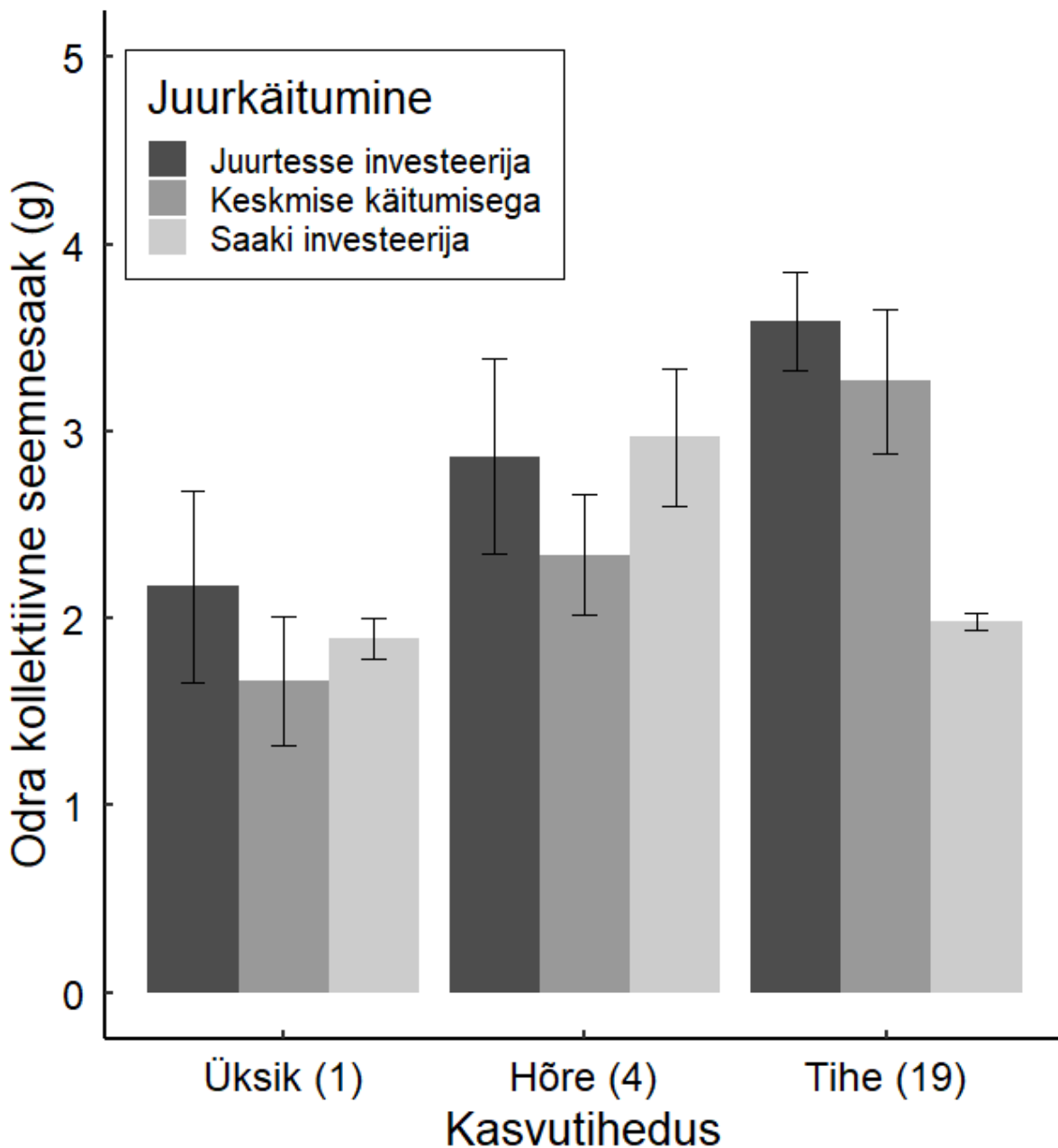
Joonis 4. Odra eri juurkäitumisetüüpide fokaaltaime juur-võsu suhe kolmel eri kasvutihedusel. Number sulgudes tiheduse nimetuse järgselt viitab külvatud taimede arvule pottides. Tulpade juures on ka näidatud keskväärtuse 95% usalduspiirid.



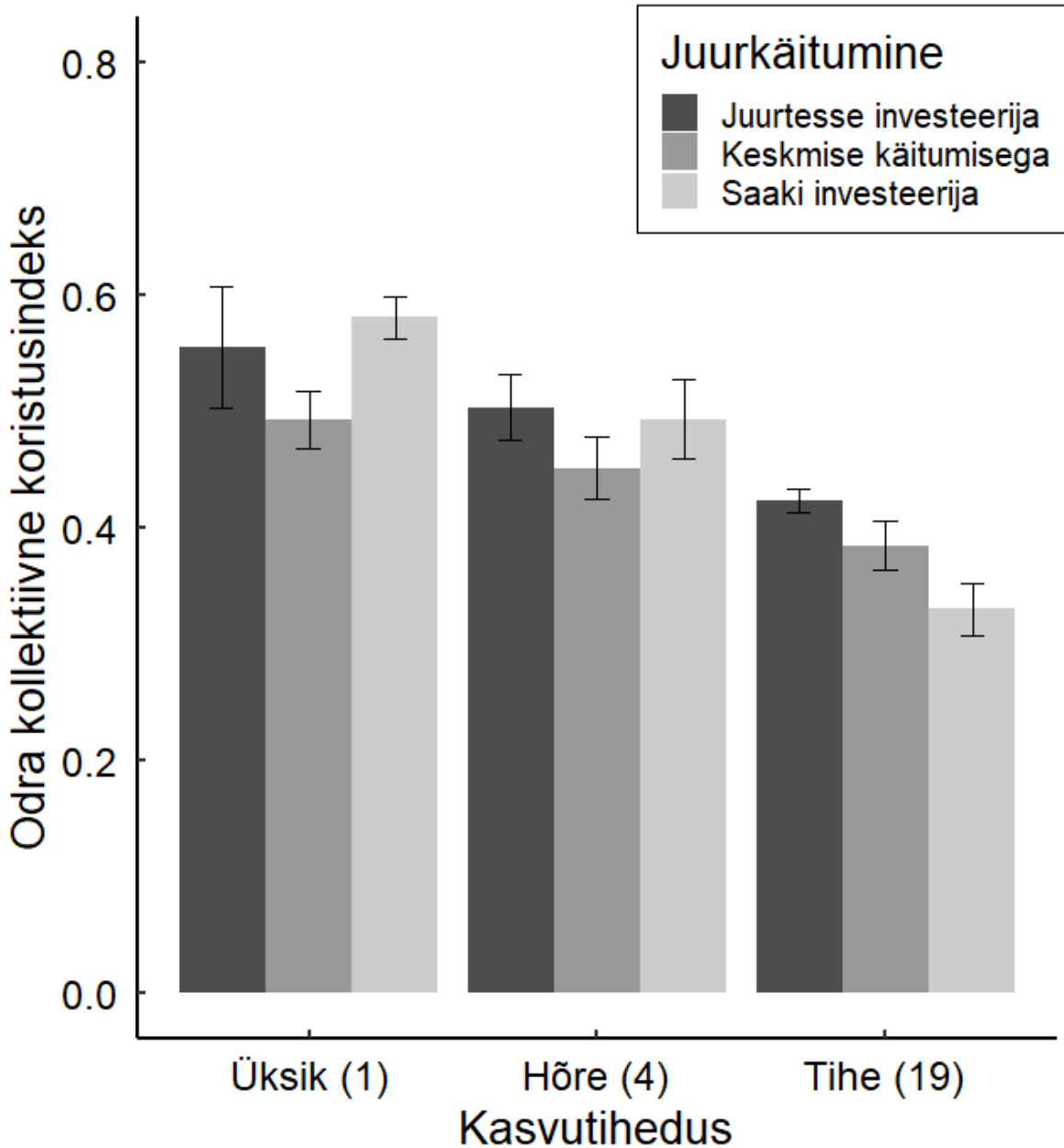
Joonis 5. Odra eri juurkäitumisetüüpide kollektiivne juur-võsu suhe kolmel eri kasvutihedusel. Number sulgudes tiheduse nimetuse järgselt viitab külvatud taimede arvule pottides. Tulpade juures on ka näidatud keskväärtuse 95% usalduspiirid.

Fokaaltaime puhul rohkem olulisi ja huvitavaid tulemusi ei tuvastatud, kuid odra puhul leiti veel ka statistiliselt oluline interaktsioon kollektiivse seemnesaagi ning koristusindeksi puhul (Tabel 4). Tiheduse kasvades tootsid sordid üldiselt rohkem saaki (Joonis 6), kuid kõige suuremal tihedusel oli möödunud katses saaki investeerinud juurkäitumise vorm hoopis kõige väiksema

seemnesaagiga. Samuti leiti oluline koosmõju koristusindeksi puhul (Tabel 4). Koristusindeks küll vähenes tiheduse kasvades (Joonis 7) kõigi juurkäitumise vormide puhul, aga vähenemine oli hõppelisem saaki investeeriva juurkäitumise puhul.

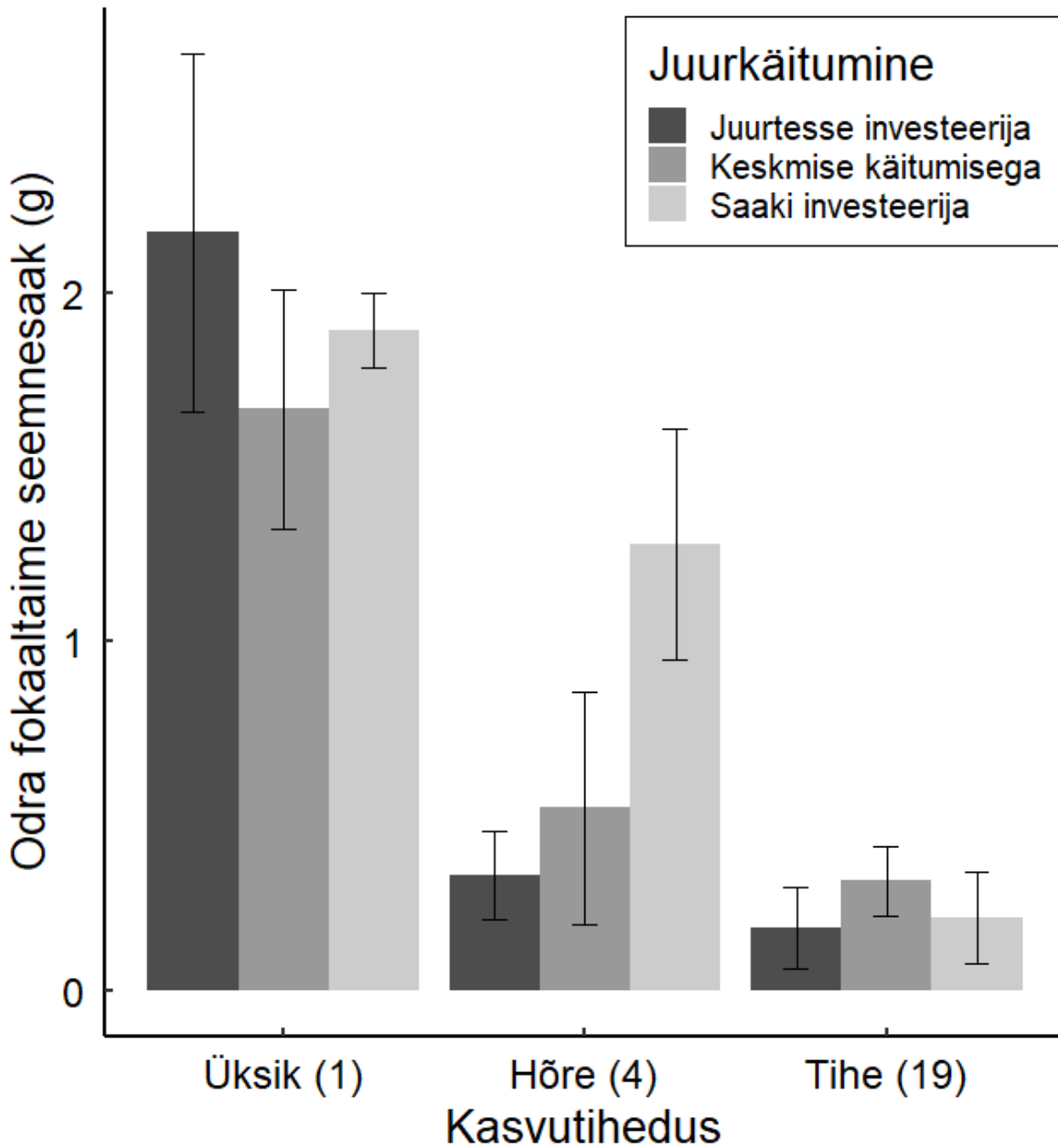


Joonis 6. Odra eri juurkäitumisetüüpide kollektiivne saagikus kolmel eri kasvutihedusel grammides. Number sulgudes tiheduse nimetuse järgselt viitab külvatud taimede arvule pottides. Tulpade juures on ka näidatud keskvärtuse 95% usalduspiirid.

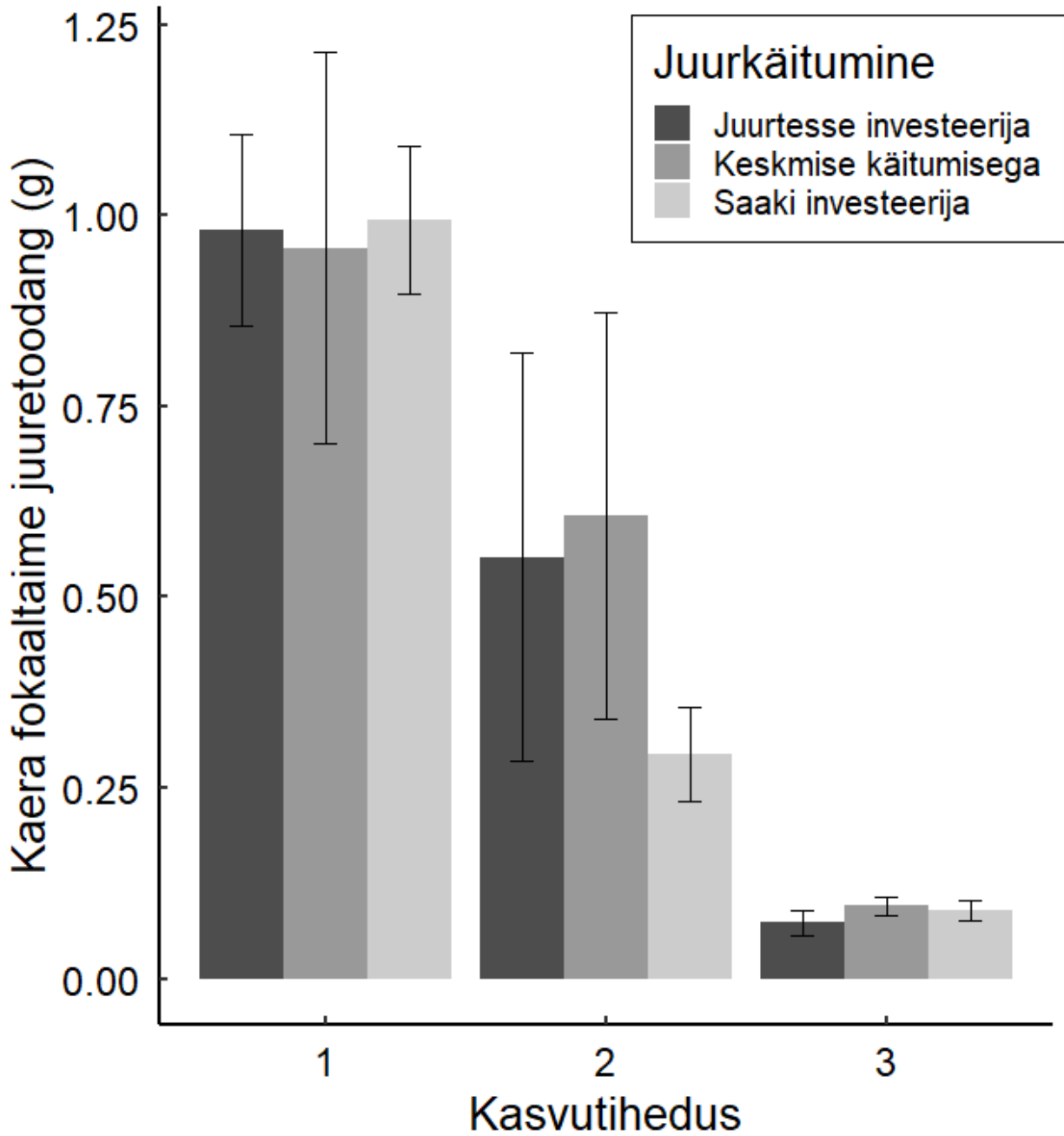


Joonis 7. Odra eri juurkäitumisetüüpide kollektiivne koristusindeks kolmel eri kasvutihedusel. Number sulgudes tiheduse nimetuse järgselt viitab külvatud taimede arvule pottides. Tulpade juures on ka näidatud keskväärtuse 95% usalduspiirid.

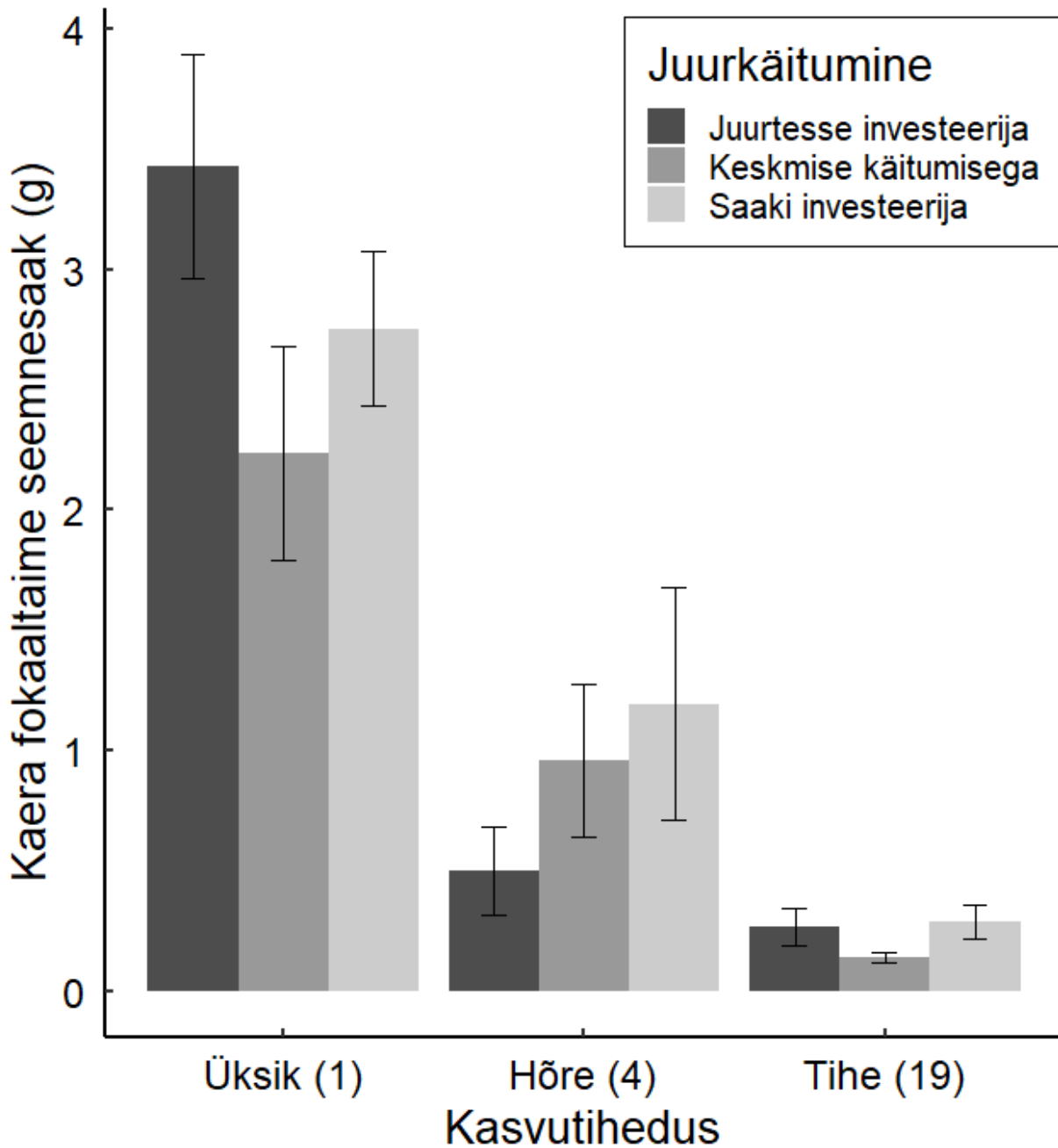
Statistilist olulisust ei leitud kaera fokaaltaime saagikuse ja kasvutiheduse (Tabel 1), kaera fokaaltaime juuretoodangu ja kasvutiheduse (Tabel 1) ning odra fokaaltaime saagikuse ja tiheduse vahel (Tabel 3). Kuna väärtused on aga olulised esimese hüpoteesi kontrollimiseks, siis need tulemused on joonistega (Joonis 2-4) siiski esindatud.



Joonis 8. Odra eri juurkäitumisetüüpide fokaaltaime saagikus kolmel eri kasvutihedusel grammides. Number sulgudes tiheduse nimetuse järgselt viitab külvatud taimede arvule pottides. Tulpade juures on ka näidatud keskvärtuse 95% usalduspiirid.



Joonis 9. Kaera eri juurkäitumisetüüpide fokaaltaime juuretoodang kolmel eri kasvutihedusel grammides. Number sulgudes tiheduse nimetuse järgselt viitab külvatud taimede arvule pottides. Tulpade juures on ka näidatud keskvärtuse 95% usalduspiirid.



Joonis 10. Kaera eri juurkäitumisetüüpide fokaaltaime saagikus kolmel eri kasvutihedusel grammides. Number sulgudes tiheduse nimetuse järgselt viitab külvatud taimede arvule pottides. Tulpade juures on ka näidatud keskvärtuse 95% usalduspiirid.

4. Arutelu

4.1 Tulemuste analüüs

Esimene hüpotees, mille kohaselt oleksid mõlema liigi kõik sordid pidanud olema üksikult kasvades sarnasse juurte ja terasaagi tootlikkusega, ei kehtinud. Ilmneb, et sordid erinevad kõigi vaadeldud tunnuste poolest (odra ja kaera fokaaltaime juuretoodang ning terasaak). Kõige ligilähedasem oli tulemus kaera fokaaltaime juuretoodangu puhul, kuid ka seda võib pidada piisavalt erinevaks. See tähendab, et sordid erinevad omavahel tunduvalt nii juurkäitumiselt kui ka tendentsist saagikusse investeerida ning seda juba üksiku taime tasandil. Juhin tähelepanu varasemalt läbiviidud konkurentsikatsetele (sageli üksiku taimega), kus kasutatav taim varieerus katsete vahel nii liigi kui ka sordi poolest (Gersani et al., 2001; Maina et al., 2002; O'Brien et al., 2005; Semchenko et al., 2007). Kuna erinevad sordid võivad käituda biomassi tootmisel niivõrd erinevalt, siis ei ole erinevad tulemused mõne katse vahel sugugi ootamatu nähtus. Selleks et saada edaspidi hästi võrreldavaid tulemusi tuleks katses kasvatada kas sama liigi sama sorti või mitut erinevat. See aitab välistada ühe sordi erandliku käitumise märkamata jäämise ning teeb katsed omavahel võrreldavaks. Erinevate omaduste esinemine tähendab aga ka, et meile sobivate näitajatega sorte on võimalik valida nii aretusse kui ka spetsiifilistesse tingimustesse kasvama, viidates aretamispotentsiaalile (Herder et al., 2010; Kong et al., 2014; Lynch, 2007; Rogers & Benfey, 2015).

Kaera puhul oluliselt vähenev fokaaltaime pikkus annab hea arusaama põllul toimuvast konkurentsist. Taime pikkus on tüüpiline konkurentsist tunnus (Gause, 2019; Tilman *et al.*, 2014) ning sellest, et juurtesse investeeriva käitumisega sort on igal tihedusel kõige pikem, ilmneb, et suurem konkureerija kasvab ka pikemaks (Casper & Jackson, 1997; Devi *et al.*, 2020; Grime, 2006; Wilson, 1988). Vastavalt on koostööaltima käitumisega sordid madalamad.

Üks potentsiaalne aspekt, mida taime maapealse pikkuse (ja üldiselt maapealse biomassi) puhul välja tuua, on kasvavate taimede varjutatus (Lee & Tollenaar, 2007). Nimelt paiknes fokaaltaim poti keskel, kus naabrid ümbritsesid ja varjutasid teda igast küljest. Samas kui taimedel, kes kasvasid poti äärel (ülejäanud kolm taime hõreda kasvutihedusega töötluses ja välimised taimed tihedal kasvutihedusel), oli võimalik saada lisavalgust naabri puudumise arvelt. See näitab ka, et

konkurents varjutamise tulemusel avaldab selget mõju taime kasvule ja sellest tulenevalt ka saagikusele (Lee & Tollenaar, 2007; McNickle & Dybzinski, 2013; G. P. Murphy & Dudley, 2007).

Vaadates odra tunnuseid, siis oleks hea esmalt keskenduda juurte biomassi toodangule. Üksikult potis kasvades oli odra juurtesse investeeriva käitumisvormi sordi juurte biomassitoodang kõige väiksem nii fokaaltaimedel kui ka taimedel kollektiivselt poti kohta. Konkurentsi kasvades oli odra juurtesse investeeriv sort suuteline kasvatama rohkem juuri kui teised kaks käitumisvormi. See on eriti ilmne odra kollektiivse juuretoodangu puhul. Vaadates odra fokaaltaime juuretoodangut eri tihedustel, näeme, et ka hõredal tihedusel, keskmise konkurentsi tingimustes on keskmist ja saaki investeerivat käitumisviisi esindavad sordid maa all vähem konkureerivad. Samal tihedusel oli juurtesse investeeriva käitumisviisi fokaaltaime juuretootlikkus neist madalam. Kannatajaks on siin just fokaaltaim, sest kollektiivselt tootis juurtesse investeerija palju rohkem juuri kui ülejäänud kaks juurkäitumise vormi. Väga suurel tihedusel suured erisused kaovad ning kõikide juurkäitumisviiside fokaaltaimede juuretoodang on suure konkurentsi tulemusena väga madal. Kollektiivselt tootis odra puhul kõige kõrgemal tihedusel kõige vähem juuri saaki investeerija, keskmise käitumisviisiga sort oli keskmine ning juuretootja tootis kõige rohkem. Tegemist on oodatud tulemusega, mis on vastavuses teise püstitatud hüpoteesiga. Trendi, et konkurentsi tingimustes toodab taim rohkem juuri ja vähem saaki on leidnud ka paljud eelnevad uuringud (Gersani *et al.*, 2001; Maina *et al.*, 2002; O'Brien *et al.*, 2005). Suurt hüppelist kasvu fokaaltaime juuretoodangus juurtesse investeeriva juurkäitumise puhul võib kinnitada ka Semchenko jt (2007) katsete tulemusi, kus peamiseks konkurentsitunnuste avaldumise ajendiks peeti juurte poolt eritatavaid kemikaale. Üksi potis olles ja piisavat ruumi omades polnud juurtesse investeerijal ajendit juurekasvuks, kuid konkurentsi ilmnemisel muutis ta oma strateegiat.

Odra kollektiivse juuretoodangu kasvu, mis leiab aset külvitiheduse suurenedes, võib tõlgendada ka potentsiaalse ühisvara tragöödia ilmnemisega. On näha, et taimed hakkasid kollektiivselt suunama ressursse juurtesse ja seda maapealse kasvu arvelt (Anten & Vermeulen, 2016; Ostrom, 2008). Viimast on näha odra kollektiivsest juur-võsu suhtest, kus juuretootja puhul suhe suureneb tiheduse kasvades, näidates, et juurte hulk kasvab võrreldes maapealse biomassi osakaaluga.

Samuti võib arutleda, et juurtesse investeeriv käitumisviis ei ole tingimata parem konkureerija, vaid odra sort on juurte kasvu kui tunnuse osas väga plastiline. Plastilisus viitab taime võimekusele oma morfoloogiat muuta vastusena nii biotilistele kui abiotilistele faktoritele (Abakumova *et al.*, 2016). Käesolevas kontekstis tähendab see, et taim on võimeline konkurentsi tingimustes ja ärakasutatavate võimaluste tekkimisel kasvatama palju rohkem juuri.

Lisaks eelnevalt kirjeldatud hüppele juuretootlikkuses (odra juurtesse investeeriva käitumisviisi puhul), tuleb vaadata, kas suurim juuretootlikkus kõrgel tihedusel tuli millegi arvelt. Odra kollektiivne juur-võsu suhe võiks viidata, et juurtesse investeeriv sort tootis rohkem juuri väheneva maapealse biomassi arvelt, kuid juurtesse investeerival käitumisviisil on võrreldes teistega kõrgem saagikus ja koristusindeks. See ei lähe kokku eelnevalt seatud hüpoteesiga, et rohkem konkureerivad sordid toodavad tiheda konkurentsi tingimustes rohkem juuri ja vähem saaki taime kohta. Seepärast pakun välja, et olulisem on selle sordi juuretootlikkuse plastilisus. See tähendaks, et antud katses osutus otsus muuta oma strateegiat taime jaoks edukaks. Taim tootis rohkem juuri ning suutis selle arvelt saadud ressursidega elada üle tiheda konkurentsi ning toota kõige rohkem saaki. Mõnes teises olukorras ei pruugi see strateegia edukaks osutada. Abakumova jt (2016) on täheldanud, et taimedel võib välja kujuneda tugevam plastilisus, kui neil on palju kokkupuudet oma koosluses domineeriva liigiga. Seega tihedalt monokultuursel põllul kasvav taim võib tõepoolest kujuneda keskmisest plastilisemaks. Plastiliste vegetatiivsete tunnuste omamine on ka üldiselt hea raskemate olude üleelamiseks (Stotz *et al.*, 2021), mis võib olla põhjuseks, miks juurtesse investeeriv sort oli katses edukam.

Päris põllumajandustingimustes on külvitihedus madalam kui siinses katses kõige kõrgema tihedusega potis kasutati, kuid kõrgem kui hõreda kasvutihedusega potis (Kaer, 2023; Suviteravili: Seemned | Baltic Agro, 2023). Sellistes oludes võib odra saaki investeeriv sort olla edukam, sest hõredal tihedusel oli sort seemnesaagi toodangus juurtesse investeerijast parem. Võib oletada, et sortidel on ka mingisugune konkurentsisist tuleneva stressi taluvuse piir. See tähendaks tihedust, milles taimed ei suuda pidada vastu liigsele biotilisele stressile ega omandada piisavalt ressursse, et ellu jääda ja/või edukalt saaki toota (Cabal *et al.*, 2020; Casper & Jackson, 1997). Tasub ka mainida, et otra ja kaera külvatakse Eestis põldudel eri tihedusega (Kaer, 2023; Suviteravili: Seemned | Baltic Agro, 2023). Kera külvatakse tihedamalt kui otra ning

see, et kaer saab suuremal tihedusel paremini hakkama, võib olla põhjus, miks mõned tulemused ei ilmnenu kaera puhul nii selgelt. Odra kollektiivse seemnetoodangu tulemustest on näha, et kuni keskmise tiheduseni on saagikusse investeerija tegelikult kõige edukam ning seemnetoodang väheneb alles suurel tihedusel. Mina kasutasin katses optimaalsest suuremat külvitihedust, et uurida taimede käitumist ja selle potentsiaalset muutust intensiivse konkurentsi tingimustes ning taimede võimalikku vastupidavust konkurentsile. Selles vallas täitis katse oma eesmärgi.

Siinkohal võib uuesti kaaluda oletust, et odra juurtesse investeeriv sort on juurte tootlikkuse osas väga plastiline. Juurekasvatajat sorti võib käsitleda mitte kui suurt juurtesse investeerijat, vaid ühisvara tragöödia lõksu langevat äärmiselt plastilise juuretootlikkusega sorti. Võib ka arutleda, et kui ühisvara tragöödia ei avaldunud millegi lõivsuhtena (see tähendab, et seemnesaak ei kannatanud suure juuretootmise tõttu), siis tõstatub küsimus, kas tegelikult on ikka tegu ühisvara tragöödiaga. Tõenäoliselt mitte, kuid ülearune juuretoodang on põllumajanduses endiselt halb. Seda seetõttu, et juurte toodang ja ülalpidamine on taimetele kulukas (Y. Fang *et al.*, 2011; Kiær *et al.*, 2013; Passioura, 1983). Vaadates odra kollektiivset juuretoodangut ja saagikust, siis on ilmne, et hõredal tihedusel tootis saaki investeerija rohkem saaki kui juurtesse investeerija ja seda just kasvatatud juurte arvelt, milles juuretootja oli saaki investeerijast ees. Selles aspektis on endiselt tegemist ühisvara tragöödiaga, lihtsalt antud katses jäi negatiivne pool ilmnemata. Kui aga taimed selle sordi puhul oleks tootnud vähem juuri, siis oleks kasu olnud märgatavalt suurem.

Samas on Waines ja Ehdaie (2007) pakkunud välja, et mõnel tänapäevasel sordil on hoopis liiga vähe juuri ning nad ei saa selle arvelt piisavalt vett ja muid toitaineid, et maksimeerida saagikust. Sellistel taimedel on raskem elada üle ka ekstreemsemaid kliimatingimusi (Waines & Ehdaie, 2007), näiteks põud või ka kuumalaine, mis leidis aset minu katse ajal. Prognoositakse ka ekstreemsemate kliimatingimuste sagenemist kliimamuutuste tõttu (Allan *et al.*, 2021; Pörtner *et al.*, 2022). Selline käitumine võib olla tekkinud kaudselt, traditsioonilise aretamise tulemusel või viidata hoopis grupivaliku ilmingule, kus taim soovib jätta rohkem toitaineid mulda järgmisele põlvkonnale. On raske öelda, kas juurte vähesus võis olla oluline faktor ka minu katses, kuid see on kindlasti asi, mida tasub silmas pidada. Waines ja Ehdaie (2007) on ka arutlenud, et erinevatel lõimistel ning sõltuvalt sellest, kuidas taim saab oma vee, võib saagikuse maksimeerimiseks kõige efektiivsem juurestik varieeruda. Samuti on ka juurte vähesuse aspekt väga vähe uuritud. Need

on veel ühed põhjused, miks juurearetusega tuleks põhjalikumalt tegelema hakata. Juurearetus võib potentsiaalselt tõsta saagikust või aidata saada jälile probleemile, mis piirab praegu maksimaalse saagikuse saamist (Waines & Ehdaie, 2007).

4.2 Järeldused

Nähes, et mõnel sordil (eriti ilmne odra sortidel) on suurema viljasaagi saamiseks kasulik üks tunnus ja teisel teine, võiks mõelda ka nende omaduste liitmisele, et saada veel parema juurkäitumisega sort. Odra juurekasvataja näitas kõrget vastupidavust suuremale tihedusele ja kõrget saagitootlikkust nendes tingimustes. Saaki investeerija ja keskmise käitumisega odra sordid seevastu näitasid kõrgemat naabritolerantsi ning suuremat koostöövõimet, kuna keskmisel kasvutihedusel oli fokaaltaime juuretoodang endiselt madalam kui juurekasvatajal, kandes saaki investeerija puhul ka rohkem saaki. Juurte aretusega pole senini teadlikult tegeletud (Anten & Vermeulen, 2016) ning siin on palju rakendamata potentsiaali (Herder *et al.*, 2010; Kong *et al.*, 2014; Lynch, 2007; Rogers & Benfey, 2015), tõstmaks põldude saagikust samal maa-alal. Samuti on näidatud, et juured on kaudse aretuse käigus juba muutunud (Zhu *et al.*, 2019). Viimast muutust seostatakse ka kaudse grupivaliku ning tihedama külviiga (Duvick & Cassman, 1999; Zhu *et al.*, 2019). Seda, kas teatud sortidel on juba praegu liiga vähe juuri või võiks neid veelgi vähendada ning kuidas vältida juurte ületootmist konkurentsi tulemusena, tuleks veel edasi uurida. Juurte aretus ja vaatlemine on vägagi tehtav, vaatamata sellele, et läheb tarvis natuke teistsugust lähenemist.

Kaer on ka põllumajanduslikult noorem (Kaer, 2023; Oder, 2023) ning vähemtähtis liik kui oder (Ritchie *et al.*, 2023). See tähendab, et kaera aretamisega on tõenäoliselt ka vähem tegeletud (J. P. Murphy & Hoffman, 1992; D. Stewart & McDougall, 2014). See omakorda võib olla põhjus, miks olulisi seoseid leiti rohkem just odra puhul. Küll aga ei tasuks kaera maha kanda, kuna liigi väärtust on hakatud taasavastama (Paudel *et al.*, 2021; Sang & Chu, 2017) ning teda kasvatatakse Eestis järjest rohkem (Ritchie *et al.*, 2023). Oletan, et edasise aretustööga nii maapealsete generatiivsete organite puhul kui ka juurte aretustööga on võimalik kaera potentsiaali põllumajanduslikult olulise teraviljana oluliselt tõsta.

Kui vaadata tulemusi, siis on näha, et odra keskmise tootlikkusega sort ja saaki investeeriv sort kippsid käituma üksteisele sarnaselt ning juurtesse investeeriv sort käitus kohati neile vastupidiselt. Juurtesse investeeriv odrasort Anni on sort, millega võrreldakse uusi aretatavaid sorte (*Sortide üldtendentside analüüs, 2023*). Oma tulemuste põhjal soovitaksin ka sordiaretajatel teha konkurentsikatseid oma etalonsortidega, et kontrollida, ega tegemist pole väga erandlikult käituva juhtumiga.

Olen korduvalt maininud konkurentsust ja plastilisust. Algselt sai katsesse võetud juuretootjaliik valitud, kuna ootasid tugevalt konkureerivat liiki. Mingis aspektis on juuretootja hea konkurent küll, kuid töö tulemusena arvan, et tegelikkus on nüansirikkam. Parem viis oleks käsitleda eraldi mingi tunnuse plastilisust ja vaadata, missuguse potentsiaalse edu see võiks taimetele teatud situatsioonis anda. Taim pole tingimata tugev konkureerija, vaid hea konkurent soodsates oludes, kus taim saab efektiivselt ära kasutada oma plastilisi omadusi.

Kokkuvõte

Vajadus toota rohkem saaki samalt maa-alalt on järjest akuutsem probleem. Maailma rahvastik on suure kiirusega kasvamas ning meetodid, mis senini on aidanud üha suurema nõudlusega sammu pidada, jäävad erinevatel põhjustel vajaka. Ühe võimaliku lahendusena võiks laiendada taimearetuse fookust taime maapealsetelt osadelt ka maa-alustele osadele. Nimelt on taime juuri vähe uuritud ning nende aretamine on olnud minimaalne. Samas on juurte näol tegu olulise osaga taimest, mis mõjutab saagi tootmise efektiivsust. On varasemaid uurimusi (ka üks minu enda kaasautorlusega), mis viitavad lõivsuhtele taime juuretoodangu ja saagikuse vahel, seda eriti naabertaime tajumisel, mis viib madalama saagikuseni.

Järjena minu bakalaureusetööle viidi läbi katse uurimaks odra- ja kaerataimede kasvutiheduse mõju juurtetoodangule ning saagikusele liigiti ja sorditi. Bakalaureusetöö katse tulemustena leiti oluline lõivsuhe juurte toodangu ning saagikuse vahel. Sellest inspireerituna valiti käesolevasse katsesse välja mõlemast liigist sordid, kes bakalaureusetöö katses vastavalt kas investeerisid juurtesse või saagikusse ning üks sort vahepealsete omadustega. Sorte kasvatati kolmel eri tihedusel: üksik taim potis, neli taime potis (hõre töötlus) ja 19 taime potis (tihe töötlus). Mõõdeti nii fokaaltaime (poti keskele külvatud taime) kui ka kogu poti kollektiivset seemnesaaki, võsu ja juurte biomassi ning taime kõrgust. Lisaks mõõdeti fokaaltaime puhul ka tema juurte pikkus.

Tulemustest ilmnas, et sortide generatiivsete organite kasv erineb sortidel ka üksi kasvades. Lisaks leiti, et odra puhul juurtesse investeeriva sordi puhul vallandas suurema juurte tootmise konkurents (kasvutiheduse suurenemine), mis tagas sellele sordile ka suurema saagikuse ning ka suurema koristusindeksi suurel tihedusel. Kaera puhul sellist tulemust ei leitud. Kaera puhul ainsaks statistiliselt oluliseks sisukaks tulemuseks osutus fokaaltaime kõrgus, mis juurtesse investeeriva sordi puhul oli oluliselt kõrgem ülejäänud kahest sordist, viidates suuremale konkurentsivõimele.

Sellised tulemused viitavad liikide ja sortide eri omadustele juurte ja saagi tootmisele eri kasvutihedustel. Võib arutleda, kas tegu on konkurentsi või hoopis suure plastilisusega juuretoodangu osas. Samuti võib edasise teadustöö käigus mõtiskleda, kas praeguse sordiaretuse käigus pole kogemata aretatud teatud sortide juuri juba liiga väikseseks, nii et nad ei saa mullast piisavalt toitaineid ja vett saagikuse maksimeerimiseks.

Töö tulemused näitavad, et kuna sortide juurkäitumised ja nendest tulenev saagitoodang on niivõrd erinevad, siis potentsiaal aretamiseks ning paremate tunnuste kombineerimiseks on suur. Selleks, et aretus oleks efektiivne, tuleb juuri üldiselt rohkem uurida. Edasise aretustöö tulemusena oleks võimalik aretada kasvukohale või tihedusele sobivama juurkäitumisega sorte, mis võimaldaksid saada samalt maa-alalt rohkem saaki. See omakorda oleks kasvava toidunõudlusega sammu pidamisel suureks abiks.

Summary

The need to produce more crops from the same area of land is an age-old and increasingly acute problem. The population of the world is growing expeditiously, and the methods that have helped to keep pace with demand so far have been rendered unsatisfactory for various reasons. As one possible solution, the focus of plant breeding could be expanded from just the above-ground traits to underground traits. Very few studies have been conducted in regards to plant roots and their breeding has been minimal; nevertheless, they are a very important part of the plant that affects the efficiency of crop production. Previous research (including one with my own co-authorship) suggests a trade-off between a plant's root production and yield, on the condition that a neighbouring plant is detected, leading to lower yields from the plant.

As a follow-up to my bachelor's thesis, an experiment was conducted on the effect of the growth density of barley and oat plants on root production and yield by species and cultivar. Therefore, a cultivar was selected from both species, which respectively either invested in the root growth or in the yield. In addition, one cultivar whose root and yield production would not lean towards either extreme was chosen. The varieties were grown at three different densities: single plant in a pot, four plants in a pot (sparse treatment) and 19 plants in a pot (dense treatment). The focal plant's (plant sown in the centre of the pot) and whole pot's collective seed yield, shoot and root biomass and plant height were measured. Moreover, the length of the roots of the focal plant was measured.

Results indicate that the growth of the generative organs of the cultivars also differs when grown alone. Additionally, the barley cultivar that invested in roots triggered a higher root production competition (increase in plant density), which also gave this cultivar a higher yield as well as a higher harvest index at high density. No such result was found in the case of oats. For oats, the only statistically significant and interesting result was the height of the focal plant, which was significantly higher for the root-investing cultivar than for the other two, indicating greater competitiveness.

Such results indicate different characteristics of species and cultivar for root and crop production at different plant densities. It is debatable whether it is a matter of competition or rather of high plasticity in root production. One can also wonder if current plant breeding has inadvertently bred

the roots of certain varieties to already be too small, which leads them to not receive enough nutrients and water from the soil to maximize yield.

The results of the experiment also show that since rooting behaviours and resulting crop production of the varieties are vastly different, there is a lot of potential for breeding and combining better traits. Thus, for the breeding to be more effective, plant roots need to be studied more in general. As a result, it would be possible to breed varieties with root behaviour more suitable for the specific place of growth or density, which would hopefully lead to more yield from the same area of land. This, in turn, would be of great help in keeping up with the growing food demand.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajat Susanna Vainu, kes oli suureks abiks töö teema ja katse väljamõtlemisel ning teostamisel. Tänu tema tagasisidele ja toetusele valmis töö väga sujuvalt. Lisaks tänan professor Kristjan Zobelit, kes andis head nõu katse väljatöötamisel ning andmeanalüüsi faasis. Viimaks tänan Elo Venti ning Laura Maria Kulli, kes olid 2021 aasta suvel abis taimekastjatena ning Anneli Annusveri, Amanda Poopuud ja Anneliis Read keelekorrektuuri eest.

Kasutatud materjalid

- Abakumova, M., Zobel, K., Lepik, A., & Semchenko, M. (2016). Plasticity in plant functional traits is shaped by variability in neighbourhood species composition. *New Phytologist*, *211*(2), 455–463.
- Aizen, M. A., Garibaldi, L. A., & Harder, L. D. (2022). *Myth and reality of a global crisis for agricultural pollination*.
- Akemo, M. C., Regnier, E. E., & Bennett, M. A. (2000). Weed suppression in spring-sown rye (*Secale cereale*)–pea (*Pisum sativum*) cover crop mixes. *Weed Technology*, *14*(3), 545–549.
- Al-Babili, S., & Beyer, P. (2005). Golden Rice–five years on the road–five years to go? *Trends in Plant Science*, *10*(12), 565–573.
- Allan, R. P., Hawkins, E., Bellouin, N., & Collins, B. (2021). *IPCC, 2021: Summary for Policymakers*.
- Anten, N. P., & Vermeulen, P. J. (2016). Tragedies and crops: Understanding natural selection to improve cropping systems. *Trends in Ecology & Evolution*, *31*(6), 429–439.
- Asseng, S., Guarin, J. R., Raman, M., Monje, O., Kiss, G., Despommier, D. D., Meggers, F. M., & Gauthier, P. P. (2020). Wheat yield potential in controlled-environment vertical farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(32), 19131–19135.
- Baik, B.-K., & Ullrich, S. E. (2008). Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *Journal of Cereal Science*, *48*(2), 233–242.
- Baillie, J., & Zhang, Y.-P. (2018). Space for nature. In *Science* (Vol. 361, Issue 6407, pp. 1051–1051). American Association for the Advancement of Science.
- Baldwin, J. (1976). Competition for plant nutrients in soil; a theoretical approach. *The Journal of Agricultural Science*, *87*(2), 341–356.
- Ballaré, C., Scopel, A., & Sánchez, R. (1991). Photocontrol of stem elongation in plant neighbourhoods: Effects of photon fluence rate under natural conditions of radiation. *Plant, Cell & Environment*, *14*(1), 57–65.

- Bansod, B., Singh, R., Thakur, R., & Singhal, G. (2017). A comparison between satellite based and drone based remote sensing technology to achieve sustainable development: A review. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, *111*(2), 383–407.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, *67*(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Beyer, P. (2010). Golden Rice and ‘Golden’ crops for human nutrition. *New Biotechnology*, *27*(5), 478–481.
- Biernaskie, J. M. (2022). Kin selection theory and the design of cooperative crops. *Evolutionary Applications*, *15*(10), 1555–1564.
- Borger, C., Hashem, A., & Powles, S. (2016). Manipulating crop row orientation and crop density to suppress *Lolium rigidum*. *Weed Research*, *56*(1), 22–30.
- Borger, C. P. D., Hashem, A., & Pathan, S. (2010). Manipulating Crop Row Orientation to Suppress Weeds and Increase Crop Yield. *Weed Science*, *58*(2), 174–178. <https://doi.org/10.1614/WS-09-094.1>
- Bot, G. P. A. (2001). Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on energy saving. *Computers and Electronics in Agriculture*, *30*(1), 151–165. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00162-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00162-9)
- Burczyk, J., Adams, W., Birkes, D., & Chybicki, I. (2006). Using genetic markers to directly estimate gene flow and reproductive success parameters in plants on the basis of naturally regenerated seedlings. *Genetics*, *173*(1), 363–372.
- Cabal, C. (2022). Root tragedy of the commons: Revisiting the mechanisms of a misunderstood theory. *Frontiers in Plant Science*, *13*.
- Cabal, C., Martínez-García, R., de Castro Aguilar, A., Valladares, F., & Pacala, S. W. (2020). The exploitative segregation of plant roots. *Science*, *370*(6521), 1197–1199.

- Cahill, J. F., McNickle, G. G., Haag, J. J., Lamb, E. G., Nyanumba, S. M., & Clair, C. C. S. (2010). Plants integrate information about nutrients and neighbors. *Science*, *328*(5986), 1657–1657.
- Callaway, R. M. (2002). The detection of neighbors by plants. *Trends in Ecology & Evolution*, *17*(3), 104–105.
- Campbell, D. R. (2000). Experimental tests of sex-allocation theory in plants. *Trends in Ecology & Evolution*, *15*(6), 227–232.
- Carroll, S. P., Jørgensen, P. S., Kinnison, M. T., Bergstrom, C. T., Denison, R. F., Gluckman, P., Smith, T. B., Strauss, S. Y., & Tabashnik, B. E. (2014). Applying evolutionary biology to address global challenges. *Science*, *346*(6207), 1245993.
- Casper, B. B., & Jackson, R. B. (1997). Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *28*(1), 545–570.
- Cousens, R. (1985). A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology*, *107*(2), 239–252.
- Cuhra, M. (2015). Review of GMO safety assessment studies: Glyphosate residues in Roundup Ready crops is an ignored issue. *Environmental Sciences Europe*, *27*(1), 1–14.
- Damgaard, C. (1999). A test of asymmetric competition in plant monocultures using the maximum likelihood function of a simple growth model. *Ecological Modelling*, *116*(2–3), 285–292.
- de Groot, W. J., Flannigan, M. D., & Cantin, A. S. (2013). Climate change impacts on future boreal fire regimes. *Forest Ecology and Management*, *294*, 35–44.
- Denison, R. F. (2011). Past evolutionary tradeoffs represent opportunities for crop genetic improvement and increased human lifespan. *Evolutionary Applications*, *4*(2), 216–224.
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, *361*(6405), 916–919.

- Devi, G., Sowmiya, N., Yasoda, K., Muthulakshmi, K., & Balasubramanian, K. (2020). Review on application of drones for crop health monitoring and spraying pesticides and fertilizer. *J. Crit. Rev*, 7(6), 667–672.
- Donald, C. t. (1968). The breeding of crop ideotypes. *Euphytica*, 17(3), 385–403.
- Duvick, D. N., & Cassman, K. G. (1999). Post–green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Science*, 39(6), 1622–1630.
- Ekroos, J., Kleijn, D., Batáry, P., Albrecht, M., Báldi, A., Blüthgen, N., Knop, E., Kovács-Hostyánszki, A., & Smith, H. G. (2020). High land-use intensity in grasslands constrains wild bee species richness in Europe. *Biological Conservation*, 241, 108255.
- Ellstrand, N. C. (1984). Multiple paternity within the fruits of the wild radish, *Raphanus sativus*. *The American Naturalist*, 123(6), 819–828.
- European Parliament, Council of the European Union, European Commission, (2021).
Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the sustainable use of plant protection products and amending Regulation (EU) 2021/2115
- Falster, D. S., & Westoby, M. (2003). Plant height and evolutionary games. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(7), 337–343.
- Fang, S., Clark, R. T., Zheng, Y., Iyer-Pascuzzi, A. S., Weitz, J. S., Kochian, L. V., Edelsbrunner, H., Liao, H., & Benfey, P. N. (2013). Genotypic recognition and spatial responses by rice roots. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(7), 2670–2675.
- Fang, Y., Liu, L., Xu, B.-C., & Li, F.-M. (2011). The relationship between competitive ability and yield stability in an old and a modern winter wheat cultivar. *Plant and Soil*, 347(1–2), 7–23.
- Fantke, P., Friedrich, R., & Jolliet, O. (2012). Health impact and damage cost assessment of pesticides in Europe. *Environment International*, 49, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.08.001>

- FAO. 2022. Pesticides use, pesticides trade and pesticides indicators – Global, regional and country trends, 1990–2020. FAOSTAT Analytical Briefs, no. 46. Rome.
<https://doi.org/10.4060/cc0918en>
- Faralli, M., & Lawson, T. (2020). Natural genetic variation in photosynthesis: An untapped resource to increase crop yield potential? *The Plant Journal*, *101*(3), 518–528.
- Feil, B. (1992). Breeding Progress in Small Grain Cereals—A Comparison of Old and Modern Cultivars. *Plant Breeding*, *108*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1992.tb00093.x>
- Fischer, G., Shah, M., Van Velthuizen, H., & Nachtergaele, F. O. (2001). *Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century*.
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression* (Third). Sage.
<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Freckleton, R., & Watkinson, A. (2001). Asymmetric competition between plant species. *Functional Ecology*, *15*(5), 615–623.
- Gause, G. F. (2019). *The struggle for existence: A classic of mathematical biology and ecology*. Courier Dover Publications.
- Gersani, M., Brown, J. S., O'Brien, E. E., Maina, G. M., & Abramsky, Z. (2001). Tragedy of the commons as a result of root competition. *Journal of Ecology*, *89*(4), 660–669.
- Giraldo, P., Benavente, E., Manzano-Agugliaro, F., & Gimenez, E. (2019). Worldwide research trends on wheat and barley: A bibliometric comparative analysis. *Agronomy*, *9*(7), 352.
- Givnish, T. J. (1982). On the adaptive significance of leaf height in forest herbs. *The American Naturalist*, *120*(3), 353–381.
- Grime, J. P. (2006). *Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties*. John Wiley & Sons.
- Grube, A., Donaldson, D., Kiely, T., & Wu, L. (2011). Pesticides industry sales and usage. *US EPA, Washington, DC*.

- Gürel, F., Öztürk, Z. N., Uçarlı, C., & Rosellini, D. (2016). Barley genes as tools to confer abiotic stress tolerance in crops. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 1137.
- Hedden, P. (2003). The genes of the Green Revolution. *TRENDS in Genetics*, *19*(1), 5–9.
- Herder, G. D., Isterdael, G. V., Beeckman, T., & Smet, I. D. (2010). The roots of a new green revolution. *Trends in Plant Science*, *15*(11), 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.08.009>
- Hintze, A., Staudacher, J., Gelhar, K., Pothmann, A., Rasch, J., & Wildegger, D. (2020). Group-level selection avoids the tragedy of the commons. *ArXiv Preprint ArXiv:2004.11124*.
- Hoffman, L. A. (1995). World production and use of oats. In *The oat crop: Production and utilization* (pp. 34–61). Springer.
- Huygens, D., Saveyn, H., Tonini, D., Eder, P., & Delgado Sancho, L. (2019). Technical proposals for selected new fertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009): Process and quality criteria, and assessment of environmental and market impacts for precipitated phosphate salts & derivatives, thermal oxidation materials & derivatives and pyrolysis & gasification materials. *Publications Office of the European Union*.
- Jackson, W., & Piper, J. (1989). The necessary marriage between ecology and agriculture. *Ecology*, *70*(6), 1591–1593.
- Jadhav, S., Lutz, S., Ghorpade, V., & Salunkhe, D. (1998). Barley: Chemistry and value-added processing. *Critical Reviews in Food Science*, *38*(2), 123–171.
- Kaer. (2023). [Entsüklopeedia]. Eesti Entsüklopeedia. Salvestatud 25. mai 2023, <http://entsyklopeedia.ee/artikkel/kaer3>
- Khush, G. S. (1999). Green revolution: Preparing for the 21st century. *Genome*, *42*(4), 646–655.
- Kiær, L. P., Weisbach, A. N., & Weiner, J. (2013). Root and shoot competition: A meta-analysis. *Journal of Ecology*, *101*(5), 1298–1312.

- Kong, X., Zhang, M., Smet, I. D., & Ding, Z. (2014). Designer crops: Optimal root system architecture for nutrient acquisition. *Trends in Biotechnology*, *32*(12), 597–598.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.09.008>
- Krimbas, C. B. (2004). On fitness. *Biology and Philosophy*, *19*, 185–203.
- Kristensen, L., Olsen, J., & Weiner, J. (2008). Crop density, sowing pattern, and nitrogen fertilization effects on weed suppression and yield in spring wheat. *Weed Science*, *56*(1), 97–102.
- Kumar, R., Singh, M. P., Kumar, P., & Singh, J. P. (2015). Crop Selection Method to maximize crop yield rate using machine learning technique. *2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM)*, 138–145. <https://doi.org/10.1109/ICSTM.2015.7225403>
- Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Al Khourdajie, A., House, J., & others. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*, *16*(7), 073005.
- Lásztity, R. (1998). Oat grain—A wonderful reservoir of natural nutrients and biologically active substances. *Food Reviews International*, *14*(1), 99–119.
- Lee, E., & Tollenaar, M. (2007). Physiological basis of successful breeding strategies for maize grain yield. *Crop Science*, *47*, S-202.
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors*, *18*(8). <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Lin, B. B. (2011). Resilience in agriculture through crop diversification: Adaptive management for environmental change. *BioScience*, *61*(3), 183–193.
- Lippert, C., Feuerbacher, A., & Narjes, M. (2021). Revisiting the economic valuation of agricultural losses due to large-scale changes in pollinator populations. *Ecological Economics*, *180*, 106860.

- Lu, P., Jiang, B., & Weiner, J. (2020). *Chapter Three—Crop spatial uniformity, yield and weed suppression* (D. L. Sparks, Ed.; Vol. 161, pp. 117–178). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.12.003>
- Lynch, J. P. (2007). Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, *55*(5), 493–512.
- Maggi, F., Tang, F. H., la Cecilia, D., & McBratney, A. (2019). PEST-CHEMGRIDS, global gridded maps of the top 20 crop-specific pesticide application rates from 2015 to 2025. *Scientific Data*, *6*(1), 170.
- Maina, G. G., Brown, J. S., & Gersani, M. (2002). Intra-plant versus inter-plant root competition in beans: Avoidance, resource matching or tragedy of the commons. *Plant Ecology*, *160*(2), 235–247.
- Marini, M., Caro, D., & Thomsen, M. (2020). The new fertilizer regulation: A starting point for cadmium control in European arable soils? *Science of the Total Environment*, *745*, 140876.
- Marschner, H. (1995). Mineral nutrition of higher plants 2nd edn. *Institute of Plant Nutrition University of Hohenheim: Germany*.
- McNickle, G. G., & Dybzinski, R. (2013). Game theory and plant ecology. *Ecology Letters*, *16*(4), 545–555.
- Metz, J. A. J. (2006). Fitness.
- Mitchell, C. A. (2022). History of Controlled Environment Horticulture: Indoor Farming and Its Key Technologies. *HortScience*, *57*(2), 247–256. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16159-21>
- Mobley, M. L., Kruse, A. S., & McNickle, G. G. (2022). *Pisum sativum* has no competitive responses to neighbors: A case study in (non) reproducible plant biology. *Plant Direct*, *6*(10), e411.
- Montazeaud, G., Rousset, F., Fort, F., Violle, C., Fréville, H., & Gandon, S. (2020). Farming plant cooperation in crops. *Proceedings of the Royal Society B*, *287*(1919), 20191290.
- Moseley, W. G. (2017). A risky solution for the wrong problem: Why GMOs won't feed the hungry of the world. *Geographical Review*, *107*(4), 578–583.
- Murphy, G. P., & Dudley, S. A. (2007). Above-and below-ground competition cues elicit independent responses. *Journal of Ecology*, *95*(2), 261–272.

- Murphy, J. P., & Hoffman, L. (1992). The origin, history, and production of oat. *Oat Science and Technology*, 33, 1–28.
- Novoplansky, A. (2019). What plant roots know? *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 92, 126–133.
- Nye, P. H., & Tinker, P. B. (1977). *Solute movement in the soil-root system* (Vol. 4). Univ of California Press.
- O'Brien, E. E., Gersani, M., & Brown, J. S. (2005). Root proliferation and seed yield in response to spatial heterogeneity of below-ground competition. *New Phytologist*, 168(2), 401–412.
- Oder. (2023). [Entsüklopeedia]. Eesti Entsüklopeedia. Salvestatud 25. mai 2023, <http://entsyklopeedia.ee/artikkel/oder2>
- Oksanen, L. (1990). 20—Predation, Herbivory, and Plant Strategies Along Gradients of Primary Productivity. In J. B. Grace & D. Tilman (Eds.), *Perspectives on Plant Competition* (pp. 445–474). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-294452-9.50024-2>
- Oldroyd, G. E., & Leyser, O. (2020). A plant's diet, surviving in a variable nutrient environment. *Science*, 368(6486).
- Olsen, J., Kristensen, L., Weiner, J., & Griepentrog, H. (2005). Increased density and spatial uniformity increase weed suppression by spring wheat. *Weed Research*, 45(4), 316–321.
- Osborne, M. J. (2004). *An introduction to game theory* (Vol. 3). Oxford university press New York.
- Ostrom, E. (2008). Tragedy of the commons. *The New Palgrave Dictionary of Economics*, 2, 1–4.
- Pärnpuu, P. (2022, March 24). Eesti meteoroloogia aastaraamat 2021. Aasta kohta | . Keskkonnaagentuur / ILM. <https://www.ilmateenistus.ee/2022/03/eesti-meteoroloogia-aastaraamat-2021-aasta-kohta/>
- Passioura, J. B. (1983). Roots and Drought Resistance. In J. F. STONE & W. O. WILLIS (Eds.), *Plant production and management under drought conditions* (Vol. 12, pp. 265–280). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42214-9.50025-9>

- Paudel, D., Dhungana, B., Caffè, M., & Krishnan, P. (2021). A review of health-beneficial properties of oats. *Foods*, *10*(11), 2591.
- Pelletier, N., Audsley, E., Brodt, S., Garnett, T., Henriksson, P., Kendall, A., Kramer, K. J., Murphy, D., Nemecek, T., & Troell, M. (2011). Energy intensity of agriculture and food systems. *Annual Review of Environment and Resources*, *36*, 223–246.
- Pennisi, E. (2018). *Restoring lost grazers could help blunt climate change*. American Association for the Advancement of Science.
- Pérez-Ramírez, J. (2007). Prospects of N₂O emission regulations in the European fertilizer industry. *Applied Catalysis B: Environmental*, *70*(1), 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.11.019>
- Pimentel, D. (2005). Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. *Environment, Development and Sustainability*, *7*, 229–252.
- Pimentel, D., Acquay, H., Biltonen, M., Rice, P., Silva, M., Nelson, J., Lipner, V., Giordano, S., Horowitz, A., & D'Amore, M. (1992). Environmental and economic costs of pesticide use. *BioScience*, *42*(10), 750–760.
- Plaas, E., Meyer-Wolfarth, F., Banse, M., Bengtsson, J., Bergmann, H., Faber, J., Potthoff, M., Runge, T., Schrader, S., & Taylor, A. (2019). Towards valuation of biodiversity in agricultural soils: A case for earthworms. *Ecological Economics*, *159*, 291–300.
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., & others. (2022). *IPCC, 2022: Summary for policymakers*.
- Potrykus, I. (2001). The golden rice tale. *Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant*, *37*, 93–100.
- Prosekov, A. Y., & Ivanova, S. A. (2018). Food security: The challenge of the present. *Geoforum*, *91*, 73–77.
- Rajagopal, D., & Zilberman, D. (2007). Review of Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels. *The World Bank, Policy Research Working Paper Series*, *4*. <https://doi.org/10.1561/07000000029>

- Richards, R. A., Rebetzke, G. J., Condon, A. G., & van Herwaarden, A. F. (2002). Breeding Opportunities for Increasing the Efficiency of Water Use and Crop Yield in Temperate Cereals. *Crop Science*, 42(1), 111–121. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1110>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2023). Agricultural production. *Our World in Data*.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2013). Land Use. *Our World in Data*.
- Rogers, E. D., & Benfey, P. N. (2015). Regulation of plant root system architecture: Implications for crop advancement. *Current Opinion in Biotechnology*, 32, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.11.015>
- Ryan, M. G., & Yoder, B. J. (1997). Hydraulic limits to tree height and tree growth. *Bioscience*, 47(4), 235–242.
- Sabzevari, S., & Hofman, J. (2022). A worldwide review of currently used pesticides' monitoring in agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 812, 152344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152344>
- Sands, R., Westcott, P., Price, J. M., Beckman, J., Leibtag, E., Lucier, G., McBride, W. D., McGranahan, D., Morehart, M., Roeger, E., & others. (2011). *Impacts of higher energy prices on agriculture and rural economies*.
- Sang, S., & Chu, Y. (2017). Whole grain oats, more than just a fiber: Role of unique phytochemicals. *Molecular Nutrition & Food Research*, 61(7), 1600715.
- Santos-del-Blanco, L., Bonser, S., Valladares, F., Chambel, M., & Climent, J. (2013). Plasticity in reproduction and growth among 52 range-wide populations of a Mediterranean conifer: Adaptive responses to environmental stress. *Journal of Evolutionary Biology*, 26(9), 1912–1924.
- Savci, S. (2012). An agricultural pollutant: Chemical fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(1), 73.

- Schmitz, J., Hahn, M., & Brühl, C. A. (2014). Agrochemicals in field margins—An experimental field study to assess the impacts of pesticides and fertilizers on a natural plant community. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *193*, 60–69.
- Schulz, R., Thiere, G., & Dabrowski, J. M. (2002). A combined microcosm and field approach to evaluate the aquatic toxicity of azinphosmethyl to stream communities. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, *21*(10), 2172–2178.
- Schwinning, S., & Weiner, J. (1998). Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants. *Oecologia*, *113*(4), 447–455.
- Semchenko, M., Hutchings, M. J., & John, E. A. (2007). Challenging the tragedy of the commons in root competition: Confounding effects of neighbour presence and substrate volume. *Journal of Ecology*, *95*(2), 252–260.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P. S., Handa, N., Kohli, S. K., Yadav, P., Bali, A. S., Parihar, R. D., & others. (2019). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, *1*, 1–16.
- Sharpley, A. N., McDowell, R. W., & Kleinman, P. J. (2001). Phosphorus loss from land to water: Integrating agricultural and environmental management. *Plant and Soil*, *237*, 287–307.
- Siddique, K., Belford, R., & Tennant, D. (1990). Root: Shoot ratios of old and modern, tall and semi-dwarf wheats in a Mediterranean environment. *Plant and Soil*, *121*(1), 89–98.
- Silvertown, J. (2008). The evolutionary maintenance of sexual reproduction: Evidence from the ecological distribution of asexual reproduction in clonal plants. *International Journal of Plant Sciences*, *169*(1), 157–168.
- Skevas, T., Lansink, A. G. J. M. O., & Stefanou, S. E. (2013). Designing the emerging EU pesticide policy: A literature review. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, *64–65*, 95–103.
- <https://doi.org/10.1016/j.njas.2012.09.001>

- Smith, J. M. (1982). *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge university press.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., & others. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 789–813.
- Smyčka, J., & Herben, T. (2017). Phylogenetic patterns of tragedy of commons in intraspecific root competition. *Plant and Soil*, 417, 87–97.
- Sortide üldtendentside analüüs. (2023). Salvestatud 25. mai 2023, <https://seemneliit.ee/wp-content/uploads/2015/11/uuring-2014-sordid-ultdentsid.pdf>
- Stewart, D., & McDougall, G. (2014). Oat agriculture, cultivation and breeding targets: Implications for human nutrition and health. *British Journal of Nutrition*, 112(S2), S50–S57.
- Stewart, W., Dibb, D., Johnston, A., & Smyth, T. (2005). The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy Journal*, 97(1), 1–6.
- Stotz, G. C., Salgado-Luarte, C., Escobedo, V. M., Valladares, F., & Gianoli, E. (2021). Global trends in phenotypic plasticity of plants. *Ecology Letters*, 24(10), 2267–2281.
- Stringfield, G. (1964). Objectives in corn improvement. In *Advances in Agronomy* (Vol. 16, pp. 101–137). Elsevier.
- Suviteravili: Seemned | Baltic Agro. (2023). Salvestatud 25. mai 2023, <https://www.balticagro.ee/seemned/suviteravili>
- Tilman, D., Isbell, F., & Cowles, J. M. (2014). Biodiversity and ecosystem functioning. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45, 471–493.
- Trivedi, M., Singh, R., Shukla, M., & Tiwari, R. K. (2016). GMO and food security. In *Ecofriendly pest management for food security* (pp. 703–726). Elsevier.
- Ullrich, S. E. (2010). *Barley: Production, improvement, and uses* (Vol. 12). John Wiley & Sons.

- United Nations Environment Programme, W. H. O., Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *Chapter 2/12: Status and Trends of Pesticide Use*.
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/40351>
- Vain, S., Tamm, I., Tamm, Ü., Annusver, M., & Zobel, K. (2023). Negative relationship between topsoil root production and grain yield in oat and barley. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 349, 108467.
- Veroustraete, F. (2015). The rise of the drones in agriculture. *EC Agriculture*, 2(2), 325–327.
- Waines, J. G., & Ehdaie, B. (2007). Domestication and crop physiology: Roots of green-revolution wheat. *Annals of Botany*, 100(5), 991–998.
- Watkiss, P., Downing, T., Handley, C., & Butterfield, R. (2005). The impacts and costs of climate change. *Brussels, European Commission DG Environment*, 19.
- Weiner, J. (2003). Ecology—the science of agriculture in the 21st century. *The Journal of Agricultural Science*, 141(3–4), 371–377.
- Weiner, J., Andersen, S. B., Wille, W. K.-M., Griepentrog, H. W., & Olsen, J. M. (2010). Evolutionary Agroecology: The potential for cooperative, high density, weed-suppressing cereals. *Evolutionary Applications*, 3(5–6), 473–479.
- Weiner, J., Griepentrog, H.-W., & Kristensen, L. (2001). Suppression of weeds by spring wheat *Triticum aestivum* increases with crop density and spatial uniformity. *Journal of Applied Ecology*, 784–790.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
<https://ggplot2.tidyverse.org>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*.
- Wilson, J. B. (1988). Shoot competition and root competition. *Journal of Applied Ecology*, 279–296.

Yerlikaya, B. A., Ömezli, S., & Aydoğan, N. (2020). Climate change forecasting and modeling for the year of 2050. *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth*, 109–122.

Younginger, B. S., Sirová, D., Cruzan, M. B., & Ballhorn, D. J. (2017). Is biomass a reliable estimate of plant fitness? *Applications in Plant Sciences*, 5(2), 1600094.

Zhang, D.-Y., Sun, G.-J., & Jiang, X.-H. (1999). Donald's ideotype and growth redundancy: A game theoretical analysis. *Field Crops Research*, 61(2), 179–187.

Zhu, Y.-H., Weiner, J., & Li, F.-M. (2019). Root proliferation in response to neighbouring roots in wheat (*Triticum aestivum*). *Basic and Applied Ecology*, 39, 10–14.

Zilberman, D., Sproul, T., Rajagopal, D., Sexton, S., & Hellegers, P. (2008). Rising energy prices and the economics of water in agriculture. *Water Policy*, 10(S1), 11–21.

Tartu Ülikooli Loodus- ja täppisteaduste valdkonna õppeprodekaanile

Taotlus lõputöö avaldamisele piirangute kehtestamiseks ja lõputöö kaitsmise kinniseks kuulutamiseks

Nimi Mihkel Annusver
Sünniaeg 27.05.1998
Õppekava Bioloogia ja ökoinnovatsioon
Juhendaja Susanna Vain
Lõputöö pealkiri "Kasvutiheduse mõju odra- ja kaerataimede juurtetoodangule ning saagikusele liigiti ja sorditi"

Palun **mitte avaldada** minu lõputööd kuni **01.06.2025**

- teistele isikutele kuuluvate varaliste autoriõiguste tõttu.
- kuna töö sisaldab isikuandmeid, mille avaldamiseks pole andmesubjekti nõusolekut.
- riigisaladuse tõttu.
- ärisaladuse tõttu.
- lõputöö avaldatakse tulevikus teadusartiklina.
- muul põhjusel.

Selgitus (põhjendus, miks taotletakse piiranguid ja miks just selliseks perioodiks):

Palun kuulutada minu **lõputöö kaitsmine kinniseks**.

Selgitus (*põhjendus, miks taotletakse lõputöö kaitsmise kinniseks kuulutamist*):

Taotlusele on lisatud järgmised lisad (*täita juhul, kui taotlusel on lisad, nt äriühingu poolne kinnitus, et töö sisaldab ärisaladust*):

- 1.
- 2.

Kuupäev ja üliõpilase allkiri: 26.05.2023, allkirjastatud digitaalselt

Kuupäev ja juhendaja allkiri: 26.05.2023, allkirjastatud digitaalselt

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mihkel Annusver,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Kasvutiheduse mõju odra- ja kaerataimede juurtetoodangule ning saagikusele liigiti ja sorditi“,

mille juhendaja on Susanna Vain,

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

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, alates **01.06.2025** kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Mihkel Annusver

26.05.2023