

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias (30 EAP)

Põllukultuuride püsivate kahjustuste leidmine Sentinel-2 andmete abil

Vete-Mari Kuningas

Juhendajad:
Prof. Evelyn Uuemaa
Prof. Eve Veromann

Tartu 2026

Annotatsioon

Põllukultuuride püsivate kahjustuste leidmine Sentinel-2 andmete abil

Käesoleva magistritöö eesmärk oli töötada välja Sentinel-2 aegridadel põhinev meetodika püsivalt kahjustunud põllukultuuriga alade tuvastamiseks Eesti põllumajandusmaastikes. Töös kasutati aastate 2017–2024 Sentinel-2 EVI taimkatteindeksi aegridu, mille põhjal loodi erinevate lävenditega mudelid kahjustunud alade leidmiseks. Mudelite kombineerimisel koostati koondmudel, mille abil tuvastati püsivalt kahjustunud põllukultuuridega alad kogu Eestis.

Tulemused näitasid, et kahjustused esinesid sagedamini laugemates ja kõrgema topograafilise niiskuse indeksi (TWI) väärtusega piirkondades ning olid seotud peamiselt liigniiskete gleistunud muldadega. Kokku tuvastati Eestis 957 ha püsivalt kahjustunud põllumajandusalasid, mis moodustas ligikaudu 0,16% analüüsitud põllumajandusmaast. Töö tulemused viitavad sellele, et Sentinel-2 aegridade abil on võimalik automaatselt kaardistada probleemseid põllumajandusalasid kogu Eesti ulatuses ning kasutada saadud infot põllumajandusmaastike kestlikumaks majandamiseks.

Märksõnad: Põllumajandus, Sentinel-2, aegridade analüüs, EVI

CERCS kood: B390 – Taimekasvatus, aiandus, taimekaitsevahendid, taimehaigused, P510 – Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Abstract

Detecting permanent damage to crops using Sentinel-2 data

The objective of this master's thesis was to develop a methodology based on Sentinel-2 time series for identifying permanently degraded cropland areas in Estonian agricultural landscapes. The study utilized Sentinel-2 EVI vegetation indices time series from 2017–2024, based on which models with different thresholds were created to identify damaged areas. By combining the models, a composite model was developed to identify areas with persistently low vegetation growth throughout Estonia.

The results showed that damage occurred more frequently in flatter areas with higher topographic wetness index (TWI) values and was primarily associated with excessively wet clay soils. A total of 957 ha of permanently damaged agricultural areas were identified in Estonia, accounting for approximately 0.16% of the analyzed agricultural land. The results of this study indicate that Sentinel-2 time series can be used to automatically map problematic agricultural areas across the entire territory of Estonia and to utilize the obtained information for more sustainable management of agricultural landscapes.

Keywords: Agriculture, Sentinel-2, time series analysis, EVI

CERCS code: B390 – Crop production, horticulture, plant protection products, plant diseases; P510 – Physical geography, geomorphology, soil science, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Teoreetiline ülevaade.....	7
1.1. Põllumajanduse areng ja intensiivistumine.....	7
1.2. Põllumajanduse intensiivistumise ökoloogilised tagajärjed	8
1.3. Maastikuelemendid põllumajandusmaastikus	9
1.4. Püsivad põllukultuuri kahjustused	11
1.5. Kaugseire kasutamine põllukultuuri kahjustuste hindamisel.....	13
2. Andmed ja meetodika.....	16
2.1. Mudeli väljatöötamine	16
2.1.1. Valideerimis- ning treeningandmete kogumine.....	16
2.1.2. Uurimisalade määramine	17
2.1.3. Põllukultuuri kahjustuste tuvastamine Sentinel-2 andmete põhjal	17
2.1.3. Sentinel-2 andmetel loodud koondmudeli analüüs	18
2.2. Mudeli rakendamine üle Eesti	20
2.2.1. Kogu Eesti prognoosi loomine.....	20
2.2.2. Kogu Eesti mudelite ja koondmudeli visualiseerimine	20
2.2.3. Koondmudeli valideerimine põllumajandustootjate abil.....	21
2.3. Kahjustunud alade potentsiaalsete põhjuste tuvastamine	21
2.3.1. Ruumiliste andmete ettevalmistus ja statistiline analüüs.....	21
2.3.1. Kasutatud tarkvarad ja tehisintellektid.....	22
3. Tulemused ja arutelu	24
3.1. Mudelite ja lävendite mõju kahjustusalade tuvastamisele	24
3.2. Põllukultuuride püsivate kahjustuste ruumiline jaotus Eestis.....	26
3.3. Kahjustunud alade keskkonnaparametrid	27

3.3.1. Kahjustusalade seosed TWI ja nõlvakaldega.....	27
3.3.2. Kahjustunud alade ja mullastiku seos	28
3.4. Põllumajandustootjate hinnang.....	30
4. Järeldused	33
4.1. Tulemuste rakenduslik väärtus	33
4.2. Metoodika piirangud ja edasiarendused.....	33
Kokkuvõte	35
Summary	37
Tänuavaldused.....	39
Kasutatud kirjandus	40
Lisad.....	53
Lisa 1. Mudelite statistilised näitajad.....	53
Lisa 2. Kahjustunud alade jaotus mullatüübi järgi (osakaalud).....	54
Lisa 3. Kahjustunud alade jaotus mullatüübi järgi (pindala)	55

Sissejuhatus

Põllumajandus on viimase sajandi jooksul läbinud ulatusliku intensiivistumise, mille peamiseks eesmärgiks on olnud kasvava rahvastiku toiduga varustamine (Lam, 2025; UN, 2024). Selle protsessi käigus on põllumajandusmaastikud muutunud üha homogeensemaks ning sõltuvus välistest sisenditest, nagu sünteetilised mineraalväetised ja taimekaitsevahendid, on märkimisväärselt kasvanud (Pingali, 2012; Wik et al., 2008). Kuigi intensiivne tootmine on võimaldanud suurendada saagikust, on sellega kaasnenud ka mitmed negatiivsed keskkonnamõjud, sealhulgas elurikkuse vähenemine ning muldade degradeerumine (Kopittke et al., 2019; Newbold et al., 2015; Pereira et al., 2025; Raven & Wagner, 2021; Wik et al., 2008).

Viimastel aastatel on üha enam tähelepanu pööratud põllumajanduse kestlikkuse parandamisele ning maastikupõhiste lahendustele, mis aitaksid samaaegselt säilitada tootlikkust ja toetada ökosüsteemiteenuste toimimist (EU, 2020; Garibaldi et al., 2021; Klerkx & Rose, 2020; Pingali, 2012). Üheks oluliseks lähtepunktiks selliste lahenduste rakendamisel on mitmekesise põllumajandusmaastiku tähtsuse parem mõistmine. Praktikas esineb sageli olukordi, kus osa põllust on püsivalt madalama tootlikkusega kui ülejäänud ala (Layton et al., 2020). Sellised piirkonnad võivad olla tingitud nii mulla omadustest, reljeefist, veerežiimist kui ka ajaloolistest maakasutusmuutritest (Narra et al., 2022; van Bussel et al., 2015; van Ittersum et al., 2013).

Püsivalt madala tootlikkusega alade tuvastamine on oluline mitmel põhjusel. Esiteks võimaldab see põllumajandustootjatel optimeerida sisendite kasutamist ning vähendada majanduslikult ebaefektiivsete alade harimist. Teiseks võivad põllukultuuride püsivate kahjustuste asukohad viidata potentsiaalselt ka mitte toimivale maaparandussüsteemile, mille parandamine aitaks saagikust tõsta. Kolmandaks loob see võimaluse suunata sellised alad alternatiivsetesse kasutusviisidesse, näiteks maastikuelementide rajamiseks, mis toetavad tootjatele olulisi loodusehüvesid (näiteks tolmeldamine, kahjuritõrje, erosiooni tõke), parandavad vee kvaliteeti, suurendavad põllumajandusmaastike mitmekesisust ja toetavad elurikkust. Seetõttu on oluline leida usaldusväärsed meetodid, mis võimaldaksid selliseid alasid süstemaatiliselt ja suurel ruumilisel skaalal kaardistada.

Kaugseire andmed pakuvad selleks olulist võimalust. Satelliitidel põhinevad vegetatsiooniindeksid, nagu normaliseeritud taimkatteindeks NDVI (*The Normalized Difference Vegetation Index*) ja täiustatud taimkatteindeks EVI (*The Enhanced Vegetation Index*), võimaldavad hinnata taimkatte seisundit ajas ja ruumis ning tuvastada põllusiseseid erinevusi (Radočaj et al., 2023). Mitmeaastaste aegridade analüüs loob eeldused eristada ajutisi kahjustusi püsivatest muutritest, mis on seotud keskkonnatingimuste või maastikuliste teguritega. Samas on selliste meetodite rakendamisel mitmeid väljakutseid, sealhulgas sobivate ajaperioodide, lävendite ja valideerimisandmete valik (Košanová et al., 2025).

Käesoleva magistritöö eesmärk on kasutada Sentinel-2 satelliidi andmeid põllukultuuride püsivate kahjustuste tuvastamiseks Eesti põllumajandusmaastikes. Põllukultuuri püsiva kahjustuse all käsitletakse käesolevas töös olukorda, kus samas ruumilises asukohas esineb rohkem kui ühe kasvuperioodi ümbritsevast alast kehvem taimkatte seisund, mis väljendub oluliselt hõredamas või kahjustunud taimestik.

Töö keskne uurimisküsimus on: **kas satelliitkaugseire andmete põhjal on võimalik tuvastada põllukultuuri püsivaid kahjustusi?**

Lisaks sellele selgitakse välja, millised on püsivalt kahjustunud alade peamised ruumilised ja

keskkonnatingimustega seotud tunnused ning kuidas selliste alade kaardistamist võiks rakendada põllumajandusmaastike kestlikumaks majandamiseks ja/või tootlikkuse tõstmiseks.

Töö tulemused aitavad paremini mõista põllumajandusmaastike sisemist heterogeensust ning loovad aluse otsustusvahendite arendamiseks, mis toetavad nii põllumajandustootjate majanduslikke otsuseid kui ka keskkonnahoidlike praktikate rakendamist.

1. Teoreetiline ülevaade

1.1. Põllumajanduse areng ja intensiivistumine

Koos põllumajanduse arenguga on kasvanud ka rahvaarv ning tulevikuproгноoside kohasel võib maailma rahvastik ületada sajandi keskel 10 miljardi inimese piiri (Livi-Bacci, 2025; UN, 2024). Sellega kaasneb ka hinnanguliselt 15% kasv toidu tarbimises (Lam, 2025).

Enne põllumajanduse intensiivistumist toimus toidutootmine väikeste, looduslike tingimustega tihedalt seotud majapidamiste tasandil, mis küll piirasid saagikust, kuid aitasid säilitada maastikulist mitmekesisust ning põllumuldade stabiilsust (Mazoyer & Roudart, 2006). Viimase 50 aasta jooksul on tänu rohelisele revolutsioonile toimunud märkimisväärne põllukultuuride tootlikkuse tõus (Wik et al., 2008). Näiteks on teraviljakultuuride toodang kasvanud ligikaudu kolmekordseks, samal ajal kui haritava maa pindala on suurenenud vaid umbes 30% (Wik et al., 2008). Saagikuse tõus on toimunud tänu põllumajanduse ulatuslikule moderniseermisele, nagu näiteks suurem sünteetiliste mineraalväetiste kasutamine, kiirem ja tõhusam sordiaretus, erasektori investeeringute kasv põllumajandussektoris ning niisutussüsteemide areng (Pingali, 2012). Neid arenguid toetasid nii tehnoloogiline progress kui ka poliitilised ja majanduslikud eesmärgid, mille keskmes oli stabiilse ja kasvava toidutootmise tagamine (Mazoyer & Roudart, 2006).

Selle tulemusena kujunes saagikuse kasv ja majanduslik efektiivsus põllumajanduse keskseteks eesmärkideks, mis tõid kaasa põllumajandusettevõtete struktuurse koondumise, majandatavate maa-alade suurenemise ning põllumajandusmaastike ruumilise ühtlustumise (Stoate et al., 2001; Tilman et al., 2002). Tänapäeval hinnatakse, et ligikaudu 10% jäävabast maismaapinnast on intensiivselt majandatud ning suur osa ülejäänust on vähem intensiivse inimtegevuse kasutuses või inimtegevuse poolt mõjutatud (Arneth et al., 2022).

Jätkusuutliku põllumajanduse loomiseks ning kasvava rahvastiku toitmiseks on suur vajadus uue rohelise revolutsiooni järele (Victor et al., 2024). See hõlmaks suure saagikusega ning stressikindlate sortide aretamist, täppispõllumajanduse võtete rakendamist (eriti olulisel kohal on ressursside efektiivsem kasutamine), jätkuvat erasektori kaasamist, jätkusuutlikku põllumajandust soodustavat poliitikakujundamist ning väiketootjate suuremat kaasamist (Klerkx & Rose, 2020; Pingali, 2012).

Eesti põllumajandusmaa kasutus ja omandisuhted on 20. sajandi jooksul ja 21. sajandi alguses läbi teinud ulatuslikke muutusi, mis on olnud tihedalt seotud poliitiliste ja majanduslike süsteemide vaheldumisega.

Enne Eesti iseseisvumist 1918. aastal oli 58% põllumajandusmaast koondunud baltisaksa mõisnike kätte ning maakasutust iseloomustas suurmajandite domineerimine (Kivistik, 1997; Lillak, 2003; Roosenberg, 2013). Iseseisvumise järel toimunud maareformi tulemusel võõrandas riik mõisamaad ning jagas need väiksemateks taludeks. See suurendas talude arv märkimisväärselt ning kujunes välja väiketaludel põhinev põllumajandusstruktuur (Kivistik, 1997; Virma, 2004).

Nõukogude okupatsiooni ajal riigistati maa ning põllumajandus reorganiseeriti kollektiivseteks suurmajanditeks (kolhoosid ja sovhoosid) (Mander & Palang, 1994; Virma, 2004; Sirendi, 2007). Seda perioodi iseloomustab intensiivne maaharimine ning hulgaline väetiste kasutamine (Astover et al., 2006). Nõukogude perioodi lõpus, 1980. aastatel, ilmnes vajadus suurmajandite ümberstruktureerimiseks ning 1989. aasta taluseadus võimaldas taas väiksemahulise erapõllumajanduse arengut, kuigi maa jäi endiselt riigi omandisse (Lillak, 2003; Virma, 2004;

Jürgenson, 2016).

Pärast Eesti taasiseseisvumist 1991. aastal algas uus maareformi etapp, mille eesmärk oli taastada ajaloolised omandisuhted, minna üle turumajandusele ning suurendada põllumajanduse efektiivsust (Jürgenson, 2016). Reform soodustas esialgu väiketalude teket, kuid aja jooksul ilmsid maa killustumise probleemid, mis olid iseloomulikud ka teistele Kesk- ja Ida-Euroopa riikidele (Dijk, 2003a, 2003b; Hartvigsen, 2014, 2015). Sellest hoolimata on põllumajandusmaa kasutus ajas taas koondunud suuremate tootmisüksuste kätte. Põllumajandustootjad omandavad hajusalt paiknevaid maatükke, mille tulemusel on tekkinud killustunud, kuid samas suure pindalaga majandamisüksused (Maasikamäe et al., 2016).

Tänapäeval on Eesti põllumajandusmaa kasutus kujunenud ajalooliste protsesside koosmõjul: kuigi omandisuhted on valdavalt korrastatud ja põllumajandus toimib turumajanduse tingimustes, on säilinud nii maa killustatus kui ka suundumus suuremate tootmisüksuste poole (Virma, 2004; Jürgenson, 2016). Samal ajal on väiketalude osakaal vähenenud ning põllumajandusmaa koondumine jätkub. Kui 2001. aastal oli keskmise Eesti põllumajandustootja maa suurus 16 ha ning põllumajandusega tegeles üle 55 000 tootja, siis 2020. aastal aga natuke üle 11 000 tootja, kelle keskmine majandavata maa suurus oli 86 ha (Rasva & Jürgenson, 2022). Statistikaameti (2024) koostatud uuringu kohaselt on Eesti põllumajandusmaa pind tootja kohta üks Euroopa suurimaid.

1.2. Põllumajanduse intensiivistumise ökoloogilised tagajärjed

Põllumajanduse intensiivistumine on määratletud kui protsessi mille käigus tootmismaa taimestik ja haldamine muutub. Selle alla kuulub suurte monokultuursete põldude ja agrokemikaalide kasutamine ja töö mehhaniseerimine (Philpott, 2013). Oleme olukorras, kus intensiivne põllumajandus on vajalik selleks, et toita maailma kasvavat rahvastikku vaatamata sellele, et praeguse põllumajandusliku tegevusega kaasneb paratamatult tugev ja peamiselt negatiivne mõju kogu Maale (Newbold et al., 2015; Pereira et al., 2025).

Elurikkuse ja loodusehüvede kadumine ning kliimamuutus on tugevalt seotud põllumajanduse intensiivistumisega (Raven & Wagner, 2021). Mitchell et al (2024) toob oma töös välja, et tegelikult on kõik maismaa- ning merebioomid põllumajanduse intensiivistusest negatiivselt mõjutatud.

Intensiivne põllumajandus kahjustab muldasid, vähendades sealhulgas mullas elavate organismide (näiteks mullaseente ja bakterite) mitmekesisust ning kooslusi (Kopittke et al., 2019; Xue et al., 2022). Samas on mulla tervis kriitiliselt oluline kuna muldadel toodetakse 98,8% inimeste päevastest kaloritest (Kopittke et al., 2019). Monokultuuride kasvatamine suurtel aladel, insektiidid, herbitsiidid, fungitsiidid ning sünteetiliste mineraalväetiste liigne kasutamine ja maastikuelementide eemaldamine põldudelt on toonud kaasa olukorra, kus ka lülialgsete, lindude, imetajate ja kahepaiksete arvukus agroökosüsteemides on drastiliselt vähenenud (Aikawa & Saito, 2023; Albero et al., 2021; de Albuquerque Pereira et al., 2025; Guerrero et al., 2024; Guiller et al., 2022; Raven & Wagner, 2021). Lisaks mõjutab agrokemikaalide intensiivne kasutamine loomade reproduktsiooni võimet, sealhulgas põhjustab ka viljatust (Mohanty, 2024). Kahepaiksete kohta läbiviidud uuring leidis, et tehniliku niisutusega põllumaaadel on kahepaiksetele vähem sobivaid elupaiku mistõttu on sellistel põldudel madala kahepaiksete arvukus ning seal elab ka vähem haruldasi liike kui sademeveest niiskust saavatel põllumaaadel (Albero et al., 2021). Põllumajanduse ümberkujundamine, eelkõige täppispõllumajandusele üleminek, looduslike elupaikade taastamine ja kliimamuutuse mõjude süvenemise vähendamine võivad aidata säilitada veel olemas olevaid liike (Raven & Wagner, 2021).

Põllumajandus sõltub otseselt looduse hüvedest, mis mõjutavad nii saagikust kui ka tootmise pikaajalist kestlikkust (Pereira et al., 2025). Varasemates uuringutes on leitud, et põllumajanduse kestlikkust aitavad parandada mitmekesisemad külvikorrad, tolmeldajate ja röövtoiduliste lüljalgsete elupaikade suurendamine põllumajandusmaastikus ning karjatamise kasutamine mullaviljakuse taastamiseks (Dawson et al., 2019; Gebhardt et al., 2023; Raven & Wagner, 2021). Samas on näidatud, et väga suurte ja intensiivselt majandatud põllumajandusalade puhul ei pruugi isegi sidusad looduslikud alad pakkuda piisavat tuge looduse hüvede toimimiseks vajalikele liikidele (Balestrieri et al., 2019; Gebhardt et al., 2023; Morgado et al., 2020). Gebhardt et al (2023) leidsid siiski, et looduslike elementide lisamine suurendab just kõrge intensiivsusega põllumajandusmaastikes looduse hüvede toimivust märkimisväärselt rohkem kui madalama intensiivsusega piirkondades. Seejuures on oluline ühendada looduslike elementide ruumiline planeerimine väiksema agrookeemikaalide kasutamisega (Rieb & Bennett, 2020). Tamburini et al (2020) näitasid, et põllumajanduse mitmekesistamine toetab eelkõige mullaviljakust ja aineriinget, ilma et saagikus tingimata väheneks. Kuigi mõned praktikad, näiteks vähendatud kündmine või mahetootmine, võivad teatud juhtudel saagikust vähendada, aitavad kultuuride mitmekesistamine ja mullaparendavad meetmed säilitada tootlikkust ning parandada mulla kvaliteeti (Tamburini et al., 2020).

1.3. Maastikuelemendid põllumajandusmaastikus

Maastikuelementideks peetakse põllumajandusmaal asuvaid alasid, mida ei harita ning mille bioloogiline mitmekesisus on võrreldes tootmispõldudega oluliselt suurem (Veromann ja Kaasik, 2019). Looduslike elementide suurem osakaal põllumajandusmaastikus aitab parandada vee kvaliteeti, vähendades toitaineid, näiteks fosfori, ärakannet veekogudesse, ning suurendab maastiku esteetilist väärtust (Gebhardt et al., 2023). Samuti toetavad sellised praktikad mulla viljakuse säilimist ja taastumist (Gebhardt et al., 2023).

Maastikuelementide rajamiseks soovitatakse lähtuda aladest, mis on madala tootlikkusega ning kõrge erosiooni riskiga (Garibaldi et al., 2023; Schaan et al., 2025). Selliste alade muutmine maastikuelementideks on potentsiaalselt madalamate kuludega ning võib aidata vähendada näiteks erosioonist tulenevaid kahjusid. Maastikuelemendid toetavad elurikkust tänu elupaikade loomisele ning juba olemasolevate alade sidumisele (Belfrage et al., 2015; Holland et al., 2017).

Saksamaal läbiviidud uuringus hinnati maastikuelementide mõju saagikusele. Võrreldi põlluäärte ja põllu keskel olevat saagikust ning leiti, et väikeste põllusiseste veesilmade lähedus ei mõjutanud saagikust rohkem kui tavapärane põlluserv. Talinisu saagikust mõjutasid rohkem puittaimestikuga maastikuelemendid. Tähelepanuväärne on, et 95% põllu keskosa saagikusest saavutati juba 11,3 m kaugusel veesilmast ning 17,8 m kaugusel hekkidest ja metsaservadest (Raatz et al., 2019).

Homogeensete maastike heterogeensemaks muutmisel pannakse rõhku maastikuelementide mitmekesisuse ja pindalade suurendamisele ning põlluservide tihendamisele. Lisaks on oluline poollooduslike elupaikade taastamine ja kesaalade suurendamine (Garibaldi et al., 2023; Schaan et al., 2025). Maastikuelementide sobitamine maastikule sõltub väga paljudest erinevatest teguritest, näiteks tuule suunast, põlluharimismeetodidest, rahastusest jne (Schaan et al., 2025). Maastikuelementide rajamisel tuleks tähelepanu pöörata ka sellele, mis liikidele antud elemendid elupaika pakuvad, tavaliselt saavad neist enim kasu generalistid, kuid praegu on oluline ka tavapäraste liikide toetamine, kuna nende arvukus on languses (Schaan et al., 2025; van Klink et al., 2024)

Maastikuelemendid on üks viisidest, kuidas Euroopa Liit soovib saavutada eesmärki muuta 2030. aastaks vähemalt 10% põllumajandusmaast poollooduslikeks aladeks. Samas on uuringud leidnud, et selline osakaal ei pruugi olla piisav loodusliku kahjuritõrje, tolmeldamisteenuste, elurikkuse ja ökosüsteemide toimimise tagamiseks ning soovitatud on suurendada poollooduslike alade osakaalu hoopis 20–25%-ni. (EU, 2020; Garibaldi et al., 2021; Kaasik et al., 2026; Vilumets et al., 2023).

Eestis on maastikuelementide tüübid ja suurused (tabel 1) defineeritud maaeluministri määrus nr 68 järgi (Riigi Teataja, 2022a).

Tabel 1. Maastikuelemendid (Riigi Teataja, 2022a).

	Suurus	Selgitus
Põllusaar	0,01 – 0,5 ha	Põllumaaga ümbritsetud ja põllumaaga külgnev selgesti eristatav loodusliku taimkattega maa-ala. Võivad esineda põõsad, puud, kivid, karstiaugud, väikesed märgalad ja tiigid.
Metsasiil	Min pikkus 20 m, min laius 30 m	Metsasiil on põllumaaga ümbritsetud ja sellest selgesti eristatav/ Metsasiil puutub põllumassiivi piiriga kokku maksimaalselt 30 meetri ulatuses.
Puude rida	Min pindala 0,01 ha, min pikkus 20 m	Peab olema põllumaaga ümbritsetud või põllumajandusmaaga külgnev. Iga 20 m peale kasvab vähemalt 3 puud.
Hekk	Min pindala 0,01 ha, min pikkus 20 m, max laius 10 m	Peab olema põllumaaga ümbritsetud või põllumajandusmaaga külgnev.
Kraav	Max laius 12 m	Peab olema põllumaaga ümbritsetud või põllumajandusmaaga külgnev. Metsaäärsel kraavil peab olema põllupoolne serv, nõlv ja kraavipõhi visuaalselt tuvastatavad.
Kiviaed	Min laius 30 cm, max kõrgus 50 cm	Peab olema põllumajandusmaaga ümbritsetud või põllumajandusmaaga külgnev.

Lisaks tabelis 1 väljatoodud aladele tuleb põllumajandusmaal säilitada ka looduskaitsealade alusel kaitstavaid looduse üksikobjekte, muinsuskaitsealadega kaitstavaid kinnismälestisi ning pärandkultuuriobjekte (PRIA, 2026; Riigi Teataja, 2022a). Kui rajatav või säilitatav maastikuelement on põllusaar, metsasiil, puude rida või hekk ning põllumajandusmaa on dreneeritud, tuleb see kooskõlastada Maa- ja Ruumiametiga (Riigi Teataja, 2022a).

Põllumassiivi hulka ei arvestata ning maastikuelemendiks ei loeta metsa ega võsaga (puittaimed, võra liituvus üle 30%) üle 0,01 ha suuruseid alasid, kivihunnikuid, püsivalt liigniiskeid alasid, lõkkeplatse, püsivalt ühes kohas olevaid masinaparke, silo- ja heinapalle jne (PRIA, 2026). Maastikuelementide loomine võimaldab tootjatel taotleda ka ökosüsteemiteenuste säilitamise toetust, mis kompenseerib saagikadu tootmisest väljaläinud põllumaa tõttu (Riigi Teataja, 2022b).

1.4. Püsivad põllukultuuri kahjustused

Põllukultuuri kahjustuse all peame laiemas pildis silmas olukorda, kus põllukultuur on kahjustatud ning saak oluliselt väheneb ja/või kvaliteet langeb (Delgado et al., 2021; Junaid & Gokce, 2024). Kahjustused jaotatakse kolmeks tüübiks:

1. Biootilistest teguritest võib välja tuua kahjurid, haigused, patogeenid ning umbrohud. Sajandi alguses hinnati kahjuritest tingitud saagikadu globaalselt umbes 26%–29% sojaoal, nisul ja puuvillal ning maisil, riisil ja kartuli vastavalt 31%, 37% ja 40% (Oerke, 2006).
2. Abiootiliselt mõjutavad saagikust kliimamuutused, erosioon, muldade soolsus ja põuad (Beillouin et al., 2020). Abiootilisest stressist tulenevat saagi kadu hinnatakse kuni 50%-ni, eeldatakse, et kliimamuutuste süvenemisel probleem süveneb ning eriti kannatavad juba praegu kuivad piirkonnad (Minhas et al., 2017).
3. Viimaseks teguriks on põllukultuuride kahjustamine võimalik ka inimese enda käeläbi, näiteks kehvade põllumajandusvõtete kasutamise tõttu (Junaid & Gokce, 2024). Sellisteks on näiteks liigne või ebaõige taimekaitsevahendite ja väetiste kasutamine, raskete masinate tõttu mulla tihenemine, monokultuuride kasvatamine (Junaid & Gokce, 2024).

Osad tegurid põhjustavad põllukultuuri kahjustusi ainult ühel hooajal, samas on ka mõjusid, mis püsivad läbi aastate. Näiteks leiti 2020.aastal ilmunud artiklis, et Tansaania põhjustavad elevandid aastas umbes 437,5ha jagu saagi kadu (Harionay et al., 2020).

Antud töö kontekstis on olulised pikaajalised kahjustused ehk siis alad põllumajandusmaal, mis on püsivalt madala saagikusega või taimestik on hävinud. Potentsiaalne saagikus sõltub mulla omadustest (mulla struktuur, veemahutavus), põllu reljeefist ning kasvutingimustest (kliima- ja ilmastikutingimused). Ideaalse majandamise korral on tegelik saagikus lähedane potentsiaalsele saagikusele; nende vahet nimetatakse saagilõheks (*yield gap*) (Narra et al., 2022; van Bussel et al., 2015). Madalat saagikust põhjustavad näiteks vee ja toitainete vähesus, biootilised tegurid, madal mullaviljakus, kliimastress (van Ittersum et al., 2013).

Madala saagikusega või kahjustunud alade leidmisel kasutakse põllusiseste tsoonide määramist ning nende alade erinevat hooldamist, et saada paremat tootlikust (Layton et al., 2020). Paljudel juhtudel kogutakse saagikuse kohast infot kombinide saagikusekaartidelt aga ka satelliitpildidelt ning erinevate vegetatsiooniindeksite abil (Dong et al., 2019; Layton et al., 2020).

Layton et al (2020) uurisid seost ajaloolise saagikuse ja mullatüübi ning maapinna kõrgusmudeli vahel. Leiti, et hea läbilaskvusega ja keskmise tekstuuriga mullal kasvas mais paremini kui sama põllu aladel, mille muld oli kehva läbilaskvusega. Soomes tehtud uuring näitas, et kaugseire andmete põhjal on võimalik leida madala saagikusega alasid põldude sees ning nad seostasid madalat saagikust nõlvakalde ning veerežiimiga (Narra et al., 2022).

Üldiselt on nõlvakalde ja mullaniiskuse omavaheline seos hästi kirjeldatud. Oluline on välja tuua, et <2-3° nõlvakalde puhul on vee akumulatsioon madalamatesse kohtadesse suurem, kui järsematel nõlvadel kus on probleemiks pigem erosioon (Pachepsky et al., 2001). Niisked kohad ning kehv vee imbumine vähendavad muldade hapnikusisaldust, limiteerivad taimede toitainete omastamist, suurendavad denitrifikatsiooni ja toitainete kadu, loovad soodsad olud juurehaigusteks (Kõlli et al., 2010; Pachepsky et al., 2001). Selliste alade puhul saab õigete maaharimisvõtetega, nagu kuivendussüsteemid, külviaja muutmine, väetamise muutmine või niiskete tingimustega sobivate põllukultuuride kasutamine, vähendada kahjustuste ulatust (Kravchenko et al., 2005).

Eesti põllumajandusmaastikke on ajalooliselt tugevalt kujundanud maaparandus ja kuivendussüsteemid, mille eesmärk oli muuta liigniisked mullad põllumajanduslikult kasutatavaks (Remmel & Karus, 1967; Tomingas, 1949). Eriti oluline oli drenide (salakraavide) areng, mis võimaldas parandada mulla kvaliteeti, ühtlustada põldude kuivamist ning vähendada liigvee mõju taimede kasvule (Tomingas, 1949). Kuivendussüsteem on ehitiste kogum (eesvoolud, kuivenduskraavid, drenid, kaevud), mis koguvad liigvee kokku ja juhivad selle suublasse (Regionaal- ja Põllumajandusministeerium, 2023; Maa- ja Ruumiamet, 2024). 1965. aastal oli kuivendatud 535 000 ha maad, millest dreenaariga 145 000 ha, tänapäevaks on maaparandust tehtud kokku 640 000 ha põllumajandusmaast (Regionaal- ja Põllumajandusministeerium, 2023; Remmel & Karus, 1967). 2016. aastal koostatud dreenaarikuivendustega kuivendussüsteemide seire tulemusel leiti, et 11 641 ha savi ja raske liivsaviga muldadel olevate drenide olukord oli valdavalt rahuldav 58% ning 7% puudulik (Tamm & Timmusk, 2016). Üldiselt on kuivendussüsteemid siiski kehv seisundis ning vajavad regulaarset hooldust (puhastamine settest, võsa eemaldamine jne). Mitte toimivad süsteemid võivad põhjustada üleujutusi, alade soostumist ning maa viljelusväärtuse langust (Järvan et al., 2020). Samas on kuivendussüsteemidega põldudel suurem risk taimetoitainete ja taimekaitsevahendite leostumiseks veekogudesse, kuna kuivendussüsteemid kiirendavad vee äravoolu ning soodustavad lahustunud ainete transporti pinnavee- ja põhjaveesüsteemidesse (Castellano et al., 2019; Gramlich et al., 2018). Uuringud on näidanud, et kuivendatud põllumajandusmaadel suureneb eriti lämmastiku ja fosfori leostumine ja taimekaitsevahendite kanne veekogudesse võrreldes kuivendamata aladega (Gramlich et al., 2018).

Põllumajandusalade mullastiku kaardistamist alustati Eestis 1954. aastal ning andmeid koguti ning parandati järgnevat kolm kümnendit. Nende andmete põhjal valmisid 20. sajandi lõpus Eesti mullastiku kaardid ning praegu on valmimas/valminud ka uuendatud versioon (Kmoch et al., 2020; Maa- ja Ruumiamet, 2001). Eesti mullad on laias laastus jaotatud kaheksasse valdkonda (joonis 1).

1. Klindieelne kiviste leetunud muldade valdkond (3,5%),
2. Põhja-Eesti rensiinade (rähksete) ja mitmesuguste gleimuldade valdkond (31,8%),
3. Lääne-Eesti glei-, turvastunud glei- ja soomuldade valdkond (7%),
4. Vahe-Eesti leede-, leet-, glei- ja soomuldade valdkond (6,8%),
5. Kesk-Eesti leostunud ja leetjate muldade valdkond (17,2%),
6. Peipsi-äärne leede-, leet-, glei- ja soomuldade valdkond (8%),
7. Lõuna-Eestii pseudo(näiv)leetunud ja leetunud muldade valdkond (20,7%),
8. Erodeeritud muldade valdkond künkliku reljeefiga aladel (5%) (Astover et al., 2012; Lillema, 1958).



Joonis 1. Eesti mullastiku valdkonnad (Astover et al., 2012; Lillema, 1958) korrigeerunud T.Kikas ja P. Penu.

Kõige paremateks põllumuldadeks peetakse leostunud (Ko) ja leetjaid (Kl) muldasid, mis sobivad hästi enamuse kultuurtaimede kasvatamiseks ning paikenevad peamiselt Kesk-Eestis (Leedu et al., 2025; Penu & Kikas, 2013). Nende gleistunud ja liigniiskeid alatüüpe, leostunud ja leetjaid gleimuldi, leidub Pärnu-, Rapla-, ja Läänemaal ning ka need on head põllumullad, kuid alles peale põhjalikku kuivendamist. Leostunud ja leetjatel gleimuldadel soovitakse kasvatada nisu ning kaera, samuti põldheinu ja segatist, kuid neid ei peeta heaks kasvukohaks tatrle, linale ega lutsenile. (Astover, 2005; Eesti Loodus, 2024). Teistest muldadest kasutakse põllumaana veel ka näiteks näivleetunud muldasid (head, kuid tallamisõrnod), rähkseid muldasid (head mullad, põuakartlikud ja viljakus on seotud koresesisaldusega), leetunud muldasid jne (Astover et al., 2017; Leedu et al., 2020, 2022).

1.5.Kaugseire kasutamine põllukultuuri kahjustuste hindamisel

Kaugseire on kujunenud oluliseks tööriistaks põllumajanduse ja loodusressursside seires ning majandamises, saadavat infot on põllumajanduses kasutatud juba 1970. aastatest (Delgado et al., 2019; MacDonald & Hall, 1980). Satelliit- ja ruumilised andmed võimaldavad koguda täpset ja ajakohast teavet põllumajandusmaastike kohta, sealhulgas määrata põllukultuuride tüüpe ja pindalasid, hinnata saagipotentsiaali ning jälgida ökosüsteemi seisundit. Samuti võimaldab kaugseire analüüsida mulla omadusi, niiskust, maakasutuse ja maakatte muutusi ning tuvastada degradatsiooni või erosiooni (Boursianis et al., 2022; Y. Huang et al., 2018). Vegetatsiooniindeksite ja modelleerimise abil saab hinnata taimkatte seisundit ning toetada kahjurite, haiguste ja umbrohtude tõrjet.

Seetõttu on kaugseire oluline vahend põllumajanduse planeerimisel, saagikuse prognoosimisel ja ressursside kestlikul majandamisel (Xue & Su, 2017).

Kaugseires kasutakse erinevaid sensoreid, millest põllumajanduse tarbeks toodavad andmeid soojuskaamerad, multi- ja hüperspektraalkaamerad, radarid (pilvkatte vältimiseks), LiDARid, satelliidid, ortofotod ja mehitamata õhusõidukid (Victor et al., 2024). Sentinel-2 on Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA) Copernicuse programmi raames välja töötatud optiline kaugseire missioon, mis koosneb kahest satelliidist — Sentinel-2A (2015) ja Sentinel-2B (2017) (Copernicus Data Space Ecosystem, 2026). Kahe satelliidi mõõtmisintervall ekvaatoril on 5 päeva (Eesti kohal on umbes 3 päeva), mis koos parema ruumilise ja spektraalse lahutusega võrreldes varasemate satelliididega on muutnud Sentinel-2 üheks olulisemaks tööriistaks täppispõllumajanduses (Segarra et al., 2020). Sentinel-2 kogub andmeid 13 spektraalkanalis 10–60 m ruumilise lahutusega ning globaalse katvusega, mis loob uusi võimalusi nii regionaalseks kui ka globaalseks põllumajanduse seireks (Segarra et al., 2020). Lisaks on Sentinel-2 andmed avalikult ja tasuta kättesaadavad, mis on oluline eelis kõrge ruumilise lahutusega kommertssatelliitide (PlanetScope, WorldView-3, Pleiades Neo jne) ees ning võimaldab nende laialdast kasutamist teadusuuringutes (Segarra et al., 2020).

Põllumajanduses kasutakse vegetatsiooni indeksitest enim NDVI (*Normalized difference vegetation index*), EVI (*Enhanced vegetation index*), GNDVI (*Green-normalized difference vegetation index*) ja SAVI (*Soil-adjusted vegetation index*) indekseid (Radočaj et al., 2023). Indekseid saab arvutada tänu satelliidi pardal olevatele sensoritele, mis salvestavad spektraalset infot (Xue & Su, 2017). Taimedelt tagasi peegelduv valgus varieerub vastavalt taimede tüübile, kudede veesisaldusele ning muudele taime mõjutavatele teguritele (Liu et al., 2016). Erinevate põllukultuuride ja kasvufaaside määramisel annavad vegetatsiooni indeksid erineva täpsusega tulemusi, seega on nendest parima valimine kohati raskendatud (Huang et al., 2019).

Normaliseeritud taimkatteindeksi (NDVI) arvutamiseks kasutakse punast (RED) ja lähi-infrapuna (NIR) kanaleid:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NDVI väärtused varieeruvad -1 kuni 1, positiivsed väärtused kirjeldavad taimede rohelisust ning negatiivsed väärtused viitavad taimedeta aladele nagu vesi või muld (Matsushita et al., 2007; Omia et al., 2023; J. Xue & Su, 2017). NDVI miinusteks on tundlikus atmosfääri aerosoolidest tekkiva hajususe ning mulla heledusele (*brightness*) suhtes (Shammi & Meng, 2021; Sishodia et al., 2020).

Täiustatud taimkatteindeks (EVI) arvutatakse kasutades punast (RED), lähi-infrapunast (NIR) ja sinist (BLUE) kanalit, millele lisaks kasutatakse koefitsiente, et korrigeerida atmosfääri aerosoolide hajususe mõju (C_1 ja C_2) ning võimendustegurit (G). Sentinel-2 andmete puhul $G=2,5$, $C_1 = 6$ ja $C_2 = 7,5$ (Liu & Huete, 1995):

$$EVI = G * \frac{(NIR - Red)}{(NIR + C_1 * Red - C_2 * Blue + 1)}$$

EVI väärtused varieeruvad samuti -1 kuni 1, kus -1-le lähedased väärtused näitavad taimkatteta alasid ja 1-le lähedased väärtused viitavad tugevale ja tervele taimeestikule (Vidican et al., 2023).

Kaugseiret ja ruumiandmete analüüsi on kasutatud maastikuelementide nagu näiteks hekkide, metsasiilude, puude leidmiseks. Lisaks saab kaugseire abil leida ka taimestiku biomassi, mis annab alust eeldada, et puittaimedest maastikuelemendid seovad arvatust oluliselt rohkem süsinikku (Golicz et al., 2021). Inglismaal läbiviidud uuring kaardistas maastikuelemente kasutades vegetatsiooniindekseid ning masinõpet ning leidsid, et 12.39% elementidest olid puud, 1.9% hekid ja 3.58% põlluservad (O'Connell et al., 2015).

Üksikute satelliidipiltide kasutamine põllukultuuride seisundi hindamisel on piiratud, kuna vegetatsiooniindeksite väärtused varieeruvad oluliselt sõltuvalt kasvufaasist, atmosfääri olekust, pilvisusest, mulla heledusest jne (Vidican et al., 2023). Multispektraalsete aegridade kasutamine põllumajanduse kaugseires võimaldab tuvastada anomaaliaid pikslipõhiselt, kasutades suurt hulka ajaloolisi vaatlusi, mis aitab eristada ajutisi ja püsivaid kõrvalekaldeid normist (León-López et al., 2022; Wei et al., 2026).

Hiljutises Slovakkias läbiviidud uuringus kasutati Sentinel-2 andmeid selleks, et hinnata põllumajandusmaa siseseid erineva tootlikkusega alad kasutades 7 aastast NDVI andmete aegrida ning masinõpet. Saadud tulemused näitasid, et ainult 6,5% olid pika perioodi vältel sama saagikusega ning 47% põllumaast varieerus saagikus aastast aastasse (Košanová et al., 2025). Sarnasel teemal tehtud artikkel tõi välja olulise aspekti, miks mitme järjestikuse aasta kaasamine analüüsis on oluline. Nimelt esines antud uuringus aastate vahel tsitruseliste saagikuses küllalki suuri erinevusi, millest järeldati, et aegridade kasutamine aitab saada paremat ülevaadet saagikuse stabiilsusest (Wei et al., 2026).

Varasemad uuringud näitavad, et mitmeaastaste Sentinel-2 aegridade abil on võimalik tuvastada põllumajandusmaastikes püsivalt madala tootlikkusega alasid (Košanová et al., 2025; Řezník et al., 2020). Käesolevas töös kasutatakse sarnast lähenemist eesmärgiga tuvastada Eesti põllumajandusmaastikes põllukultuuride püsivaid kahjustusi.

2. Andmed ja metoodika

Magistritöö metoodiline pool koosneb kolmest osast. Esiteks mudeli väljatöötamisest, teiseks selle rakendamisest kogu Eesti ulatuses ning kolmandaks keskkonnaparameetrite lisamisest nii kahjustunud kui mitte kahjustunud aladele.

2.1. Mudeli väljatöötamine

Selle osa eesmärk oli tuvastada ortofotodelt potentsiaalsed põllukultuuri püsiva kahjustusega alad, katsetada NDVI ja EVI lävendeid ja ajalist varieeruvust, hinnata mudelite toimimist ning leida parim meetod, mida kasutada kogu Eesti hindamiseks.

2.1.1. Valideerimis- ning treeningandmete kogumine

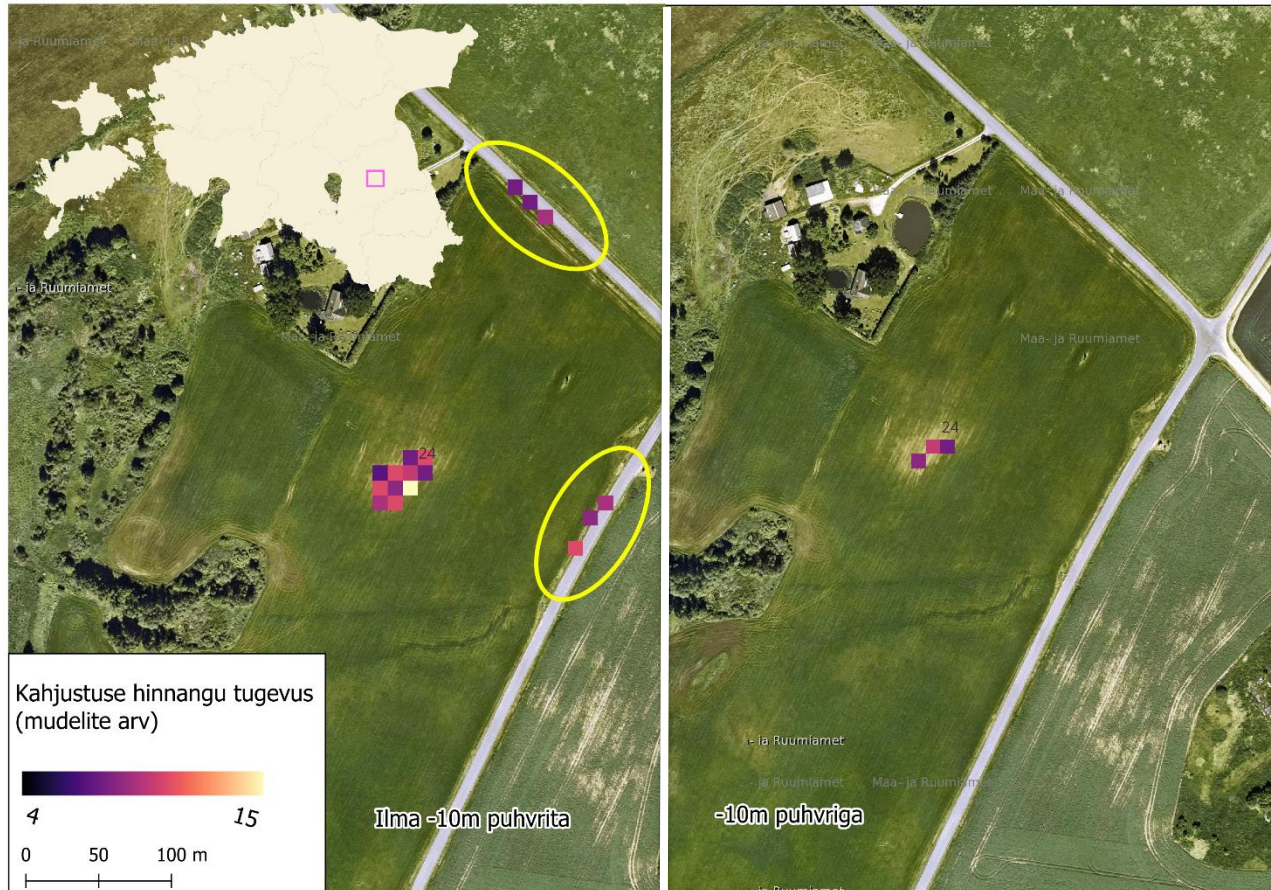
Antud magistritöö raames oli oluline leida vähemalt mõned alad, mis paistsid olevat püsivalt kahjustunud, et oleks võimalik mudeleid treenida ning valideerida. Selleks kaardistasin Maa- ja Ruumiameti ortofotode alusel püsiva põllukultuuri kahjustusega alad (Ortofoto, Maa- ja Ruumiamet, 2026). Püsivaks kahjustuseks lugesin olukorda, kui kahjustus esines kahel või enamal aastal põllukultuuris samas kohas ja enam-vähem samas ulatuses (joonis 2). Antud uurimistöö kontekstis oli olulise tähtsusega juba piisava taimkattega põllumajandusmaade olemasolu, sellest tulenevalt kasutasin töös algsete põllukultuuri kahjustuste määramisel peamiselt metsanduslikke ortofotosid, kuna need on tehtud juuni alguses. Andmete kogumiseks valisin Lõuna-Eesti, kuna seal oli kõige rohkem vajaliku kvaliteediga ortofotosid (Metsanduslik 2024, Metsanduslik 2021, Metsanduslik 2020, Metsanduslik 2017, Aeropildistamine 2013 ja Asulad 2023). Esmased põllukultuuri kahjustused märkisin ära punktiga, hiljem digitaliseerisin kahjustunud ala jaoks ka polügonid ning arvutasin pindala. Kokku määrasin esialgu 38 potentsiaalselt püsiva põllukultuuri kahjustusega ala.



Joonis 2. Põld, millel esines põllukultuuri püsivat kahjustust kolme ortofoto põhjal. Punane joon näitab põllumassiivi ning sinine joon tähistab määratud kahjustunud ala.

2.1.2. Uurimisalade määramine

Töö esimeses etapis kasutasin uurimisaladena 2025. aasta PRIA põllumassiive, mille maakasutus oli määratud põllumaaks (PRIA Veebikaart, 2025). Töö esimeses etapis kasutasin põllumassiivide originaal ruumikuju, kuid analüüsi käigu selgus, et see lisas mudelitesse palju valepositiivseid tulemusi, kuna mudel pidas põlluservas olevaid tee pikselid kahjustunud aladeks. Selle vältimiseks rakendasin töö teises etapis põldudele 10 m puhvrit. Valisin 10 m, sest uurimises kasutatud satelliidipiltide lahutusvõime oli samuti 10 m (joonis 3).



Joonis 3. Metoodika arendamise näide -10m puhvri lisamise vajadusest.

2.1.3. Põllukultuuri kahjustuste tuvastamine Sentinel-2 andmete põhjal

Töö järgmise etapi viisin läbi *Google Earth Engine*-s (GEE), kuna tegemist on pilvepõhise kaugseire andmete analüüsimise platvormiga, kus on Sentinel-2 pildid vabalt kättesaadavad (Gorelick et al., 2017). Kirjutasin koodi, mille eesmärgiks oli leida uurimisaladel põllukultuuri püsivaid kahjustusi. Analüüsi tarbeks kasutasin harmoniseeritud Sentinel-2A MSI SR (multispektraalne seade, *surface reflectance*) andmeid vahemikus 15.06.2017 kuni 15.07.2024. Valisin need vahemikud lähtudes põllukultuuride kasvufaasidest, eeldusel, et sel ajal on kehva taimkattega alad kõige paremini eristatavad (Kostiukhin, 2022). Analüüsiks lõin kuupõhise pilvevaba komposiidi piksli mediaanväärtuste põhjal mille arvutasin kaks taimkatteindeksi NDVI ja EVI (Košanová et al., 2025; Řezník et al., 2020). Püsivate põllukultuuri kahjustuste leidmiseks kasutasin erinevaid lävendite kombinatsioone, kus esimeseks parameetriks oli taimkatteindeksi väärtus ja teiseks parameetriks protsent kui suure osa ajast indeksi väärtus oli alla teatud lävendi (tabel 2). Näiteks NDVI väärtus oli madalam

kui 0,35 kuni 55% piltidel. Kokku tuli 37 mudelit – 21 EVI-ga ja 16 NDVI-ga. Iga mudeliga lõin binaarse rastri, kus 1 tähistas, et piksel vastas lävendi seatud kriteeriumitele ehk tegemist võib olla alaga, kus põllukultuur on kahjustunud ning 0 tähistas seda, et piksel ei vastanud lävendile ehk põllukultuur polnud kahjustunud.

Tabel 2. Mudelite lävendid.

Mudel	Indeks	Indeksi lävend	Aja lävend (%)
Mudel 1	EVI	0.25	45
Mudel 2	EVI	0.25	50
Mudel 3	EVI	0.3	50
Mudel 4	EVI	0.3	55
Mudel 5	EVI	0.3	60
Mudel 6	EVI	0.35	50
Mudel 7	EVI	0.35	55
Mudel 8	EVI	0.35	60
Mudel 9	EVI	0.35	65
Mudel 10	EVI	0.35	70
Mudel 11	EVI	0.35	75
Mudel 12	EVI	0.4	45
Mudel 13	EVI	0.4	50
Mudel 14	EVI	0.4	55
Mudel 15	EVI	0.4	60
Mudel 16	EVI	0.4	65
Mudel 17	EVI	0.4	70
Mudel 18	EVI	0.4	75
Mudel 19	EVI	0.4	80
Mudel 20	EVI	0.4	85
Mudel 21	EVI	0.45	90
Mudel 22	NDVI	0.35	35
Mudel 23	NDVI	0.35	40
Mudel 24	NDVI	0.35	45
Mudel 25	NDVI	0.35	50
Mudel 26	NDVI	0.35	55
Mudel 27	NDVI	0.4	40
Mudel 28	NDVI	0.4	45
Mudel 29	NDVI	0.4	50
Mudel 30	NDVI	0.4	55
Mudel 31	NDVI	0.4	60
Mudel 32	NDVI	0.4	65
Mudel 33	NDVI	0.45	45
Mudel 34	NDVI	0.45	50
Mudel 35	NDVI	0.45	55
Mudel 36	NDVI	0.45	60
Mudel 37	NDVI	0.45	65

2.1.3. Sentinel-2 andmetel loodud koondmudeli analüüs

Binaarsed rastrid liitsin kaardialgebrat (*Raster Calculator*) kasutades üheks koondmudeliks. Koondmudeli tulemusena sain soojuskaardi, kus suurem piksli väärtus näitas suurema hulga mudelite konsensut, et piksel on kahjustunud. Mudelite analüüsi tarbeks rasteriseerisin kahjustuste polügonid kasutades Sentinel-2 pikslisuurust ja ruumilist joonvõrku (*grid*), et valideerimisandmed kattuksid ruumiliselt mudelite rasterkihtidega (edaspidi

valideerimisraster).

Esiteks kontrollisin, millised mudelid tuvastasid valideerimisaladel kahjustusi. Selleks lugesin R-i mudelite rasterkihid ning kahjustunud alasid kirjeldava polügonikihi. Iga valideerimisala puhul kontrollisin, kas polügoni sisse jäi vähemalt üks kahjustuseks klassifitseeritud piksel. Kui polügonis leidis vähemalt üks selline piksel, lugesin kahjustuse mudeli poolt tuvastatuks. Analüüsi tulemusel selgus, et mudelid tuvastasid kokku 17 kahjustunud ala 38-st alast. Kõige rohkem valideerimisalasid tuvastasid Mudel 12 ja Mudel 13, mis mõlemad leidsid 17 kahjustunud ala.

Järgmiseks lugesin R-i lisaks veel valideerimisrastri ning põllumassiivide polügonikihi. Mudelite hindamiseks võrdlesin iga mudeli rasterkihti piksleid valideerimisrastri pikslitega ning koostasid iga mudeli kohta veamaatriksi (*confusion matrix*) ja arvutasin iga mudeli kohta positiivsete (TP), valepositiivsete (FP), valenegatiivsete (FN) ja negatiivsete (TN) pikslite arvu (Sathyanarayanan & Tantri, 2024). Lisaks hindasin, kui suur osa mudelite poolt tuvastatud kahjustuspikslitest paiknes põldudel väljas (esimese etapi mudelitele ei olnud veel -10 m puhvrit rakendatud). Lugesin kahjustunud piksli polügooni sisemiseks pikslis juhul, kui vähemalt 80% pikslit paiknes põllumassiivi polügooni sees. Selle põhjal arvutasin iga mudeli kohta servapikslite arvu ning korrigeerisin sellega valepositiivsete tulemuste väärtust. Mudelite võrdlemisel keskendusin eelkõige nende täpsusele, et leida mudelid, mis tuvastasid võimalikult palju tegelikke kahjustusi ning samal ajal võimalikult vähe valepositiivseid alasid:

$$\text{täpsus} = \frac{TP}{TP + FP}$$

Täpsem ülevaade mudelite veamaatriksi ja näitajate kohta on näha lisa 1.

Täpsuse (*precision*) väärtused jäid vahemikku 0,18–0,97. Kõrgema täpsuse saavutasid karmima lävendiga mudelid ja see näitab, et tuvastatud alad vastavad suure tõenäosusega tegelikele kahjustuskohtadele. Tundlikkus (*sensitivity*) jäi kõikidel mudelitel madalaks (vahemik 0,01–0,28), mis tähendab, et märkimisväärne osa tegelikest kahjustuspiirkondadest jäi tuvastamata. Kappa koefitsient jäi vahemikku 0,008–0,22, mis vastab nõrgale kuni mõõdukale kokkulangevusele ja peegeldab tugevat klassidevahelist erinevust valideerimisandmestikus — enam kui 11 miljonit pikslit olid negatiivsed, samas kui positiivseid piksleid oli vaid ~767. Seetõttu ei ole üldine täpsus (*overall accuracy* ≈ 99,99%) informatiivne mudeli hindamisel ning tasakaalustatud täpsus (*balanced accuracy*) (vahemik 0,52 – 0,64) ja kappa on asjakohasemad hindamismõõdikud.

Üksikute mudelite analüüs näitas, et mudelid eraldivõetuna annavad väga varieeruvaid tulemusi, mistõttu otsustasin ka kogu Eesti jaoks tehtava analüüsi tarbeks kasutada koondmudelit. Valisin EVI kogu Eesti analüüsiks, sest on teada, et NDVI küllastub tiheda taimestikuga aladel (Huete et al., 2002), vähendades selle tundlikkust just siis, kui põllukultuuride kahjustuste avastamine on kõige olulisem. Lisaks hõlmab EVI atmosfääri ja mulla korrigeerimist, mis on eriti oluline kahjustatud põllumajanduspiirkondades, kus osaline paljas pinnas tekitab müra NDVI-põhistes hinnangutes (Huete et al., 1994; Johnson et al., 2016; Li et al., 2026). Mudelite rakendamisel kogu Eesti ulatuses oli esmaseks eesmärgiks valepositiivsete tulemuste minimeerimine. See tähendab, et tuvastatud alad on tõenäolisemalt kahjustunud, kuid mudel võib osa kahjustusi tuvastamata jätta. Selline lähenemine lähtub mudeli kasutusest — üle-eestilise kaardistamise kontekstis on oluline, et tuvastatud alad oleksid usaldusväärsed ja ei tekitaks põhjendamatuid sekkumissoovitusi. Konservatiivsuse vajadus tuleneb seega eelkõige mudeli kasutuseesmärgist, kuid on seotud ka kalibreerimis- ja valideerimisandmete vähesusest.

2.2.Mudeli rakendamine üle Eesti

Töö teise etapi eesmärk oli luua koondmodel, mida rakendada kogu Eestis, et leida põllukultuuride püsivaid kahjustusi ülepinnaalalt. Kahjustunud alade eraldamise ja analüüsi töövoog on kokkuvõtlikult esitatud joonisel 4.

2.2.1. Kogu Eesti prognoosi loomine

Kogu Eestit katva mudeli jaoks kasutasin PRIA põllumaade ajaloolist andmestikku (Andmete teabevärv, 2026), filtreerisin aastatest 2017 – 2024 välja kõik põllumassiiivid mille maakasutus oli põllukultuurid ning määrasin kõigile -10 m puhvri, mis oli oluline kuna esimeses etapis tekitas põlluservade müra valepositiivseid tulemusi. Ajalooliste andmete kasutamine andis parema ülevaate sellest, et kõik alad oleksid terve uurimisaja olnud püsivalt põllumaad, mis samuti parandas tulemuste täpsust. Saadud kihid rasteriseerisin ning jätsin lõplikku analüüsi alad, mis PRIA ajalooliste andmete põhjal olid vähemalt 7 aastat olnud põllumaad. Saadud põllumaade raster olid sisendiks põllukultuuri püsivate kahjustuste arvutamisel. Kogu Eesti analüüsiks kasutasin ajavahemikku 15.06 – 15.07 ning tegin koodis modifikatsioone nii, et arvutataks automaatselt erinevate lävenditega kihid kasutades EVI vahemikke $\leq 0,30$; $\leq 0,33$; $\leq 0,35$ ning, et ajaliselt oleks väärtus selline 55%, 60%, 65%, 70%, 75% (tabel 3). Saadud 15 mudelit liitsin kokku ning uus rasterkiht näitas alasid, kus kõik mudelid kombineeritult püsivaid põllukahjustusi leiavad.

Tabel 3. Kogu Eesti põllukultuuri püsivate kahjustuste prognoosi lävendid.

Mudel	Indeks	Indeksi lävend	Aja lävend (%)
Mudel a	EVI	0.30	55
Mudel b	EVI	0.30	60
Mudel c	EVI	0.30	65
Mudel d	EVI	0.30	70
Mudel e	EVI	0.30	75
Mudel f	EVI	0.33	55
Mudel g	EVI	0.33	60
Mudel h	EVI	0.33	65
Mudel i	EVI	0.33	70
Mudel j	EVI	0.33	75
Mudel k	EVI	0.35	55
Mudel l	EVI	0.35	60
Mudel m	EVI	0.35	65
Mudel n	EVI	0.35	70
Mudel o	EVI	0.35	75

2.2.2. Kogu Eesti mudelite ja koondmudeli visualiseerimine

Tulemuste visualiseerimiseks arvutasin koondmudeli iga väärtusklassi (1 – 15) pindala. Selleks eraldas in koondmudelist kõik positiivse väärtusega pikslid. Pikslite arvu põhjal arvutasin iga väärtusklassi pindala

hektarites (1 piksel = 0,01 ha). Lisaks koostasin väärtusklasside põhjal tulpdiaagrammi.

Edasi analüüsisin eraldi kõigi mudelite tulemusi. Iga mudeli puhul arvutasin pikslite arvu, mille väärtus oli üks ehk mida mudel klassifitseeris kahjustunuks. Pikslite arv teisendasin pindalaks hektarites (1 piksel = 0,01 ha). Mudelite võrdlemiseks koostasin joondiaagrammi ja maatriksi. Maatriks võimaldas hinnata, kuidas muutus tuvastatud kahjustuste pindala erinevate EVI ja ajaliste lävendite kombinatsioonide korral. Lisaks kasutasin logaritmilise skaalaga joondiaagrammi, et väiksemate pindalade erinevused oleksid paremini nähtavad. Edasiseks analüüsiks jätsin välja mudelid, mille tuvastatud kahjustuste pindala ületas 1000 ha (mudel a, mudel b ja mudel c), kuna eesmärgiks oli konservatiivne tulemkiht ning vähendada valepositiivsete tulemuste hulka.

2.2.3. Koondmudeli valideerimine põllumajandustootjate abil

Koondmudeli tulemuste hindamiseks osalesin 24. aprillil Maamessil ning viisin läbi küsitluse, mille käigus uurisin messi külastajatelt, kas nad tegutsevad põllukultuuride kasvatamisega. Sobivatel inimestel palusin kaardivaates leida neile kuuluvad põllumassiivid. Edasi said nad näidata, kus on teadaolevad kahjustunud alad ning kas mudeli tuvastatud alad on kahjustunud. Saadud kohad märkisin punktiga, lisasin juurde kahjustuse põhjuse ning muud asjakohased kommentaarid, mida põllumajandustootjad jagasid.

2.3. Kahjustunud alade potentsiaalsete põhjuste tuvastamine

Viimase etapi eesmärk oli lisada uurimisaladele erinevad keskkonnaparametrid, et saada ülevaade sellest, mis tunnused on kahjustunud aladele iseloomulikud.

2.3.1. Ruumiliste andmete ettevalmistus ja statistiline analüüs

Kahjustunud alade potentsiaalsete põhjuste leidmiseks jagasin koondmudeli vastavalt piksli väärtustele mitte kahjustunud aladeks (0 – 3) ning kahjustunud aladeks (4 – 15). Seejärel vektoriseerisin kahjustunud ja mitte kahjustunud alade rasterkihid kasutades tööriista *Raster to vector*, liitsin polügonid (*dissolve*) kokku ja jagasin eraldi alad osadeks (*singlepart to multipart*). Tulemuseks sain kaks andmestikku ühes mitte kahjustunud alade polügononid ning teises kahjustunud alade polügonid. Edasi lisasin mõlemale andmestikule mullatüübid (Kmooh et al., 2020) kasutades *intersection* tööriista, arvutasin alade pindalad, lisasin igale alale keskmise TWI ja keskmise nõlvakalde kasutades *zonal statistic* tööriista. Topograafiline niiskuse indeks ehk TWI (*Topographic Wetness Index*) on reljeefipõhine indeks mille abil saab hinnata reljeefi mõju hüdroloogilistele protsessidele nagu näiteks vee akumulatsioon. TWI kirjeldab tõenäosust, et vesi koguneb mingisse punkti arvestades nii vooluakumulatsiooni kui ka nõlvakallet (Beven & Kirkby, 1979). Indeksi kõrgemad väärtused viitavad üldiselt niiskematele aladele ja madalamad väärtused kuivematele ning parema äravooluga aladele.

$$TWI = \ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right),$$

kus:

a = vee kogunemisala pindala ja β = nõlvakalle radiaanides (Beven & Kirkby, 1979). TWI ja nõlvakalde andmed sain Maastikugeoinformaatika tööühma loodud andmekuubist (Eesti Keskkonna Andmekuup, 2026).

Mõlemale andmestikule lisasin binaarse tunnuse „defekt“, kus väärtus 1 tähistas kahjustunud alasid ning väärtus 0 mitte kahjustunud alasid. Seejärel ühendasin andmestikud üheks tervikuks ning eemaldasin geomeetria, et teostada statistilisi analüüse.

Gruppidevaheliste erinevuste hindamiseks kasutasin Mann-Whitney U testi, kuna andmed ei vastanud normaaljaotuse eeldusele. Statistilise olulisuse lävendiks määrasin $p < 0.05$. Lisaks p-väärtusele arvutasin efektisuurus (r), mis näitab erinevuse praktilist tähtsust sõltumata valimi suurusest. Efektisuuruse tõlgendamisel kasutati Cohen (1988) kriteeriume: $r < 0.30$ väike efekt, $r = 0.30\text{--}0.49$ keskmine efekt, $r \geq 0.50$ suur efekt. Analüüsis võrdlesin kahjustunud ja mitte kahjustunud alasid keskmise nõlvakalde ja topograafilise niiskuse indeksi põhjal. Keskkonnatunnuste omavaheliste seoste hindamiseks arvutasin nõlvakalde ja TWI vahelise Spearmani korrelatsiooni.

Mullatüüpide analüüsi jaoks grupeerisin mullad sarnaste omadustega rühmadesse lähtudes Maa-ja Ruumiameti mullastiku kaardi värvikoodide tabelist (Mullastiku kaart, Maa-ja Ruumiamet, 2026) ning arvutasin iga mullatüübi (lisa 3) ja mullagrupi kohta kahjustunud ning mitte kahjustunud alade pindalad. Lisaks arvutasin kahjustunud alade osakaalu kogu mullatüübi (lisa 2) või mullagrupi pindalast. Väikese esinemissagedusega mullatüübid koondasin kategooriasse „Muu“, et parandada tulemuste loetavust.

Tulemuste visualiseerimiseks koostasın kastdiagrammi ja kahe x-teljega võrdlusgraafikud. Kahe teljega graafikuid kasutasin selleks, et võrrelda samaaegselt mullatüüpide kogupindala ning kahjustunud alade pindala või osakaalu. Mullatüübid järjestasin kahjustunud alade osakaalu järgi, et tuua selgemalt esile mullad, millel kahjustusi esines suhteliselt rohkem.

2.3.1. Kasutatud tarkvarad ja tehisintellektid

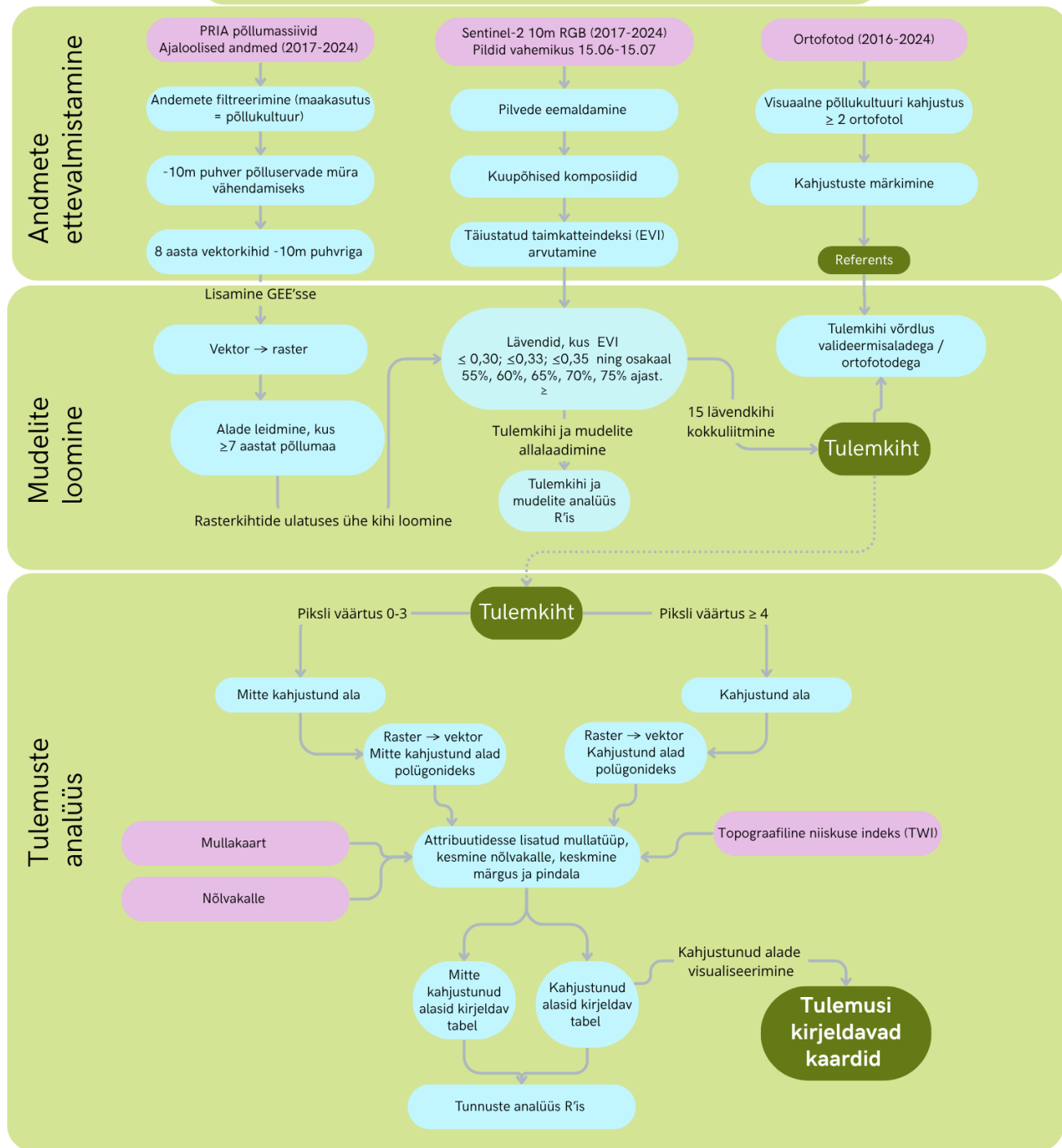
Andmeanalüüsiks kasutasin R-i versiooni 4.5.1 (R Core Team, 2025) ja pakette *sf* (Pebesma, 2018; Pebesma & Bivand, 2023), *terra* (Hijmans et al., 2026), *caret* (Kuhn, 2008), *dplyr* (Wickham et al., 2026), *tidyverse* (Wickham et al., 2019) ja *ggplot2* (Wickham, 2016) ja *patchwork* (Pedersen, 2025).

Ruumiandmete visualiseerimiseks ja analüüsiks kasutasin QGIS-i versiooni 3.40.10.

Töös kasutatud GEE skript: https://github.com/vetemari/pysivad_kahjutused

Töö koostamisel kasutasin tehisintellekte GPT 5.5 ja Sonnet 4.6 abivahendina oma töö struktuuri täpsustamiseks, keeruliste konseptsioonide selgitamiseks, skripide koostamiseks ja parandamiseks ning tagasiside saamiseks. Anara AI'd teadusartiklitest asjakohaste lõikude leidmiseks ja DeepL'i tõlkimiseks.

Püsivate põllukultuurikahjustuste tuvastamise metoodika



Joonis 4. Kokkuvõtlik töövojoonis.

3. Tulemused ja arutelu

3.1. Mudelite ja lävendite mõju kahjustusalade tuvastamisele

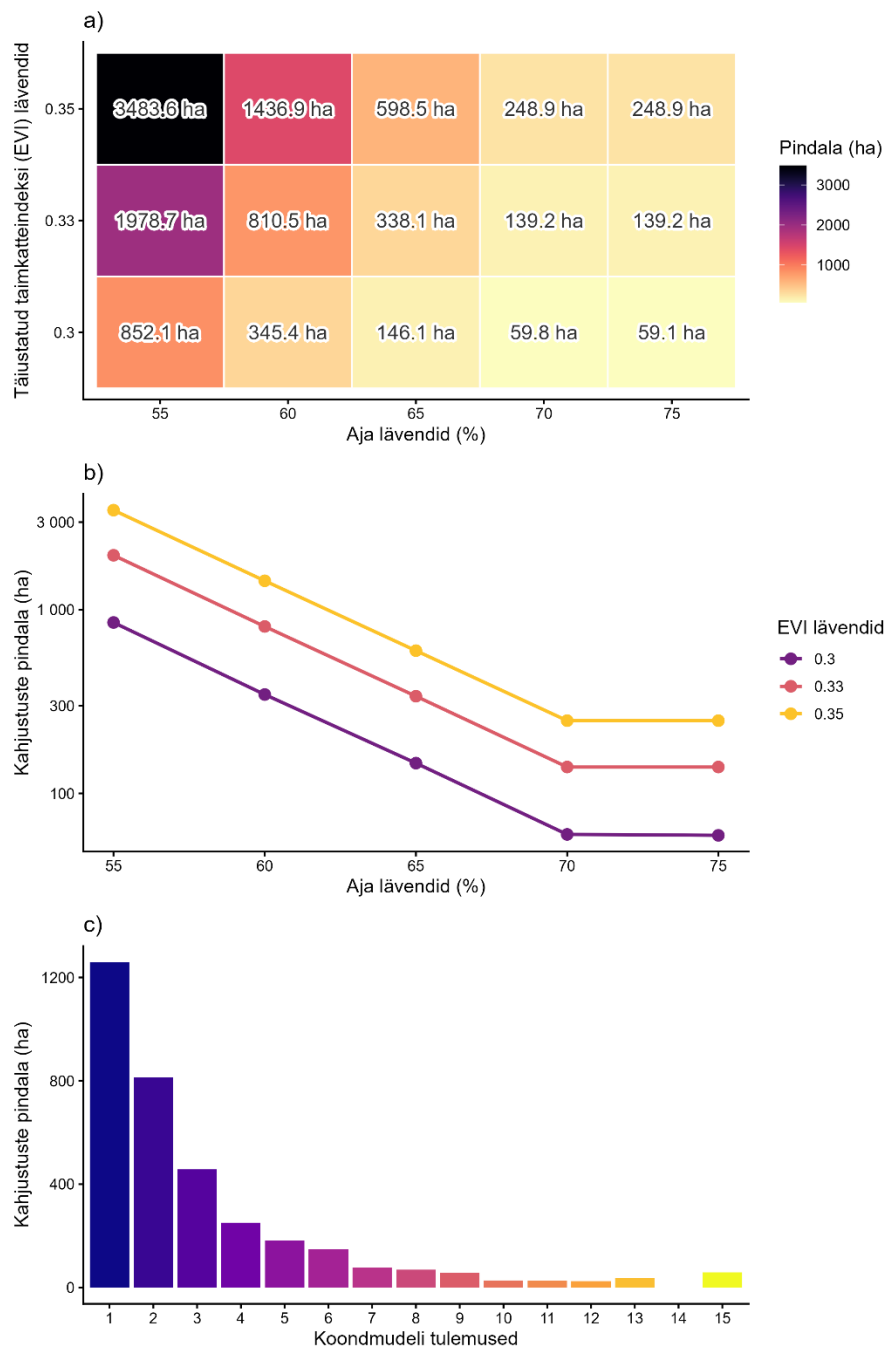
Varasemates töödes on Sentinel-2 andmete ja aegridade kasutamine põllukultuuride seires osutunud tulemuslikuks (Košanová et al., 2025; Řezník et al., 2020). Käesoleva töö tulemused kinnitavad, et Sentinel-2 EVI aegridade (2017–2024) põhjal on võimalik tuvastada põllumajandusmaastikes alasid, kus põllukultuurid on püsivalt kahjustunud. Mudelite ning koondmudeli analüüs näitas, et tuvastatud kahjustuste pindala sõltub oluliselt nii EVI kui ka ajalisest lävendist (joonis 5).

Kõige suurema kahjustunud ala (3483,6 ha) määras mudel, mille puhul oli EVI lävend $\leq 0,35$ ning piksel pidi olema sellest madalam vähemalt 55% ajast. Kõige väiksema kahjustunud ala (59,1 ha) määras mudel, mille puhul oli EVI lävend $\leq 0,30$ ning tingimus pidi olema täidetud vähemalt 75% ajast. Tulemused näitavad selgelt, et rangemate lävendite kasutamisel väheneb kahjustunud alade pindala märkimisväärselt.

Koondmudeli tulemused näitasid, et kõige suurema ala moodustasid pikslid, mida klassifitseeriti kahjustuseks ainult ühe mudeli poolt 1256,26 ha. Kõigi 15 mudeli järgi kahjustunuks hinnatud pikslid moodustasid kokku 59,1 ha. See viitab sellele, et osa kahjustustest on nõrgemad või ajaliselt muutlikumad, samas kui väiksem osa alasid eristus püsivalt kahjustununa sõltumata kasutatud lävenditest.

Mudelite tulemused peegeldavad otseselt valitud lävendite rangust – leebemate lävendite kasutamisel tuvastatakse rohkem kahjustunud alasid, kuid suureneb ka valepositiivsete tulemuste tõenäosus. Koondmudeli põhjal koostatud soojuskaart võimaldas hinnata kahjustunud alade esinemise tõenäosust ning kirjeldada kahjustuste ruumilist ulatust ümbritseval alal. Selline lähenemine annab detailsema ülevaate kahjustuste ruumilisest mustrist võrreldes üksikute lävenditega mudelitega. Mudelid, mille ajaline lävend oli 70% ja 75%, andsid väga sarnaseid tulemusi. See viitab sellele, et tegemist on piirkondadega, kus kahjustused on eriti püsivad ning ilmnevad sõltumata aastatevahelisest varieeruvusest.

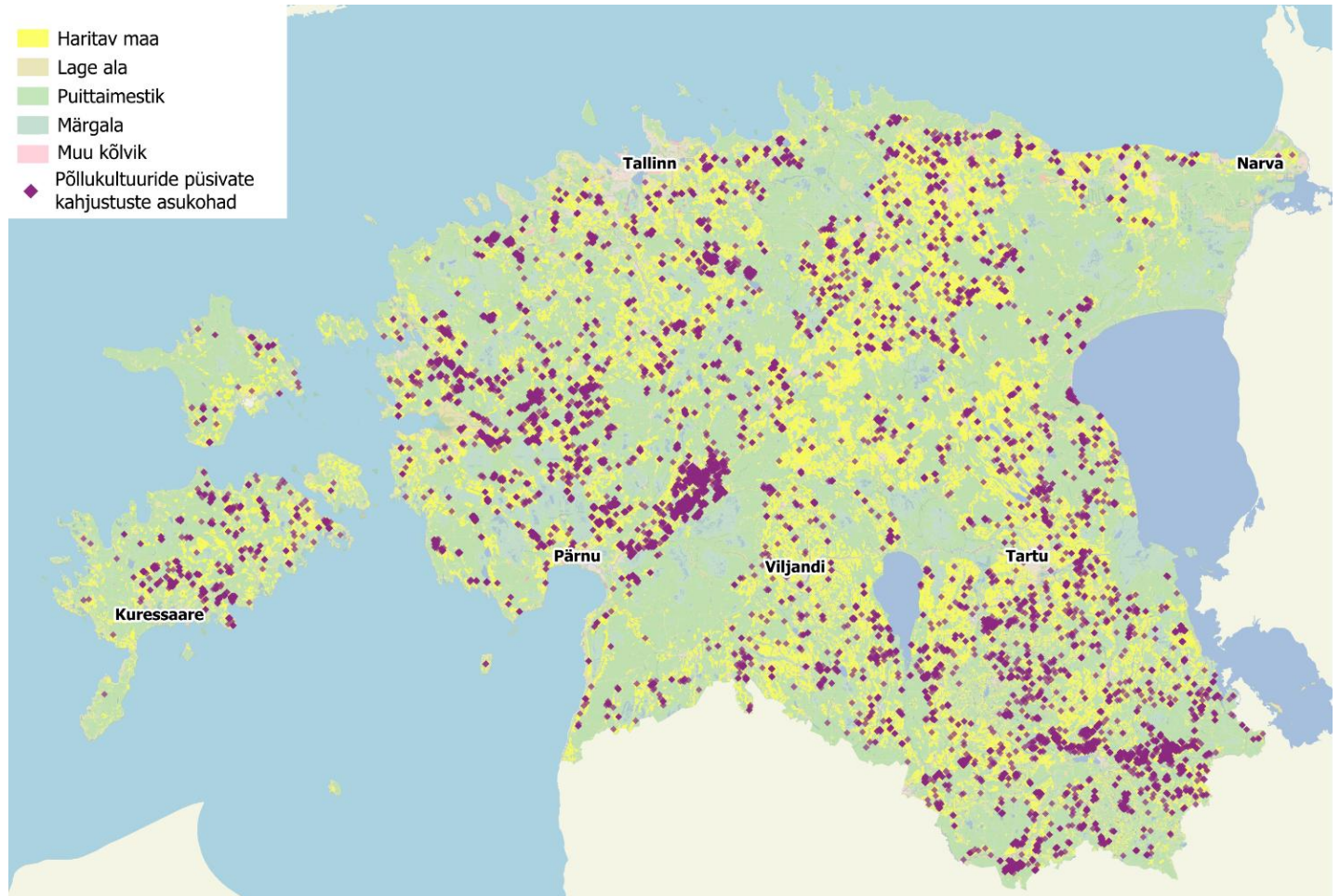
Näiteks võib maaparandussüsteemide rekonstrueerimine või maaharimisvõtete muutmine olla kulukas ning majanduslikult põhjendatud pigem ulatuslikumate kahjustuste korral. Väiksemad ja püsivalt kahjustunud alad võiksid seevastu sobida maastikuelementide rajamiseks, eriti juhul, kui nende põllumajanduslik kasutamine ei ole enam efektiivne. Varasemates uuringutes on leitud, et põlluservades paiknevad alad on sageli madalama saagikusega kui põllu keskosa (Raatz et al., 2019), mistõttu võiks maastikuelementide rajamine just sellistesse piirkondadesse vähendada tootlikkuse kadu ning samal ajal toetada elurikkust.



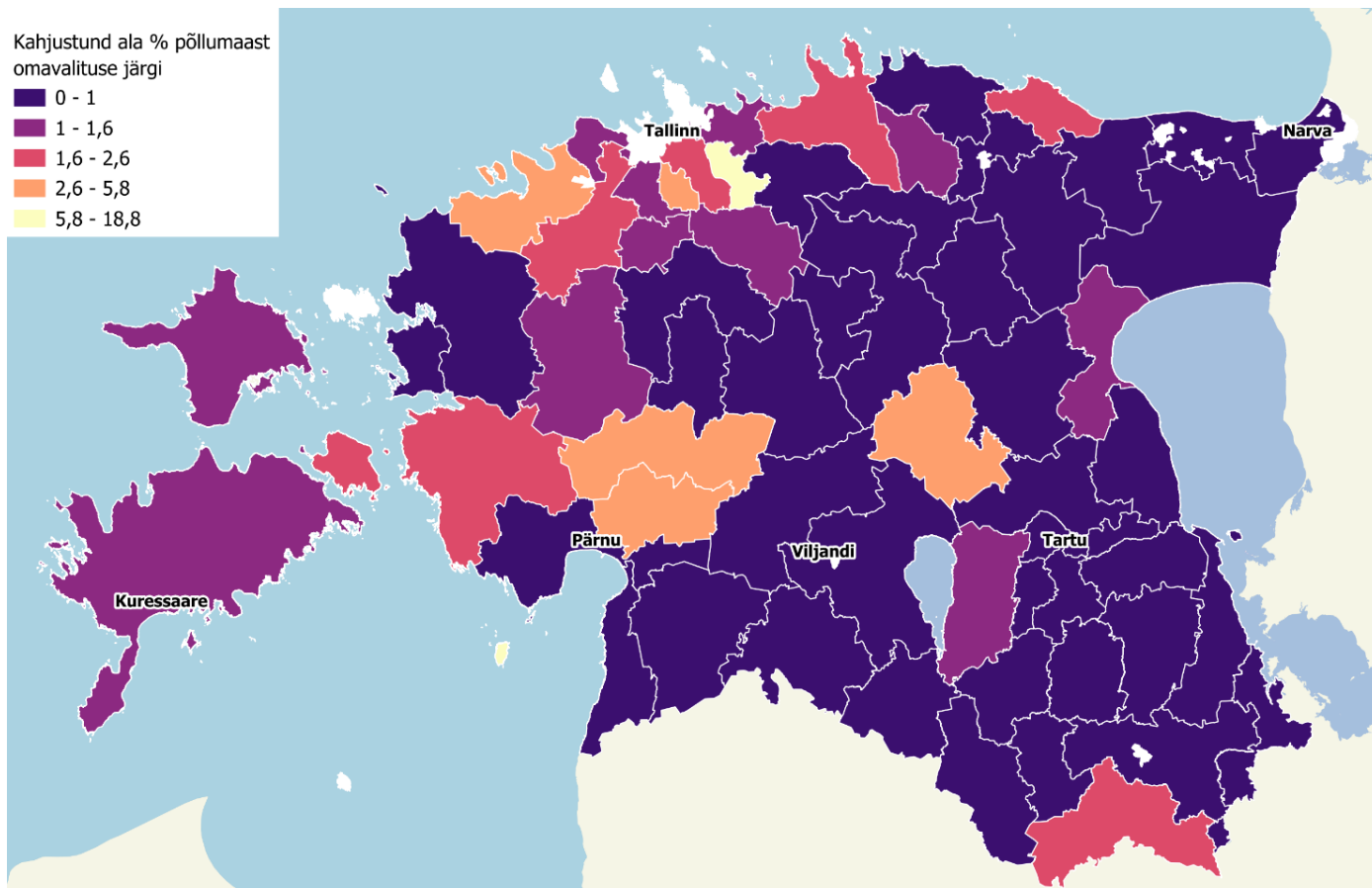
Joonis 5. Tuvastatud kahjustuse pindala (ha) mudelite ja koondmudeli järgi. a) mudelite poolt tuvastatud alade maatriks, b) logaritmilisel skaalal mudelite poolt tuvastatud alade joendiagramm, c) koondmudeli tulemused – pindalad on leitud koondmudeli klassidele vastavalt sellele, mitme mudeli poolt on antud ala kahjustunuks määratud.

3.2. Põllukultuuride püsivate kahjustuste ruumiline jaotus Eestis

PRIA andmete põhjal oli 2017–2024 aastal Eestis 604 552 ha põllumassiive mida kasutati põllukultuuride kasvatamiseks. Käesoleva töö tulemusel leiti põllukultuuride püsivate kahjustustega alasid 957 ha ehk 0,16%. Kahjustunud alad paiknesid suhteliselt ühtlaselt üle Eesti (joonis 6), kuid pindalaliselt esines neid kõige rohkem Põhja-Pärnumaa vallas (184,2 ha). Osakaalu poolest eristusid rohkem Raasiku vald (18,75%), Kihnu vald (17,95%) ja Lääne-Harju vald (5,7%) (joonis 7).



Joonis 6. Põllukultuuride püsivate kahjustuste asukohad. Visualiseerimise eesmärgil on need esitatud punktidenä.



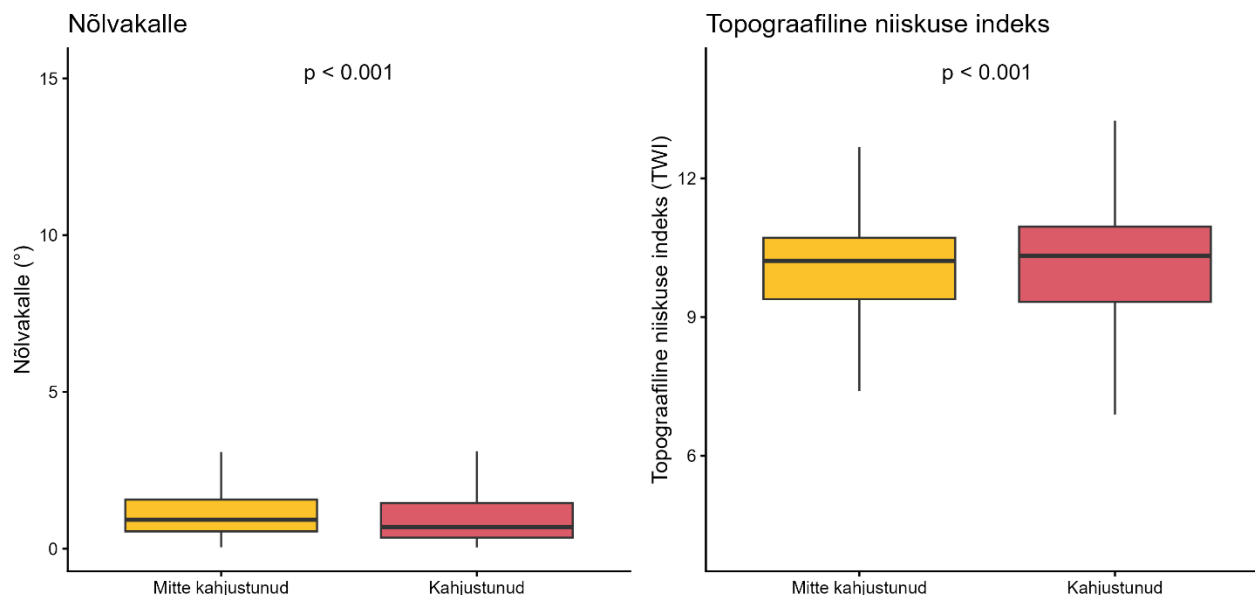
Joonis 7. Kahjustunud alade osakaalud (%) analüüsiks kasutatud põllumaadest erinevates omavalitsustes.

Suhteliselt väike kahjustunud alade protsent tuleneb tõenäoliselt sellest, et kasutasin analüüsis konservatiivseid mudeleid (esimeses etapis hinnatud mudelite põhjal täpsus vahemikus 0,93–0,83), et minimeerida valepositiivseid tulemusi. Ruumiliselt esines rohkem kahjustusi Lääne-Eesti liigniisketel glei- ja soomuldadel, mis viitab tugevale seosele kahjustuste ning veerežiimi ja liigniiskuse vahel. Kuigi sellised mullad on põllumajanduslikult viljakad, põhjustab nende halb vee läbilaskvus ja perioodiline liigniiskus probleeme kultuurtaimede kasvatamisel.

3.3. Kahjustunud alade keskkonnaparametrid

3.3.1. Kahjustusalade seosed TWI ja nõlvakaldega

Mann-Whitney U testi tulemused näitasid, et kahjustunud ja mitte kahjustunud alade vahel esinesid statistiliselt olulised erinevused nii nõlvakalde kui ka TWI osas ($p < 0.001$) (joonis 8). Kuigi statistiline olulisus viitab erinevuse olemasolule jäi mõlema tunnuse efektisuurus väikeseks (nõlvakalle $r = 0.13$; TWI $r = 0.05$), mis näitab, et topograafiliste tunnustega saab selgitada kahjustuste tekkimist ainult osaliselt. Sarnastele tulemustele jõudsid ka Maestrini & Basso (2018), kes leidsid, et madalama tootlikkusega alad on seotud märguse ja veerežiimiga, kuid nende kujunemist mõjutavad samaaegselt ka teised keskkonnategurid.



Joonis 8. Kahjustunud ja mitte kahjustunud alade nõlvakalde ja topograafilise niiskuse indeksi võrdlus.

Mediaanväärtuste põhjal oli kahjustunud aladel nõlvakalle väiksem (0.69°) võrreldes mitte kahjustunud aladega (0.92°), mis viitab sellele, et kahjustunud alad esinevad sagedamini tasasematel aladel. Tasastel aladel on vee äravool aeglasem, mistõttu sademete ja põhjavee mõjul võib kujuneda liigniiskuse. Liigniiskused tingimused vähendavad mulla hapnikusisaldust, piiravad taimede juurte arengut ja toitainete omastamist ning soodustavad juurehaiguste teket (Kõlli et al., 2010; Pachepsky et al., 2001). Kahjustunud aladel oli TWI veidi kõrgem (10,32) kui mitte kahjustunud aladel (10,22), mis on kooskõlas nõlvakalde tulemustega. Kõrgem topograafilise niiskuse indeksi väärtus viitab suuremale vee akumulatsioonile maastike madalamates ning tasasemates kohtades (Buchanan et al., 2014). Nõlvakalde ja TWI vahel esines tugev negatiivne korrelatsioon ($p = -0.86$), mis on ootuspärane, kuna TWI arvutatakse osaliselt ka reljeefi alusel. Mida järsem on nõlv, seda kiirem on äravool ja ma madalam on TWI väärtus (Beven & Kirkby, 1979).

Saadud tulemused viitavad sellele, et kahjustunud alade kujunemine on seotud eelkõige veerežiimi ja vee akumulatsiooniga. Sarnaseid seoseid on leitud ka varasemates uuringutes. Maestrini ja Basso (2018) leidsid, et kõrge TWI väärtusega piirkondades esineb suurem saagikuse ajaline varieeruvus, kuna märgadel aastatel muutuvad sellised alad liigniiskeks, samas kuivadel aastatel võib kõrgem mullaniiskus taimede kasvu hoopis soodustada.

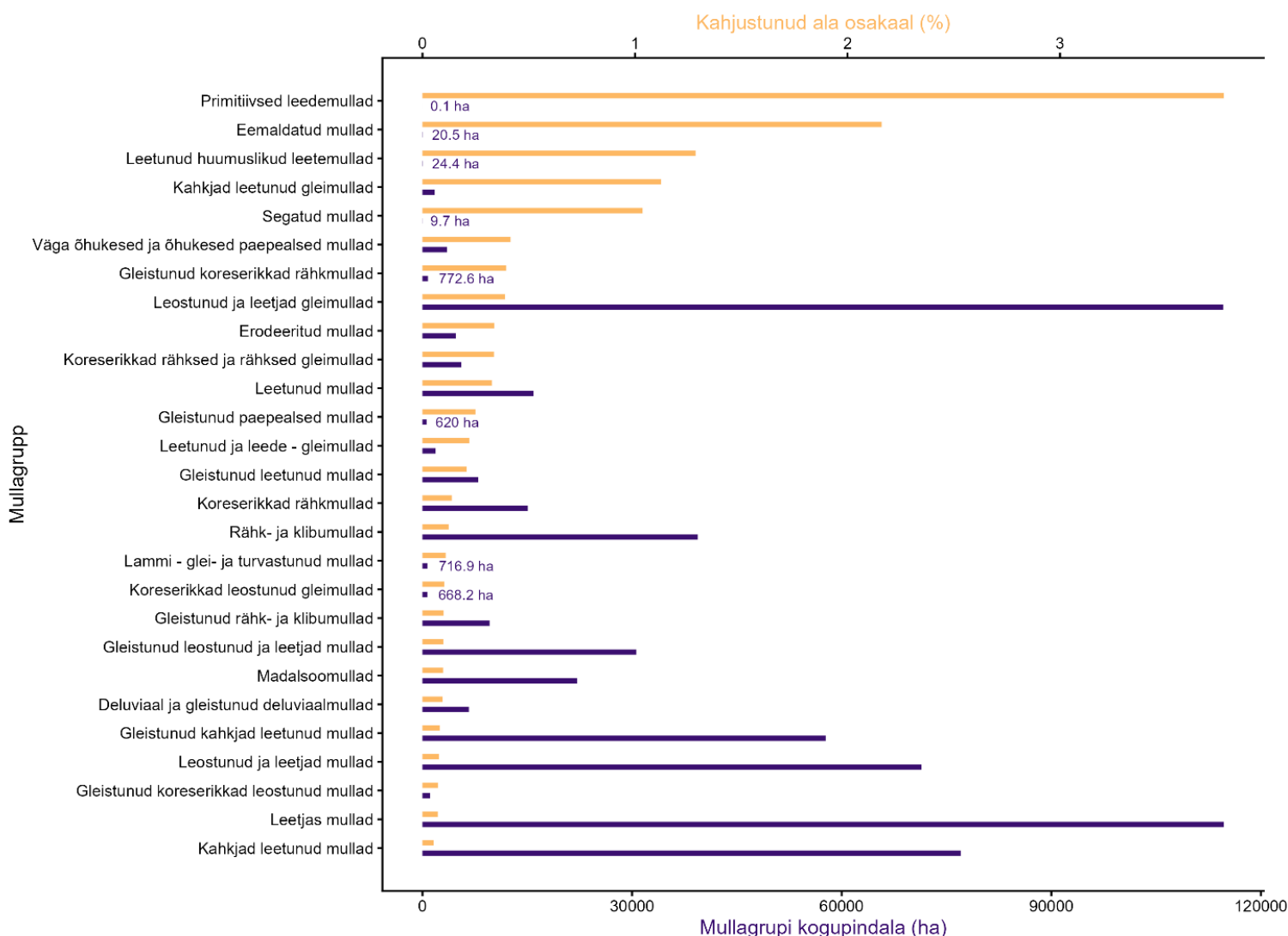
3.3.2. Kahjustunud alade ja mullastiku seos

Tulemused näitavad, et kõige suurema kahjustuste osakaaluga mullagrupid ei moodusta uurimisalast märkimisväärtset osa, mis viitab sellele, et suure kahjustuste osakaaluga mullad pole eriti suures mahus haritavad (joonis 9). Kõrgeima kahjustuste osakaaluga olid primitiivsed leedemullad ($\sim 4\%$), kuid nende esinemine uurimisalas oli marginaalne (0,1 ha). Tegemist on liivase tekstuuri ja madala toitainesisaldusega muldadega, mis on põllumajanduseks vähe sobivad (Astover et al., 2012).

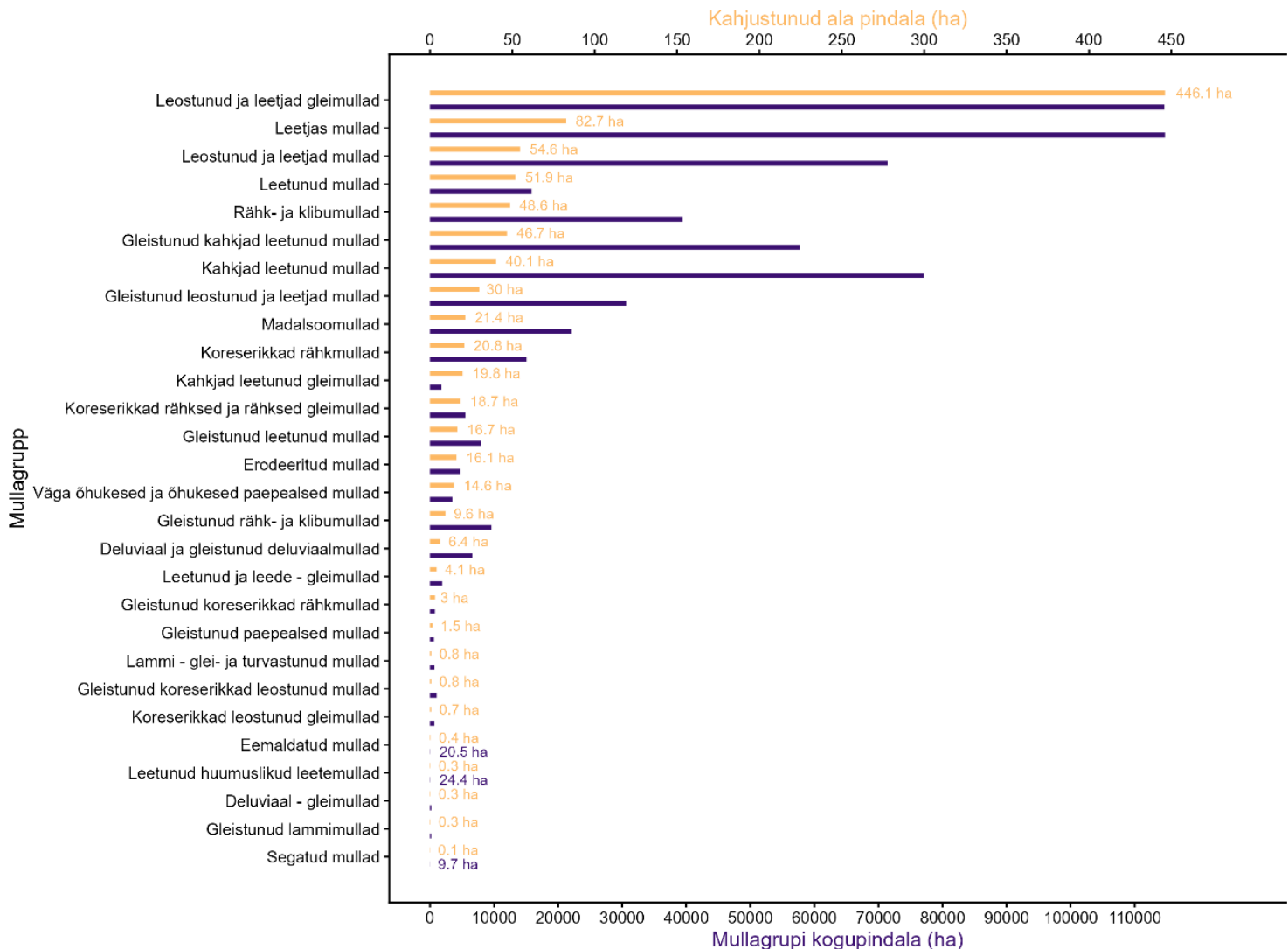
Üle 1% kahjustuste osakaaluga olid ka eemaldatud mullad, leetunud huumuslikud mullad, kahjkad leetunud

gleimullad ning segatud mullad. Nendest gruppidest kõige märkimisväärsema osa moodustasid kahkjad leetunud gleimullad, mida analüüsis oli 1767 ha ning sellest kahjustunud 20 ha. Tegemist on keskmiselt liigniiskete muldade, mis sobivad küll põllukultuuride kasvatamiseks, kuid mille puhul võib liigne märgus piirata taimede kasvu (Maa-ja Ruumiamet, 2001).

Absoluutarvudes esines kõige rohkem kahjustunud alasid leostunud ja leetjatel gleimuldadel (Go, GI), kus kahjustuste pindala oli 446 ha (0,4%, mullagrupi kogupindalast 114 614 ha) (joonis 10). Gleimuldade kujunemine on seotud perioodilise või püsiva üleujutusega ning kõrge põhjaveega. Samas on need ka viljakad mullad, mis viitab, et kahjuste suur osakaal on seotud sellega, et leostunud ja leetjaid muldasid kasutakse suurel määral põlluharimiseks (Astover et al., 2012; Penu & Kikas, 2013).



Joonis 9. Mullagruppide jaotus alustades kõige suurema osakaaluga kahjustunud alade mullagrupist. Kollasega on näidatud mullagrupi kahjustuse osakaal ning lillaga kogu mullagrupi suurus hektarites uurimisalal. Arvuga on välja toodud väga väiksed pindalad. Andmed on filtreeritud nii, et graafikul kuvatakse mullad, mida oli kas rohkem kui 1000 ha või nende kahjustuse oli üle 0,2.



Joonis 10. Mullagruppide jaotus alustades kõige suurema kahjustunud alaga mullagrupist. Kollasega on näidatud mullagrupi kahjustuste pindala ning lillaga kogu mullagrupi suurus hektarites uurimisalal. Arvuga on välja toodud väga väikesed pindalad alla 500 ha.

Varasemad uuringud on samuti seostanud põllukultuuride kehvemat kasvu veerežiimi ja mullastikuga. Layton et al (2020) näitasid et hea vee läbilaskvusega muldadel kasvasid taimed paremini kui halvema vee läbilaskvusega aladel. Narra et al (2022) leidsid Soome põllumajandusmaastikes, et madalama saagikusega alad olid seotud reljeefi ja niiskusega.

Samas viitavad suhteliselt väikesed erinevused nõlvakalde ja TWI väärtustes sellele, et kahjustuste kujunemist ei määra ainult reljeef ja märgus. Taimkatte arengut mõjutavad samaaegselt ka mullastik, kuivendussüsteemide toimimine, ilmastikutingimused, kasvatatav kultuur ning põllumajanduslikud töövõtted.

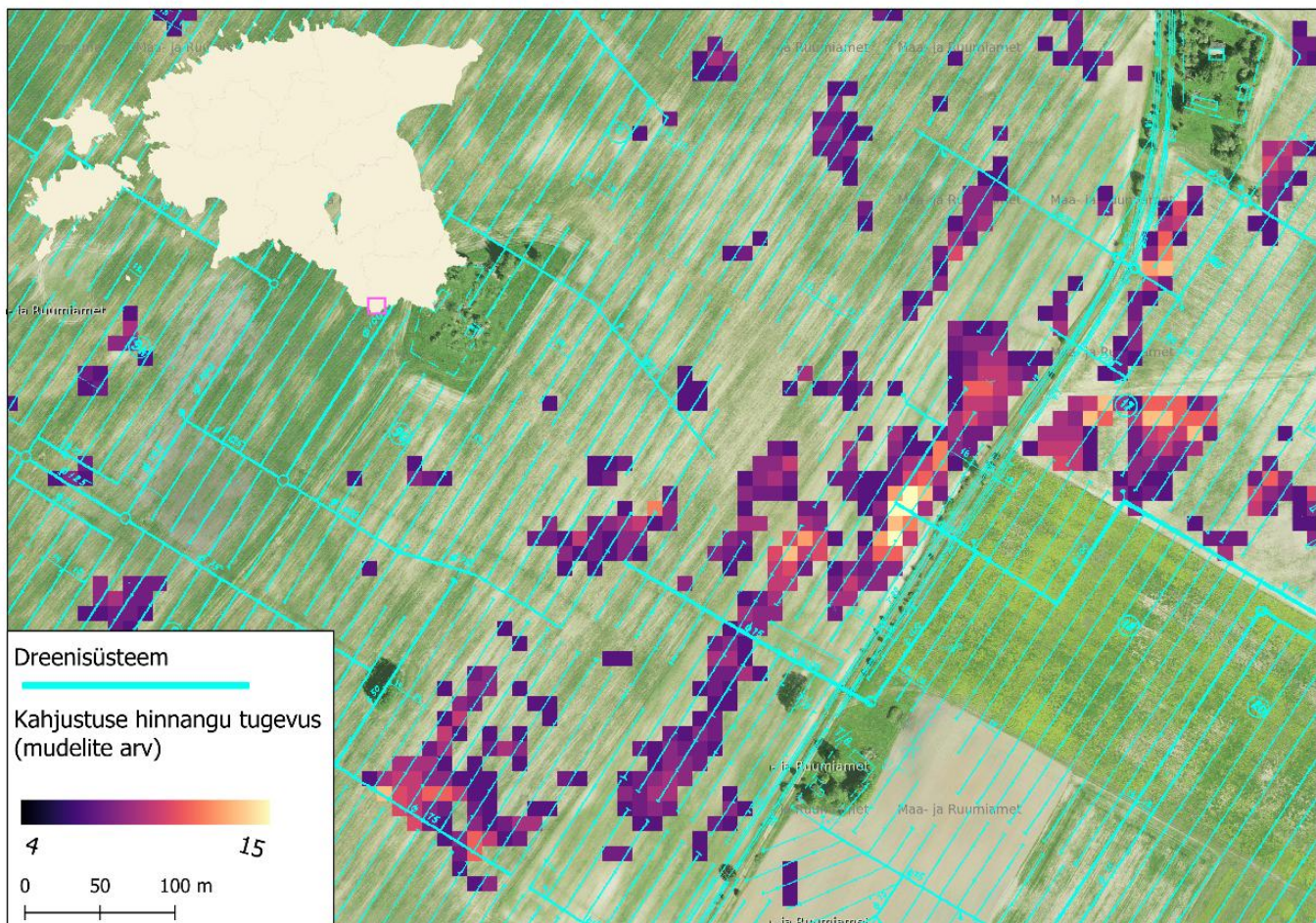
3.4. Põllumajandustootjate hinnang

Käesoleva magistritöö üheks oluliseks osaks oli tulemuste tutvustamine põllumajandustootjatele Maames 2026 raames. Tagasiside kogumise eesmärk oli hinnata, kas mudelite poolt tuvastatud alad vastavad realselt

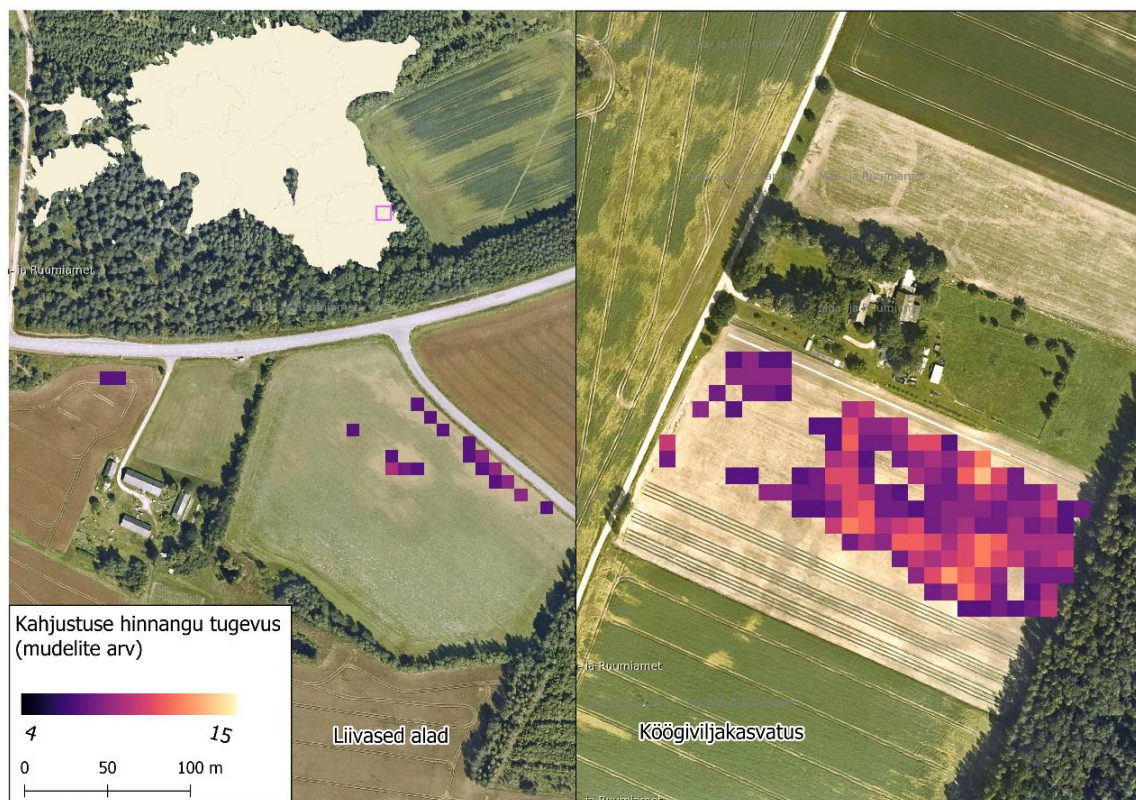
kahjustunud põllumajandusaladele.

Messil küsitleti hinnanguliselt 20 inimest, kokku tuvastati 19 kahjustunud ala, millest 11 tuvastasid mudelid ning 8 ala mudel ei tuvastanud. Kolme mudeli tuvastatud ala olid tegelikult köögiviljakasvatuse või aiandusega tegelevad alad, ning seega tehniliselt mitte kahjustunud (joonis 13). Osaliselt võiks neid alasid lugeda valepositiivseteks, kuid tegelikkuses esineb aiamaal rohkem taimkatteta alasid kui näiteks südasuvisel viljapõllul mistõttu pole leitud alasid täielikult valed.

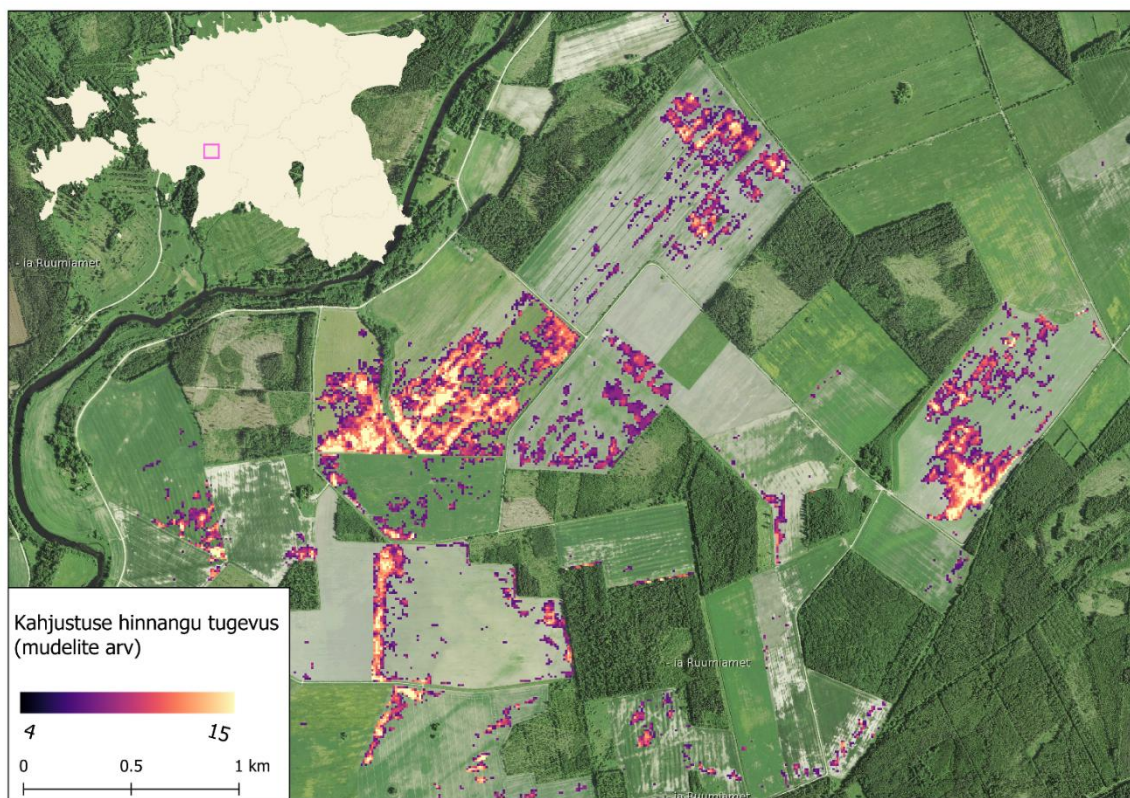
Põllumajandustootjate hinnangul on üheks peamiseks kahjustuste põhjuseks liigvesi, mille kogunemine võib olla seotud drenisüsteemide ebapiisava toimimisega (joonis 12 ja joonis 14). See on põhjendatud, kuna Eesti põllumajandusmaa maaparandussüsteemid on rajatud valdavalt 1960–1980ndatel aastatel ning nende tehniline seisukord on tänaseks oluliselt halvenenud (Järvan et al., 2020; Tamm & Timmusk, 2016). Amortiseerunud drenisüsteemid ei suuda enam tagada piisavat vee ärajuhtimist, mistõttu võib tekkida püsiv liigniiskus. Drenisüsteemide seisukorra ja põllumajandusliku tootlikkuse vahelise seose täpsem hindamine vajab edasist uurimist, näiteks drenisüsteemide kaartide ja kaugseireandmete kombineeritud analüüsi kaudu.



Joonis 12. Kahjustunud alad ning drenisüsteem.



Joonis 13. Rõpina ümbruse näited kahjustunud aladest.



Joonis 14. Tori lähistel suured kahjustunud alad. Enamus alast asub G1 mullal.

4. Järeldused

Töö tulemustest saab järeldada, et Sentinel-2 andmete abil on võimalik leida põllukultuuris püsivalt kahjustunud alasid. Lisaks viitab keskkonnaparametrite analüüs sellele, et enamus kahjustusi on põhjustatud liigniiskusest, mis on tekitatud madalatest ja laugetest kohtades kuhu koguneb vesi, mis gleistunud mulla tõttu ei saa maasse imbuda. See omakorda pärsib taimede kasvu ja tekitab kahjustunud alasid. Antud järeldus sai kinnitust ka põllumajandustootjaid küsitledes, kes viitasid samuti peamiselt liigniiskuse tekitatud kahjustustele. Paaris kohas Lõuna-Eestis toodi välja liivane ala ning kuivus. Mõned põllumajandustootjad näitasid oma maadel kohtasid, kus neil on probleeme, kuid mudel neid ei leidnud. Kuna mudeli loomisel pidasin silmas leida pigem võimalikult kindlalt kahjustunud alasid ja vähem valepositiivseid tulemusi, on ka loogiline, et selle käigus võis palju kahjustunud alasid välja jääda. Tulemkihi rakendamise vaates ongi parem tuua välja pigem rangemate mudelite tulemusi, et leitud kohtade harimisvõtete või kasutusviisi muutmine oleks võimalikult läbimõeldud ja ei tooks kaasa ebavajalikke kulusid või kadusid.

4.1. Tulemuste rakenduslik väärtus

Käesoleva töö tulemused annavad esmase sisendi püsivalt kahjustunud põllumajandusalade kaardistamiseks ning võimaldavad maaomanikel ja põllumajandustootjatel tuvastada alasid, kus põllukultuuride kasv on olnud pikaajaliselt kehv. Selline info võimaldab teha teadlikumaid otsuseid nii maaharimisvõtete muutmise, maaparanduse korrastamise kui ka alternatiivsete maakasutusviiside rakendamise osas.

Üheks võimaluseks on näiteks kuni 0,5 ha suuruste alade maastikuelemendiks muutmine, see eeldab maastikuelemendi nõuetele vastavust ning loodusliku koosluse tekkimist või tekitamist antud alale. Maastikuelemente saab luua nii põllu keskele kui ka põllu äärde. Põllu ääres asuva maastikuelemendi puhul ei tohiks ala olla seotud rohumaaga vaid pigem olema näiteks tee serva lähedal. Maastikuelementide loomine ja kaardikihile kandmine võimaldab tootjatel taotleda ka ökosüsteemiteenuste säilitamise toetust, mis kompenseerib saagikadu tootmisest väljaläinud põllumaa tõttu. Suuremate kui 0,5 ha alade puhul võib neid kasutada rohumaana või kaaluda teisi alternatiivseid toetusi pakkuvaid maakasutus tüüpe (PRIA, 2026).

Töö tulemused visualiseerivad alasid, mis on kohalikele põllumajandustootjatele sageli juba teada probleemsete kohtadena, näiteks liigniiskete või kuivade piirkondadena. Sentinel-2 aegridade kasutamine võimaldab sellist infot koguda ühtselt kogu Eesti ulatuses ning märkimisväärselt väiksema aja- ja ressursikuluga võrreldes põllupõhiste mõõtmiste või saagikusekaartide kogumisega. Mitmed põllumajandustootjad tõid samuti välja, et selliste probleemalade kaardistamine võiks aidata neil põlde paremini majandada.

Kuna Eesti põllumajandusmaastikke on ajalooliselt tugevalt kujundanud maaparandus, võib töö tulemusi kasutada ka potentsiaalselt probleemsete drenaalade leidmiseks. Tulevikus võiks ühe edasiarendusena siduda kahjustunud alade kaardikihi ajalooliste kuivendussüsteemide andmetega, mis võimaldaks hinnata, kas osa kahjustustest võib olla seotud kuivendussüsteemide vananemise või mittetoimimisega.

4.2. Metoodika piirangud ja edasiarendused

Magistritöö väljatöötatud metoodikas esineb ka mitmeid kitsaskohti. Töö üheks oluliseks aspektiks oli sisendandmete kvaliteet ja nende mõju tulemuste usaldusväärsusele. Sentinel-2 andmete kasutamise peamiseks piiranguks on optilise kaugseire iseloom, mille tõttu mõjutavad andmete kättesaadavust ja kvaliteeti pilvisus ning

atmosfääritingimused. Kuigi analüüsis kasutati suveperioodi, mil satelliitandmete kättesaadavus on üldiselt parem, vähendab pilvisus siiski kasutatavate vaatluste hulka. Sellest tulenevalt võib osadel aladel aeGRIDade kvaliteet olla ebaühtlane. Tulemuste täpsust mõjutas ka Sentinel-2 andmete ruumiline lahutusvõime (10 m), mille tõttu võivad väiksemad ja kahjustused jääda osaliselt tuvastamata.

Põllumassiivide uurimiskihi koostamisel kasutati PRIA ajaloolisi põllumassiivide andmeid, kuid analüüsis ei arvestatud kasvatatavate põllukultuuride eripärasid. Tulemuste valideerimisel ilmnes, et teatud juhtudel klassifitseeris mudel kahjustunuks alasid, mis ei olnud tegelikult probleemsed, näiteks köögiviljakasvatused ja aiandusalad. See viitab vajadusele töö edasiarendamisel uurimisalasid valides lähtuda rohkem ka kasvatatavast põllukultuurist, näiteks analüüsida ainult teraviljaga alasid.

Valideerimiseks kasutatud ortofotode rakendamine oli samuti piiratud. Ortofotode tegemise sagedus on Eestis kord nelja aasta jooksul, mistõttu ei võimalda need alati hinnata kahjustuste püsivust erinevatel aastatel. Lisaks tehakse lennud peamiselt varakevadest hilissuveni, mis tähendab, et põllukultuurid ei pruugi olla veel täielikult välja arenenud või võivad juba olla liiga kõrges kasvufaasis. Seetõttu ei anna ortofotod alati adekvaatset ülevaadet taimkatte seisundist kasvuperioodi kõrghetkel. Osaliselt võimaldasid ortofotod siiski hinnata mudelite tulemuste realistlikkust ning tuvastada potentsiaalselt püsivaid kahjustunud alasid.

Oluliseks piiranguks jäi ka valideerimisandmete hulk ja kvaliteet. Käesolevas töös kasutati valideerimiseks ortofotode põhjal määratud alasid ning piiratud hulgal põllumajandustootjatelt saadud tagasisidet. Kuigi esialgsed tulemused viitavad sellele, et mudel suudab tuvastada reaalseid kahjustusalasid, oleks metoodika põhjalikumaks hindamiseks vajalik suurem ja süsteemsem valideerimisandmestik. Üks võimalik valideerimisandmete allikas võiks olla kombinide kogutav info põldude kohta. Selliste andmete puhul on samuti oluline, et need on saadaval mitme aasta kohta.

Taimkatteindeksitest kasutati töö testimisfaasis nii NDVI kui ka EVI indeksit, kuid lõplikus analüüsis keskenduti EVI-le, kuna see on vähem tundlik atmosfääri ja mulla heleduse mõjule ning kirjeldab taimkatte seisundit stabiilsemalt tihedama taimkatte korral. Samas võiks erinevate taimkatteindeksite kombineerimine ning radarandmete kaasamine parandada kahjustusalade tuvastamise täpsust, eriti pilviste perioodide korral.

Lisaks pakuti maamessil osaleja poolt välja ka idee siduda selles töös loodud kahjustuste kaart ajaloolise kaardiga ning uurida ajalooliste maastikuelementide asukohti tänapäevaste kahjustunud aladega. Selline lähenemine aitaks jõuda arusaamale, kas alad kus ajalooliselt on olnud maastikuelemente on kehvema saagikusega kohad, ning juhul kui on, siis võiks ajaloolise maastikuelemendi taastamine samas kohas olla üks võimalus probleemiga tegeleda.

Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärk oli töötada välja Sentinel-2 aegridade põhine metoodika põllukultuuri püsivate kahjustuste tuvastamiseks Eesti põllumajandusmaastikes. Lisaks hinnata, millised on püsivalt kahjustunud alade peamised ruumilised ja keskkonnatingimustega seotud tunnused ning kuidas selliste alade kaardistamist võiks rakendada põllumajandusmaastike kestlikumaks majandamiseks ja/või tootlikkuse tõstmiseks.

Töö eesmärgid saavutati läbi kahe peamise väljundi. Esmalt töötati välja Sentinel-2 EVI aegridade analüüsil põhinev metoodika kahjustunud põllukultuurialade tuvastamiseks aastatel 2017 – 2024. Selle käigus loodi erinevatel EVI ja ajalistel lävenditel põhinevad mudelid ning nende kombineerimisel koostati koondmudel püsivate kahjustusalade leidmiseks kogu Eesti ulatuses. Teiseks analüüsiti tuvastatud kahjustusalade seoseid reljeefi, topograafilise niiskuse indeksi (TWI) ja mullastikuga.

Magistritöö oli oma olemuselt metoodiline, kuna töö keskendus eelkõige kaugseireandmete põhjal püsivate kahjustusalade automaatse tuvastamise töövoog väljatöötamisele ja valideerimisele. Metoodika rakendamiseks loodi Google Earth Engine põhine töövoog, mille sisenditeks olid Sentinel-2 andmed ja PRIA põllumassiivide andmed. Töö olulisemateks metoodilisteks lahendusteks olid järgmised sammud:

- Mitmeaastaste Sentinel-2 EVI aegridade kasutamine võimaldas tuvastada alasid, kus madalad taimkatte väärtused esinesid püsivalt samades kohtades aastatel 2017–2024.
- Püsivate kahjustusalade leidmiseks kombineeriti erinevaid EVI lävendeid ($\leq 0,30$; $\leq 0,33$; $\leq 0,35$) ning ajalisi lävendeid (55–75%), mille tulemusena koostati kahjustusalade koondmudel.
- Valepositiivsete tulemuste vähendamiseks kasutati konservatiivset lähenemist, kus kahjustuseks loeti pikslid, mida koondmudelis klassifitseeriti kahjustunuks vähemalt nelja mudeli poolt.
- Põlluservadest tingitud müra vähendamiseks kasutati põllumassiivide puhul -10 m puhvrit.

Töö tulemusel tuvastati Eestis kokku 957 ha püsivate kahjustustega põllukultuurialasid, mis moodustas ligikaudu 0,16% kogu analüüsitud põllumajandusmaast. Kahjustunud alasid esines üle Eesti, kuid pindalaliselt koondusid suuremad kahjustusalad Põhja-Pärnumaa valda. Osakaalu poolest eristusid enim Raasiku vald, Kihnu vald ja Lääne-Harju vald.

Nõlvakalde ja märguse analüüs näitas, et kahjustunud alad paiknesid sagedamini laugemates ja kõrgema TWI väärtusega piirkondades. Mullastiku analüüsis domineerisid kahjustunud aladel leostunud ja leetjad gleimullad, mis viitab liigniiskuse olulisele rollile kahjustuste kujunemisel. Tulemused olid kooskõlas varasemate uuringutega, kus madalama tootlikkusega alasid seostati reljeefi, mullastiku ning vee akumuleerumisega maastiku madalamates osades.

Töö käigus läbiviidud valideerimine näitas, et mudel suutis tuvastada reaalseid kahjustusalasid, mida kinnitasid nii ortofotode analüüs kui ka põllumajandustootjate tagasiside. Samas ilmnes, et teatud juhtudel klassifitseeris mudel kahjustunuks ka alasid, mis ei olnud tegelikult probleemsed, näiteks kõõgiviljakasvatus.

Kokkuvõttes kinnitavad magistritöö tulemused, et Sentinel-2 aegridade põhjal on võimalik automaatselt tuvastada põllukultuuride püsivaid kahjustusi kogu Eesti ulatuses. Kuigi loodud metoodika ei võimalda otseselt hinnata kahjustuste põhjuseid ega asenda põllupõhist seiret, kujutab see endast paindlikku ja ajakohastatavat tööriista

probleemsete põllumajandusalade kaardistamiseks. Edasise arenduse korral võiks metoodikat siduda näiteks saagikusekaartide või kuivendussüsteemide andmetega ning kasutada otsustustoe süsteemides põllumajandusmaastike kestlikumaks majandamiseks.

Detecting permanent damage to crops using Sentinel-2 data

Vete-Mari Kuningas

Summary

The objective of this master's thesis was to develop a methodology based on Sentinel-2 time series for detecting permanent crop damage in Estonian agricultural landscapes. Additionally, to assess the main spatial and environmental characteristics of permanently damaged areas and how the mapping of such areas could be applied to manage agricultural landscapes more sustainably and/or increase productivity.

The objectives of the study were achieved through two main outputs. First, a methodology based on the analysis of Sentinel-2 EVI time series was developed to identify damaged crop areas from 2017 to 2024. In the process, models based on various EVI and temporal thresholds were created, and by combining them, a composite model was developed to identify persistent damage areas across the entire territory of Estonia. Second, the relationships between the identified damaged areas and terrain, the topographic wetness index (TWI) and soil conditions were analyzed.

The master's thesis was methodological in nature, as the work focused primarily on developing and validating a workflow for the automatic identification of persistent damage areas based on remote sensing data. To implement the methodology, a Google Earth Engine-based workflow was created, using Sentinel-2 data and PRIA agricultural parcel data as inputs. The key methodological solutions of the study were the following steps:

- The use of multi-year Sentinel-2 EVI time series made it possible to identify areas where low vegetation cover values persisted in the same locations between 2017 and 2024.
- To identify persistent damage areas, various EVI thresholds (≤ 0.30 ; ≤ 0.33 ; ≤ 0.35) and temporal thresholds (55–75%) were combined, resulting in a consolidated model of damage areas.
- To reduce false positives, a conservative approach was used, in which pixels classified as damaged by at least four models in the consolidated model were considered damaged.
- To reduce noise caused by field edges, a -10 m buffer was applied to agricultural blocks.

The study identified a total of 957 hectares of cropland in Estonia with permanent damage, accounting for approximately 0.16% of the total agricultural land analyzed. Damaged areas were found throughout Estonia, but in terms of area, the largest damaged areas were concentrated in the municipality of Põhja-Pärnumaa. In terms of proportion, the municipalities of Raasiku, Kihnu, and Lääne-Harju stood out the most.

Analysis of topography and moisture levels showed that damaged areas were more frequently located in flatter regions with higher TWI values. Soil analysis revealed that leached and leached gleysols dominated in the damaged areas, indicating the significant role of excess moisture in the development of damage. The results were consistent with previous studies, in which areas with lower productivity were associated with relief, soil conditions, and water accumulation in the lower parts of the landscape.

Validation conducted during the study showed that the model was able to identify actual damaged areas, which was confirmed by both orthophoto analysis and feedback from farmers. At the same time, it became apparent that

in certain cases, the model also classified areas as damaged that were not actually problematic, such as regions with vegetable cultivation or specific land use.

In conclusion, the results of this master's thesis confirm that it is possible to automatically detect persistent crop damage across the entire territory of Estonia using Sentinel-2 time series. Although the developed methodology does not allow for a direct assessment of the causes of damage nor does it replace field-based monitoring, it represents a flexible and updatable tool for mapping problematic agricultural areas. With further development, the methodology could be linked, for example, to yield maps or drainage system data and used in decision support systems for the more sustainable management of agricultural landscapes.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendaid Evelyn Uuemaad ja Eve Veromanni, kelle erialased tähelepanekud, head nõuanded ning julgustus olid väga suureks toeks lõputöö valmimisel. Lisaks soovin tänada kõiki inimesi Maamessilt, kes mu andmeid uurisid ja arvamust avaldasid. Samuti olid suureks abiks PRIA töötajad, kes nõustasid mind nii andmete otsimise kui ka tõlgendamiseks vajaliku info leidmisel. Tänan oma lähedasi, eriti Greetet ja Quinteni, kes olid alati minu jaoks olemas.

Kasutatud kirjandus

- AASTA MULD | Leostunud gleimuldi leiab enim Pärnu-, Rapla- ja Läänemaal. (2024, January 9). *loodusajakiri.ee*.
<https://www.loodusajakiri.ee/aasta-muld-leostunud-gleimuldi-leiab-enim-parnu-rapla-ja-laanemaal/>
- Aikawa, E., & Saito, M. U. (2023). Effects of intensive agricultural landscapes on farmland use by medium and large mammals in Japan. *Écoscience*, 30(1), 2–16. <https://doi.org/10.1080/11956860.2022.2151554>
- Albero, L., Martínez-Solano, Í., Arias, A., Lizana, M., & Bécares, E. (2021). Amphibian Metacommunity Responses to Agricultural Intensification in a Mediterranean Landscape. *Land*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/land10090924>
- Arneth, A., Denton, F., Agus, F., Elbehri, A., Erb, K., Elasha, B. O., Rahimi, M., Rounsevell, M., Spence, A., Valentini, R., Alexander, P., Bai, Y., Bastos, A., Debonne, N., Fuglestedt, J., Hillerbrand, R., Janz, B., Kastner, T., Longva, Y., ... Valentini, R. (2022). Framing and context. In *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (pp. 77–130). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157988.003>
- Astover, A. (2005). *Muldade klassifitseerimine*. https://www.maad.ee/avalik_leht/img/Eesti-mullastik.pdf
- Astover, A., Kölli, R., Roostalu, H., Reintam, E., & Leedu, E. (2012). *Mullateadus. Õpik kõrgkoolidele*.
<https://www.etis.ee/Portal/Publications/Display/9fce058a-af3b-4722-8ed2-a04cb58bcd11>
- Astover, A., Leedu, E., Penu, P., & Kikas, T. (2017). *Aasta muld 2018. Näivleetunud muld*.
<https://dspace.emu.ee/server/api/core/bitstreams/25492613-3c08-489e-bcc2-84016603415a/content>
- Astover, A., Roostalu, H., Lauringson, E., Lemetti, I., & Et., A. (2006). Changes in agricultural land use and in plant nutrient balances of arable soils in Estonia. *Archives of Agronomy and Soil Science*.
<https://doi.org/10.1080/03650340600638883>
- Balestrieri, A., Gazzola, A., Formenton, G., & Canova, L. (2019). Long-term impact of agricultural practices on the diversity of small mammal communities: A case study based on owl pellets. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(12), 725. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7910-5>
- Beillouin, D., Schauburger, B., Bastos, A., Ciais, P., & Makowski, D. (2020). Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*,

375(1810), 20190510. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>

- Belfrage, K., Björklund, J., & Salomonsson, L. (2015). Effects of Farm Size and On-Farm Landscape Heterogeneity on Biodiversity—Case Study of Twelve Farms in a Swedish Landscape. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 39(2), 170–188. <https://doi.org/10.1080/21683565.2014.967437>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Diamantoulakis, P., Liopa-Tsakalidi, A., Barouchas, P., Salahas, G., Karagiannidis, G., Wan, S., & Goudos, S. K. (2022). Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review. *Internet of Things*, 18, 100187. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187>
- Buchanan, B. P., Fleming, M., Schneider, R. L., & Richards, B. K. (2014). Evaluating topographic wetness indices across central New York agricultural landscapes. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3279-2014>
- Castellano, M. J., Archontoulis, S. V., & Helmers, M. J. (2019, July 10). *Sustainable intensification of agricultural drainage*. <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0393-0>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed). L. Erlbaum Associates. <https://utstat.toronto.edu/~brunner/oldclass/378f16/readings/CohenPower.pdf>
- Copernicus Data Space Ecosystem. (2026). *Sentinel-2*. <https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-missions/sentinel-2> (viimati vaadatud 25.05.2026)
- Dawson, I. K., Park, S. E., Attwood, S. J., Jamnadass, R., Powell, W., Sunderland, T., & Carsan, S. (2019). Contributions of biodiversity to the sustainable intensification of food production. *Global Food Security*, 21, 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.07.002>
- de Albuquerque Pereira, B., Ilha, C., da Rosa, M. G., Brescovit, A. D., Pompeo, P. N., Oliveira Filho, L. C. I. de, Baretta, D., Rezende, R. de S., & Maluche Baretta, C. R. D. (2025). Intensification of land use in Neotropical environments determines loss of taxonomic and functional diversity of spiders. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 381, 109447. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109447>

- Delgado, J. A., Short, N. M., Roberts, D. P., & Vandenberg, B. (2019). Big Data Analysis for Sustainable Agriculture on a Geospatial Cloud Framework. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00054>
- Delgado, L., Schuster, M., & Torero, M. (2021). Quantity and quality food losses across the value Chain: A Comparative analysis. *Food Policy, Food Loss and Waste: Evidence for Effective Policies*, 98, 101958. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101958>
- Dijk, T. van. (2003a). *Dealing with Central European land fragmentation: A critical assessment on the use of Western European instruments*. <https://research.wur.nl/en/publications/dealing-with-central-european-land-fragmentation-a-critical-asses/>
- Dijk, T. van. (2003b). Scenarios of Central European land fragmentation. *Land Use Policy*, 20(2), 149–158. [https://doi.org/10.1016/S0264-8377\(02\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S0264-8377(02)00082-0)
- Dong, T., Shang, J., Liu, J., Qian, B., Jing, Q., Ma, B., Huffman, T., Geng, X., Sow, A., Shi, Y., Canisius, F., Jiao, X., Kovacs, J. M., Walters, D., Cable, J., & Wilson, J. (2019). Using RapidEye imagery to identify within-field variability of crop growth and yield in Ontario, Canada. *Precision Agriculture*, 20(6), 1231–1250. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09646-w>
- Eesti keskkonna andmekuup. (2026). <https://geokuup.ee/guide/data-cube-portal-user-guide/querying-layers> (viimati vaadatud 25.05.2026)
- Eesti riigi andmete portaal. (2026). <https://andmed.eesti.ee/> (viimati vaadatud 25.05.2026)
- EU biodiversity strategy for 2030 | EUR-Lex. (2020). <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/eu-biodiversity-strategy-for-2030.html> (viimati vaadatud 25.05.2026)
- Garibaldi, L. A., Oddi, F. J., Miguez, F. E., Bartomeus, I., Orr, M. C., Jobbágy, E. G., Kremen, C., Schulte, L. A., Hughes, A. C., Bagnato, C., Abramson, G., Bridgewater, P., Carella, D. G., Díaz, S., Dicks, L. V., Ellis, E. C., Goldenberg, M., Huaylla, C. A., Kuperman, M., ... Zhu, C.-D. (2021). Working landscapes need at least 20% native habitat. *Conservation Letters*, 14(2), e12773. <https://doi.org/10.1111/conl.12773>
- Garibaldi, L. A., Zermoglio, P. F., Jobbágy, E. G., Andreoni, L., Ortiz de Urbina, A., Grass, I., & Oddi, F. J. (2023). How to design multifunctional landscapes? *Journal of Applied Ecology*, 60(12), 2521–2527. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14517>
- Gebhardt, S., van Dijk, J., Wassen, M. J., & Bakker, M. (2023). Agricultural intensity interacts with landscape

arrangement in driving ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 357, 108692.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108692>

Golicz, K., Ghazaryan, G., Niether, W., Wartenberg, A. C., Breuer, L., Gatteringer, A., Jacobs, S. R., Kleinebecker, T., Weckenbrock, P., & Große-Stoltenberg, A. (2021). The Role of Small Woody Landscape Features and Agroforestry Systems for National Carbon Budgeting in Germany. *Land*, 10(10).

<https://doi.org/10.3390/land10101028>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, Big Remotely Sensed Data: Tools, Applications and Experiences*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Gramlich, A., Stoll, S., Stamm, C., Walter, T., & Prasuhn, V. (2018). Effects of artificial land drainage on hydrology, nutrient and pesticide fluxes from agricultural fields – A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 266, 84–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.04.005>

Guerrero, I., Duque, D., Oñate, J. J., Pärt, T., Bengtsson, J., Tschardtke, T., Liira, J., Aavik, T., Emmerson, M., Berendse, F., Ceryngier, P., Weisser, W. W., & Morales, M. B. (2024). Agricultural intensification affects birds' trait diversity across Europe. *Basic and Applied Ecology*, 74, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2023.11.007>

Guiller, G., Legentilhomme, J., Boissinot, A., Blouin-Demers, G., Barbraud, C., & Lourdais, O. (2022). Response of farmland reptiles to agricultural intensification: Collapse of the common adder *Vipera berus* and the western green lizard *Lacerta bilineata* in a hedgerow landscape. *Animal Conservation*, 25(6), 849–864.

<https://doi.org/10.1111/acv.12790>

Hariohay, K. M., Munuo, W. A., & Røskft, E. (2020). Human–elephant interactions in areas surrounding the Rungwa, Kizigo, and Muhesi Game Reserves, central Tanzania. *Oryx*, 54(5), 612–620.

<https://doi.org/10.1017/S003060531800128X>

Hartvigsen, M. (2014). Land reform and land fragmentation in Central and Eastern Europe. *Land Use Policy*, 36, 330–341. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.08.016>

Hartvigsen, M. (2015). *Experiences with land consolidation and land banking in Central and Eastern Europe after 1989*. <https://openknowledge.fao.org/items/8a9bedde-16f4-4a7b-9110-0788b0de1c77>

Hijmans, R., Brown, A., & Barbosa, M. (2026). *Hijmans R, Brown A, Barbosa M (2026). Terra: Spatial Data Analysis. R*

package version 1.9-29 [C++]. rspatial. [https://github.com/rspatial/terra](https://github.com/rsatial/terra)

- Holland, J. M., Douma, J. C., Crowley, L., James, L., Kor, L., Stevenson, D. R. W., & Smith, B. M. (2017). Semi-natural habitats support biological control, pollination and soil conservation in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(4), 31. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0434-x>
- Huang, X., Liu, J., Zhu, W., Atzberger, C., & Liu, Q. (2019). The Optimal Threshold and Vegetation Index Time Series for Retrieving Crop Phenology Based on a Modified Dynamic Threshold Method. *Remote Sensing*, 11(23), 2725. <https://doi.org/10.3390/rs11232725>
- Huang, Y., Chen, Z., Yu, T., Huang, X., & Gu, X. (2018). Agricultural remote sensing big data: Management and applications. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(9), 1915–1931. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61859-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61859-8)
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment, The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): A New Generation of Land Surface Monitoring*, 83(1), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete, A., Justice, C., & Liu, H. (1994). Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, 49(3), 224–234. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90018-3)
- Järvan, M., Vettik, R., Koppel, M., Sooväli, P., & Saue, T. (2020). *Hea põllumajandustava*. Eesti Taimekasvatuse Instituut, Maaeluministeerium. https://maaruum.ee/sites/default/files/documents/2024-12/Hea_pollumajandustava_UUS_2020.pdf
- Johnson, M. D., Hsieh, W. W., Cannon, A. J., Davidson, A., & Bédard, F. (2016). Crop yield forecasting on the Canadian Prairies by remotely sensed vegetation indices and machine learning methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218–219, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.003>
- Junaid, M., & Gokce, A. (2024). Global agricultural losses and their causes. *Bulletin of Biological and Allied Sciences Research*, 2024(1), 66–66. <https://doi.org/10.54112/bbasr.v2024i1.66>
- Jürgenson, E. (2016). Land reform, land fragmentation and perspectives for future land consolidation in Estonia. *Land Use Policy*, 57, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.030>
- Kaasik, R., Vilumets, S., Treier, K., Roosileht, U., Holland, J. M., & Veromann, E. (2026). Community composition,

- abundance and activity-density of carabids and staphylinids depend on prey abundance and adjacent habitat even in diverse agricultural landscapes. *Pest Management Science*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1002/ps.70765>
- Klerkx, L., & Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24, 100347. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>
- Kmoch, A., Kanal, A., Astover, A., Kull, A., Virro, H., Helm, A., Pärtel, M., Ostonen, I., & Uuemaa, E. (2020). *EstSoil-EH: A high-resolution eco-hydrological modelling parameters dataset for Estonia (dataset)* [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4291855>
- Kõlli, R., Ellermäe, O., Kauer, K., & Köster, T. (2010). Erosion-affected soils in the Estonian landscape: Humus status, patterns and classification. *Archives of Agronomy and Soil Science*. <https://doi.org/10.1080/03650340903005624>
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Košánová, S., Halabuk, A., Kenderessy, P., & Rusňák, T. (2025). Assessment of yield stability patterns using sentinel-2 over a 7-year period. *Geocarto International*, 40(1), 2532529. <https://doi.org/10.1080/10106049.2025.2532529>
- Kostiukhin, A. (2022). *Clustering analysis of spatiotemporal Sentinel-2 data of agricultural parcels in Estonia for damaged crop delineation*. <https://dspace.ut.ee/server/api/core/bitstreams/98fde106-7db2-44c4-bf58-2aa15123bcba/content> (viimati vaadatud 25.05.2026)
- Kravchenko, A. N., Robertson, G. P., Thelen, K. D., & Harwood, R. R. (2005). Management, Topographical, and Weather Effects on Spatial Variability of Crop Grain Yields. *Agronomy Journal*. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0514>
- Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, 28, 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
- Lam, D. (2025). The Next 2 Billion: Can the World Support 10 Billion People? *Population and Development Review*, 51(1), 63–102. <https://doi.org/10.1111/padr.12685>
- Layton, A., Krogmeier, J. V., Ault, A., & Buckmaster, D. R. (2020). From yield history to productivity zone identification with hidden Markov random fields. *Precision Agriculture*, 21(4), 762–781. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09694-2>

- Leedu, E., Astover, A., Kikas, T., & Penu, P. (2025). *Aasta muld 2026. Leetjas muld*. <http://hdl.handle.net/10492/10194>
- Leedu, E., Astover, A., Penu, P., & Kikas, T. (2020). *Aasta muld 2021. Rähkmuld*.
<https://dspace.emu.ee/server/api/core/bitstreams/41cd35cc-c1c2-4309-9669-ba5c5a72e13c/content>
- Leedu, E., Astover, A., Penu, P., & Kikas, T. (2022). *Aasta muld 2023. Leetunud muld*.
<https://dspace.emu.ee/server/api/core/bitstreams/46697e77-6fdd-4412-bd65-9b191b4645a5/content>
- León-López, K. M., Mouret, F., Arguello, H., & Tournet, J.-Y. (2022). Anomaly Detection and Classification in Multispectral Time Series Based on Hidden Markov Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–11. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3101127>
- Li, H.-Y., Lawrence, J. A., Mason, P. J., & Ghail, R. C. (2026). A Framework for Accurate Annual Regional Crop Yield Prediction. *Remote Sensing*, 18(8), 1157. <https://doi.org/10.3390/rs18081157>
- Lillema, A. (1958). *Eesti NSV mullastiku valdkonnad*. <https://www.digar.ee/arhiiv/et/pildimaterjal/110972> (viimati vaadatud 25.05.2026)
- Liu, C., Sun, P. S., & Liu, S. R. (2016). *A review of plant spectral reflectance response to water physiological changes*.
<https://www.plant-ecology.com/EN/10.17521/cjpe.2015.0267?refererToken=b384972f857943368dcc5ce889a9763d>
- Liu, H. Q., & Huete, A. (1995). *Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise*. <https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/13171>
- Livi-Bacci, M. (2025). *A Concise History of World Population*. Google Books.
https://books.google.ee/books?hl=en&lr=&id=2-iXEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&ots=aLTE9c_Oqi&sig=Ajhe9xqUeWLs89A0YvPSF1NuKoM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Maa-ja Ruumiamet. (2001). *Vabariigi suuremõõtkavalise mullastiku kaardi*.
https://geoportaal.maaamet.ee/docs/muld/mullakaardi_seletuskiri.pdf
- Maa-ja Ruumiamet. (2026a). *Mullastiku kaardi värvikoodide tabel*.
<https://geoportaal.maaamet.ee/est/kaardirakendused/mullastiku-kaart/mullastiku-kaardi-varvikoodide-tabel-p174.html> (viimati vaadatud 25.05.2026)
- Maa-ja Ruumiamet. (2026b). *Ortofotod*. <https://geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed/ortofotod-p99.html> (viimati

vaadatud 25.05.2026)

Maaparandus | Regionaal- ja Põllumajandusministeerium. (2023). <https://www.agri.ee/maaelu-pollumajandus-toiduturg/maaelu-maettevotlus-maakasutus/maaparandus> (viimati vaadatud 25.05.2026)

Maaparandussüsteemid | Maa- ja Ruumiamet. (2024). <https://maaruum.ee/maaparanduse-ulesanded/maaparandussusteemid/maaparandussusteemid>(viimati vaadatud 25.05.2026)

Maasikamäe, S., Jürgenson, E., & Estonia, K. S. (2016). *The Rearrangement of Leasehold Agreements as an Alternative to Land Consolidation.*

MacDonald, R. B., & Hall, F. G. (1980). Global Crop Forecasting. *Science*, 208(4445), 670–679.
<https://doi.org/10.1126/science.208.4445.670>

Maestrini, B., & Basso, B. (2018). Drivers of within-field spatial and temporal variability of crop yield across the US Midwest. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32779-3>

Mander, Ü., & Palang, H. (1994). Changes of landscape structure in Estonia during the Soviet period. *GeoJournal*, 33(1), 45–54. <https://doi.org/10.1007/BF00810135>

Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-density Cypress Forest. *Sensors*, 7(11), 2636–2651. <https://doi.org/10.3390/s7112636>

Mazoyer, M., & Roudart, L. (2006). *A History of World Agriculture: From the Neolithic Age to the Current Crisis*. NYU Press.
https://books.google.ee/books/about/A_History_of_World_Agriculture.html?id=vt0VCgAAQBAJ&redir_esc=y

Minhas, P. S., Rane, J., & Pasala, R. K. (2017). Abiotic Stresses in Agriculture: An Overview. In P. S. Minhas, J. Rane, & R. K. Pasala (Eds.), *Abiotic Stress Management for Resilient Agriculture* (pp. 3–8). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-5744-1_1

Mitchell, M. G. E., Qiu, J., Cardinale, B. J., Chan, K. M. A., Eigenbrod, F., Felipe-Lucia, M. R., Jacob, A. L., Jones, M. S., & Sonter, L. J. (2024). Key questions for understanding drivers of biodiversity-ecosystem service relationships across spatial scales. *Landscape Ecology*, 39(2), 36. <https://doi.org/10.1007/s10980-024-01842-y>

Mohanty, B. (2024). Pesticides exposure and compromised fitness in wild birds: Focusing on the reproductive endocrine disruption. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 199, 105800. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2024.105800>

- Morgado, R., Santana, J., Porto, M., Sánchez-Oliver, J. S., Reino, L., Herrera, J. M., Rego, F., Beja, P., & Moreira, F. (2020). A Mediterranean silent spring? The effects of olive farming intensification on breeding bird communities. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 288, 106694. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106694>
- Narra, N., Linna, P., & Lipping, T. (2022). Calculating Productivity Zones of Crop Fields using Open Satellite Data. *IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. <https://doi.org/10.1109/igarss46834.2022.9883146>
- Newbold, T., Hudson, L., Hill, S., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R., Börger, L., Bennett, D., Choimes, A., Collen, B., Day, J., De Palma, A., Diaz, S., Echeverria-Londono, S., Edgar, M., Feldman, A., Garon, M., Harrison, M., Alhusseini, T., & Purvis, A. (2015). Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520, 45–50. <https://doi.org/10.1038/nature14324>
- O’Connell, J., Bradter, U., & Benton, T. G. (2015). Wide-area mapping of small-scale features in agricultural landscapes using airborne remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 109, 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.09.007>
- Oerke, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- Omia, E., Bae, H., Park, E., Kim, M. S., Baek, I., Kabenge, I., & Cho, B.-K. (2023). Remote Sensing in Field Crop Monitoring: A Comprehensive Review of Sensor Systems, Data Analyses and Recent Advances. *Remote Sensing*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/rs15020354>
- Pachepsky, Y. A., Timlin, D. J., & Rawls, W. J. (2001). Soil Water Retention as Related to Topographic Variables. *Soil Science Society of America Journal*. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1787>
- Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*, 10(1), 439–446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Pebesma, E., & Bivand, R. (2023). *Spatial Data Science: With Applications in R*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429459016>
- Pedersen, T. L. (2025). *patchwork: The Composer of Plots*. <https://patchwork.data-imaginist.com/>
- Penu, P., & Kikas, T. (2013). *Aasta muld 2014. Leostunud muld*. <https://dspace.emu.ee/server/api/core/bitstreams/8326d2c4-4cae-4443-98c4-d1bed2136465/content>

- Pereira, P., Inacio, M., Barcelo, D., & Zhao, W. (2025). Impacts of agriculture intensification on biodiversity loss, climate change and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 46, 100637.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100637>
- Philpott, S. M. (2013). Biodiversity and Pest Control Services. In *Encyclopedia of Biodiversity* (pp. 373–385). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00344-0>
- Pingali, P. L. (2012). Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(31), 12302–12308. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>
- PRIA. (2025). *PRIA Veebikaart*. <https://kls.pria.ee/kaart/> (viimati vaadatud 25.05.2026)
- PRIA. (2026). *Pindalapõhiste otsetoetuste taotlemine*. https://www.pria.ee/sites/default/files/2026-05/otsetoetuste-at-2026_1.pdf
- R Core Team. (2025). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Raatz, L., Bacchi, N., Pirhofer Walzl, K., Glemnitz, M., Müller, M. E. H., Joshi, J., & Scherber, C. (2019). How much do we really lose?—Yield losses in the proximity of natural landscape elements in agricultural landscapes. *Ecology and Evolution*, 9(13), 7838–7848. <https://doi.org/10.1002/ece3.5370>
- Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R., & Jurišić, M. (2023). State of Major Vegetation Indices in Precision Agriculture Studies Indexed in Web of Science: A Review. *Agriculture*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/agriculture13030707>
- Rasva, M., & Jürgenson, E. (2022). Agricultural Land Concentration in Estonia and Its Containment Possibilities. *Land*, 11(12), 2270. <https://doi.org/10.3390/land11122270>
- Raven, P. H., & Wagner, D. L. (2021). Agricultural intensification and climate change are rapidly decreasing insect biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(2), e2002548117.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2002548117>
- Rommel, A., & Karus, G. (1967). *Maaparandus õpik kõrgkoolidele*. <http://www.digar.ee/id/et/nlib-digar:681888>
- Řezník, T., Pavelka, T., Herman, L., Lukas, V., Širůček, P., Leitgeb, Š., & Leitner, F. (2020). Prediction of Yield Productivity Zones from Landsat 8 and Sentinel-2A/B and Their Evaluation Using Farm Machinery Measurements. *Remote Sensing*, 12(12), 1917. <https://doi.org/10.3390/rs12121917>
- Riigi Teataja. (2022a). *Maa heas põllumajandus- ja keskkonnaseisundis hoidmise nõuded, kohustuslikud*

majandamisnõuded ning töö- ja tööhõivetingimustega seotud nõuded ja tööandja kohustused.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/106052026004?leiaKehtiv> (viimati vaadatud 25.05.2026)

Riigi Teataja. (2022b3). *Perioodi 2023–2027 ökosüsteemiteenuste säilitamise toetus.*

<https://www.riigiteataja.ee/akt/128062024028?leiaKehtiv> (viimati vaadatud 25.05.2026)

Sathyanarayanan, S., & Tantri, B. R. (2024). Confusion Matrix-Based Performance Evaluation Metrics. *African Journal of Biomedical Research*, 27(4S), 4023–4031. <https://doi.org/10.53555/AJBR.v27i4S.4345>

Schaan, L. N., Finch, E. A., Wartenberg, A. C., Boettner, V. S., Bellingrath-Kimura, S. D., Bonn, A., & Pe'er, G. (2025). Mapping and prioritising landscape feature restoration in agricultural landscapes: A case study in Brandenburg, Germany. *Land Use Policy*, 154, 107531. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107531>

Segarra, J., Buchailot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy*, 10(5), 641. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050641>

Shammi, S. A., & Meng, Q. (2021). Use time series NDVI and EVI to develop dynamic crop growth metrics for yield modeling. *Ecological Indicators*, 121, 107124. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107124>

Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/rs12193136>

Statistikaamet. (2024). *Eesti põllumajandusmaa pind tootja kohta on üks Euroopa suurimaid.*

<https://stat.ee/et/uudised/eesti-pollumajandusmaa-pind-tootja-kohta-uks-euroopa-suurimaid>

Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., Kremen, C., van der Heijden, M. G. A., Liebman, M., & Hallin, S. (2020). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, 6(45), eaba1715. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715>

Tamburini Giovanni, Riccardo Bommarco, Thomas Cherico Wanger, Claire Kremen, Marcel G. A. van der Heijden, Matt Liebman, & Sara Hallin. (2020). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aba1715>

Tamm, T., & Timmusk, T. (2016). *Drenaažkuivendusega kuivendussüsteemide kuivendusseisundi uurimine rasketes liivsavi ja savi pinnastes.* <https://dspace.emu.ee/server/api/core/bitstreams/c933f782-7204-4547-ba6a-e87caffa45d6/content>

Tomingas, E. (1949). *Maaparanduse õpik: Põllundus- ja aiandustehnikumidele.* <https://hdl.handle.net/10062/113130>

UN. (2024). *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. Stylus Publishing, LLC.

<https://books.google.ee/books?id=GAiGEQAAQBAJ>

van Bussel, L. G. J., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., Saito, K.,

Cassman, K. G., & van Ittersum, M. K. (2015). From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.005>

van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Titttonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research, Crop Yield Gap Analysis – Rationale, Methods and Applications*, 143, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>

van Klink, R., Bowler, D. E., Gongalsky, K. B., Shen, M., Swengel, S. R., & Chase, J. M. (2024). Disproportionate declines of formerly abundant species underlie insect loss. *Nature*, 628(8007), 359–364.

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06861-4>

Veromann, E., & Kaasik, R. (2019). *Põllumajandusmaa mitmekesisus*. Eesti Maaülikool. <http://hdl.handle.net/10492/5839>

Victor, N., Maddikunta, P. K. R., Mary, D. R. K., Murugan, R., Chengoden, R., Gadekallu, T. R., Rakesh, N., Zhu, Y., & Paek, J. (2024). Remote Sensing for Agriculture in the Era of Industry 5.0—A Survey. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 5920–5945.

<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3370508>

Vidican, R., Mălinaş, A., Ranta, O., Moldovan, C., Marian, O., Gheţe, A., Ghiş, C. R., Popovici, F., & Cătunescu, G. M. (2023). Using Remote Sensing Vegetation Indices for the Discrimination and Monitoring of Agricultural Crops: A Critical Review. *Agronomy*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy13123040>

Vilumets, S., Kaasik, R., Lof, M., Kovács, G., Holland, J., & Veromann, E. (2023). Landscape complexity effects on *Brassicogethes aeneus* abundance and larval parasitism rate: A two-year field study. *Scientific Reports*, 13(1), 22373. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49690-1>

Wei, M. C. F., Longchamps, L., Colaço, A. F., & Molin, J. P. (2026). Integrating stability zones and machine learning for enhanced crop management. *Precision Agriculture*, 27(2), 38. <https://doi.org/10.1007/s11119-026-10318-9>

Wickham, H. (2016). *Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics*. <https://ggplot2.tidyverse.org/>

Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P.,

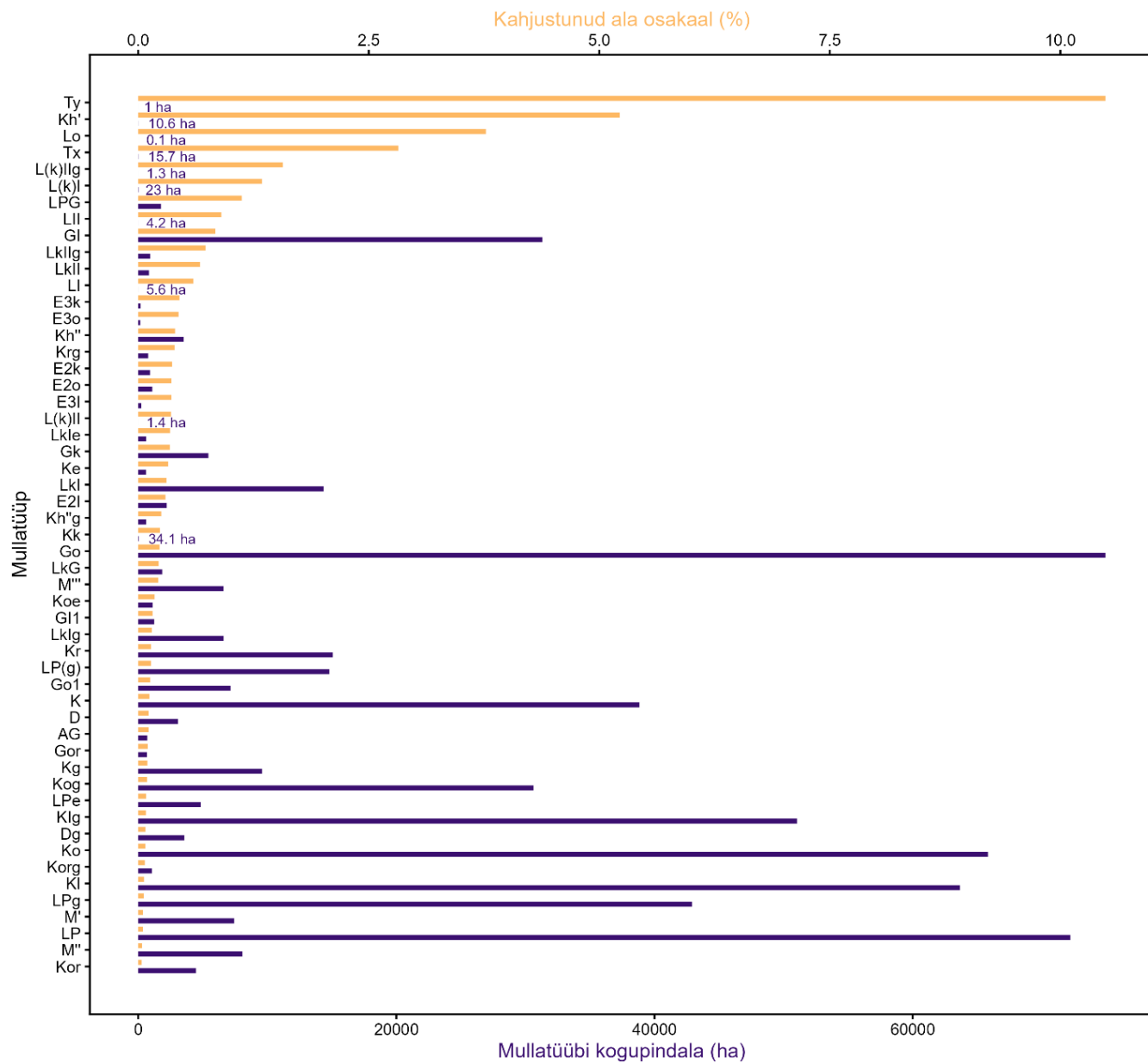
- Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686.
<https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2026). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*.
<https://dplyr.tidyverse.org/>
- Wik, M., Pingali, P., & Broca, S. (2008). *Global Agricultural Performance: Past Trends and Future Prospects*.
https://www.researchgate.net/publication/252356344_Global_Agricultural_Performance_Past_Trends_and_Future_Prospects
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017(1), 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Xue, R., Wang, C., Zhao, L., Sun, B., & Wang, B. (2022). Agricultural intensification weakens the soil health index and stability of microbial networks. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 339, 108118.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108118>

Lisad

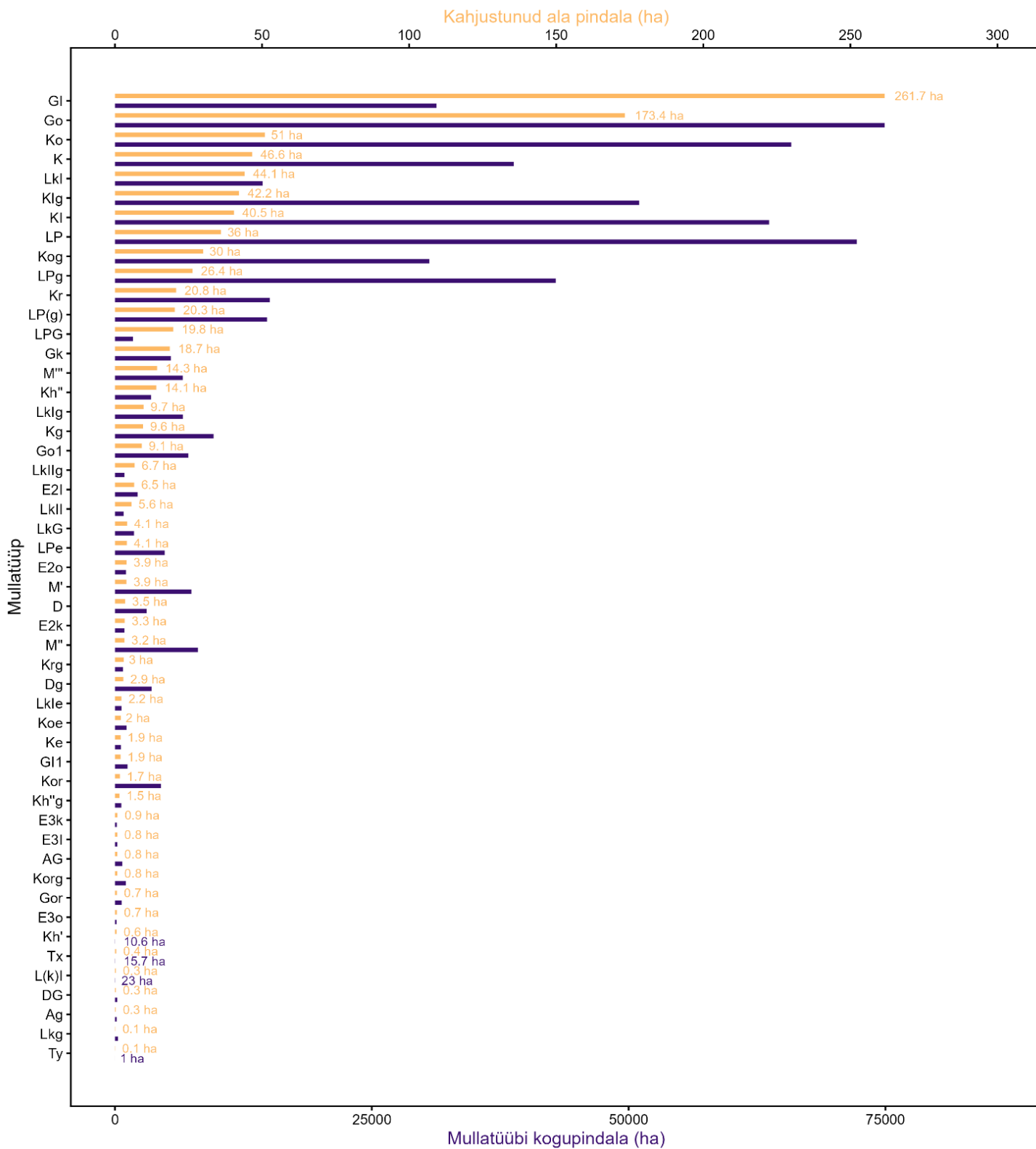
Lisa 1. Mudelite statistilised näitajad

Mudel	TP	Parandatud				Serva- pikslid	Defekt	Tundlikkus	Spetsiifilisus	Täpsus	Üldine täpsus	Tasakaalu- statud	Kappa kordaja	Väljajätmis- viga	Lisamis- viga
		FP	FN	TN	FP							täpsus			
0_35_and_55_NDVI	37	1	730	11894065	11	10	2	0.05	0.9999999	0.97	0.999939	0.52	0.09	0.952	0.03
0_35_and_65_EVI	15	1	752	11894056	20	19	3	0.02	0.9999999	0.94	0.999937	0.51	0.04	0.980	0.06
0_3_and_55_EVI	14	1	753	11894067	9	8	3	0.02	0.9999999	0.93	0.999937	0.51	0.04	0.982	0.07
0_35_and_45_NDVI	48	4	719	11894054	22	18	4	0.06	0.9999997	0.92	0.999939	0.53	0.12	0.937	0.08
0_35_and_50_NDVI	48	4	719	11894054	22	18	4	0.06	0.9999997	0.92	0.999939	0.53	0.12	0.937	0.08
0_4_and_65_NDVI	27	3	740	11894051	25	22	2	0.04	0.9999997	0.9	0.999938	0.52	0.07	0.965	0.10
0_3_and_50_EVI	42	5	725	11894057	19	14	7	0.05	0.9999996	0.89	0.999939	0.52	0.10	0.945	0.11
0_25_and_45_EVI	6	1	761	11894073	3	3	2	0.01	0.9999999	0.86	0.999936	0.50	0.02	0.992	0.14
0_25_and_50_EVI	6	1	761	11894073	3	3	2	0.01	0.9999999	0.86	0.999936	0.50	0.02	0.992	0.14
0_3_and_60_EVI	5	1	762	11894070	6	5	2	0.01	0.9999999	0.83	0.999936	0.50	0.01	0.993	0.17
0_35_and_70_EVI	5	1	762	11894061	15	14	3	0.01	0.9999999	0.83	0.999936	0.50	0.01	0.993	0.17
0_35_and_75_EVI	5	1	762	11894061	15	14	3	0.01	0.9999999	0.83	0.999936	0.50	0.01	0.993	0.17
0_4_and_60_NDVI	48	14	719	11894025	51	37	4	0.06	0.9999988	0.77	0.999938	0.53	0.12	0.937	0.23
0_4_and_85_EVI	3	1	764	11894064	12	12	2	0	0.9999999	0.75	0.999936	0.50	0.01	0.996	0.25
0_4_and_70_EVI	35	12	732	11894022	54	42	6	0.05	0.9999990	0.74	0.999937	0.52	0.09	0.954	0.26
0_4_and_75_EVI	35	12	732	11894022	54	42	6	0.05	0.9999990	0.74	0.999937	0.52	0.09	0.954	0.26
0_4_and_55_NDVI	63	27	704	11893994	82	55	6	0.08	0.9999977	0.7	0.999939	0.54	0.15	0.918	0.30
0_35_and_60_EVI	37	18	730	11894030	46	28	6	0.05	0.9999985	0.67	0.999937	0.52	0.09	0.952	0.33
0_35_and_40_NDVI	62	37	705	11894007	69	32	6	0.08	0.9999969	0.63	0.999938	0.54	0.14	0.919	0.37
0_45_and_65_NDVI	55	37	712	11893965	111	74	5	0.07	0.9999969	0.6	0.999937	0.53	0.13	0.928	0.40
0_4_and_80_EVI	9	6	758	11894049	27	21	2	0.01	0.9999995	0.6	0.999936	0.50	0.02	0.988	0.40
0_35_and_55_EVI	61	43	706	11893992	84	41	8	0.08	0.9999964	0.59	0.999937	0.54	0.14	0.920	0.41
0_4_and_45_NDVI	80	59	687	11893944	132	73	9	0.1	0.9999950	0.58	0.999937	0.55	0.18	0.896	0.42
0_4_and_50_NDVI	80	59	687	11893944	132	73	9	0.1	0.9999950	0.58	0.999937	0.55	0.18	0.896	0.42
0_45_and_60_NDVI	77	61	690	11893913	163	102	10	0.1	0.9999949	0.56	0.999937	0.55	0.17	0.900	0.44
0_45_and_90_EVI	5	4	762	11894059	17	13	3	0.01	0.9999997	0.56	0.999936	0.50	0.01	0.993	0.44
0_4_and_65_EVI	61	55	706	11893962	114	59	8	0.08	0.9999954	0.53	0.999936	0.54	0.14	0.920	0.47
0_35_and_50_EVI	105	106	662	11893912	164	58	11	0.14	0.9999911	0.5	0.999935	0.57	0.21	0.863	0.50
0_45_and_55_NDVI	100	142	667	11893801	275	133	10	0.13	0.9999881	0.41	0.999932	0.56	0.20	0.870	0.59
0_4_and_60_EVI	97	140	670	11893850	226	86	11	0.13	0.9999882	0.41	0.999932	0.56	0.19	0.874	0.59
0_4_and_55_EVI	137	351	630	11893605	471	120	14	0.18	0.9999705	0.28	0.999918	0.59	0.22	0.821	0.72
0_35_and_35_NDVI	75	196	692	11893826	250	54	8	0.1	0.9999835	0.28	0.999925	0.55	0.14	0.902	0.72
0_45_and_45_NDVI	136	412	631	11893478	598	186	12	0.18	0.9999654	0.25	0.999912	0.59	0.21	0.823	0.75
0_45_and_50_NDVI	136	412	631	11893478	598	186	12	0.18	0.9999654	0.25	0.999912	0.59	0.21	0.823	0.75
0_4_and_40_NDVI	101	315	666	11893660	416	101	10	0.13	0.9999735	0.24	0.999918	0.56	0.17	0.868	0.76
0_4_and_45_EVI	212	964	555	11892925	1151	187	17	0.28	0.9999190	0.18	0.999872	0.64	0.22	0.724	0.82
0_4_and_50_EVI	212	964	555	11892925	1151	187	17	0.28	0.9999190	0.18	0.999872	0.64	0.22	0.724	0.82

Lisa 2. Kahjustunud alade jaotus mullatüübi järgi (osakaalud)



Lisa 3. Kahjustunud alade jaotus mullatüübi järgi (pindala)



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Vete-Mari Kuningas,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Põllukultuuride püsivate kahjustuste leidmine Sentinel-2 andmete abil“, mille juhendajad on Evelyn Uemaa ja Eve Veromann, 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 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Vete-Mari Kuningas

25.05.2026