

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

Magistritöö loodusgeograafias ja maastikuökoloogias (30 EAP)

Reljeefiomaduste ja põllukultuuride saagikuse vahelised seosed kasutades täppispõllunduse andmeid

Anu Hark

Juhendaja: PhD. Ain Kull

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2018

Reljeefiomaduste ja põllukultuuride saagikuse vahelised seosed kasutades täppispõllunduse andmeid

Magistritöös uuriti põllukultuuride saagikuse statistilisi seoseid nõlvakalde, voolu akumulatsiooni ala suuruse ja nõlva ekspositsiooniga. Töös kasutati seitsme Viljandimaal ning kaheksa Jõgevamaal paikneva põllu saagikuse andmeid aastatest 2013-2017. Reljeefiomadused tuletati LiDARi põhiseest digitaliseeritud maapinna kõrgusmudelist, mullaomadused Maa-ameti mullastiku kaardilt ning ilmastikuandmed saadi Eesti Keskkonnaagentuuri Ilmateenistuse andmebaasist. Saagikuse seoseid reljeefi, mullaomaduste ja ilmastikunäitajate vahel uuriti korrelatsioonanalüüsi ja mitmese regressiooni meetodiga. Korrelatsioonanalüüsi tulemused näitavad, et lineaarne seos reljeefiomaduste ja saagikuse vahel on nõrk ning nii seose suund kui tugevus varieerub põlluti ja aastati. Saagikuse korrelatsioon voolu akumulatsiooni ala suurusega oli väga nõrk, ent valdavalt positiivne. Saagikuse seos nõlva lõunapoolse orientatsiooniga sõltus aastast ning vaadeldavast põllukultuurist, olles suviadra puhul valdavalt negatiivne, talinisu puhul pigem positiivne. Korrelatsioonid olid tugevaimad nõlvakaldega, kuid seose suund oli väga varieeruv. Mitmene regressiooni analüüs näitas, et töös käsitletud reljeefi- ja mullaomadustest ning ilmastikunäitajatest on saagikuse varieeruvuse ennustamisel olulised mulla savisisaldus, nõlva ekspositsioon, voolu akumulatsiooni ala suurus ning talinisu puhul ka nõlvakalle. Oluliseks osutunud kliimaparameetrid olid kultuuriti erinevad. Saadud mudelid kirjeldavad saagikuse varieeruvusest vaid väikese osa (0,24 - 0,6 %).

Märksõnad: täppispõllundus, saagikus, nõlvakalle, voolu akumulatsioon, nõlva ekspositsioon

CERCS: P510

Relations between topographic properties and crop yield using precision farming data

In this research statistical relations between crop yield recorded by precision harvesting combine and topographic properties such as slope, flow accumulation and aspect were studied. Yield data of fifteen Estonian fields (seven fields from Viljandi county and eight from Jõgeva county) were analyzed together with topographic data derived from LiDAR based digital elevation model. To evaluate relationship between topographic properties and yield correlation analysis and multiple linear regression analysis were used. Results show

that relation between topography and yield is low and its direction varies from year to year and field to field. Relations between yield and flow accumulation area were mainly positive, whereas relationship between yield and slope was stronger but its direction varied a lot. Relation between yield and southern orientation of slope depended on year and crop. Multiple regression analysis indicated that amongst studied properties soil clay content, slope aspect and flow accumulation area were important in yield estimation models. Importance of climate parameters differed between crops. However, derived models predict only 0,24 - 0,6 % of total yield variability.

Keywords: precision agriculture, yield, slope, flow accumulation, slope aspect

CERCS: P510

Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. Täppispõllundus	7
1.1 Ajalugu.....	7
1.2 Kasutusel olev tehnika ja rakendused.....	8
1.3. Saagikuse andmed ja nende kasutamine täppisviljeluses	10
2. Põllukultuuride saagikust mõjutavad tegurid	11
2.1. Kliima.....	11
2.1.1. Temperatuur	11
2.1.2. Sademete hulk.....	12
2.1.3. Päikesekiirguse hulk	12
2.2. Muld	14
2.3. Reljeef.....	15
3. Kasutatud andmed ja meetodika	15
3.1. Saagikuse andmed.....	16
3.1.1. Saagikuse algandmete eeltötlus	19
3.1.2. Normeerimine ja interpoleerimine	20
3.2. Reljeefiandmed	23
3.3. Mullastiku andmed.....	25
3.4. Ilmastikuandmed.....	26
3.5. Statistiline analüüs	26
4. Tulemused ja arutelu.....	28
4.1. Seos saagikuse ja reljeefiomaduste vahel.....	28
4.1.1. Saagikus ja nõlvakalle.....	29
4.1.2. Saagikus ja voolu akumulatsioon	31
4.1.3. Saagikus ja nõlva ekspositsioon	32
4.2. Mitmene regressioonimudel.....	33
4.2.1. Suviotra saagikuse mudel.....	33
4.2.2. Talinisu saagikuse mudel.....	34
Kokkuvõte.....	38
Summary	40
Tänuavaldused	42
Kasutatud materjalid.....	43

Sissejuhatus

Põllumajandussaadused moodustavad tähtsa osa inimese toidust ning inimkond aina jätkab kasvutrendi. Vajadus toidu järele suureneb ning maa-ala inimese kohta väheneb, mis tingib vajaduse maa efektiivsema kasutamise järele. Üheks võimaluseks seda saavutada võib olla täppispõllundus. Täppispõllunduse eesmärk on suurendada põllumajandusliku tootmise efektiivsust, tootlikkust ja kasumlikkust, samal ajal vähendades soovimatuid mõjusid elusloodusele ja keskkonnale (Euroopa parlament, 2014).

Kuigi täppispõllundus näitab Eestis tõusvat trendi, ei kasutata olemasolevaid võimalusi veel piisavalt ära. Paljudes tänapäevastes kombainides ja traktorites on navigatsiooniseadmed koos vajaliku tarkvaraga sisseehitatud või on neid sinna lihtne paigaldada, kuid põllupidajaid, kes saadud andmed ka maha laadivad ja neid analüüsivad, on vähe. 2009. aastal oli Eestis ligi poolsada kombaini, millel olid nii saagikuse mõõtmise kui ka asukoha määramise seadmed, hiljem on neid veelgi lisandunud. Kümnekond firmat kogusid järjekindlalt ja süsteemselt saagikuse andmeid, kuid asukohapõhist väetamist ja taimekaitset tehti vaid vähesel määral (Ettevõtluse Arendamise Sihtasutus, 2018). Täppisviljeluse andmete vähese tähtsustamise ja kasutamise tõttu on ka põllu reljeefiomaduste ja ilmastiku koosmõju saagikusele tänapäeval rakendatavate agrotehniliste võtete tingimustes täpselt kirjeldamata.

Üldiselt on teada, et nõlvadel esineb toitainete äraanne, mullast välja leostumine, ning toitained liiguvad veega lohkudesse ja nõlva jalamile. Seega peaks põllu ulatuses ühetaolise väetamise korral lohkudes kasvavad taimed saama rohkem mulda lisatud toitaineid kui nõlva ülaosas või järsematel nõlvadel kasvavad taimed. Nõlval, eriti selle ülaosas, võib tekkida toitainete defitsiit, mis mõjutab negatiivselt saagikust, jalamil ja lohkudes aga võib esineda toitainete üleküllust. Lisaks toitainete liikumisele mõjutab põllumaa reljeef ka sealsetele taimedele langeva päikesekiirguse hulka ja seeläbi mikrokliimat. Eesti asukoht tingib suure aastasisese varieeruvuse maapinnale jõudva päikesekiirguse hulgas ning taimekasvu limiteerivad päikesekiirguse vähesus ja madal õhutemperatuur. Seetõttu võib oletada, et eelis on põldudel või põlluosadel mille ekspositsioon ilmakaarte suhtes ja nõlvakalle tagavad maksimaalse päikesekiirguse hulga vegetatsiooniperioodil. Põhjapoolkeral on sellisteks lõunapoolse ekspositsiooniga nõlvad.

Ühelt poolt, nõlvadel võib tekkida toitainete defitsiit, samas aga võib lõunapoolne ekspositsioon tagada suurema kiirguse hulga (sellest tulenevalt ka kõrgema temperatuuri,

mida antud töös eraldi ei käsitleta) ja soodsama taimekasvu, aga sõltuvalt mullast ja aasta ilmastikust võib tingida ka intensiivsema evapotranspiratsiooni tõttu taimedel lokaalset veepuudust.

Võttes arvesse teema vähest uuritust ning potentsiaalset olulisust efektiivsemale põllumajanduslikule tootmisele on käesoleva töö eesmärgiks täppisviljelusandmeid kasutades analüüsida kuidas, kui palju ja milliste lisaparameetrite läbi mõjutavad nõlvakalle, ekspositsioon ja voolu akumulatsiooni ala suurus põllu saagikust Eesti tingimustes. Pikemas perspektiivis aga oleks muutujate vaheliste seoste välja selgitamisel võimalik luua mudel, mis kirjeldaks saagikuse varieeruvust ning aitaks optimeerida väetamist, niisutamist ja muid töid vastavalt põllu reljeefiomadustele.

Töö hüpoteesid on järgmised:

- 1) täppisviljeluse tehnikaga varustatud kombainidega kogutav saagikuse informatsioon võimaldab hinnata reljeefi mõju saagikusele,
- 2) lõunapoolse orientatsiooniga nõlvad saavad rohkem päikesekiirgust, mis soodustab taimekasvu ning suurendab saagikust,
- 3) voolu akumulatsiooni ala suurus on positiivselt seotud põllukultuuride saagikusega,
- 4) nõlvakalde mõju saagikusele sõltub konkreetse aasta ilmastikust, eriti sademetest.

Töö uudsus seisneb selles, et suurem osa varasemaid saagikuse ning seda mõjutavate tegurite vahelisi seoseid analüüsivaid uurimusi on läbi viidud kontrollitud tingimustes katsepõldudel, kuid käesolevas töös kasutatakse põllumajandustootjate poolt tavapärase saagikoristuse käigus kombainidega kogutud täppisviljeluse andmeid (nn. passiivselt kogutud saagikusandmed).

1. Täppispõllundus

Täppispõllundus (täppisviljelus, kohaspetsiifiline maaviljelus) on põllumajanduse viis, mis põhineb vaatlustel, mõõtmistel ning tegevuste optimeerimisel vastavalt põldudevahelisele ja –sisesele saagikuse varieeruvusele (Vili, 2013; GRDC, 2010). See hõlmab GIS ja navigatsioonitehnoloogia kasutamist tööde sidumisel asukohaga, ning analüüsi ja kokkuvõtteid sensoritega mõõdetud saagikuse, mullaomaduste ja taimekasvu tulemuste alusel. Mõõtmiste põhjal saab analüüsida kohaspetsiifiliselt väetamis- ja niisutamisevajadust, optimeerida viljakoristusaja jne. Eesmärgiks on efektiivne põllupidamine, mis arvestades omaduste varieerumist põllu piires, aitaks optimeerida sisendeid nagu väetised ja kahjuritõrjevahendid. Tulemuseks peaks olema keskkonnasõbralikum maaviljelus ja suurem saak väiksemate kuludega.

1.1 Ajalugu

Täppisviljeluse aluseks olev andmete kogumine, analüüsimine ning järelduste põhjal otsuste tegemine on erineval määral toimunud juba pikka aega. Väikese toodangumahuga farmides oli see võimalik lihtsate vahenditega, kuid farmide suurenedes kasvas vajadus uute meetodite ja töövahendite järele. Aja jooksul on nii meetodid kui töövahendid arenenud. Üks esimesi tänapäevase täppisviljeluse eeldusi oli geoinfosüsteemi ehk GIS kasutuselevõtt põllumajanduses, mis võimaldas kohapõhist ruumiandmete analüüsi (Nemenyi *et al.*, 2003; Mulla & Khosla, 2015). Algselt (1960.-1970. aastatel) oli see kasutusel peamiselt teadusasutustes rakendusuringutes, olles veel põllumajandusettevõtete jaoks liiga kallis ning ebapraktiline. Kuigi GIS võimaldas analüüsida maaviljeluse andmeid kohapõhiselt, ei osatud selle potentsiaali tol ajal ära kasutada ning nappis toetavaid tehnoloogilisi vahendeid. Täppisviljelus praeguses mõistes sai hoo sisse hilistel 1980ndatel kui kombineeriti omavahel võrgustikupõhiselt võetud mullaproovide info ja äsja väljaarendatud varustus põllusiseseks muutuva määraga väetamiseks (Mulla & Khosla, 2015). Asukoha määramiseks väetamise ajal kasutati kompassi ning pimenavigatsiooni põhimõtteid, mille puhul uuritavate asukohtade koordinaadid arvutati varasemalt positsioneeritud asukoha, liikumissuuna ja –kiiruse alusel. Saagikuse mõõtmise tehnoloogiad olid tol ajal veel katsetuste faasis (GRDC, 2010). Järgmisel kümnendil muutusid laiemale avalikkusele kättesaadavaks ka satelliitnavigatsiooni süsteemid, muutes võimalikuks täpse ja kiire navigatsiooni (Casady & Adamchuk, 2011). Uut sorti asukohainfo haldamiseks muutuva määraga väetamisel töötati välja saagikuse monitorid ja

elektroonilised regulaatorid, mis kombinatsioonis navigatsioonisüsteemiga võimaldasid täpset saagikuse põllusise varieeruvuse kaardistamist (Mulla & Khosla, 2015). Kuna saagikuse monitoorimise meetodid olid arenenud, oli vaja tõhustada ka meetodeid mullaomaduste ning muude andmete saamiseks. Võrgustikupõhine proovide võtmine osutus tihti liiga ajamahukaks ning rahaliselt kulukaks, sest põllusisest varieeruvust hästi iseloomustavate andmete saamiseks peavad võrgustikupunktid paiknema tihedalt (Lachapelle *et al.*, 1994). Sajandi lõpuks kujunes võrgustikupõhisele põllu kirjeldamisele alternatiiviks tsoneerimisel põhinev lähenemisviis, kus põllud jagatakse saagikuse sarnasuse alusel tsoonideks, mida edasiste majandamisotsuste tegemisel vaadeldakse eraldi (Gnip & Charvat, 2003). Saagikuse muutlikkuse andmete sidumist mulla toitainete sisalduse kaartidega võibki pidada tõeliseks täppisviljeluse alguseks suurpõldudel.

Täppisviljeluse edu ning eeldused tulevaseks eduks teraviljatööstuses on ergutanud ka teisi põllumajandusharusid, iseäranis vitikultuuri ja aiandust võtma samuti kasutusele täppisviljeluse meetodeid ning tehnikat (<http://www.agriprecisione.it/>). Alates hilistest 1990-ndatest on aina rohkem uurimusi läbi viidud teraviljadest erinevate põllukultuuridega. Arengud globaalses satelliitnavigatsioonisüsteemi (GNSS) tehnoloogias alates 1999. aastast on muutnud võimalikuks automaatroolimise ja masinate kaugjuhtimise. Siiski on uued, nii maapealsed kui kaugseire süsteemid mulla ning vilja omaduste suurema pidevusega mõõtmiseks jätkuvalt arendamisel. Näiteks võib tuua mulla elektrijuhtivust mõõtvad vahendid (Corwin & Plant, 2005) ja aina täpsemad vilja kvaliteeti mõõtvad sensorid, mis võimaldavad teha otsuseid ka reaajas.

1.2 Kasutusel olev tehnika ja rakendused

Üks täppisviljeluse alustalasid on satelliitnavigatsioon, mis annab võimaluse siduda põllult kogutud andmed asukohaandmetega. Üks levinumaid täppispõllunduse rakendusi on saagikuse mõõtmine ning positsioneerimine koristuse ajal. Tänapäevastes kombainides on navigatsiooniseadmed ja saagikuse detektorid tavaliselt sisseehitatud või lihtsasti paigaldatavad. Seetõttu on asukohapõhiste saagikusandmete kogumine muutunud võrdlemisi lihtsaks ja taskukohaseks paljudele ettevõtetele. Lisaks saagikuse andmete kogumisele on täppisviljeluses oluline ka põllu ning taimede seisukorra hindamine kasvuperioodi alguses ja keskel. Sensorite abil saadavaid andmeid geoinfosüsteemides analüüsides on võimalik seirata taimede tervislikku seisundit ning tuvastada haiguskoldeid, mille alusel saab teha edasisi majandamisotsuseid (Mahlein, 2016). Ulatuslikematel aladel

on rakendatav satelliitseire, kus erinevate sensorite (multispektraalne, hüperspektraalne, termaalne jne) abil saab tuvastada muutusi taimede füsioloogilistes omadustes nagu koe värvus, lehe kuju, lehestiku morfoloogia, taimestiku tihedus ja transpiratsiooni kiirus (West *et al.*, 2010). Satelliitseire puuduseks on pikk ülelendude intervall ja sõltuvus pilvisusest. Nende puuduste ületamiseks on hakatud sarnaseid sensoreid kasutama droonipõhiselt, mis tagab väiksema sõltuvuse pilvisusest, suurema ruumilise lahutuse ja ajalise paindlikkuse (nt saab teha ülelennu vahetult kahjustuse tekke järgselt) (Saha *et al.*, 2018; Corrigan, 2018).

Lisaks põllu seisukorra seirele ja saagikuse ning mullaandmete kogumisele viljakoristuse ajal on oluline saadud andmete analüüs ja kasutamine põllu majandamise optimeerimisel. Täppisviljeluse andmete töötlus ja analüüs viiakse läbi kasutades erinevaid nii põllumajandusspetsiifilisi kui laiema kasutusega GIS tarkvarasid (Nash *et al.*, 2009). GIS võimaldab kogutud andmed kaardistada, saadud kaardikihte analüüsida ja võrrelda. Näiteks saab kaugseire andmeid reljeefi, mulla värvuse ja saagikuse kaardikihtidega kombineerides jagada põllu väetisevajaduse alusel tsoonideks (Doerge, 2018). Saadud tsoonide kaarte analüüsitakse ning nende alusel tehakse järeldused ja plaan edasiseks väetamiseks. Täppisviljeluse droonide poolt kogutud andmete põhjal tulevad aga välja näiteks ebaühtlase külvi ning külma- ja veekahjustustega alad (<http://www.pollumajandus.ee/>, 2017), juhtides tähelepanu kohtadele, kus on vaja majandamispraktikaid muuta.

Andmete kaardistamine, analüüs ning põldude jagamine tsoonideks oleks aga kasutu kui poleks võimalik varieerida sisendite hulka (nt väetised, pestitsiidid, herbitsiidid jmt) põllu piires. Muutuva määra tehnoloogia (*variable rate technology* - VRT) ehk võimalus masinat peatamata muuta kasutatava väetise hulka vastavalt taimede seisukorrale ja toitainete hulgal mullas on olnud kättesaadav juba kaks kümnendit ning VRT rakendamist parendavate toodete ja tehnikate areng jätkub. Näiteks on võimalik väetiselaoturi või pestitsiidipritsi seksiooniviisiline juhtimine nii, et laotur on jagatud osadeks, mida saab sisse ja välja lülitada või reguleerida, vältides sama ala mitmekordset väetamist või pritsimist (GRDC, 2010). See on iseäranis kasulik mittehomoogeense pinnaga põldudel, kus masinate liikumist segavad takistused nagu kaljud, kivihunnikud, paljanduv aluskivim, põõsastikud, puud, ojad, kraavid jne. Masinad ei saa sellisel juhul liikuda otse, vaid peavad sõitma ümber takistuste ning mõned alad võivad jääda külvi ja väetamise käigus katmata

või saada kaetud mitmekordselt. Vajatav väetise kogus võib kattuvuse puudumise korral olla 10% väiksem (Nijs, 2014).

1.3. Saagikuse andmed ja nende kasutamine täppisviljeluses

Eestis on tänu varasematele uuringutele, tehnoloogia arengule ning EL põllumajandustoetustega kehtestatud nõuetele kogutud suur hulk saagikus- ja mullaandmeid ning koostatud nende kohta digitaalseid kaarte ja kultuuride vastavustabeleid (Reintam *et al.* 2003). Praeguseks pole aga olemasolevaid andmeid taimekasvatuse optimeerimisel eriti kasutatud (Kuht, 2015). Põhjuseks võib olla nii info ja teadmiste puudumine uue tehnoloogia kasutusvõimaluste kohta kui ka andmetes esinevad vead ning kohatised raskused andmete interpreteerimisel. Kombineerides kasutatakse saagikuse hindamisel peamiselt impulsi põhinevaid sensoreid, mis mõõdavad vilja voolu impulsi muutusest tekkivat survejõudu, mis arvutatakse ümber massiks. Vähestes kombineerides mõõdetakse vilja kogust optiliste sensoritega, mille puhul mõõdetakse vilja kihi kõrgust elevaatori labadel ning arvutatakse vilja ruumala, mis konverteeritakse vilja tiheduse alusel massiks (Reyns *et al.*, 2002). Kuna täppisviljeluse kombineerides mõõdetakse saagikust, vilja niiskust, temperatuuri jne käigu pealt, oleneb mõõtmiste ühtlus ja usaldusväärsus kombineeritud sõidustiilist, mõõteseadmete kalibreeritusest ning maastikust. Sellest tulenevalt esineb toorandmetes suurel hulgal vigu. Ebausaldusväärsed tulemused saagikuse mõõtmisel võivad tuleneda näiteks järskudest kiiruse muutustest, kühmude ning lohku ületamisel tekkivast vibratsioonist, vilja koristamisest mittetäieliku heedrilaiusega, valest asukohainfost, kalibreerimata või valesti kalibreeritud saagikuse sensorist (Kleijman *et al.*, 2002). Igal saagikuse mõõtesüsteemil on täpsuses piirangud, mis sõltuvad kombineeritud ehitusest ja mõõtesensori tööpõhimõttest. Aeg, mille jooksul viljatera liigub heedrist detektorini, varieerub sõltuvalt teekonnast mille ta kombineeritud läbib. Kleijman *et al.* (2002) järgi jõuab maisitõlvik heedrist detektorini 7-22 sekundi jooksul ning kõige suurem on terade pealevool 12-13 sekundit peale lõikushetke. Niisiis on raske määrata millal täpselt kindlast ruumipunktis koristatud vilja detektorini jõuab, ning saagikusandmed võivad olla nihkes GPS-ga salvestatud punktide suhtes. Sellest tuleneb veel üks süsteemselt esinev probleem - koristuskäigu alguses mõõdetakse väga väike saagikus kuna vilja esimeste sekundite jooksul veel detektorini ei jõua, ning koristuskäiku lõpetades mõõdetakse suured saagikused, kuna pidurdamisel läheneb liikumiskiirus nullile ja eelnevalt lõigatud vilja jõuab hilinemisega detektorini (Algerbo, 1999). Kasutades saagikuse andmeid analüüsil

ning põllu harimist puudutavate otsuste tegemisel, on oluline valed mõõtetulemused andmetest eemaldada.

2. Põllukultuuride saagikust mõjutavad tegurid

Saagikus on funktsioon põllu mullaomadustest ja pinnamoest, kliimast, bioloogilistest faktoritest, ning viisist kuidas põldu haritakse. Need tegurid jagunevad omakorda erinevateks komponentideks, mis mingil moel põllu saagikust võivad mõjutada. Põllukultuuri kasv sõltub sellest kui lähedased on tingimused liigi ökoloogilisele optimumile. Tähtsaimateks mõjuteguriteks on eelnevates uuringutes osutunud mulla omadused (Stone *et al.* 1985) ning reljeef (Yang *et al.* 1998). Need tegurid mõjutavad tihti ka teineteist, näiteks olenevad bioloogilised tegurid ja mullaomadused teineteisest ning kliimast, mis aga omakorda sõltub teataval määral reljeefist.

2.1. Kliima

Nii aastate lõikes kui territoriaalselt on saagikuse kujunemisel väga oluline roll kliimatingimustel nagu temperatuur, sademete hulk ja kasvuperioodi pikkus (Ingver & Koppel, 2006).

2.1.1. Temperatuur

Üks tähtsamaid taimekasvu mõjutavaid ja limiteerivaid abiootilisi tegureid on temperatuur. Näiteks võib keskmisest kõrgem temperatuur troopilistel ning lähistroopilistel aladel põhjustada saagikuse vähenemist, samal ajal kui jahedamas kliimas võib see pigem saaki suurendada. Samuti võib keskmise temperatuuri kasv nihutada näiteks nisu areaali piire suurematele laiustele (Warrick, 1988). USA-s ja Lääne-Euroopas läbi viidud uurimuses jõuti järeldusele, et kõrgem temperatuur kiirendab evapotranspiratsiooni, põhjustades sellega niiskusstressi. Täheldati, et temperatuuri tõus 2° võib alandada nisu saagikust 3-17% (Warrick, 1988). Eesti õhutemperatuuri muutusi käsitlevad uuringud on näidanud aasta keskmise temperatuuri tõusu keskmiselt 1-1,5° ning kevadkuudel ligi 2° (Jaagus & Sepp, 2016). Kuna aga Eesti suvekuude keskmised temperatuurid on madalamad kui nisu kasvatamiseks optimaalne 20-25°C (Pimentel, 1993), on siin temperatuuri tõusu mõju saagikusele tõenäoliselt pigem positiivne.

Lisaks keskmisele temperatuurile ja kraadipäevade arvule mõjutavad saagikust ka temperatuurid kindlate taime arengustaadiumite ajal. Boubaker & Yamada (1991) näitasid,

et suvinisu idanemine 20°C juures oli keskmiselt 4,4 korda kiirem kui 5°C juures ning 1,5 korda kiirem kui 15°C juures. Madal temperatuur kasvuperioodil võib vähendada idanemist, aeglustada vegetatiivset kasvu ja lükata edasi või tõkestada reproduktiivset arengut, vähendades nii ka saagikust. Õitsemiseelne ning õitsemisjärgne kõrge temperatuur põhjustab taimedes stressi ning aeglustab kasvu. Samas valmistab õitsemiseelne kuumašokk taime ette potentsiaalseks õitsemisjärgseks kuuma perioodi üleelamiseks, olles seega taime kasvule parem kui näiteks õitsemisjärgne kuumus õitsemiseelse kõrge temperatuuri aklimatisatsioonita (Wang *et al.*, 2011).

2.1.2. Sademete hulk

Toitainete liikumiseks mullast taime on oluline piisava hulga vee olemasolu mullas. Mulla niiskus sõltub ühelt poolt mulla veehoiu võimest, teiselt poolt aga sademete hulgast. Sobiv niiskusrežiim on eriti oluline taime varajastes kasvufaasides nagu tärkamine ja võrsumine. Alaru *et al.* (2006) leidsid oma agrotehnilises uurimuses, et tritikale võrsumiseks keskmisest veidi kõrgema sademete hulga juures piisab vajaliku produktiivvõrsete arvu saamiseks palju madalamast külvisenormist kui põuastel aastatel. Ka Meng *et al.* (2017) rapsiga tehtud uurimuse, tulemused kinnitasid positiivset seost kasvuperioodi alguse sademete hulga ning saagikuse vahel. Kõrge sademete hulk viljakoristusperioodil võib aga saagikusele hoopiski negatiivselt mõjuda, takistades koristust. Väga suur sademete hulk võib aga põhjustada mulla liigniiskust ja lamandumist, millega kaasnev niiskusstress kõrgendab juurehaigustesse haigestumise riski (Duniway, 1977). Lisaks kasvufaaside vahelisele veevajaduse erinevusele on oluline ka põllukultuuride vaheline erinevus veevajaduses. Näiteks sõltub taliviljade saagikus kevadistest sademetest vähem, kuna idanemine ja võrsumine toimuvad juba sügisel (Koppel & Ess, 2007).

2.1.3. Päikesekiirguse hulk

Taimede kasvu seisukohast on oluline teada nii otse- ja hajuskiirguse kui ka fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse (PAR) hulka. Otsene päikesekiirgus on see osa kiirgusest, mis jõuab Päikeselt Maale praktiliselt paralleelsete kiirte kimbuna. Seda tähistatakse sümboliga S ning mõõdetakse kiirtega risti oleval pinnal. Horisontaalsele pinnale langeva otsese kiirguse (S') väärtus arvutatakse seosest:

$$S' = S \sin h_0,$$

kus h_0 on Päikese nurkkõrgus horisondi suhtes (Russak & Kallis, 2004).

Täppisviljeluse puhul aga on vaja teada, milline on kiirguse väärtus maapinnal ehk praktiliselt horisontaalsel pinnal või künka-/mäenõlval. Küngaste ja mägede nõlvadele ehk mittehoriisontaalsele pinnale langeva otsese kiirguse väärtust arvutatakse seosest:

$$S^* = kS',$$

kus S^* tähistab otsest kiirgust uuritava pinnal. Kordaja k oleneb koha geograafilisest laiusel, aastaajast, nõlva kaldest ja nõlva ekspositsioonist ehk orientatsioonist ilmakaarte suhtes (Russak & Kallis, 2004).

Taimekasvu seisukohast on aga olulisim otsese ja hajusa kiirguse summa ehk summaarne kiirgus, mida tähistatakse tavaliselt Q :

$$Q = S' + D,$$

kus D tähistab hajuskiirgust (Russak & Kallis, 2004).

Kuigi on teada päikesekiirguse roll fotosünteesi protsessis ning selle kaudu taimekasvus, on päikesekiirguse hulga ja põllukultuuride saagikuse vahelisi seoseid vähe uuritud. Leng *et al.* (2016) näitasid oma statistilises uurimuses, et päikesekiirguse hulk seletas USA põldudel ära 5% maisi ja sojaoa saagikuse varieeruvusest. Ceglar *et al.* (2016) analüüsisid päikesekiirguse hulga mõju maisi ja talinisu saagikusele Prantsusmaal. Tulemused näitasid negatiivset korrelatsiooni kiirgushulga ja maisi saagikuse vahel samas kui nisu saagikuse sõltuvus kiirgushulga varieeruvusest oli väiksem ning talvekuudel pigem positiivne. Hispaanias läbi viidud uurimuses oli kiirgushulga ja nisu saagikuse omavaheline sõltuvus negatiivne (Hernández-Barrera & Rodríguez-Puebla, 2017). Saagikuse ja kiirgushulga negatiivne korrelatsioon Lõuna-Euroopas võib olla põhjustatud sellest, et kõrgem kiirgushulk on seotud väiksema pilvisuse, kõrgema maksimaalse temperatuuri (Hernández-Barrera & Rodríguez-Puebla, 2017) ning aktiivsema transpiratsiooni ja sellest põhjustatud veepuudusega (Ramirez-Villegas *et al.*, 2015). Põhjapoolsematel laiuskraadidel on päikesekiirguse hulga seos saagikusega tõenäoliselt positiivsem, kuid sealgi võib põuakartlikel muldadel suur kiirgushulk põhjustada mulla kuivamist ning langetada seeläbi saagikust.

Põllule langev päikesekiirguse hulk sõltub lisaks geograafilisele laiusel ja atmosfäärioludele otseselt ka nõlva orientatsioonist ja kaldest ning täpsete aktinomeetriliste mõõtmiste puudumisel saab päikesekiirguse mõju saagikusele uurida reljeefiomaduste kaudu.

2.2. Muld

Mullaomadused on üheks olulisemaks saaki mõjutavaks teguriks põllumajanduses. Olulisemad muldade tunnused on mullatüüp, lõimis ehk savi ja liiva vahekord, struktuursus, happesus, huumusesisaldus, huumushorisoni tusedus, mineraaltoitainete sisaldus, vee, õhu ja soojuse olemasolu ning mullaelustik. Eestis on peamised muldade erisuste tekitajad mulla lähtekivimi keemiline koostis (karbonaatsus, toitainetevaru), lõimis, koresus ja veerežiim (http://www.keskkonnainfo.ee/failid/ky/mullastik_maakasutus.pdf). Muld kujuneb välja mitmete erinevate protsesside ja tegurite koostoimel ning tema omadused ja horisonidid sõltuvad sellest, millised täpselt need protsessid ja tegurid on. Teadlased kasutavad mullatekke kirjeldamiseks viit põhilist mullatekketegurit: lähtekivim (-materjal), aeg, kliima, reljeef ja bioloogilised faktorid (USDA, 2018). Kliimategurid nagu temperatuur ja sademete hulk, liik ja ajastus põhjustavad erinevusi murenemises ja leostumises, tuul kannab kuivades piirkondades laiali liiva ning tolmu. Ööpäevased ja hooajalised muutused temperatuuris mõjutavad niiskusefektiivsust, bioloogilist aktiivsust, keemiliste reaktsioonide aktiivsust ning taimekooslusi (USDA, 2018). Lähtekivim määrab osaliselt ära mulla keemilised omadused, lõimise ning sellest tulenevalt ka veehoidevõime ja õhustatuse. Ühelt poolt on taimedele toitainete saamiseks vaja vett, teisalt liiga märgades tingimustes ohustab taimi niiskusstress ja kõrgem juurehaigustesse haigestumise risk (Duniway, 1977) ning konkurents umbrohtudega, mis on paremini kohastunud kasvaks liigniiskes mullas. Vee režiim mõjutab kaudselte teiste mullaomaduste mõjusid saagikusele. Näiteks Ungaris läbi viidud uurimuses osutusid peamisteks maisi, päevalille ja talinisu saagikust mõjutavateks faktoriteks põuastes tingimustes soolsus, naatriumi kuhjumine, lõimis ja toitainete sisaldus ning niisketes tingimustes orgaanilise aine ja toitainete sisaldus (Juhos *et al.*, 2015). Texasese kolme aasta saagikuse andmetega läbi viidud uurimuses mõjutasid puuvilla saagikust enim lõimis, pH, vahetusioonide Ca²⁺ ja Mg²⁺, taimedele kättesaadava fosfori ning nitraatioonide sisaldus (Ping *et al.*, 2004). Samas mõjude suurus varieerusid aastati, niisiis oleks selgete ja usaldusväärsete seoste välja selgitamiseks vaja pikemat aegrida.

2.3. Reljeef

Reljeef mängib põldudel olulist rolli muldade ruumilise varieeruvuse, pinna- ja põhjavee hüdroloogia ning mulla viljakuse kujundamises. Reljeef mõjutab mulla füüsikalisi ja keemilisi omadusi läbi erosiooni- ja kuhjeptsesside (Miller *et al.*, 1988).

Üldiselt on teada, et nõlvadel esineb toitainete ärakanne, mullast välja leostumine, ning toitained liiguvad veega lohkudesse ja nõlva jalamile. Seetõttu peaks ühetaolise normiga väetamise korral lohkudes kasvavad taimed saama rohkem mulda lisatud toitaineid kui järskudel nõlvadel kasvavad. Nõlval võib tekkida toitainete defitsiit, mis mõjutab negatiivselt saagikust, jalamil ja lohkudes aga esineb vahel toitainete üleküllust. Miller *et al.* (1988) tehtud uurimuses oli saagikus kõrgeim nõlva jalamil ning madalaim nõlva ülaosas. Lohkude põhjas, kus küll eeldatav ainete kuhjumine oli suurim, tuli välja kerge langus biomassis, mis võis tuleneda puudulikkusest drenaažist. Väga märgadel aladel ohustab taimi kõrgem juurehaigustesse haigestumise risk (Duniway, 1977) ning konkurents umbrohtudega, mis on paremini kohastunud kasvaks liigniisketes tingimustes.

Lisaks toitainete liikumisele mõjutab põllumaa reljeef ka sealsetele taimedele langeva päikesekiirguse hulka. Eesti asukoht vahemikus 57-60 laiuskraadi tingib suure aastasisese varieeruvuse päikesekiirguse intensiivsuses ja päikesepaiste kestuses. Põllukultuuride kasvatamine ei toimu parasvöetmelises kliimas aastaringselt, sest taimekasvu limiteerivad päikesekiirguse vähesus ja madal õhutemperatuur. Seetõttu võib eeldada, et eelis on põllulappidel, mille ekspositsioon ja nõlvakalle tagavad maksimaalse päikesekiirguse hulga vegetatsiooniperioodil. Kevadel ja suvel pole küll päikesepaiste kestuse ja intensiivsuse suhtelised erinevused reljeefil nõnda rõhutatud kui talvel, kuid siiski võivad need taimekasvust rolli mängida.

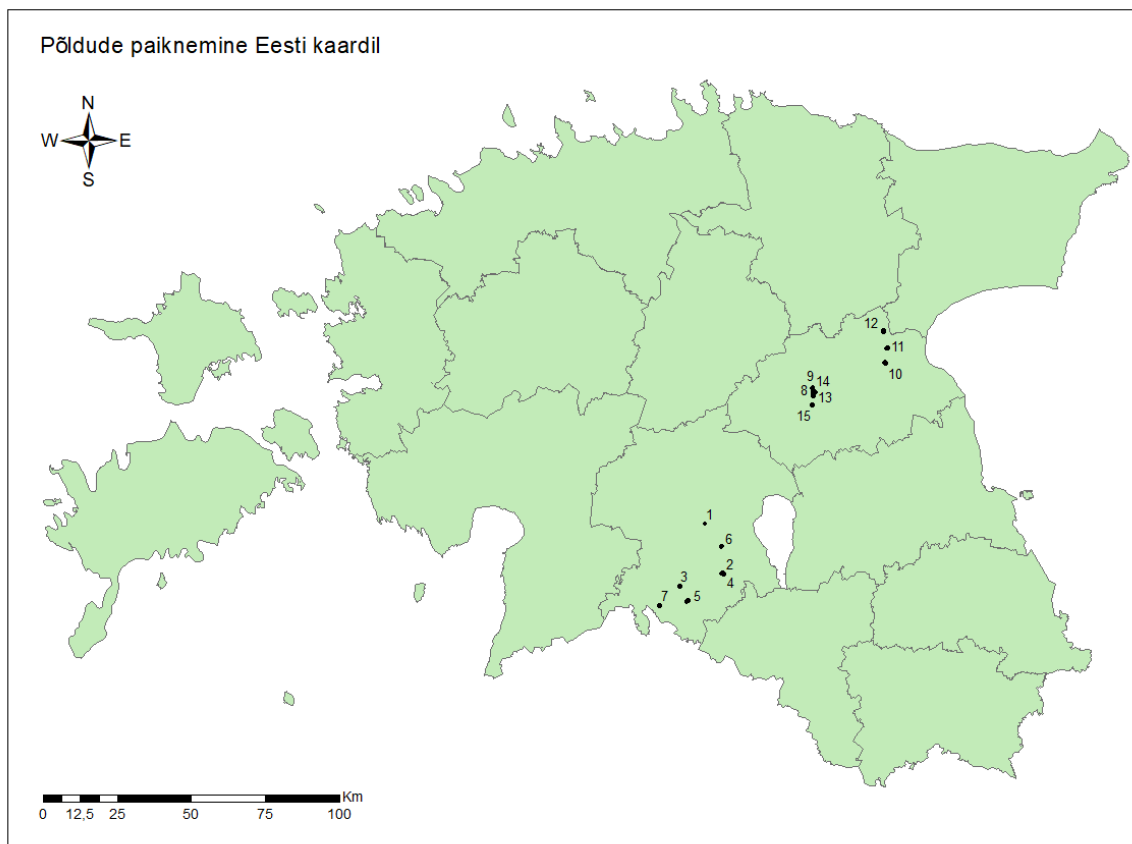
3. Kasutatud andmed ja meetodika

Käesolevas töös kasutatud saagikuse andmed on saadud juhendaja kaudu Põllumajandusuuringute Keskuselt, AS Tatolist Jaanus Kilgilt ning Jõgeva- ja Viljandimaa viljakasvatajatelt. Töös on põllud tähistatud katastriüksuse numbri asemel koodnumbritega kuna saagikuse andmed on põllumajandusettevõtete jaoks äriiselt tundlik informatsioon. Analüüsivad saagikusandmed pole spetsiaalselt kogutud antud uurimuse jaoks vaid põllumajandusettevõtetes tavapärase viljakoristuse raames, mida käesolevas töös käsitletakse passiivse andmekogumisena. Saagikusandmete kogumine pole Eestis veel rutiiniks kujunenud, seetõttu sisaldasid toorandmed rohkelt ebausaldusväärseid lugemeid

mis tuli analüüsi käigus eemaldada. Saagikuse varieeruvuse kirjeldamiseks on kasutatud Keskkonnaagentuuri Ilmateenistuse andmebaasidest pärinevaid ilmastikuandmeid, Maaameti mullakaarti ja LiDARi andmetel põhinevat digitaliseeritud maapinna kõrgusmudelit, edaspidi DEM (*digital elevation model*). Järgnevalt on kirjeldatud andmete iseloomu ja kitsaskohti ning antud ülevaade nendega läbi viidud toimingutest. Suurem osa ruumiandmeanalüüsist ja andmetööstlusest on tehtud ArcMap 10.5.1 tarkvaraga. Interpoleerimine on läbi viidud tarkvaraga Surfer 13 ning statistiline analüüs peamiselt tarkvaraga Statistica 7. Tabelandmete töötamiseks on kasutatud MS Excelit.

3.1. Saagikuse andmed

Saagikuse andmed pärinevad kokku 15 põllult, millest 8 paikneb Jõgeva- ning 7 Viljandimaal. Andmeid on aastatest 2013, 2014, 2015, 2016 ja 2017, vastavalt kolme, ühe, üheksa, seitsme ja viie põllu kohta. Põllukultuuridest on esindatud suvioder, talioder, suvinisu, talinisu, põldhernes, tritikale ja raps. Põldude asukohad eesti kaardil on kujutatud joonisel 1. Analüüsitavaid põldude pindalad olid vahemikus 2,47 ha – 33,76 ha, keskmiselt 11,3 ha.



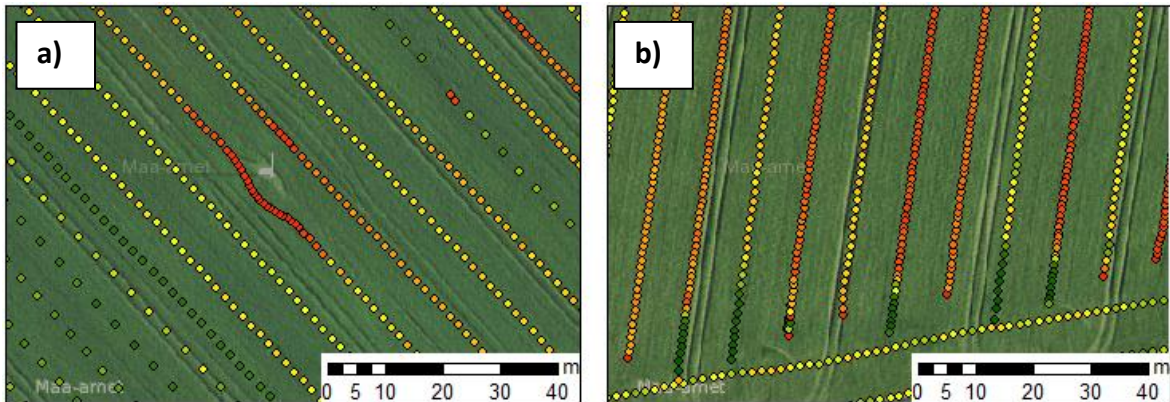
Joonis 1. Põldude asukohaskeem. Põldude asukohad on tähistatud punktiga, numbrid kaardil tähistavad põldude koodnimesid, mida edaspidi neile viitamisel kasutatakse.

Saagikuse mõõtmine ning positsioneerimine toimus saagikuse detektori ning GPS-ga varustatud kombainides. Lähteandmed on konverteeritud ArcGIS punktandmetega *shape* failideks. Toorandmetes esines nii visuaalselt nähtavaid kui ka statistilisel töötlusel avalduvaid ebakorrapärasusi ja/või valeandmeid. Peamised põlluandmetes esinenud probleemid olid:

- 1) sama põllu ulatuses naabruskonnast kontrastselt erineva saagikusega andmepunktid ja alad,
- 2) väga madalad saagikused koristuskäiku alustades kui heeder alles maha on pandud ning väga kõrged mõõdetud saagikused koristuskäigu lõpetamisel, Põhjuseks on esimesel juhul asjaolu, et kombain juba liigub ning saagikuse arvutamine käib, kuid vili pole veel heedrist detektorini jõudnud, koristuskäigu lõpetamisel tuleb aga eelnevalt koristatud vilja ikka veel detektorile ja punkrisse. Vilja lõikamise ja selle hulga mõõtmise vahel on ajaline nihe, mida mõõturi kalibreerimisel küll arvestatakse, kuid teatav määramatus jääb. Lisaks oleneb mõõturi kalibreeritus töötajast, kes viljakoristust läbi viib.
- 3) Ümber takistuste (puud, elektripostid, kivid) sõitmisel ning kombaini kiiruse langemisel mõõdetakse kombainis kõigepealt suured saagikused, sest varem koristatud vili jõuab endiselt detektorini, kuid läbitav distants ning seega pindala millega saak jagatakse on väike,
- 4) Suuremad põllud olid sageli koristatud mitme kombainiga, mõnel juhul ka mitme päeva jooksul. Tulenevalt masinate erinevusest (nt vilja teekond heedrist saagikuse mõõturini, mõõturi kalibreeritus, sensori tööpõhimõte ja täpsus, süstemaatilised vead, koristatava põllukultuuri sisestamise korrektsus) ei pruugi erinevate kombainidega koristamisel mõõdetud saagikuse toorandmed olla omavahel võrreldavad. Erinevatel päevadel vilja koristamisel võib mõõtmistulemusi mõjutada näiteks vahepealsel perioodil toimunud vihmajärgu tõttu muutunud niiskus või isegi tuule tõttu tekkinud lamandumine.
- 5) Mõõdetud saagikuse väärtused sõltusid sõidu suunast, mistõttu esinesid vaheldumisi kõrge ja madala saagikusega koristuskäigud. Selle põhjuseks võis olla lamandumine, mille puhul kõrre kaldele vastu liikudes saadakse suurem saak kui kõrre kaldega samas suunas liikudes.
- 6) Kombaini sõidusuunas on mõõtepunkte tihedalt, sõidusuunaga risti piirab punktide tihedust heedri laius, mis varieerub 6,9 meetrist 9,1 meetrini. Seega on kahe

koristuskäigu ristisuunaline vahe suurem kui analüüsis kasutatav 5 meetrise lahutusega raster, ning sarnase lahutusega rastri loomisel mõnedele elementidele väärtust ei omistataks. Samuti esineks anisotroopia koristuskäigu piki- ja ristisuunalisel andmetihedusel ja statistilisel töötlusel.

Kirjeldatud probleemid on visualiseeritud joonisel 2 ning nende esinemine uuritud põldudel on kokku võetud tabelis 1.



Joonis 2. Saagikuse andmed ortofoto (Maa-ameti geoportaal, 2018) taustal. Rohekad punktid tähistavad madalamat, kollakad keskmist ning punakad kõrgemat saagikust. Vasakpoolsel joonisel (a) on näha kombainiga registreeritud saagikuse muutumist elektripostist möödumisel ning samal joonisel ülal paremal kaht kõrge saagikusega eristuvat punkti. Parempoolsel joonisel (b) on kujutatud kõrge ja madalama saagikusega koristuskäikude paiknemine vaheldumisi ning erinevus saagikuses koristuskäiku alustades ja lõpetades.

Tabel 1. Ülevaade saagikuse andmetes esinenud probleemidest erinevatel põldudel. Numbrid 1-6 vastavad eelpool toodud probleemide loetelu numbridusele: 1 - kontrastselt erinevad alad/punktid, 2 - madal saagikuse koristuskäigu alguses ning kõrge koristuskäigu lõpus, 3 – kõrge saagikus ümber takistuse sõidul, 4 – koristatud mitmel päeval või mitme kombainiga, 5 – sõltuvus sõidusuunast, 6 – sõidusuunaga risti on punktide distants üle 5 m.

Põld	Aasta	Kultuur	Saagikuse andmetes esinenud probleem					
			1	2	3	4	5	6
1	2015	suviuder	X	X	-	X	X	X
2	2015	suviuder	X	X	X	X	X	X
3	2015	suviuder	X	X	X	X	X	X
4	2015	suviuder	X	X	X	X	X	X
5	2015	suviuder	X	X	X	X	-	X
6	2015	talnisu	X	X	X	X	X	X
7	2015	...nisu	X	X	X	-	-	X
8	2016	suvinisu	X	X	X	-	-	X
	2017	taliuder	X	X	X	-	X	X
9	2016	talnisu	X	X	X	X	-	X
	2017	talnisu	X	X	X	X	X	X
10	2013	suviuder	X	X	X	X	X	X
	2015	tritik	X	X	X	X	X	X
	2016	talnisu	X	X	X	X	-	X
11	2013	suviuder	X	X	X	X	-	X
	2014	talnisu	X	X	X	-	-	X
	2016	suviuder	X	X	X	X	-	X
12	2013	suviuder	X	X	X	-	-	X
	2015	suviuder	X	X	X	X	X	X
13	2016	hernes	X	X	X	X	-	X
	2017	talnisu	X	X	X	-	-	X
14	2016	talnisu	X	X	X	-	-	X
	2017	talnisu	X	X	X	-	X	X
15	2016	suviuder	-	X	-	-	X	X
	2017	raps	X	X	X	-	-	X

3.1.1. Saagikuse algandmete eeltöötlus

Enne andmete analüüsi eemaldati saagikuse toorandmetest ebausaldusväärsed mõõtmistulemused. Väärandmete filtreerimine ja kustutamine toimus mitmes etapis ning lähtus osaliselt Kleinjan *et al.* (2002) meetodikast, peamiselt aga eksperthinnangust ortofoto ja digitaalse kõrgusmudeliga kombineeritud saagikusandmete vaatlusel. Kõik andmehulgad sisaldasid algselt ebareaalselt kõrge saagikuse väärtusega punkte (enamasti tekkinud järsust ebataasusest läbi sõitmisel tekkinud pörutusest), mis eemaldati vastavalt kultuurile läviväärtuse ületamise alusel. Maksimaalse saagikuse lävendi määramine oli subjektiivne, toetudes põllumajanduslikes katsetes mõõdetud maksimumväärtustele samas arvestades ka piirkonna või põllu üldist saagikust. Jõgevamaa põldude puhul kasutati lävendina saagikuse väärtusi, mis ületasid uuritava aastal Põllumajandusuuringute

Keskuse katseväljadel saadud maksimumi 50% või enam, rapsi puhul oli lävendiks 7 t/ha. Viljandimaa põldudel olid mõõdetud saagikused Jõgevamaa põldudega võrreldes tunduvalt väiksemad ning seetõttu rakendati seal ekstreemsete väärtuste eemaldamiseks sagedusjaotusi arvestades madalamaid kriteeriume. Viie põllu puhul oli kriteeriumiks 4 t/ha ning kahel juhul 7 t/ha. Väärandmete eemaldamise kriteeriumid ning peale filtreerimist alles jäänud punktide arvud on toodud tabelis 2.

Tabel 2. Põllu number, koristusaasta, põllukultuur ning kombainiga registreeritud väärtuspunktide arv enne ja pärast filtreerimist. NO – algne väärtuspunktide arv, pmk max – Põllumajandusuuringute Keskuse saagikuse maksimumväärtus uuritava aastal, N1- väärtuspunktide arv pärast Põllumajandusuuringute Keskuse maksimumsaagikust enam kui 50% ületavate väärtuste eemaldamist, N2 – punktide arv pärast 4 või 7 t/ha läviväärtuse rakendamist Viljandimaa põldudel, N – lõplik interpoleerimisel kasutatud punktide põllu kohta analüüsis kasutatud punktide arv.

põld	aasta	kultuur	NO	pmk max	N1(NO-1,5*pmk max)	lisa kr.	N2(N1-lisa kr.)	N
1	2015	suvioder	3932	9,595	3923	4	3353	1930
2	2015	suvioder	4958	9,595	4941	4	4782	3954
3	2015	suvioder	4102	9,595	4069	4	3950	2794
4	2015	suvioder	11673	9,595	11624	7	11510	5303
5	2015	suvioder	10724	9,595	10696	4	10596	5555
6	2015	taliniisu	3908	9,94	3895	7	3867	2217
7	2015	...niisu	1613	9,94	1612	4	1608	1573
8	2016	suvinisu	4541	8,04	4459	-	4459	2389
	2017	talioder	7062	10,77	7002	-	7002	3713
9	2016	taliniisu	25856	9,861	25569	-	25569	14446
	2017	taliniisu	33213	12,121	32529	-	32529	19218
10	2013	suvioder	16849	9,818	16817	-	16817	10974
	2015	trititik	18058	9,591	17486	-	17486	6802
	2016	taliniisu	18967	9,861	18841	-	18841	10081
11	2013	suvioder	12862	9,818	12766	-	12766	7281
	2016	suvioder	16616	7,186	14044	-	14044	7360
12	2013	suvioder	16318	9,818	16287	-	16287	8050
	2015	suvioder	16373	9,595	15887	-	15887	11449
13	2016	hernes	11514	3,868	10978	-	10978	7003
	2017	taliniisu	18300	12,121	17988	-	17988	13937
14	2016	taliniisu	2012	9,861	1974	-	1974	1521
	2017	taliniisu	3040	12,121	2884	-	2884	2310
15	2016	suvioder	11038	7,186	10950	-	10950	7030
	2017	raps	13912	teadmata	13912	7	13550	8750

3.1.2. Normeerimine ja interpoleerimine

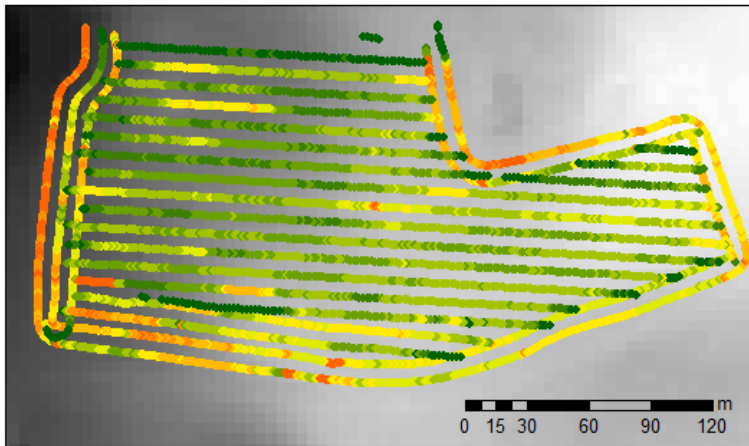
Erinevatel päevadel või erinevate kombainidega koristatud põldude andmemassiivid jagati töid sooritanud kombaini või kuupäeva järgi osadeks. Saagikusandmed normeeriti eraldi iga uuritava andmehulga keskmise väärtuse suhtes (punkti väärtus jagatud andmehulga keskmise väärtusega). Selle tulemusel saadi suhteline saagikus, mis muutis erinevates tingimustes mõõdetud saagikuse väärtused võrreldavaks. Normeerimise kaudu võrreldakse

suhtelisi väärtusi ning taandatakse välja kombainide mõõtesüsteemist ja erinevast koristuspäevast tulenevad süstemaatilised vead mis takistaksid põllu osade võrdlemist. Seeläbi joonistuvad välja suhteliselt viljakamad ja vähemviljakad piirkonnad nii uuritava põllu osa või kogu põllu kontekstis.

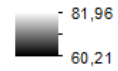
Kõrgusmudeliga võrreldava kaardikihi saamiseks ning suurest heedri laiusest tuleneva rasterkihi lünklikkuse vältimiseks saagikuse punktandmed interpoleeriti. Saagikuse juhusliku varieeruvuse (lamandumine, põllu ebatasasusest tingitud rappumise mõju mõõtesensorile, juhuslik ülekate koristusradade vahel) vähendamiseks omistati esimeses etapis igale punktile 25 m raadiusse jäävate punktide keskmine saagikuse väärtus. Kuna sõidusuunas oli mõõtepunkte keskmiselt kaks korda tihedamalt kui ristisuunas ehk esines anisotroopia, arvestati interpoleerimisel väärtusi 30 meetri raadiuses sõidusuunas ning 60 meetri raadiuses ristuvast suunas. Interpoleerimismeetodiks valiti *kriging* kuna saagikuse interpoleerimist on vähe uuritud ning kriging on võrdlemisi universaalne meetod, mis on siiani tehtud uurimustes andnud rahuldavaid tulemusi (Souza *et al.* 2016).

Saagikuse andmeid enne töötlust, peale väärandmete eemaldamist ning peale keskmistamist ja interpoleerimist ühe põllu näitel iseloomustab joonis 3.

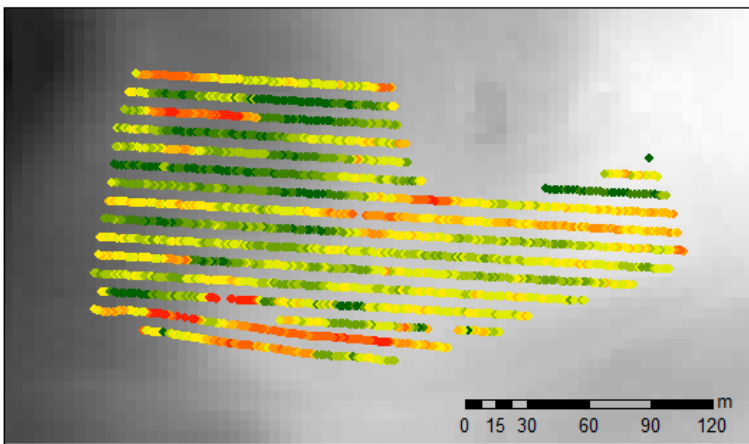
a)



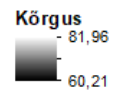
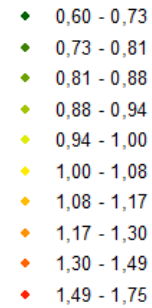
Suhteline saagikus



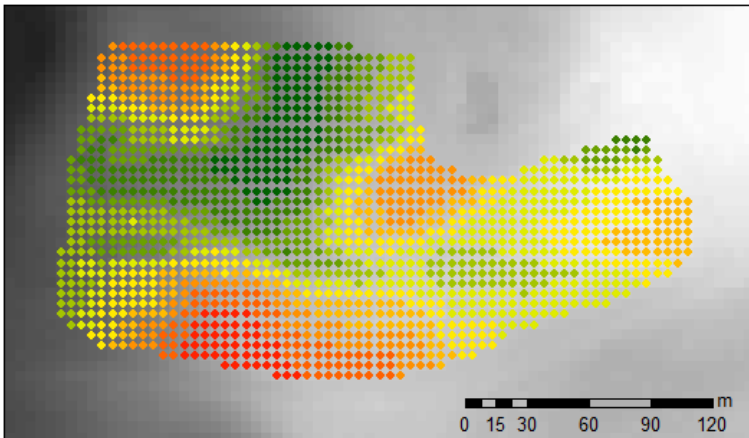
b)



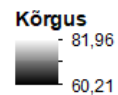
Suhteline saagikus



c)



Suhteline saagikus



Joonis 3. Põllu nr 1 saagikuse andmed a) algsel kujul, b) pärast ebausaldusväärsete mõõtmistulemuste (servad, koristuskäikude algused ja lõpud, ülekatted ning üksikud ebausaldusväärased punktid) eemaldamist ning c) peale interpoleerimist. Jooniste a), b) ja c) värviskaala ei ole identne.

3.2. Reljeefiandmed

Reljeefiandmetena kasutati Maa-ameti LiDARi andmete põhjal tehtud digitaliseeritud maapinna kõrgusmudelit ehk DEM-i. Andmed pärinevad 2014-2015. aastal sooritatud lendudelt – Jõgevamaa kaeti 2014. ning Viljandimaa lõunaosa 2015. aastal. Kõrgusmudeli põhjal arvutati ArcMapi „Hydrology“ ja „Surface“ tööriistu kasutades igale rastrielemendile voolu suund, voolu akumulatsiooni ala, nõlva ekspositsioon ning nõlvakalle. Näide reljeefiomaduste mudelitest ühel uuritava põllualal on esitatud joonisel 4

Voolu suund arvutatakse kaheksal ilmakaarel põhineva algoritmi alusel ning selle põhjal leitakse voolu akumulatsiooni ala. Kõigepealt arvutatakse millises suunas piksli keskpunktist naaberpiksli keskpunkti liikudes on langus suurim. See leitakse z-väärtuse muudu ja keskpunktide vaheliste distantside jagatisena. Voolu suuna andmestikku kasutatakse edaspidisel voolu akumulatsiooni ala arvutamisel. Voolu akumulatsiooni ala (tabelites edaspidi Q_s) väärtus tähistab pikslite arvu millelt vesi uuritavasse pikslisse voolab, näidates sellega nõ piksli valgala suurust. Nullväärtusega pikslid vastavad tavaliselt lokaalsetele kõrgematele aladele, mis toimivad veelahkmena. Kirjeldatud voolu suuna ja akumulatsiooni tuletamise meetodi töötasid välja Jenson ja Domingue (1988).

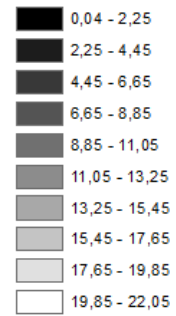
Nõlvakalde leidmiseks arvutatakse maksimaalne kõrguste muutus uuritava piksli ning tema kaheksa naaberpiksli vahel ning jagatakse see horisontaalse distantsiga (tööriist „Slope“ võimaldab valida kas kalle antakse kraadides või protsentides). Ekspositsioon ehk nõlva suund ilmakaarte suhtes leitakse maksimaalse languse suuna järgi, saades väljundiks väärtused vahemikus $0^\circ - 360^\circ$, mis näitab, millises kompassi suunas on kallakus orienteeritud. Täiesti horisontaalsetele aladele omistatakse väärtuseks -1 (ESRI, 2018), neid käesolevas töös statistilises analüüsis ei kasutatud.

Nii reljeefiomadusi kui ka interpoleerimisel saadud saagikuse väärtusi kajastavad rasterkihid teisendati punktandmeteks, et lihtsustada andmete ruumilist sidumist ning ühendamist samasse tabelisse. Tabelid ühendati ning eksporditi edaspidiseks töötamiseks ja statistiliseks analüüsiks.

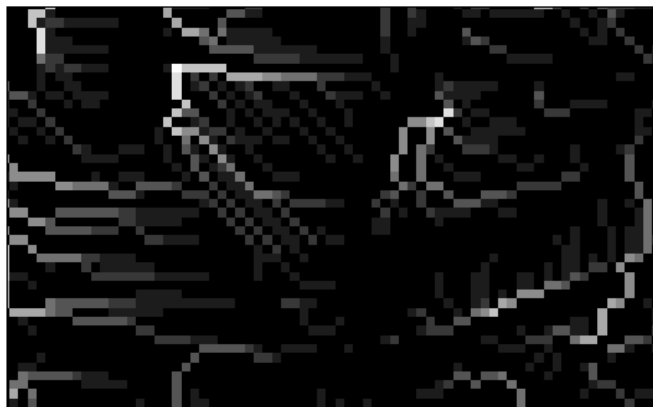
a)



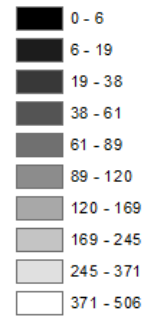
Kalle kraadides



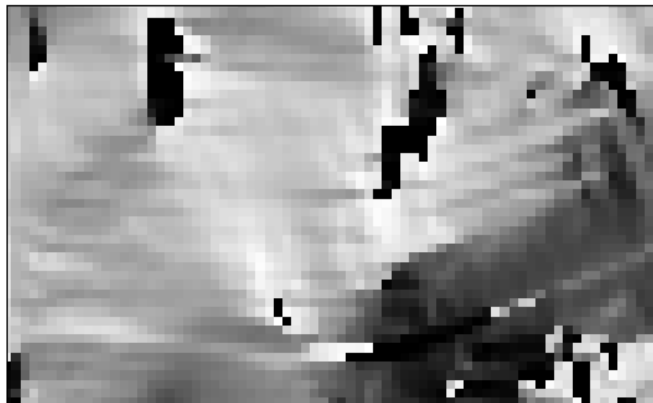
b)



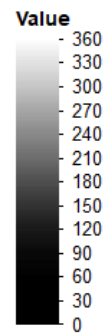
Voolu akumulatsioon



c)



Ekspositsioon



Joonis 4. Põllu nr 1 reljeefiomadusi kirjeldavad joonised. a) nõlvakalle, b) voolu akumulatsiooni ala, c) nõlva ekspositsioon.

3.3. Mullastiku andmed

Analüüsis kasutatavad mullaparameetrite väärtused pärinevad maa-ameti mullastiku kaardilt (1:10000). Mulla boniteet on kasutatav algsel kujul, lõimis aga on algselt esitatud kvalitatiivsel kujul. Lõimis ehk mehaaniline koostis on määratud füüsikalise savi (alla 0,01 mm läbimõõduga osakeste) sisaldusel baseeruva Katšinski klassifikatsiooni alusel. Parameetri kasutamiseks mitmeses regressioonianalüüsis viidi see arvkujule, asendades mullaerimi tähistused erimile vastava füüsikalise savi sisalduse vahemiku keskmisega. Savi sisaldus on taimekasvu seisukohast oluline parameeter, näidates kaudselt mulla veehoiu võimet (mida suurem on saviosakeste sisaldus, seda paremini püsib vesi mullas).

Tabelis 3 on esitatud mullaerimite rühmad, erimid, nende tähistused, füüsikalise savi sisalduse vahemikud ning vahemike keskmised väärtused. Kuna mullad on sageli kihilised ning ka lõimis varieerub olenevalt sügavusest, on ka lõimise kirjeldused mullakaardil esitatud vastavate kombinatsioonidena. Mitmekihilise lõimise puhul on väärtuse omistamisel lähtutud pindmise kihi paksusest – kui pindmise kihi paksus oli kuni 40 cm, omistati punktile savisisalduse väärtuseks ülemise ja alumise erimi piiripealne väärtus. Näiteks tähistus sl40/ls₁ (40 cm paksune kiht saviliiva, sügavamal kerge liivsavi) sai savisisalduse väärtuseks 20%. Liivadele ning liivsavidel, millel polnud erimit eristatud, omistati savisisalduseks erimite rühma keskmine ehk vastavalt 5% ja 35%.

Tabel 3. Muldade klassifikatsioon füüsikalise savi sisalduse järgi (Maa-amet, 2001) ja arvutatud savisisalduse keskmine väärtus.

Mullaerimite rühm	Mullaerim	Tähis	Füüsikalise savi sisaldus (%)	Vahemiku keskmine savi sisaldus
Liivad	Sõredad liivad	l (pl)	0-5	2,5
	Sidusad liivad	l (tl)	5-10	7,5
Saviliivad	Saviliivad	sl	10-20	15
Liivsavid	Kerged liivsavid	ls1	20-30	25
	Keskmised liivsavid	ls2	30-40	35
Savid	Rasked liivsavid	ls3	40-50	45
	Kerged savid	s	50-65	57,5
	Keskmised savid	s	65-85	75
	Rasked savid	s	>85	92,5

3.4. Ilmastikuandmed

Kuna uuritavatel põldudel ei sooritata regulaarselt ilmavaatlusi ning mõõtmisi, pärinevad kuude keskmised temperatuurid ning sademete hulgad uuritavatel aastatel (2013-2017) Keskkonnaagentuuri Ilmateenistuse kliimakaartidelt (Ilmateenistus, 2018). Kasutatud on kõige lähemal paiknevate ja piirkonda kõige täpsemini kirjeldavate ilmajaamade andmeid: Viljandimaa põldudele omistati Viljandi meteoroloogiajaama (58°22'40'' N, 25°36'01'' E) ning Jõgevamaa põldudele Jõgeva meteoroloogiajaama 58°44'59'' N, 26°24'54'' E) andmed. Kuigi kolm idapoolseimat põldu paiknevad distantsilt kõige lähemal Tiirikoja meteoroloogiajaamale, kirjeldab piirkonda tõenäoliselt siiski paremini Jõgeva jaam. Tiirikoja kliima on tugevalt mõjutatud Peipsi järve lähedusest, 10-15 km kaugusel põldudel on aga Peipsi mõju tõenäoliselt väike või olematu. Analüüsis kasutatakse kuude keskmisi temperatuure ja sademete hulka vegetatsiooniperioodil ehk maist augustini (tabel 4). Taliviljade puhul on tegelikult olulised ka talvitumistingimused nagu sulamise ja jäätumise sagedus, lumikatte paksus ja kestus, kuid seda antud töös ei käsitleta.

Tabel 4. Vegetatsiooniperioodi kuude keskmised temperatuurid (t) ja sademete hulgad (P) aastatel 2013-2017 (13-17) Jõgeva ja Viljandi (V) meteoroloogiajaamades.

Kuu	t° 2013	P 2013	t° 2014	P 2014	t° (V) 2015	P(V) 2015	t° 2015	P 2015	t 2016	P 2016	t 2017	P 2017	t (V)	P (V)	t	P
Mai	14,4	84	11,7	64	10,3	40	10,3	43	13,5	4	9,6	8	11	48	10,7	49
Juuni	17,8	39	13,1	157	14,4	45	14	52	15,7	162	13,4	78	15,1	87	14,9	79
Juuli	17,6	34	19,3	48	16,1	111	15,6	77	17,6	78	14,9	57	16,5	83	16,3	76
August	16,6	73	16,5	123	17	76	16,1	34	15,7	180	15,9	83	15,4	91	14,9	93

3.5. Statistiline analüüs

Nii nõlvakalde kui vooluakumulatsiooni ala sagedusjaotused erinesid normaaljaotusest, mis tingis vajaduse normaliseerimisteisenduste järele. Mõlema omaduse puhul kasutati logaritmteisendust $\log(\text{väärtus}+1)$, kuna suur osa väärtusi olid väiksemad kui 1. Nõlvakalde puhul aitas logaritmine saavutada normaaljaotusele läheneva sagedusjaotuse. Vooluakumulatsiooni puhul, kus domineerisid null-väärtused, normaaljaotust saavutada ei õnnestunud. Siiski aitas logaritmine koondada väärtused väiksemasse vahemikku, mis on sobivam erindite suhtes tundlikuks korrelatsioonanalüüsiks.

Ka nõlva ekspositsiooni väärtusi oli tarvis töödelda, sest algsel kujul olid need tsirkulaarsed. Statistilises analüüsis kasutamiseks transformeeriti ekspositsiooni väärtused erinevuseks põhja suunast kraadides. Punktidel ekspositsiooni väärtusega 0°-180° jäeti

väärtus samaks, punktidel väärtusega $>180^\circ$ omistati väärtuseks 360 - algne väärtus. Põhjapoolne ekspositsioon = 0, ida = 90° , lääs = 90° ning lõuna = 180° . Uued väärtused kajastavad kaudselt ka saadavat päikesekiirguse ning maapinna soojenemist. Antud juhul pole arvestatud asjaoluga, et pärastlõunased temperatuurid on kõrgemad ning taimi mõjutava temperatuuri ja päikesekiirguse maksimumi kellaajad on mõne tunni võrra nihkes.

Reljeefiomaduste ning saagikuse vaheliste seoste uurimiseks kasutati korrelatsioonanalüüsi. Pearsoni korrelatsioonikordaja arvutati nõlvakalde ja saagikuse, voolu akumulatsiooni ala ja saagikuse ning nõlva ekspositsiooni ja saagikuse vahel. Reljeefiomaduste, kliima parameetrite ja mullaomaduste koosmõju uurimiseks saagikuse kujunemisele, kasutati mitmest regressioonanalüüsi. Sõltuvaks tunnuseks oli saagikus ning argumenttunnusteks logaritmitud nõlvakalle ja logaritmitud voolu akumulatsioon ning nõlva ekspositsioon (erinevus põhja suunast kraadides), mulla boniteet, mulla savisisaldus, sademete hulk ja keskmine temperatuur kuude kaupa (mai, juuni, juuli ja august). Kuna saagikuse andmed pärinevad vaid kahest kliimaatilisel veidi erinevast piirkonnast, viidi analüüs läbi ainult nende põllukultuuridega, mille kohta oli andmeid mitme aasta jooksul erinevatelt põldudelt. Suviadra saagikuse kohta on andmeid mõlemast piirkonnast aastatest 2013, 2015 ja 2016, kokku üheksalt erinevalt põllult (viis põldu Viljandimaal, neli Jõgevamaal). Talinisu andmed pärinevad aastatest 2014, 2015, 2016 ja 2017, kokku kuult erinevalt põllult ning samuti mõlemast piirkonnast (viis põldu Jõgevamaal, üks Viljandimaal). Erinevaid aastaid hõlmavate koondandmetega viidi läbi analüüs kasutades samm-sammulist astakregressiooni.

4. Tulemused ja arutelu

4.1. Seos saagikuse ja reljeefiomaduste vahel

Reljeefiomaduste ja saagikuse ning saagikuse ja voolu akumulatsiooni ala vahelise seose hindamiseks arutati nende vahel Pearsoni korrelatsioonikordajad (r) mille väärtused on välja toodud tabelis 5. Korrelatsioonid olid üldiselt väikesed ning nende suunad olid varieeruvad, kuid enamasti oli seos statistiliselt oluline ($p < 0,05$). Seoseid käsitletakse põhjalikumalt edasi peatükkides 4.1.1, 4.1.2 ja 4.1.3.

Tabel 5. Saagikuse ja reljeefiomaduste vahelised Pearsoni korrelatsioonikordajad. Statistiliselt olulised ($p < 0,05$) korrelatsioonikordajad on toodud rasvases kirjas. Sinisel taustal on eristatud suvioder ning roosal taustal talinisu.

Põld	Aasta	Kultuur	Kalle (log)	Q_s (log)	Aspekt	Pindala (ha)	Keskmine Kalle(°)
1	2015	suvioder	-0,31	-0,16	0,05	3,108	3,32
2	2015	suvioder	0,04	0,15	0,13	9,42	1,75
3	2015	suvioder	-0,28	-0,02	-0,06	7,133	1,83
4	2015	suvioder	-0,06	0,05	-0,04	14,595	2,25
5	2015	suvioder	0,14	0,12	-0,07	14,515	1,49
6	2015	taliniisu	0,11	0,07	-0,1	4,388	1,61
7	2015	...nisu	-0,2	0,03	-0,34	6,505	2,15
8	2016	suvinisu	-0,09	-0,01	-0,02	5,87	1,36
	2017	talioder	-0,05	-0,04	-0,02	5,87	1,36
9	2016	taliniisu	0,12	0,03	0,02	33,76	1,32
	2017	taliniisu	-0,06	0,07	-0,05	31,455	1,32
10	2013	suvioder	-0,06	0,04	-0,13	16,828	1,87
	2015	tritik	-0,02	-0,03	-0,18	16,828	1,87
	2016	taliniisu	-0,25	0,01	0,04	16,828	1,87
11	2013	suvioder	-0,38	-0,11	-0,22	11,573	1,07
	2014	taliniisu	0,23	0,06	0,03	6,79	1,07
	2016	suvioder	-0,5	-0,13	-0,07	11,573	1,07
12	2013	suvioder	0,16	0,07	-0,17	16,363	0,84
	2015	suvioder	-0,11	0,06	-0,09	16,363	0,84
13	2016	hernes	-0,06	0,04	0,15	12,673	0,67
	2017	taliniisu	-0,09	0,07	0,06	12,673	0,67
14	2016	taliniisu	0,13	0,05	0,05	2,465	1,2
	2017	taliniisu	0,06	0,12	0,28	2,465	1,2
15	2016	suvioder	0,4	0,09	0,12	10,335	0,94
	2017	raps	0,24	0,08	-0,29	10,335	0,94
Keskmine			-0,036	0,028	-0,037	11,302	1,58
Keskmine r ($p < 0,05$)			-0,040	0,036	-0,051		
Keskmine r absoluutväärtus			0,166	0,068	0,111		
Keskmine r ($p < 0,05$) abs. väärtus			0,177	0,082	0,131		

4.1.1. Saagikus ja nõlvakalle

Nõlva kalde ja saagikuse vahelised korrelatsioonid olid madalad ning nende suund varieerusid põlluti ning aastati. Korrelatsioonikordajad (tabel 5) näitavad, et negatiivse saagikuse ja nõlvakalde vahelise seosega põlde oli enam kui positiivse seosega. Statistiliselt oluline ($p < 0,05$) oli seos 22 juhul, negatiivne neist 13 juhul. Oluliste seoste keskmine korrelatsioonikordaja oli $-0,04$, madalaim $-0,5$ ning kõrgeim $0,4$.

Korrelatsioonikordajate väärtusi võrreldi aastate ning põllukultuuride kaupa (tabel 6), kuid ka seal on seose suund erinevate aastate ja kultuuride lõikes varieeruv.

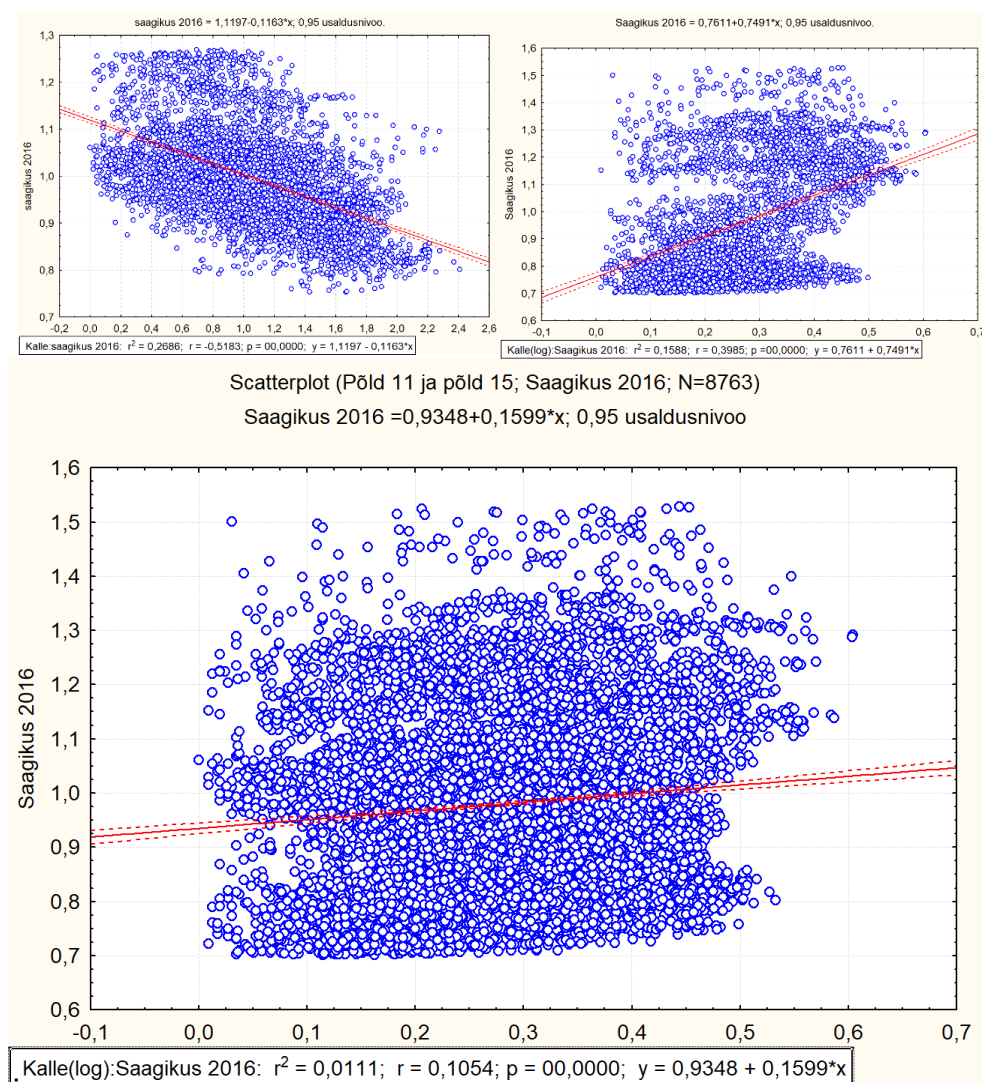
Tabel 6. Saagikuse ja nõlvakalde vahelised Pearsoni korrelatsioonikordajad aastate kaupa. Statistiliselt olulised ($p < 0,05$) korrelatsioonikordajad on toodud rasvases kirjas.

Aasta	Kultuur	Kalle (log)	Aasta	Kultuur	Kalle (log)	Aasta	Kultuur	Kalle (log)	Aasta	kultuur	Kalle (log)
2013	suvioder	-0,06	2015	suvioder	-0,31	2016	suvinisu	-0,09	2017	talioder	-0,05
2013	suvioder	-0,38	2015	suvioder	0,04	2016	taliniisu	0,12	2017	taliniisu	-0,06
2013	suvioder	0,16	2015	suvioder	-0,28	2016	taliniisu	-0,25	2017	taliniisu	-0,09
			2015	suvioder	-0,06	2016	taliniisu	0,13	2017	taliniisu	0,06
2014	taliniisu	0,23	2015	suvioder	0,14	2016	hernes	-0,06	2017	raps	0,24
			2015	suvioder	-0,11	2016	suvioder	-0,5			
			2015	taliniisu	0,11	2016	suvioder	0,4			
			2015	...nisu	-0,2						
			2015	tritik	-0,02						

Eraldi vaadeldi põllukultuure, millelt oli saagikuse andmeid mitme aasta kohta. Suviodra saagikusel oli 2015. aastal valdavalt negatiivne seos nõlvakallega, mis on seletatav keskmisest väiksema sademete hulgaga mais ja juunis. Seos oli tugevam põldudel, kus keskmine nõlvakalle oli suurem. Taliniisu puhul oli saagikuse seos nõlvakallega positiivne (0,11), mida võib selgitada kevadsuviste sademete väiksema mõjuga taliviljale (Ess & Koppel, 2007). Erinevate kultuuride lõikes selget ühesuunalist seost saagikuse ja nõlvakalde vahel ei esinenud. Põhjus võib seisneda asjaolus, et nõlvakalle mõjutab küll otseselt niiskusrežiimi ja mikrokliimat (eriti maapinna temperatuuri), kuid tema mõju saagikusele on pigem kaudne. Sõltudes vastava aasta ilmastikutingimustest võib nõlvakalde mõju olla erisuunaline. Lisaks võib kalde mõju sõltuda nõlva ekspositsioonist ning kalde seos saagikusega ei pruugi olla lineaarne.

Vaadeldes 2016. aasta korrelatsioonikordajaid suviokra põldudel 11 ja 15, tuleb välja kontrastne erinevus nende vahel: korrelatsioonikordajad olid vastavalt $-0,5$ ja $0,4$ (tabel 6).

Joonisel 5 on esitatud saagikuse väärtuste hajuvusdiagrammid mõlemal põllul eraldi ning ühendatult.



Joonis 5. Suviudra saagikuse ja nõlvakalde hajuvusdiagrammid 2016. aastal. Vasakul ülemisel joonisel saagikuse hajuvus põllul nr 11, paremal ülemisel joonisel hajuvus põllul nr 15, alumisel joonisel saagikuse hajuvus kahe põllu andmete ühendamisel.

Nii suurt erinevust on uurimuses kasutatud andmete põhjal raske seletada. Põldude keskmised kalded on suhteliselt sarnased, vastavalt 1,07 ja 0,94, niisiis ei saa erinevust põhjendada kalde võimaliku mittelineaarse mõjuga. Samuti ei seleta nii suurt erinevust ka põldudevaheline mullaomaduste erinevus. Negatiivse seosega põllul oli valdavaks mullatüübiks kahkjass leetunud muld (LP), väikesel alal esines ka gleistunud leetjat mulda (LPg). Positiivse seosega põllul olid valdavaks leostunud ja leetjad mullad (K0, KI, K0g, K0(g) ja KIg). Neid mullatüüpe iseloomustab üldiselt keskmise raskusega lõimis (saviliiv, liivsavi) ning parasniiskus või nõrk liigniiskus. Mõlemal põllul olidki valdavaks lõimiseks

kerged liivsavid, niisiis antud töös käsitletavad mulla parameetrid ei seleta suurt erinevust kahe põllu vahel.

Erinevusi võib põhjustada ka ilmastikutingimuste erinevus, mis üldistatud ilmastikuandmetes ei kajastu. Mõlemad põllud asuvad Jõgevamaal ning nende kliimaparameetreid on kirjeldatud Jõgeva ilmajaama mõõtmistulemuste alusel, samas paikneb põld 15 Jõgevast läänes, põld 11 aga idas, lähemal Peipsi järvele kui linnale. Sellest tulenevalt võivad põldudel ilmastikutingimused, iseäranis suvine sademetehulk, erineda. Antud töös kasutatavad andmed seda aga kirjeldada ei võimalda.

4.1.2. Saagikus ja voolu akumulatsioon

Saagikuse korrelatsioonid voolu akumulatsiooni ala suurusega on aastate kaupa välja toodud tabelis 7. Seosed voolu akumulatsiooniga olid veelgi nõrgemad kui nõlva kaldega, kuid selgemalt tuli välja seose suund, mis oli valdavalt positiivne (15 juhul 19-st statistiliselt olulisest seosest). Positiivne seos on kooskõlas ka varasemate tehtud uuringutega (Marques da Silva & Silva, 2008; Kumhalova *et al.*, 2011). Seoste olulisus, tugevus ning suund erines aastati. Proportsionaalselt oli enim statistiliselt ebaolulisi seoseid aastal 2016, mida iseloomustas väga soe ja kuiv mai ning väga sademeterohke suvi. Kõige ühtlasem oli statistiliselt oluliste seoste suund 2017. aastal, mida iseloomustab ühtlase sademete jaotusega keskmisest jahedam suvi, mil voolu akumulatsiooni ala suurus oli positiivselt seotud saagikusega. 2016. aasta madalaid korrelatsioone võib selgitada ajaliselt ebaühtlase sademete jaotusega. Liigne kuivus takistab toitainete liikumist, liigne niiskus aga vähendab mulla õhustatust ja soodustab taimahaiguste levikut. On tõenäoline, et voolu akumulatsiooni ala suuruse mõju saagikusele pole lineaarne. 2016. aasta juuni ja juuli ebaharilikult rohketest sademetest tulenev negatiivne ning mai põuast tekkiv positiivne voolu akumulatsiooni mõju võisid teineteist maskeerida. Lisaks võis 2016. aastal voolu akumulatsiooni ala suuruse mõju vähendada kõrge suvine temperatuur, mis soodustab vee aurumist, vältides sellega suurte erinevuste tekkimist veehulga ruumilises jaotuses. 2017. aastal aga oli sademete hulk ühtlane ning pikaajalisest keskmisest veidi madalam ning voolu akumulatsiooni ja saagikuse vahelised statistiliselt olulised korrelatsioonid olid läbivalt positiivsed. Ka 2015. aastat iseloomustab võrdlemisi ühtlase sademete hulgaga suvi (va. veidi vihmase juuli Viljandimaal) ning sarnaselt 2017. aastale on voolu akumulatsiooni seosed valdavalt positiivsed ning enamjaolt statistiliselt olulised.

Tabel 7. Saagikuse ja voolu akumulatsiooni vahelised Pearsoni korrelatsioonikordajad aastate kaupa.

Aasta	Kultuur	Q _s (log)	Aasta	Kultuur	Q _s (log)	Aasta	Kultuur	Q _s (log)	Aasta	Kultuur	Q _s (log)
2013	suvioder	0,04	2015	suvioder	-0,16	2016	suvinisu	-0,01	2017	talioder	-0,04
2013	suvioder	-0,11	2015	suvioder	0,15	2016	taliniisu	0,03	2017	taliniisu	0,07
2013	suvioder	0,07	2015	suvioder	-0,02	2016	taliniisu	0,01	2017	taliniisu	0,07
			2015	suvioder	0,05	2016	taliniisu	0,05	2017	taliniisu	0,12
2014	taliniisu	0,06	2015	suvioder	0,12	2016	hernes	0,04	2017	raps	0,08
			2015	suvioder	0,06	2016	suvioder	-0,13			
			2015	taliniisu	0,07	2016	suvioder	0,09			
			2015	...nisu	0,03						
			2015	tritik	-0,03						

4.1.3. Saagikus ja nõlva ekspositsioon

Põllukultuuride saagikuse ja nõlva ekspositsiooni vahelised korrelatsioonikordajad on esitatud tabelis 8. Saagikuse seos nõlva ekspositsiooniga (erinevusega põhjasuunast) oli statistiliselt oluline 20 juhul 25-st. Aastatel 2013 ja 2015 oli seos valdavalt negatiivne, ehk mida sarnasem oli nõlva suund lõunasuunale, seda madalam oli saagikus. 2016. aastal oli lõunapoolne kalle saagikusega korreleeritud pigem positiivselt ning 2017. aastal kindlat seose suunda välja ei tulnud. 2014. aasta ainsal põllul statistiliselt olulist seost saagikuse ja ekspositsiooni vahel ei olnud. Kokku oli korrelatsioon negatiivne 13 juhul ning positiivne 8 juhul.

Tabel 8. Saagikuse ja ekspositsiooni (erinevus põhjasuunast nurgakraadides) vahelised Pearsoni korrelatsioonikordajad aastate kaupa.

Aasta	Kultuur	Aspekt	Aasta	Kultuur	Aspekt	Aasta	Kultuur	Aspekt	Aasta	kultuur	Aspekt
2013	suvioder	-0,13	2015	suvioder	0,05	2016	suvinisu	-0,02	2017	talioder	-0,02
2013	suvioder	-0,22	2015	suvioder	0,13	2016	taliniisu	0,02	2017	taliniisu	-0,05
2013	suvioder	-0,17	2015	suvioder	-0,06	2016	taliniisu	0,04	2017	taliniisu	0,06
			2015	suvioder	-0,04	2016	taliniisu	0,05	2017	taliniisu	0,28
2014	taliniisu	0,03	2015	suvioder	-0,07	2016	hernes	0,15	2017	raps	-0,29
			2015	suvioder	-0,09	2016	suvioder	-0,07			
			2015	taliniisu	-0,1	2016	suvioder	0,12			
			2015	...nisu	-0,34						
			2015	tritik	-0,18						

Aastatevahelist erinevust võib taas aidata selgitada kliimaparameetrite erinevine. 2013. aasta suvi oli keskmisest soojem ja kuivem, niisiis võib negatiivne korrelatsioon lõunasuunas orienteeritud nõlvadel tuleneda suviadra kasvu mõjutanud niiskusdefitsiidist.

2015. aasta oli küll keskmisest jahedam, niisiis võiks lõunapoolne kalle taimekasvule kaasa aidata, kuid kuna suvel oli sademete hulk keskmisest madalam võis lõunapoolse ekspositsiooniga aladel muld kuivada ja vilja kasv kannatada. Lõunapoolse ekspositsiooni valdavalt nõrka positiivset seost saagikusega 2016. aastal aitab omakorda selgitada suvine kõrge sademete hulk, mis aitas ära hoida mulla kuivamist keskmisest kõrgema õhutemperatuuriga suvel.

4.2. Mitmene regressioonimudel

Saagikuse varieeruvuse kirjeldamiseks koostati mitmese regressiooni mudelid. Analüüs viidi läbi suviadra ja talinisu saagikuse andmetega kuna nende kohta oli mõõtmistulemusi vähemalt kolmel aastal. Võrreldi mudeleid, mis erinesid selle poolest, kui palju ja milliseid argumenttunnuseid need hõlmasid. Esimesse mudelisse lisati kõik uuritavad tunnused, teisest jäeti välja kliimaparameetrid (kuude keskmised temperatuurid ja sademete hulk), kolmandasse, neljandasse, viiendasse ja kuuendasse kaasati kliimaparameetritest vastavalt mai, juuni, juuli või augusti sademete hulk ja temperatuur.

4.2.1. Suviadra saagikuse mudel

Kõige paremini seletab saagikuse varieeruvust (determinatsioonikordaja $R^2_{adj} = 0,0033$, $p < 0,05$) mudel, millesse on kaasatud kõik analüüsitavad parameetrid: voolu akumulatsiooni ala, nõlva kalle, ekspositsioon, mulla boniteet ja savisisaldus, mai, juuni, juuli ja augusti keskmised temperatuurid ning sademete hulgad. Mudeli tulemused on võetud kokku tabelis 9.

Tabel 9. Suviadra saagikuse sõltuvus reljeefi- ja mullaomadustest ning kasvuperioodi sademete hulgast ja keskmistest temperatuuridest kuude kaupa (N=52685)

Muutuja	Q_s (log)	Boniteet	Juuli t(°C)	Eksp.	Aug P.(mm)	Savi %	Saagikus	β	b
Savi %							-0,037	-0,042	-0,00092
Aug P.(mm)						-0,230	-0,029	-0,025	-0,00009
Aspekt					-0,133	0,240	-0,027	-0,02	-0,00006
Juuli t(°C)				0,016	0,535	-0,460	-0,016	-0,016	-0,00306
Boniteet			0,500	0,176	0,436	-0,027	-0,033	-0,014	-0,00038
Q_s (log)		-0,332	-0,244	-0,403	-0,089	-0,023	0,008	-0,01	-0,00197
								Vabaliige =	1,09666
Keskmine	0,867	52,001	16,797	76,135	87,089	22,739	0,991		
St. hälve	0,808	5,858	0,827	54,283	43,556	7,168	0,158	$R^2_{adj}=0,003314$	

Statistiliselt olulisteks tunnusteks osutusid savisisaldus, augusti sademete hulk, ekspositsioon, juuli keskmine temperatuur, mulla boniteet ja voolu akumulatsiooni ala. Kõige nõrgema ennustusvõimega ($R^2_{adj} = 0,0025$, $p < 0,05$) oli mudel, millest olid välja jäetud kõik kliimaparameetrid (tabel 10).

Tabel 10. Suviodra saagikuse sõltuvus reljeefi- ja mullaomadustest (N=52685)

Muutuja	Korrelatsioonid muutujate vahel					B	b
	Q_s (log)	Aspekt	Boniteet	Savi %	Saagikus		
Savi %					-0,037	-0,031	-0,00069
Boniteet				-0,027	-0,033	-0,031	-0,00083
Aspekt			0,176	0,240	-0,027	-0,016	-0,00005
Q_s (log)		-0,403	-0,332	-0,023	0,008	-0,008	-0,00156
Vabaliige =						1,0544	
Keskmine	0,867	76,135	52,001	22,739	0,991	$R^2_{adj} = 0,002458$	
St. hälve	0,808	54,283	5,858	7,168	0,158		

Nõlvakalle olulise tegurina mudelitesse sisse ei tule, küll aga voolu akumulatsiooni ala kui mudelisse on kaasatud kliimategurid. Nõlva aspekt on statistiliselt oluline parameeter nii kliimategureid sisaldavas kui ka neid mitte arvestavais mudeleis. Voolu akumulatsiooni mõju sõltuvus ilmastikust on loogiline, sest sademete hulgast sõltub vee hulk mis põllul reljeefist sõltuvalt saab ümber jaotuda (Simmons *et al.*, 1989; Halvorson & Doll, 1991).

Üldiselt aga on kõigi katsetatud mudelite seletusvõime väga madal ning tunnuste lisamine või väljajätmine muudab determinatsioonikordajat minimaalselt.

4.2.2. Talinisu saagikuse mudel

Sarnaselt suviodrale seletab ka talinisu puhul saagikuse varieeruvust kõige paremini ($R^2_{adj} = 0,0060$, $p < 0,05$) mudel, millesse on sisestatud kõik analüüsitavad argumenttunnused. Statistiliselt olulisteks osutusid mudelis savisisaldus, voolu akumulatsioon, augusti keskmine õhutemperatuur, nõlvakalle, mulla boniteet, ekspositsioon, ning juuni keskmine temperatuur (tabel 11). Taaskord osutus nõrgimaks mudel, millest olid välja jäetud kliimaomadused ($R^2_{adj} = 0,0052$, $p < 0,05$). Seal osutusid oluliseks kõik mudelisse kaasatud argumenttunnused (tabel 12).

Tabel 11. Talinisu saagikuse sõltuvus reljeefi- ja mullaomadustest ning kasvuperioodi sademete hulgast ja keskmistest temperatuuridest kuude kaupa (N=43321)

Muutuja	Korrelatsioonid muutujate vahel								β	b
	Jun t(°C)	Aspekt	Boniteet	Kalle	Aug t(°C)	Q _s (log)	Savi %	Saagikus		
Savi %								0,052	0,050	0,00134
Q _s (log)							-0,144	0,028	0,036	0,00870
Aug t(°C)						0,047	-0,383	0,014	0,018	0,00802
Kalle					-0,009	0,112	-0,185	-0,032	-0,025	-0,01857
Boniteet				-0,121	-0,123	0,059	-0,127	-0,028	-0,023	-0,00077
Aspekt			-0,027	-0,015	0,052	0,013	0,009	0,021	0,017	0,00005
Jun t(°C)		0,024	-0,083	0,166	-0,491	0,039	-0,153	-0,033	-0,015	-0,00172
Vabaliige =									0,90307	
Keskmine	14,495	92,821	51,798	0,329	15,889	0,495	22,804	0,999		
St. hälve	1,147	47,318	4,027	0,175	0,300	0,543	4,917	0,133		R ² _{adj} =0,005996

Nii talinisu kui suviodra mudelites osutusid olulisteks argumenttunnusteks mulla saavisaldus ja ekspositsioon, seda nii kliimategureid sisaldavais kui ka mittesisaldavais mudelites. Oluliseks osutunud kliimaparameetrid olid kultuuriti erinevad. Suviodra saagikuse mudelis oli oluline juuli temperatuur ning augusti sademete hulk, samas kui talinisu mudelis osutusid olulisimaks kliimateguriteks augusti ja juuni õhutemperatuur.

Tabel 12. Talinisu saagikuse sõltuvus reljeefi- ja mullaomadustest (N=43321)

Muutuja	Korrelatsioonid muutujate vahel						β	b	
	Aspekt	Boniteet	Kalle	Q _s (log)	Savi %	Saagikus			
Savi %							0,052	0,045	0,00121
Q _s (log)						-0,144	0,028	0,036	0,00871
Kalle				0,112	-0,185	-0,032		-0,028	-0,02117
Boniteet			-0,121	0,059	-0,127	-0,028		-0,025	-0,00083
Aspekt		-0,027	-0,015	0,013	0,009	0,021		0,017	0,00005
Vabaliige =							1,01244		
Keskmine	92,821	51,798	0,329	0,495	22,804	0,999			
St. hälve	47,318	4,027	0,175	0,543	4,917	0,133			R ² _{adj} =0,005208

Võrreldes kahe põllukultuuri saagikuse mudelite ennustusvõimet, nähtub, et talinisu mudel seletab peaaegu kaks korda suurema osa saagikusest ning reljeefiomadused mängivad mudelis suuremat rolli kui suviodra mudelis. Suvivili on tundlikum kevadsuviste meteoroloogiliste näitajate suhtes, talivili aga talvitumistingimuste (vee äravool nõlvalt) ja

lõunanõlvale täiendavalt langeva päikesekiirguse suhtes, mis mõjutab saagikust positiivselt.

Mõlema põllukultuuri puhul aga on mudelid tegelikult väga madala ennustusvõimega, seletades ära vastavalt 0,6% ja 0,33% saagikuse varieeruvusest. Analüüsis kasutatud andmete ja meetodikaga saadud tulemuste põhjal ei oma reljeefiomadused saagikusele suurt mõju. Saadud mitmese regressiooni mudelid ei oma madala ennustusvõime tõttu põlluharimise optimeerimise seisukohast erilist väärtust. Paremaks saagikuse ennustamiseks oleks vaja mudelisse lisada saagikusega suuremaid seoseid omavaid tegureid (nt mulla toitainete sisaldus). Nende välja selgitamiseks oleks aga vaja rohkem ja täpsemaid mulla- ja ilmastikuandmeid, mis eeldab empiiriliste mõõtmiste läbi viimist uuritavatel põldudel. Üheks võimaluseks on viljelusvõistluste alade ühildamine täppisviljelusaladega. Samuti oleks oluline suurema andmemassiivi (suurem põldude arv ja regionaalne hõlmatus) ja pikema aegrea olemasolu

Ka mitmetes teistes reljeefi ja saagikuse vahelisi seoseid analüüsivates töodes on tulemused näidanud tugevate seoste puudumist. Nisu saagi ja erosiooni poolt mõjutatavate mulla omaduste vahelist sõltuvust uurivas katses (Miller *et al.*, 1988), mis viidi läbi California osariigis Sacramentost loodes, ei tulnud regressioonanalüüsi kasutades välja seost nõlvakalde ja saagikuse ning nõlvakalde ja mulla omaduste vahel. Tugevate ja ühesuunaliste seoste puudumise põhjuseks võib olla asjaolu, et reljeefiomaduste mõju on kaudne, sõltudes mitmetest teistest muutujatest. Kravchenko *et al.* (2000) on uurinud reljeefi (nii eraldi kui kombineeritult valitud mullaomadustega) olulisust saagikuse põllusiseses varieeruvuses. Nõlva kju (*curvature*), -kalde ja voolu akumulatsiooni mõju oli oluline vaid teatud ekstreemsetes tingimustes nagu näiteks kuivenduseteta lohkudes ning erodeeritud küngaste osadel kui viljelusaasta oli väga kuiv või sademeterohke. Reljeef koos mullaomadustega ligi 40% saagikuse varieeruvusest

Siiski on mõnedes varasemates uuringutes leitud ka tugevaid ja ühesuunalisi seoseid, kuid tehtud järeldused reljeefi, ilmastiku ja saagikuse omavahelise sõltuvuse kohta on vastakad. Halvorson & Doll (1991) nägid suuremat reljeefi mõju saagikusele niisketel ning väiksemat mõju kuivadel aastatel. Seda seostati erineva vee kogusega, mis võiks toitaineid ümber jaotada – vihmasetel aastatel on rohkem vett, mis võib toitained nõlvadelt lohkudesse kanda ning sellega toitainete hulgas põllusiseseid erinevusi põhjustada. Simmons *et al.* (1989) uurisid reljeefi mõju maisi saagikusele ning leidsid, et see oli

suurim aastal, mil hooaeg oli alanud põuaga. Ka Kumhalova *et al.* (2008) leidsid talirapsi, talinisu ja odraga tehtud katses, et reljeefiomaduste (kõrgus, nõlvakalle, voolu akumulatsioon) ja saagikuse omavaheline sõltuvus oli suurim kuivematel aastatel, mil voolu akumulatsiooni ja vee ümberjaotumise mõju oli tugevam (kõige kuivemal aastal oli saagikuse korrelatsioon nõlvakallega -0,61 ning voolu akumulatsiooni alaga 0,62). Koppel & Ess (2007) on näidanud, et talivilja saagikusele tuleb (väike) nõlvakalle kasuks, võimaldades kevadisel sulaveel piisavalt kiiresti ära voolata.

Lisaks saagikuse kujunemise kompleksusele võib tugevate seoste puudumine käesolevas töös olla seotud saagikuse andmete iseloomuga. Vaatamata kombainiga kogutud toorandmete eelnevale puhastamisele on võimalik, et kasutatud andmemassiiv sisaldas jätkuvalt olulisel määral ebatäpseid andmeid või tuleks seoste uurimiseks kasutada teistsugust metoodikat. Suurem osa varasemaid saagikuse ja sõltumatute muutujate vahelisi seoseid uurivaid uurimusi on läbi viidud katsetena, mille puhul tingimused on paremini kontrollitud ja mõõdetud (Miller *et al.*, 1988; Simmons *et al.* 1989; Kravchenko *et al.* 2000; Kumhalova *et al.* 2008). Usaldusväärsete saagikuse andmete saamiseks eksperimendi jaoks peaks viljakoristus olema läbimõeldud ning korraldatud nii, et kombain saaks liikuda ühtlase kiirusega, peaks pöörama ning peatuma võimalikult vähe, saagikuse mõõtur oleks kalibreeritud ning saagikoristus toimuks võrreldavates tingimustes.

Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö peamiseks eesmärgiks oli analüüsida põllukultuuride saagikuse seoseid nõlvakalde, voolu akumulatsiooni ja nõlva ekspositsiooniga. Lisaks sooviti hinnata passiivselt kogutud saagikusandmete ning lihtsasti ligipääsetavate ilmastiku- ja mullaandmete kasutatavust nende seoste uurimisel.

Töös kasutati täppispõllunduse andmeid, digitaalse maapinna kõrgusmudeli andmeid, mullastiku kaardilt pärinevaid mullastikuandmeid ning Jõgeva ja Viljandi meteoroloogiajaama temperatuuri ja sademete andmeid. Seoste uurimiseks viidi andmetega läbi lineaarne korrelatsioonanalüüs ning mitmene regressioonanalüüs.

Järgnevalt on välja toodud peamised tulemused, mis saagikuse ja reljeefiomaduste seoste uurimisel saadi:

- lineaarne seos reljeefiomaduste ja saagikuse vahel on nõrk ning nii seose suund kui tugevus varieerub põlluti ja aastati,
- tugevaim, aga ka kõige varieeruvama suunaga on saagikuse korrelatsioon nõlvakaldega,
- voolu akumulatsiooni seos saagikusega oli kolme reljeefiomaduse võrdluses nõrgim kuid kõige ühtlasema suunaga, olles saagikusega valdavalt positiivelt seotud,
- nõlva ekspositsiooni seos saagikusega sõltus aastast ning vaadeldavast põllukultuurist. Suviotra saagikus korreleerus lõunapoolse suunaga valdavalt negatiivselt, talinisu saagikusega oli seos nõrgem kuid pigem positiivne.
- Töös käsitletud reljeefi- ja mullaomadusi ning ilmastikunäitajaid hõlmavad mudelid on statistiliselt olulised, kuid kirjeldavad ära vaid 0,24 - 0,6 % saagikuse varieeruvusest.

Saagikuse varieeruvuse kirjeldamisel on statistiliselt olulisteks tunnusteks:

- suviotra puhul mulla füüsikalise savi sisaldus, augusti sademete hulk, ekspositsioon, juuli keskmine temperatuur, mulla boniteet ja voolu akumulatsiooni ala suurus,
- talinisu puhul mulla füüsikalise savi sisaldus, voolu akumulatsiooni ala suurus, augusti keskmine õhutemperatuur, nõlvakalle, mulla boniteet, ekspositsioon, ning juuni keskmine temperatuur,

- talinisu puhul oli reljefiomaduste roll mudelis suurem ning mudel seletas ära peaaegu kaks korda suurema osa saagikuse varieeruvusest kui suviadra mudel.

Täppisviljeluse kombainidega saagikuse andmete kogumine ei ole Eestis veel tavaks kujunenud, aegread on lühikesed ja andmetega kaetud põllumassiivide hulk väike. Sageli pole andmete kogumine olnud teadlik ja eesmärgipärane tegevus vaid pigem uue tehnikaga kaasnev boonus, mida ei osata täiel määral rakendada.

Relations between topographic properties and crop yield using precision farming data

Anu Hark

Summary

The aim of this research was to analyze crop yield relationship with slope, flow accumulation area and slope aspect. Another aim was to evaluate suitability of passively collected yield data for in depth spatial analysis. Yield data was collected by precision harvesting combines equipped with GPS and yield sensors during routine crop harvesting with no specific scientific purpose.

Yield data from fifteen Estonian fields were analysed together with topographic data derived from LiDAR based digital elevation model. To evaluate relations between yield and topographic properties correlation analysis and multiple regression analysis were used.

Main results of the study were as follow:

- correlations between topographic properties and crop yield are weak and their directions vary from year to year and field to field,
- correlation between yield and slope was stronger but its direction varied a lot,
- correlation between yield and flow accumulation area was very low and mainly positive,
- relationship between yield and southern orientation of slope depended the most on year and crop:
 - for the yield of spring barley correlation was mainly negative,
 - for the yield of winter wheat correlation was mainly positive,
- developed regression models to predict yield based on topographic and soil properties and climatic parameters are statistically significant, but predict only 0,24 – 0,6 % of the total yield variability,
- significant predictors for the model of spring barley yield were soil clay content, precipitation of August, slope aspect, temperature of June, soil quality index and flow accumulation area,
- significant predictors for the model of winter wheat yield were soil clay content, flow accumulation area, temperature of August, slope, soil quality index, slope aspect and temperature of June.

In Estonia collecting yield data with precision harvesting combines is not a common practice yet, time series are short and collected data covers only small proportion of all arable land. Yield data is often not collected systematically and purposefully as farmers are not aware of all capabilities and applications offered by evolving technology they are using.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajat Ain Kulli, kes aitas töö valmimisele kaasa nii hea nõu ja diskussiooni kui ka positiivse ja rahuliku suhtumisega. Lisaks tänan Jaanus Kilgit, Põllumajandusuuringute keskust ja põllumehi, kellelt pärinevad töös kasutatud saagikuse andmed. Viimaseks soovin tänada kõiki sõpru ja lähedasi toetava suhtumise ja igakülgse abi eest töö kirjutamise edasi lükkamisel.

Kasutatud materjalid

Alaru M, Laur Ü, Jaama E (2006). Tritikale agrotehnoloogias. Teadustööde kogumik. *Agronomia* 2006 (lk. 61-64). Jõgeva: Jõgeva sordiaretuse instituut.

Boubaker M, Yamada T (1991). Screening spring wheat genotypes (*triticum* sp.) for seedling emergence under optimal and suboptimal temperature conditions. *Japan J Breed* 41:381- 387.

Casady WW, Adamchuk VI (2011). Global positioning systems. Heldman DR, Moraru CI (toim). *Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering* (pp. 707-709). Boca Raton: Taylor and Francis Group.

Corwin DL, Plant RE (2005). Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46:1-10.

Duniway JM (1977). Predisposing effect of water stress on the severity of phytophthora root rot in safflower. *Phytopathology* 67:884-889.

Gnip P, Charvat K (2003). Management of zones in precision farming. *Agric. Econ.-Czech* 49:416-418.

Halvorson GA, Doll EC (1991). Topographic effects on spring wheat yields and water use. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1680-1685.

Hernández-Barrera S, Rodríguez-Puebla C (2017). Wheat yield in Spain and associated solar radiation patterns. *Int. J. Climatol.* 37:45-58.

Ingver A, Koppel R (2006). Ilmastiku mõju suvinisu saagi kujunemisele. Nurmekivi H (toim.). Teadustööde kogumik. *Agronomia* 2006 (lk. 102-105). Jõgeva: Jõgeva sordiaretuse instituut.

Jaagus J, Sepp M (2016). Eesti kliima trendid ja režiimihked. Post P, Järvet A, Tammiksaar E (Toim.). Tartu Ülikooli Ilmade Observatooriumi 150. aastapäeva konverentside artiklid. *Publicationes Geophysicales Universitatis Tartuensis* 51:88-100. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.

Jenson SK, Domingue JO (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54:1593-1600.

- Juhos K, Szilard S, Ladanyi M (2015). Influence of soil properties on crop yield: a multivariate statistical approach. *Int. Agrophys.* 29:433-440.
- Koppel R, Ess M (2007). Talinisu sortide iseärasused ja agrotehnilised võtted kvaliteetse talinisu kasvatamiseks. Millest sõltub teravilja saagikus 67-84. Jõgeva: OÜ Vali Press.
- Kumhálová J, Matějková Š, Fifernová M, Lipavský J, Kumhála F (2008). Topography impact on nutrition content in soil and yield. *Plant Soil Environ.* 54:255-261.
- Kumhálová J, Kumhála F, Kroulík M, Matějková S (2011). The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture* 12:813-830
- Lachapelle G, Cannon E, Gehue H, Goddard TW, Penney C (1994). GPS system integration and field approaches in precision farming. *Navigation* 41:323-335.
- Mahlein AK (2016). Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease* 100:241-251.
- Marques da Silva JR, Silva LL (2008). Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. *Biosystems Engineering* 101:183-190.
- Meng T, Carew R, Florkowski WJ, Klepacka AM (2017). Analyzing temperature and precipitation influences on yield distributions of canola and spring heat in Saskatchewan. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 6:897-913.
- Miller MP, Singer MJ, Nielsen DR (1988). Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Sci. Soc. Am.J.* 52:1133-1141.
- Mulla D, Khosla R (2015). Historical evolution and recent advances in precision farming. *soil-specific farming* 1-36.
- Nash E, Korduan P, Bill R (2009). Applications of open geospatial web services in precision agriculture: a review. *Precision Agriculture* 10: 546.
- Nemenyi M, Mesterhazi PA, Pecze Z, Stepan Z (2003). The role of GIS and GPS in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture* 40:45-55.
- Nijs L (2014). The economics of precision agriculture. *The Handbook of Global Agricultural Markets* (pp. 29-31). Suurbritannia: Palgrave Macmillan.

- Pimentel D (1993). Climate changes and food supply. *Forum for Applied Research and Public Policy* 8:54-60.
- Ping JL, Green CJ, Bronson KF, Zartman RE, Dobermann A (2004). Identification of Relationships between Cotton Yield, Quality, and Soil Properties. *Agronomy Journal* 96:1588-1597.
- Reintam L, Kull A, Palang H, Rooma I (2003). Large-Scale soil maps and a supplementary database for land use planning in Estonia. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 166:225-231.
- Reyns P, Missotten B, Ramon H, De Baerdemaeker J (2002). A review of combine sensors for precision farming. *Precision Agriculture* 3:169-182.
- Russak V, Kallis A (2003). *Eesti kiirguskliima teatmik*. Tallinn: Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut.
- Saha AK, Saha J, Ray R, Sircar S, Dutta S, Chattopadhyay SP, Saha HN (2018). IOT-based drone for improvement of crop quality in agricultural field, *Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC) 2018 IEEE 8th Annual*, (pp. 612-615).
- Simmons FW, Cassel DK, Daniels RB (1989). Landscape and soil property effects on corn grain yield response to tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:534-539.
- Souza EG, Bazzi CL, Khosla R, Uribe-Opazo MA, Reich RM (2016). Interpolation type and data computation of crop yield maps is important for precision crop production. *Journal of Plant Nutrition* 39:531-538.
- Vili A (2013). Mida annab põllumehele täppisviljelus ja kuidas tehnikat paremini kasutada saaks. *Vooremaa*, 10. september.
- Wang X, Cai J, Jiang D, Liu F, Dai T, Cao V (2011). Pre-anthesis high-temperature acclimation alleviates damage to the flag leaf caused by post-anthesis heat stress in wheat. *J Plant Physiol* 168:585-593.
- Warrick RA (1988). Carbon dioxide, climate change and agriculture. *The Geographical Journal* 154:221-233.
- West JS, Bravo C, Oberti R, Moshou D, Ramon H, McCartney HA (2010). Detection of fungal diseases optically and pathogen inoculum by air sampling. Oerke EC, Gerhards R,

Menz G, Sikora R (eds), Precision crop protection – the challenge and use of heterogeneity (pp. 135-149). Dordrecht: Springer.

Yang C, Peterson CL, Shropshire GJ, and Otawa T (1998). Spatial variability of field topography and wheat yield in the Palouse region of the Pacific Northwest. Trans. ASAE 41:17-27.

Internetiallikad

Corrigan F (2018). Multispectral Imaging Camera Drones In Farming Yield Big Benefits - <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/multispectral-sensor-drones-in-farming-yield-big-benefits/> [25.05.2018]

Ettevõtluse Arendamise Sihtasutus (2018) - https://www.eas.ee/images/doc/ettevotjale/innovatsioon/kosmos/materials/010_kosmosetehnoloogia_rakenduste_kasutamine_jaarendamine_eestis.pdf [27.05.2018]

Ilmateenistus (2018) - <http://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimakaardid/> [20.05.2018]

Kleinjan J, Chang J, Wilson J, Humburg D, Carlson G, Clay D, Long D (2002). Cleaning Yield Data - https://www.researchgate.net/publication/265744742_Cleaning_Yield_Data [26.03.2018]

<http://www.pollumajandus.ee/uudised/2017/02/28/droonipohine-tappisviljelus-on-uus-trend?+pollumajandus-rss+%28www.pollumajandus.ee%29> [10.12.2017]

http://www.keskkonnainfo.ee/failid/ky/mullastik_maakasutus.pdf [15.12.2017]

Maa-amet (2001). Vabariigi digitaalse suuremõõtkavalise mullastiku kaardi seletuskiri - https://geoportaal.maaamet.ee/docs/muld/mullakaardi_seletuskiri.pdf?t=20091211092214 [20.05.2018]

GRDC (2010) - Grains Research & Development Corporation (2010). http://www.agriprecisione.it/wp-content/uploads/2010/11/general_introduction_to_precision_agriculture.pdf [15.04.2018]

http://www.agriprecisione.it/prodotti/semaforo_vendemmia_selettiva/ [16.04.2018]

Doerge TA (2018). Management Zone Concepts. Site-Specific Management Guidelines. [http://www.ipni.net/publication/ssmg.nsf/0/C0D052F04A53E0BF852579E500761AE3/\\$FILE/SSMG-02.pdf](http://www.ipni.net/publication/ssmg.nsf/0/C0D052F04A53E0BF852579E500761AE3/$FILE/SSMG-02.pdf) [14.05.2018]

USDA (2018) – United States Department of Agriculture -
https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/?cid=nrcs142p2_054278
[24.04.2018]

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Anu Hark,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Reljeefiomaduste ja põllukultuuride saagikuse vahelised seosed kasutades täppispõllunduse andmeid”, mille juhendaja on Ain Kull,
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **28.05.2018**