

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

Bakalaureusetöö

**Drooni fotogramm-meetria rakendamine  
kõrgusmudelite ja ortofotode loomiseks Raadi karjääri  
näitel**

Kaspar Huul

Juhendaja: Msc Edgar Sepp

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2016

# **Drooni fotogramm-meetria rakendamine kõrgusmodelite ja ortofotode loomiseks Raadi karjääri näitel**

**Kaspar Huul**

Uurimistöö analüüsib drooniga kaardistamise käigus 3D mudeli loomist. Töö käigus saadi 3D mudeli põhjal Raadi karjäärist ortofoto ja kõrgusmodel, mille täpsusele anti hinnang.

CERCS:

P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

P175 Informaatika, süsteemiteooria

T111 Pilditehnika

Märksõnad: droonid, fotogramm-meetria, ortofoto, 3D modelleerimine, kõrgusmodel

# **Implementing drone photogrammetry to create ortophotos and digital elevation models in Raadi strip mine**

**Kaspar Huul**

Bachelor's thesis gives an overview of the process of mapping using drones and creating a 3D model based on the image data gathered. As a result of the thesis, ortophotos and digital elevation models of Raadi strip mine were created and evaluated.

CERCS:

P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

P175 Informatics, systems theory

T111 Image, image processing

Keywords: drones, photogrammetry, ortophoto, 3D modelling, digital elevation model

# Sisukord

<b>Sissejuhatus .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Droonid .....</b>	<b>7</b>
1.1. Droonide kasutamise ajalugu .....	7
1.2. Drooni ehitus.....	7
1.3. Droonide kasutusala.....	8
<b>2. Fotogramm-meetria .....</b>	<b>10</b>
2.1. Klassikaline fotogramm-meetria.....	10
2.2. Drooni fotogramm-meetria .....	11
<b>3. Andmed ja meetodika .....</b>	<b>13</b>
3.1. Ettevalmistav etapp ja lennuplaani koostamine .....	13
3.2. Välitöö: lendamine ja mõõdistamine .....	14
3.2.1. Drooniga lendamine .....	14
3.2.2. Mõõdistus .....	16
3.3. Andmete järeltöötlus ja mudelite loomine .....	17
3.4. Täpsuse hindamine.....	18
3.4.1. Maa-ameti andmed.....	19
3.4.2. Ortofoto täpsuse hindamine .....	19
3.4.3. Kõrgusmudeli täpsuse hindamine .....	19
<b>4. Tulemused.....</b>	<b>21</b>
4.1. 3D mudel.....	21
4.2. L-EST süsteemi transformeeritud ortofotod ja kõrgusmudelid.....	23
4.3. Mudeli täpsuse hindamine.....	24
4.3.1. Kevadine mudel .....	24
4.3.2. Sügisene mudel .....	27
4.4. „Kausi efekt“ .....	30
4.5. Uus kõrgusmudel .....	31
<b>5. Arutelu .....</b>	<b>33</b>
<b>Kokkuvõte.....</b>	<b>35</b>

<b>Summary.....</b>	<b>37</b>
<b>Tänuavaldus .....</b>	<b>38</b>
<b>Kasutatud allikad.....</b>	<b>39</b>
<b>Lisad.....</b>	<b>42</b>

## Sissejuhatus

20. sajandi lõpul ja 21. sajandi algusel on tehnoloogias toimunud väga suur areng. Selle tulemusena on võetud kasutusele uusi tehnilisi meetodeid ja vahendeid, mis lihtsustavad ning vähendavad ressursi- ja ajakulu paljudes erinevates valdkondades. Mõõdistustehnoloogias on sellel perioodil kasutusele võetud mitmeid uusi vahendeid, näiteks LIDAR, droonid ja automaatalgoritmid kaardistuses. Üks meetoditest, mida kasutatakse täpsete kaartide koostamise lihtsustamiseks, on fotogramm-meetria.

Fotogramm-meetria on meetod, mille abil on võimalik määrata objektide asendit, mõõtmeid ja kuju, kasutades selleks fotosid. Fotosid on võimalik saada mitmel erineval moel, näiteks satelliitidelt, aeromõõdistamise teel või ka maapinnalt või selle lähedalt kaameraga pildistades. Fotogramm-meetriat kasutatakse tänapäeval väga erinevates valdkondades, näiteks loodusvarade ja –nähtuste uurimisel, astronoomias ja kaugseires. 20. sajandil on fotograafia, optika ja arvutitehnoloogia arengu tõttu toimunud fotogramm-meetrias ja selle rakendamises tähelepanuväärsed muutused. Esialgselt analüütilisest fotogramm-meetriast, kus kasutati emulsioonil toodetud fotot, on saanud teadus, kus analüüs toimub digitaalse kujutise alusel. Seega on väga suurel määral muutunud nii töökeskkond kui ka fotogramm-meetrilised vahendid ja meetodid. Peamisteks uuteks fotogramm-meetria rakendusteks on drooniga kaardistamine, 3D modelleerimine ning erinevad pilditöötlusvahendid.

Algselt mõisteti drooni ehk mehitamata õhusõiduki nime all militaarse otstarbega vahendit, nüüd aga tuntakse drooni kui tänapäeva tehnoloogia viimast sõna, mida kasutatakse ka mittedõjalistel eesmärkidel. Droonide kommertsialiseerumise ja hindade languse tõttu on droonid tänapäeval muutunud ka tavainimesele kättesaadavamaks. Droonide kasutamine ning 3D mudelite loomine leiab tänapäeval erinevates valdkondades järjest suuremat rakendust, üks nendest valdkondadest on kaugseire. Droonid leiavad kaugseires kasutust raskesti ligipääsetavate kohtade uurimisel, näiteks maastikupõlengute, maaväriinate ja suuremate saasteallikate piirkondades. Samuti rakendatakse tänapäeval mehitamata õhusõidukeid piirivalve poolt, et kontrollida näiteks rannajoont ja maapiire.

Antud bakalaureusetöö temaatikaks on fotogramm-meetiline drooniga kaardistamine ning 3D modelleerimine. Uurimispiirkonnaks valiti Raadi vana kruusakarjäär, kuna seal on mõõdistamiseks sobiv mitmekülgne maastik ning piirkond asub kõrvalises kohas, kus ei liigu palju inimesi, kes võiksid takistada täpsete mõõdistusandmete saamist. Töö

eesmärgiks on kasutada Tartu Ülikooli geograafia osakonna kopter-drooni kaardistamisel ning analüüsida tulemusena saadud piltide kvaliteeti ja täpsust. Pildistamise tulemusena saadud materjalidega luuakse 3D mudelid ning nende väljundid ehk ortofotod ja kõrgusmudelid. 3D mudelite ning nende väljundite täpsuste hindamiseks kasutatakse võrdlusena Maa-ameti andmeid. Mudelite ja väljundite täpsuse hindamise eesmärgiks on analüüsida antud kopter-drooni kaardistamise kvaliteeti.

# 1. Droonid

## 1.1. Droonide kasutamise ajalugu

Droon ehk mehitamata õhusõiduk (UAV ingl k. *unmanned aerial vehicle*) on lennumasin, millel ei ole pardal pilooti. Mehitamata õhusõidukitel on erinevaid kasutusalasid. Esimesena hakkas droonide arendamisega tegelema sõjatööstus, kuid nüüdseks on droonide kasutamine levinud ka muudel eesmärkidel. Algselt luureotstarbel kasutatud mehitamata õhusõidukid on tavakasutuses kasulikud abivahendid näiteks kaardistamisel, fotograafias, filmitööstuses või meelelahutuslikel eesmärkidel. Teaduses kasutatakse enim kopterdroone, mille külge on monteeritud peegelkaamera või muud mõõdistusseadmed (Remondino *et al.* 2011).

Algselt kasutati õhust piltide tegemiseks õhupalle, tuulelohesid ja isegi linde. Suur läbimurre saabus, kui õhusõidukite juhtimiseks õpiti kasutama raadiolaineid ja fotograafia muutus digitaalseks, võimaldades droonidel läbida suuremaid vahemaid ja koguda rohkem materjali (Eisenbeiss 2009). Esimeste mehitamata õhusõidukite lennukaugus oli küllaltki väike tulenevalt kasutusel olnud raadiolainete levi piiridest. Hiljem on droonide juhtimisel hakatud kasutama eelprogrammeerimist ja globaalset navigatsioonisüsteemi, tänu millele on droonide kontrollitud lennud oluliselt pikemad ja piiravaks teguriks saab eelkõige akude või kütuse tarbimine. Mõned teadaolevad militaarkasutuses olevad droonid suudavad õhus püsida päevi (Remondino *et al.* 2011).

## 1.2. Drooni ehitus

Ehituselt jagunevad droonid kahte erinevasse gruppi, millest ühe moodustavad fikseeritud tiibadega lendavad sõidukid ja teise kuuluvad pöörlevate rootoritega õhusõidukid. Fikseeritud tiibadega õhusõidukid on väga levinud militaarkasutuses ja muudel juhtudel, kus oluline on pikk lennuaeg. Helikoptertüüpi ja pöörlevate rootoritega droonid on enamasti lühema lennuajaga, aga väga laialdaselt levinud just tsiviilkasutuses (Eisenbeiss 2009).

Tavakasutuses olevad mehitamata õhusõidukid koosnevad üldjuhul kerest ehk raamist, mille külge kinnituvad mootorid koos rootoritega, juhtarvuti, akud ja eesmärgipärane aparatuur: kaamera või muud mõõtevahendid. Tavaliselt on droonil ka ohutuks maandumiseks vajalikud jalased või rattad. Õhusõidukite ehituse puhul on alati oluline

sõiduki kaal, mille vähendamiseks kasutatakse võimalikult kergeid ja vastupidavaid materjale: erinevad plastikud, süsinikkiud ja kerged metallisulamid. Samuti on oluline saavutada materjali ja seeläbi kaalu kokkuhoid targa disaini abil, kus näiteks drooni jalased täidavad samal ajal ka mõõtmisvahendite kaitsmise otstarvet või on raami sisemusse integreeritud akud. Tulenevalt õhusõiduki kasutusalaast võib suures ulatuses varieeruda drooni suurus, millest omakorda võib sõltuda sõiduki tõstevõime ja stabiilsus (Valavanis, Vachtsevanos 2014).

Droonide juurde kuulub enamasti ka juhtpult, mille abil toimub õhusõiduki juhtimine ja muu infovahetus. Paljud tänapäevased droonid on ka eelprogrammeeritavad ja otsest juhi sekkumist ei vaja (Valavanis, Vachtsevanos 2004).

### **1.3. Droonide kasutusala**

Tänapäeval on droonidele leitud laialdaselt kasutust erinevates valdkondades. Peale sõjalise otstarbe on droonid jõudnud tsiviilkasutusse. Droonide ajalugu ulatub tagasi juba 20. sajandi algusesse, kus need võeti esialgselt kasutusele sõjatööstuses. Esimesi droone (1910-1950) nimetati oma eesmärgi pärast sihtmärkideks ja nende peal testiti ründepilootide oskusi ning õhutorjerehvi. Algselt I Maailmasõjas kasutusele võtud droonid olid mehitamata õhutorpeedod ning need olid eelseadistatud ja ei olnud õhus juhitavad. Sõja käigus arendati nendest välja raadio teel juhitavad torpeedod kuid kuni 1960ni jäi droonide peamiseks otstarbeks siiski harjutustel sihtmärgiks olemine (Nichols 2014).

Droonide arengu teise etapi alguseks võib pidada Vietnami sõda kus droonide sihtmärgi otstarve asendati kaugseirega. Droonidega kaugseire võeti kasutusele, kuna see võimaldas saada infot vastase paiknemise kohta ilma inimressurssi kaotuseta. Järgmine periood droonide arengus oli külma sõja algus. Sel perioodil said droonid relva nimetuse ning neid kasutatakse militaarsel otstarbel tänapäevani (Nichols 2014).

Tsiviilkasutuses on mehitamata õhusõidukid kasutusel väga erinevates valdkondades. Droone kasutatakse filminduses, põllumajanduses, rekreatsiooniliselt ja katsetatakse droonide kasutamist isegi kullerteenuse osutamiseks (Barr, Bensinger 2014). Droonide kasutamine mitte-sõjalis otstarvetel on arenenud jõudsalt ning eelkõige just seepärast, et nad on muutunud tavakasutajatele oma hinna poolest kättesaadavamaks (Harwin, Lucieer 2012).

Droonide suureks eeliseks võrreldes mehitatud õhusõidukitega on see, et droone saab kasutada suure riskiga olukordades kahjustamata sealhulgas inimesid. Samuti võimaldavad droonid juurdepääsu raskesti ligipääsevatesse kohtadesse, lennates madalatel kõrgustel ja lähedal maapinna objektile. Sellised piirkonnad on näiteks looduskatastroofialad: mäestike ja vulkaanide piirkonnad, üleujutusala, maavärinate piirkond, kõrbealad ja samuti õnnetuspaigad. Lisaks sellele on droonidega võimalik lennata ka pilvise või uduse ilma korral tingimusel, et objekti kaugus maapinnast jääb allapoole pilvi. Sellised ilmastikutingimused aga ei võimalda andmete kogumist mehitatud õhusõidukitega, kuna vajavad suuremat lennukõrgust maapinnast. Maa-aladel, kus juurdepääs on raskendatud ja mehitatud õhusõidukitega lendamiseks pole kohta ega tihti ka luba, on droonid ainukeseks praktiliseks alternatiiviks (Eisenbeiss 2009).

Kaugseire tehnoloogia on suuresti arenenud viimastel aastakümnetel ning erinevate positsioneerimissüsteemide ja kaugseire sensorite miniatursemaks muutumine on loonud tee omakorda mehitamata õhusõidukitele. Droonidega kaardistamine võimaldab saada kõrgema kvaliteediga pilti maapinnast, kui aero- või satelliitmõõdistamise korral. Seega on sellisel viisil võimalik mõõdistada ka neid objekte, mis aero- või satelliitmõõdistamisel jäävad häguseks või liiga väikeseks. Droonide kerge kasutatavus ning madalad ülalpidamiskulud võimaldavad teha pidevaid ja kõrgekvaliteedilisi seireid (Harwin, Lucieer 2012).

## 2. Fotogramm-meetria

### 2.1. Klassikaline fotogramm-meetria

Fotogramm-meetria on teadus, mis uurib fotode abil objektide parameetreid ilma nendega füüsilist kontakti loomata. Fotogramm-meetria areng on suuresti mõjutatud järjest enam areneva arvutiteaduse ja elektroonika poolt (Schenk 2005). 20. sajandil on fotogramm-meetrias toimunud märkimisväärsed muutused fotograafia, optika ning arvutitehnoloogia jõudsa arengu tõttu. Analüütilisest fotogramm-meetriast on saanud digitaalfotogramm-meetria, kus emulsioonil toodetud foto on asendunud digitaalse kujutisega. Fotogramm-meetria üldine mõiste on samaks jäänud, kuid muutunud on suuresti selle töökeskkond ja vahendid (Liba 2005).

Klassikaline fotogramm-meetria on üks võimalus objektidest või piirkondadest 3D mudelite loomiseks. Selle meetodi eelduseks on fotode täpsete asukohakoordinaatide teadmine. Lisaks on vajalik teada fotode välise ja sisemise orienteerimise parameetreid. Välise orienteerimise parameetriteks on  $x$ ,  $y$  ja  $z$  koordinaadid ning  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  ehk pöördenurgad nende koordinaatide ümber. Sisemise orienteerimise parameetrid määravad, kuidas käitub valguskiir kaameras ehk millised on kaamera moonutused (Schenk 2005). Seega on klassikalise fotogramm-meetria eelduseks fotode kolme erineva parameetri täpsete väärtuste teadmine. 3D modelleerimine klassikalise fotogramm-meetria teel on võimalik vaid juhul, kui on teada rohkem kui ühe foto parameetrid.

Klassikalises fotogramm-meetrias võib fotogramm-meetrilised süsteemid jagada kolmeks: satelliit-, aero- ja fototeodoliit ehk terrestriline fotogramm-meetria. Kõige levinum süsteem on neist aerofotogramm-meetria. Aerofotosid kogutakse lennukilt, helikopterilt või õhupallilt, kasutades selleks kartograafilist aerofotoaparaati. Mõned fotogramm-meetrilise töötlemise süsteemid on mõeldud korraga ühe pildi töötlemiseks. Süsteemid, mis kasutavad töötlemiseks kahte või enam pilti, võimaldavad tavaliselt ka stereopilti. Mitme pildi koostöötlemisel kasutatavaid seadmeid nimetatakse stereoplotteriteks ning alandmetena kasutatakse stereopaare (Liba 2005). Stereoplottereid on kahte tüüpi: analoog ja analüütiline stereoplotter. Analoog stereoplotter on optilis-mehaaniline seadeldis, mille sätted sisestatakse mehaaniliselt. Sellest on edasi arenenud analüütiline stereoplotter, mis on palju dünaamilisem ja täpsem. Analüütilise stereoplotteri erinevus analoogist on see, et ta on juhitud arvuti poolt. Stereoplotteritega vaadatakse kahte järjestikust aerofotot kolmedimensioonilisena (Montgomery, Schuch 1993).

## 2.2. Drooni fotogramm-meetria

Antud töös laenab autor Eisenbeiss'i (2009) tööst termini UAV photogrammetry, mis tõlgitakse ümber kui drooni fotogramm-meetria. Drooni fotogramm-meetriat võib pidada uueks fotogramm-meetriliseks töövahendiks, kus toimub mõõdistamine pool- või täisautomaatselt juhtides, ilma et masinas istuks piloot (Eisenbeiss 2009). Võrreldes klassikalist ja drooni fotogramm-meetriat, siis üldised põhimõtted ja eesmärgid on samaks jäänud, muutunud on vaid töökeskkond ning vahendid. Drooni fotogramm-meetria on välja kujunenud arvutigraafika ja pilditöötlemise arengu käigus.

Fotogramm-meetrilisi protsesse kasutatakse aerofotode töötlemisel erinevat liiki topograafiliste toodete saamiseks. Peamiseks väljundiks fotogramm-meetrilisel töötlemisel on 3D mudelid, ortofotod ja pinnamudelid (Shahbazi *et al.* 2015).

Piltide kokkusobitamisel on oluline punktide vastavus. Kõigepealt leitakse SIFT (ingl k. *scale invariant feature transform*) algoritmiga piltidelt siduspunktide asukohad ning antakse neile spetsiifilised väärtused (Snavely 2008). SIFT algoritmi tulemusena transformeeritakse piltide andmed mõõtkavast sõltumatusse koordinaatsüsteemi.

SIFT algoritmi arvutamise võib jagada kolmeks suuremaks etapiks. Esimeses etapis teostatakse otsing kõikidelt piltidelt kogu skaala ulatuses. Seda tehakse *difference-of-Gaussian* funktsiooni abil, et tuvastada potentsiaalsed punktid, mis on skaalast ja orientatsioonist sõltumatud. Neid punkte võrreldakse üle kõikide piltide ja leitakse punktid, mis on piisavalt sarnased, et neid võiks lugeda samaks punktiks erinevatel piltidel. Seejärel toimub tugipunktide lokaliseerimine. Iga potentsiaalse punkti asukohal koostatakse detailne mudel, et määrata kindlaks punkti asukoht ja skaala. Punkte hinnatakse ja valitakse nende stabiilsuse näitajate alusel. Kolmanda tööetapina toimub orientatsiooni määratlemine. Igale punktile määratakse üks või mitu orientatsiooni ning kõik edasised tööetapid toimuvad lähtudes piltide andmetest, mis on transformeeritud vastavalt igale punktile määratud orientatsioonist, skaalast ja asukohaandmetest. Seega on tagatud nende transformatsioonide tulemusena saadud punktide sõltumatus mõõtkavast. Piltide kokkusobitamiseks salvestatakse saadud punktide atribuudid andmebaasi (Lowe 2004).

Järgmise sammuna luuakse hõre punkt pilv kasutades kiirtekimbu optimeerimist (ingl k. *bundle adjustment*). *Bundle adjustment* on visuaalse rekonstruktsiooni loomine, et saada optimaalseid 3D struktuure ja prognoosida vaatepunktide parameetreid (ehk kaamera asukohta ja kalibratsiooni). Protsess arvestab samaaegselt nii struktuuri kui kaamera

parameetrite muutuseid (Triggs *et al.* 1999). Optimeerimisel kasutatakse mittelineaarset vähimruutude meetodit, mille abil on võimalik viia modelleerimise viga miinumini (Agarwal *et al.* 2010). *Bundle adjustment* põhineb mitmetelt kattuvatelt piltidelt automaatselt välja võetud tunnuste andmekogumil ning hõreda punktipilve alusel hinnatakse 3D kaamera ja maastiku geometriat. *Bundle adjustment*'i miinuseks võib olla suur ajakulu, kui on tegemist suurte piirkondade töötlemisega, kus on palju punkte ning kaameraid (Snavely 2008).

*Bundle adjustment*'i tulemusena saadakse uuritava piirkonna või objekti hõre punktipilv, kasutades punktide loomisel pilte, mis on võetud mitmest erinevast vaatepunktist. Hõre punktipilv koos kaamera asukohtadega on MVS (ingl k. *multi-view stereo*) algoritmi sisendiks, et luua tihe punktipilv. MVS eesmärgiks on konstrueerida täielik piirkonna või objekti 3D mudel (Seitz *et al.* 2006). MVS protsessi esimeseks etapiks on punktide sobitamine, seejärel nende laiendamine ja filtreerimine. Teisisõnu hõreda punktipilve punkte laiendatakse pidevalt, kuni tekib tihe punktipilv. Seejärel eemaldatakse tihedast punktipilvest mitesobilikud punktid (Furukawa & Ponce 2010).

*Structure from motion* (SfM) on tööprotsess, mida kasutatakse drooni fotogramm-meetrias, kus erinevalt klassikalisest fotogramm-meetriast ei ole vaja mudeli loomisel teada kaamerate asukohti ja orientatsiooni (Vasuki *et al.* 2014). Drooni fotogramm-meetrias arvutatakse need parameetrid automaatselt kasutades selleks erinevaid keerukaid algoritme. SfM meetodiga luuakse 3D mudelid alguses suhtelisse ruumi, kus mudelil puuduvad nii mõõtkava kui ka orientatsioon (Westoby *et al.* 2012). Hiljem saab mudeli vajadusel teisendada lisatud tugipunktide alusel koordinaatsüsteemi. Tugipunktide koordinaatide saamise üheks võimaluseks on täiendav mõõdistus. Tugipunktide mõõdistusandmed optimeeritakse kollineaarsusvõrrandite lahendamise teel. Kollineaarsusvõrrandite lahendamiseks on vaja teada projektsioonitsentri koordinaate ja objekti asukohta.

Tiheda punktipilve alusel koostatakse võrgustik (ingl k. *mesh*), mille põhjal on võimalik luua objektist või piirkonnast pindobjekt. Selleks kasutatakse erinevaid võrrandeid, üheks viisiks on arvutamine kolmnurkade abil ehk triangulatsioonimeetod. Hiljem on võimalik piltide alusel lisada pinnale tekstuur (Snavely 2008).

### 3. Andmed ja metoodika

Antud töös loodud 3D mudeli koostamisel ja selle täpsuse hindamisel kasutati andmetena drooniga tehtud aerofotosid (kevadiselt kaardistuselt 189, sügiseselt 225 pilti), maapinnalt mõõdistatud tugipunkte ning Maa-ameti lidarmõõdistuse andmeid ja ortofotosid. Uurimisalaks valiti Raadi vana kruusakarjäär, kus esineb mitmekülgne maastik, asub piisavalt lähedal ja on kõrvaline koht, kus ei liigu palju inimesi. Otsustati teha kaks kaardistusprojekti, et lisaks Maa-ameti andmetega võrdlemisele neid mudeleid ka omavahel võrrelda. 3D mudelite loomiseks kautati programmi *Agisoft PhotoScan 1.1.0*. Loodud 3D mudelite täpsuse hindamiseks on vaja teist sõltumatut andmestikku, mille suhtes täpsust hinnata. Antud töös on selleks andmestikuks Maa-ameti ortofotod ja lidarmõõdistuse põhjal loodud kõrgusmudel.

Drooniga tehtud aerofotodest 3D mudeliteni jõudmiseks tuleb läbi käia mitmed etapid. Esmalt tuleb välja valida uuritav objekt ning koostada lennuplaan. Teise etapina järgneb välitöö, mille käigus teostatakse nii lendamine kui ka pildistamine ning täpsema tulemuse saavutamiseks ka maapealne tugipunktide mõõdistus. Kui andmed saavad kogutud on järgmiseks punktiks andmete töötlemine ning 3D mudeli loomine. Seejärel saab asuda mudeli täpsuse hindamise juurde. Järgnevates alapeatükkides käsitletakse eelpool nimetatud etappe.

#### 3.1. Ettevalmistav etapp ja lennuplaani koostamine

Käesoleva töö uurimisala jääb kontrollitavasse õhuruumi, mis tähendab, et drooniga lendamiseks tuli esmalt taodelda Lennuametilt lennuluba. Seejärel koostati lennuplaan, kasutades selleks vabavara programmi *Mission Planner*. Kvaliteetse 3D mudeli jaoks tuleb lennuplaani koostamisel lähtuda kahest peamisest parameetrist: lennukõrgusest ning pildistamise tihedusest. Lennukõrguse valik koos kaamera ja kasutatava objektiiviga määrab ära maapealse lahutuse ja pildi ulatuse. Sellest tulenevalt pannakse paika lennutrajektoride vahemaa ning pildistamise tihedus. See on eelduseks, et mudeli loomisel kautatavatel piltidel oleks olemas piisav omavaheline ülekate. Klassikalises fotogramm-meetrias loetakse madallendudel piisavaks ülekatteks pikikattumist vähemalt 60% ning põikikattumist vähemalt 20% (Liba, 2005). Antud töös kasutati drooni fotogramm-meetriat, kus kehtib põhimõte, et mida suurem ülekate, seda parem. Joonised mudelite piltide ülekatetest on toodud lisades 1 ja 2. Lennuplaani koostamist mõjutab veel

see, kui kauda suudab droon õhus püsida ja millise distantsi selle aja jooksul läbida. See on kombinatsioon drooni raskusest, akude võimsusest, lennukõrgusest ja ilmast, eelkõige tuulest. Lennumarsruut tuleb planeerida vastavalt sellele kui suure ala jõuab ühe paari akudega üles pildistada. Antud töös sooritati mõlema kaardistuse puhul akudest sõltuvalt kaks lennu (Joonis 1). Mõlema kaardistuse puhul kasutati sama lennuplaani hilisema parema võrreldavuse eesmärgil.



**Joonis 1.** Sügisese lennu trajektoorid ja piltide asukohad.

## **3.2. Välitöö: lendamine ja mõõdistamine**

### **3.2.1. Drooniga lendamine**

Drooniga lendamisel tuleb esimese asjana leida sobiv koht, kus oleks võimalik drooni turvaliselt õhku tõsta ning samamoodi ka drooni turvaliselt maandada. Parim lahendus on kas siis mõni horizontaalse tasapinnaga kõvakattega tee või plats. Õhikutõusmise ja maandumise ala peaks olema samuti kõrgema taimestiku vaba ala. Kui sobiv koht on leitud, seatakse üles drooni maapealne juhtimispunkt (ingl k GCS - *Ground Control Station*). GCS-ks on tavaliselt kas sülearvuti või mõni muu tehnikaseade, mis võimaldab kasutada programmi, mille abil saab drooniga sidet pidada, jälgida telemeetria andmeid ja lennuplaani üles laadida või korrigeerida. Antud töös kasutati GCS-ks sülearvutit. Sülearvuti külge ühendatakse raadiosaatja, mille kaudu luuakse ühendus GCS ja drooni vahel. Läbi raadiosaatja ühenduse laetakse lennuplaan ning muud lennu parameetrid drooni

mällu. Enne lendamist paigaldatakse mõõdistatavale alale maha tugipunktid, mis tulevad hiljem kasuks mudeli täpsuse parandamisel (Joonis 2).



**Joonis 2.** Näited maha pandud tugipunktide märgistutest.

Drooni pidev raadiouhendus GCS-ga võimaldab jälgida lennu ajal vajalikke parameetreid nagu näiteks akude volutase ning kestvus, lennu kõrgus, lennurežiim. Üldiselt kasutatakse drooni juhtimiseks juhtpulti, kuid drooni on võimalik ka õhus ümber lülitada autopiloodile. Autopiloodiga lendamine kujutab endast seda, et droon läbib talle lennuplaanis ette antud marsruudi iseseisvalt, kasutades GPS'i ja muude sensorite abi enda asukoha, suuna, kõrguse, kalle ja kiirenduse määramiseks. Sadu kordi sekundis neid parameetreid kontrollides ja lennuplaaniga kõrvutades korrigeeritakse pidevalt mootorite tööd, et droon jälgiks etteantud marsruuti ja kõrgust. Antud töös läbiti etteantud lennuplaan autopilooti kasutades, kuid õhkutõusmist ja maandumist kontrolliti puldiga juhtides.

Antud töös kasutati kaardistamiseks Tartu Ülikooli geograafia osakonna drooni, mille külge on fikseeritud alus koos kaameraga. Drooni tüübiks on oktokooper, mis kujutab endast 8 propelleriga drooni. Pildistamiseks kasutati peegelkaamerat Canon EOS 550D. Vahetult enne lendamist lülitati kaamera sisse ning pildistamise tiheduseks seati 2 sekundit. Pildid on mõõtmetega 5184x3456 pikslit ehk 18 megapikslit. Drooni juhib Pixhawk'i 32 bitine lennujuhtimise riistvara ning lendamise ajal on drooniga ühendatud korraka kaks akut. Lennuaeg kahe 5000mAh akuga on ligikaudu 7 minutit ning kahe 8000mAh akuga ligikaudu 10 minutit. Drooni lennukiirus on 5m/s ning ta suudab eelpool mainitud aegadega läbida vastavalt siis umbes 700m ja 1000m tiiru. Lendude kõrgusvahemik oli 56-66 meetrit. Droonil on peal ka GPS, mis määrab asukoha. Lisaks baromeeter, kompass ja IMU. Puldi ja drooni vahel on 2,4GHz raadiolink, mille abil saab teda juhtida. Telemeetria ja sidepidamine GCS'iga käib üle 433MHz raadiolingi.

### 3.2.2. Mõõdistus

*Agisoft PhotoScan* suudab luua 3D mudeli piltidest ilma täiendavate lisaandmeteta, aga sel juhul puudub mudelil mõõtkava ja ta ei ole seotud konkreetse asukohaga. Mudeli proportsioonid on küll õiged, kuid aimdus objekti mõõtmetest puudub. Sellepärast tuleb mudelile anda mingisugune mõõtkava, antud juhul kasutati selleks mõõdistusandmeid. Lähtudes SfM metoodikast, siis mida rohkem lähteandmeid antakse, seda täpsem tulemus on võimalik saavutada. Mõõdistus viidi läbi digitahhümeetriga ning mõõdistati nende samade maha pandud tugipunktide asukoha koordinaadid ning kõrgus (Tabel 1). Mõõdistus viidi läbi mõlema, nii kevadise kui ka sügisese mudeli puhul. Esimene mõõdistus toimus 25.05.2015, kus andmeid koguti fotogramm-meetria aluste õppeaine raames. Andmete kogumisega tegelesid nii õppejõud, õppeainest osavõtjad kui ka autor ise. Teine mõõdistamine toimus 29.10.2015 ning viidi läbi koos juhendajaga.

**Tabel 1.** Mõõdistusandmete tabel. (Kevadine mudel)

Punktid	X (m)	Y (m)	Z (m)
501	4988,360000	4967,252000	100,985000
502	5025,342000	4965,781000	94,319000
503	5091,918000	4969,097000	102,746000
504	5072,082000	4921,907000	95,341000
505	5077,343000	4866,822000	103,243000
506	5022,787000	4869,904000	101,739000
507	5017,681000	4923,267000	98,423000
508	4992,637000	4915,342000	103,390000
509	5061,300000	4998,545000	91,735000
510	5069,090000	5049,336000	88,745000
511	5049,787000	5085,873000	88,252000
512	5067,414000	5075,476000	87,759000
513	5008,644000	5074,328000	93,912000

### 3.3. Andmete järeltöötlus ja mudelite loomine

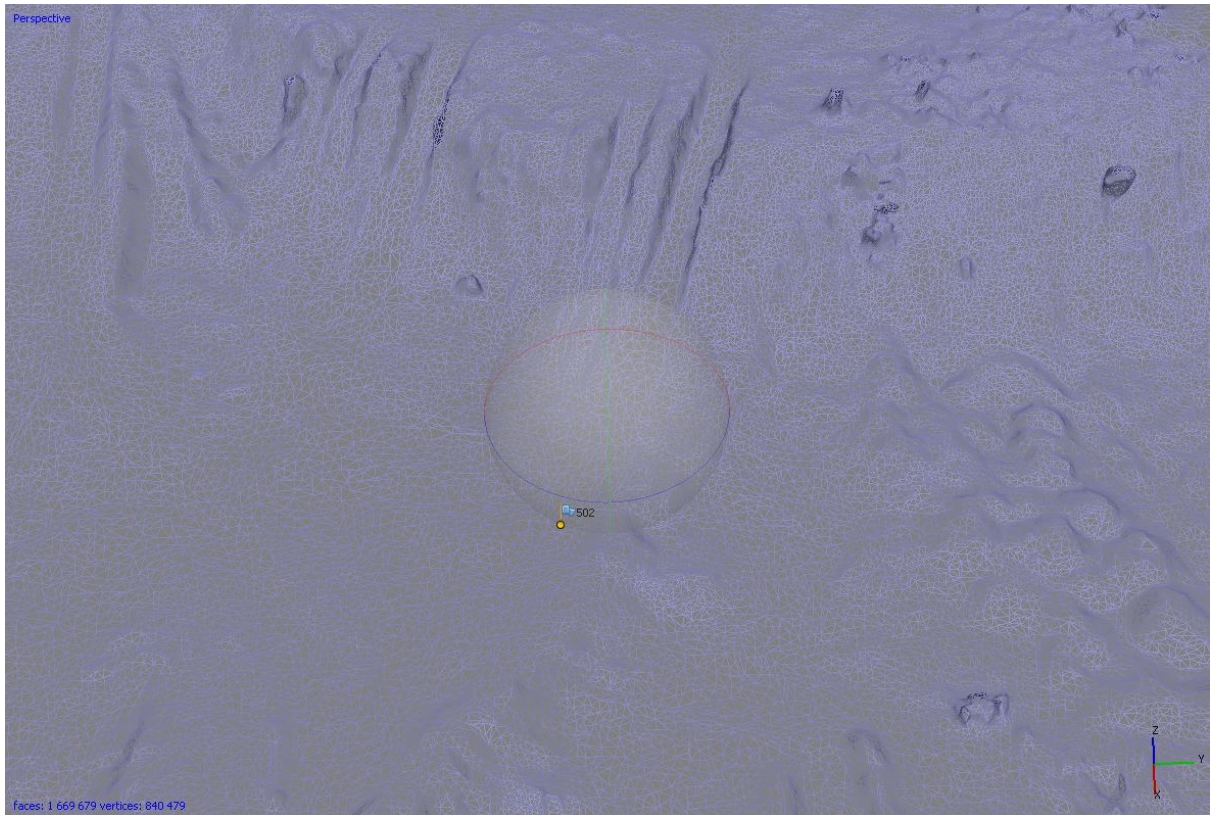
Andmete töötlemise ning mudelite loomise protsess algab piltide allalaadimisega arvutisse. Edasi lisatakse piltidele juurde drooni GPSi logist saadud koordinaadid. Kuigi Agisoft Photoscan otseselt ei vaja mudeli loomiseks piltide koordinaate, annab nende lisamine meile umbkaudse asukoha ja mudeli mõõtkava. Edasi valiti välja sobivad pildid mudeli loomiseks. Valikust jäid välja pildid, mis olid tehtud drooni õhkuõhusmisel ja maandumisel ning pildid, mille kvaliteet ei olnud hea (Joonis 3). Piltide halb kvaliteet tulenes drooni vibreerimisest õhus ning pildidel väljendus see udususe näol. Ebakvaliteetselt pildilt on raske tuvastada maha paigaldatud tugipunktide mõõdistatud keskkohati.



**Joonis 3.** Vasakul pilt drooni õhkuõhusmise ajal, paremal näide halva kvaliteediga pildist ja seal näha olevast tugipunktist.

Esimeseks etapiks pärast piltide lisamist programmi on *Photo Alignment* ehk siis fotode joondamine. Selle protsessi käigus leitakse piltidelt suur hulk punkte neid iseloomustavate parameetritega. Punkte ja nende parameetreid võrreldes leitakse üle kõigi piltide sarnased punktid, mille järgi seotakse erinevad pildid ühtseks tervikuks. Nendest punktidest luuakse esmane hõre punktipilv. Järgmiseks lisatakse mudelile digitahhümeetriga mõõdistatud punktide koordinaadid. Programm loob kõigi mõõdistatud punktide jaoks markerid, mis viiakse lisatäpsuse saamiseks manuaalselt õigesse asukohta. Seejärel need lisatud mõõdistusandmed optimeeritakse. See tähendab, et leitakse uus kollineaarsusvõrrandite lahend arvestades mõõdistusandmeid, mis on olemuselt palju täpsemad kui piltide tegemise asukohad. Peale optimeerimist luuakse mudelile *Dense Cloud* ehk tihe punktipilv. Peale tiheda punktipilve valmimist on järgmiseks etapiks võrgustiku loomine (*Mesh, TIN*

ingl k. *triangular irregular network*), mille puhul on tegemist pinna loomisega tiheda punktipilve punktide vahele (Joonis 4).



**Joonis 4.** Väljalõige loodud võrgustikust.

Viimaseks 3D mudeli loomise etapiks on *Build Texture*, kus siis mudelile luuakse ortofoto eksportimiseks vajalik tekstuur. Kui kõik tööprotsessid on läbitud saab mudelist eksportida ortofoto ning kõrgusmudeli.

### **3.4. Täpsuse hindamine**

3D mudelite koostamisel on oluliseks aspektiks mudelite täpsused, nii ortofoto -kui ka kõrgusmudeli täpsus. Antud töös võrreldakse täpsuseid Maa-ameti andmetega, eeldades, et viimaste puhul on tegemist õigete andmetega. Võrdlemiseks kasutatakse geograafia osakonnale litsenseeritud programmi ArcMap 10.3.1. Kuna autori loodud mudelid on mõõdistatud suvalises koordinaatsüsteemis, siis on vaja need transformeerida ümber L-EST97 koordinaatsüsteemi. Koordinaatide ümberarvutamiseks kasutati Helmert'i transformatsiooni. See meetod valiti kuna transformeerimisel mudeli proportsioonid ei muutu. Maa-ameti ortofotolt valiti 3 punkti koordinaadid, seejärel otsiti autori ortofotolt samad punktid ning võeti samuti nende koordinaadid. Koordinaatide transformatsioon

teostati mõlema, nii ortofoto kui ka kõrgusmudeli puhul, kasutades transformeerimiseks samu parameetreid. Transformatsiooni viga antud töös hinnatakse tugipunktide omavaheliste kauguste võrdlusel. Võrreldakse suvalises koordinaatsüsteemis oleva mudeli tungipunktide omavahelised kauguseid ja L-EST koordinaatsüsteemi transformeeritud mudeli samade punktide kauguseid.

#### **3.4.1. Maa-ameti andmed**

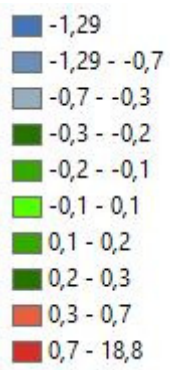
Maa-ameti andmetest kasutati töös Maa-ameti ortofotot ning aerolaserskaneerimise (ingl k LiDAR - *Light Detection And Ranging*) andmetest loodud kõrgusmudelit. Maa-ameti ortofoto on pärit 2015 aasta mai kuus teostatud madallennust, kus ortofoto piksli suuruseks on 12,5 cm. Kõrgusmudeli andmed uuritava objekti kohta pärinevad samuti aastast 2015. 2400 meetri kõrguselt sooritatud lennu vertikaalne täpsushinnang kontrollmõõtmistel jäi vahemikku +/- 0,34m (Gruno 2012).

#### **3.4.2. Ortofoto täpsuse hindamine**

Ortofoto täpsuse hindamine toimub kahel viisil: visuaalne hindamine ning valitud ortofoto punktide ruutkeskmise vea arvutamine ehk RMS (ingl k - *Root Mean Square*). Esimese meetodi puhul hinnatakse visuaalselt autori ortofoto sobivust Maa-ameti ortofotoga. Teisel juhul võetakse 3D mudeli põhjal loodud ortofotolt 10 punkti ning saadakse nende koordinaadid. Samad punktid ja nende koordinaadid leitakse ka Maa-ameti ortofotolt ning saadud koordinaadid kantakse tabelisse. Koordinaatide erinevus näitab viga ja selle põhjal arvutatakse RMS. Sügiseselt ortofotolt ühiste punktide leidmine ebaõnnestus karjääris toimunud maaparandustööde tõttu ning RMS väärtused arvutati kevadise ortofoto põhjal.

#### **3.4.3. Kõrgusmudeli täpsuse hindamine**

Kõrgusmudeli hindamisel vaadatakse kui suur on autori loodud kõrgusmudeli ning Maa-ameti LiDAR andmetega loodud kõrgusmudeli vahe. Sobivaks veahinnangu skaalaks kasutatakse Maa-ameti vertikaalse täpsushinnangu kontrollmõõtmisel saadud vahemikku, milleks on +/- 0,34 meetrit (Gruno 2012). Kõrgusandmete kujutamise skaala koostamisel arvestati ka maksimaalseid ja minimaalseid kõrguste väärtusi (Joonis 5).

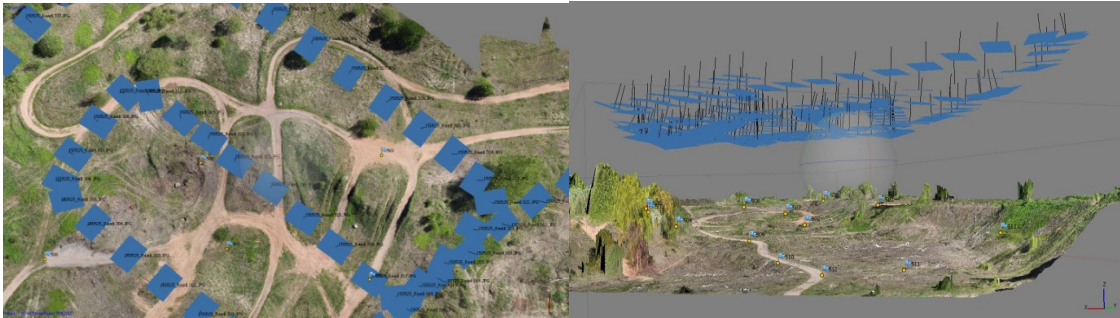


**Joonis 5.** Kõrgusandmete kujutamise skaala.

## 4. Tulemused

### 4.1. 3D mudel

Kõikide töötappide korrektse täitmise puhul on tulemuseks 3D mudel, mida on võimalik kasutada asukohatäpsuse ning kõrgusmudeli täpsuse hindamiseks. 3D mudel pakub huvitavat visuaalset informatsiooni erinevatele tunnustele nagu näiteks on maapinna reljeefi kuju või siis pildistamise asukoht ruumis (Joonis 6).



**Joonis 6.** Perspektiiv vaade kevadisest mudelist.

Antud töös loodi 3D, nii kevadise kui ka sügise kaardistuse kohta. Mudelitelt võib näha mõningaid auguga alasid. Augud on tekkinud enamjaolt mudeli servaalale ning selle põhjuseks on ebapiisavad andmed pildimaterjalis maapinna kohta (Joonis 7). Aukudega alad ei oma mudeli asukohatäpsuse hindamisel suurt kaalu kuid kõrgusmudeli täpsuse hindamisel võivad nad põhjustada liigset müra.



**Joonis 7.** Kevadine mudel, mille servades on näha mõningaid auguga alasid.

*Agisoft PhotoScan* võimaldab paralleelselt 3D mudeli loomisega jälgida mudeli enda täpsust. Mudeli enda täpsus kirjeldab seda, et kui väikese veaga loob programm piltidest 3D mudeli suvalises koordinaatsüsteemis. Mudeli enda täpsuse vea hinnangu annavad kaks parameetrit: asukohatäpsuse viga meetrites ning piksliviga. Kevadise mudeli tabelis on näha, et asukohatäpsuse viga jääb üsna väikeseks, täpsemalt 3,7 cm ning piksliviga jääb suurusjärku 0,291 pikslit (Joonis 8). Sügisese mudeli tabelis on asukohatäpsuse viga natukene suurem kui kevadises mudelis, kuid jääb samuti võrdlemisi väikeseks, nimelt 5,5 cm. Piksliviga on sügisese mudelil 0,623 pikslit (Joonis 9).

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 501	4988.360000	4967.252000	100.985000	0.022405	11	0.240
<input checked="" type="checkbox"/> 502	5025.342000	4965.781000	94.319000	0.080388	33	0.330
<input checked="" type="checkbox"/> 503	5091.918000	4969.097000	102.746000	0.028460	15	0.244
<input checked="" type="checkbox"/> 504	5072.082000	4921.907000	95.341000	0.042814	22	0.185
<input checked="" type="checkbox"/> 505	5077.343000	4866.822000	103.243000	0.026408	8	0.107
<input checked="" type="checkbox"/> 506	5022.787000	4869.904000	101.739000	0.021488	13	0.108
<input checked="" type="checkbox"/> 507	5017.681000	4923.267000	98.423000	0.041279	14	0.280
<input checked="" type="checkbox"/> 508	4992.637000	4915.342000	103.390000	0.040821	11	0.220
<input checked="" type="checkbox"/> 509	5061.300000	4998.545000	91.735000	0.031406	29	0.415
<input checked="" type="checkbox"/> 510	5069.090000	5049.336000	88.745000	0.029975	5	0.368
<input checked="" type="checkbox"/> 511	5049.787000	5085.873000	88.252000	0.018249	4	0.144
<input checked="" type="checkbox"/> 512	5067.414000	5075.476000	87.759000	0.028322	5	0.506
<input checked="" type="checkbox"/> 513	5008.644000	5074.328000	93.912000	0.027140	9	0.213
<b>Total Error</b>				<b>0.037100</b>		<b>0.291</b>

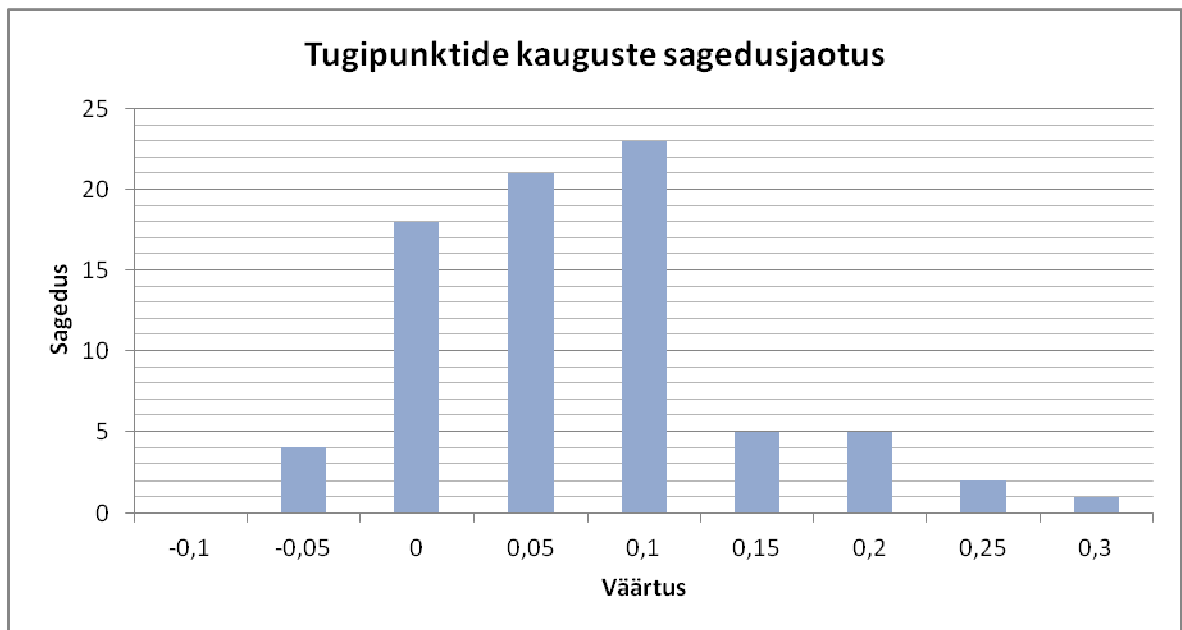
**Joonis 8.** Agisoft PhotoScani tabel kevadise mudeli veahinnangust.

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 101	2012.483000	4972.122000	94.022000	0.098192	23	0.651
<input checked="" type="checkbox"/> 102	2018.040000	4900.191000	98.246000	0.061478	15	0.459
<input checked="" type="checkbox"/> 103	2068.740000	4913.473000	94.511000	0.053003	20	0.577
<input checked="" type="checkbox"/> 104	2067.836000	4952.509000	92.425000	0.051535	27	0.663
<input checked="" type="checkbox"/> 105	2081.238000	4982.405000	100.029000	0.031728	14	0.588
<input checked="" type="checkbox"/> 106	2057.022000	5022.532000	89.905000	0.027256	30	0.579
<input checked="" type="checkbox"/> 107	2065.090000	5076.504000	85.330000	0.058871	39	0.486
<input checked="" type="checkbox"/> 108	2079.329000	5116.096000	83.443000	0.050424	13	0.387
<input checked="" type="checkbox"/> 109	2051.720000	5130.270000	84.259000	0.042382	10	0.408
<input checked="" type="checkbox"/> 110	2019.699000	5093.708000	87.644000	0.039320	15	0.372
<input checked="" type="checkbox"/> 111	2040.146000	5070.943000	86.954000	0.042556	16	0.510
<input checked="" type="checkbox"/> 112	2030.067000	5024.288000	90.879000	0.073225	21	0.668
<input checked="" type="checkbox"/> 113	2037.300000	4975.663000	94.944000	0.047868	26	1.065
<b>Total Error</b>				<b>0.055088</b>		<b>0.623</b>

**Joonis 9.** Agisoft PhotoScani tabel sügisese mudeli veahinnangust.

## 4.2. L-EST süsteemi transformeeritud ortofotod ja kõrgusmudelid

Autori loodud ortofoto L-EST süsteemi transformeerimise täpsuse hindamisel kasutati meetodit, mis hõlmas endas tugipunktide omavahelist kaugust. Nagu metoodika all mainitud sai, siis transformeerimise täpsuse hindamiseks lahutati suvalises koordinaatsüsteemis oleva kevadise ortofoto tugipunktide omavahelised kaugused L-EST süsteemi transformeeritud ortofoto samade tugipunktide omavahelistest kaugustest. Saadud tulemustest loodi risttabel, kus on toodud välja tugipunktide omavaheliste kauguste lahutus meetrites (Lisa 3). Kõikide tugipunktide väärtused jäid vahemikku -0,1m - +0.3 m, kus miinimum ja maksimum piirväärtus on lisatud autori poolt juurde (Joonis 10). Kokku saadi väärtused 78 punktilt ning nende keskmiseks väärtuseks tuli 0,04m. Seda tulemust arvesse võttes võib öelda, et ortofoto transformeerimine L-EST süsteemi õnnestus ning ei esinenud suuri proportsiooni moonutusi.



**Joonis 10.** Tugipunktide kauguste sagedusjaotus.

### 4.3. Mudeli täpsuse hindamine

#### 4.3.1. Kevadine mudel

Mudeli asukohatäpsuse uurimisel ja hindamisel kasutati visuaalset hinnangut ning kevadisele mudelile arvutati ka RMS viga. Kevadisest mudelist loodud ortofoto puhul on näha, et peale selle transformeerimist L-EST süsteemi, klappib ta suures osas Maa-ameti ortofotoga (Joonis 11). Visuaalsel hinnangul vaadati autori ortofoto ja Maa-ameti ortofoto servaalade ning ortofotol olevate objektide ja teede kattumist (Joonis 12). Ortofoto transformeerimisel L-EST süsteemi võib näha, et ortofoto proportsioonid ei ole transformeerimisel muutunud ega ka moondunud. Ruutkeskmise vea väärtuseks saadi 0,123 (Lisa 4).

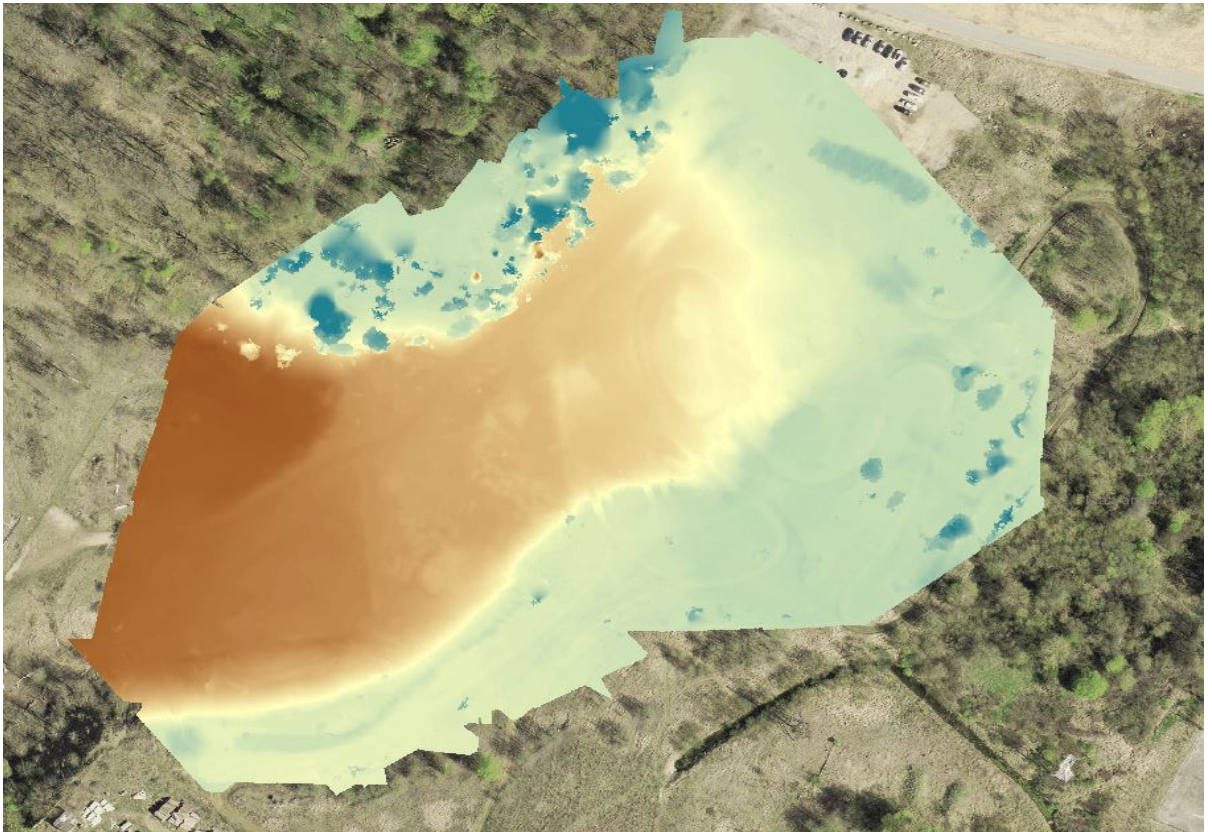


**Joonis 11.** Kevadise ortofoto paiknemine Maa-ameti ortofoto aluskaardil peale koordinaatide transformatsiooni.

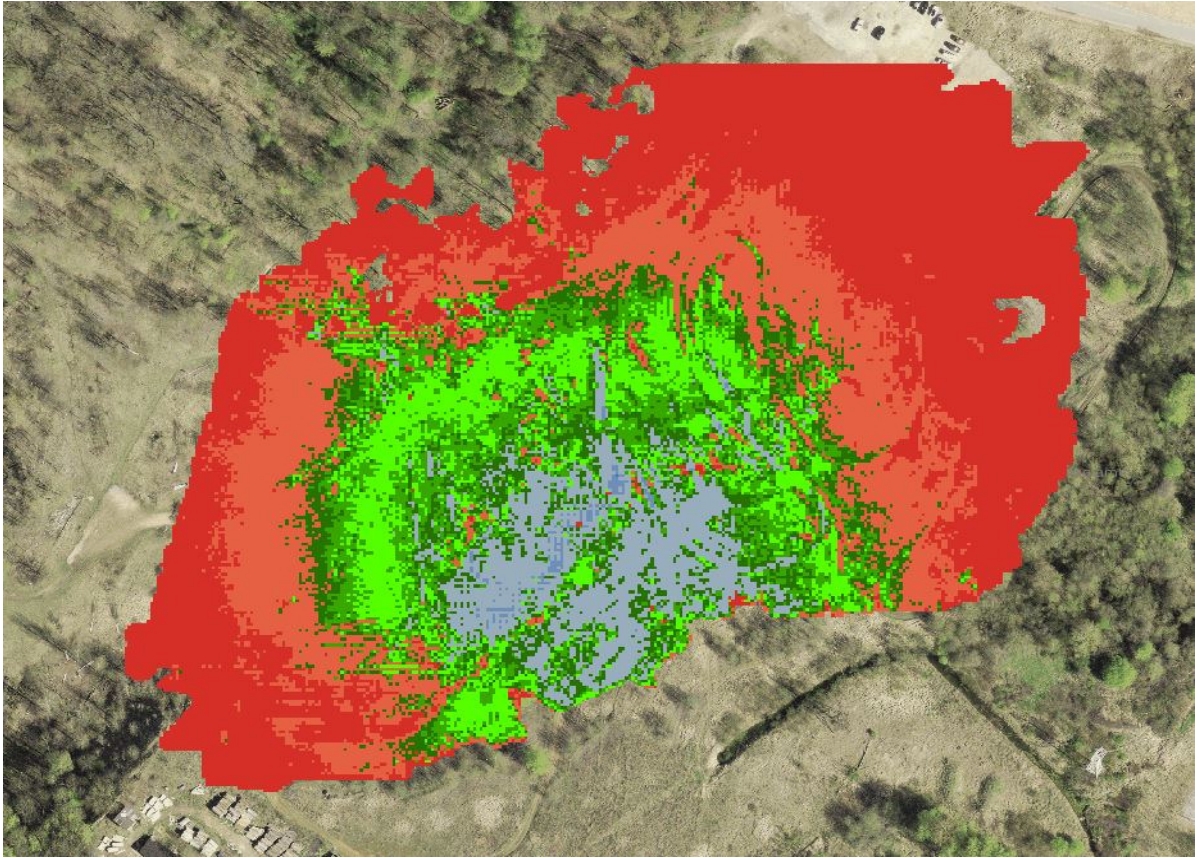


**Joonis 12.** Kevadise ortofoto paiknemine Maa-ameti ortofoto aluskaardil peale koordinaatide transformatsiooni.

Kõrgusmudeli täpsuse hindamisel kasutati võrdluseks Maa-ameti LiDAR andmete põhjal koostatud kõrgusmudelit. Autori loodud kõrgusmudel transformeeriti L-EST süsteemi samade parameetrite järgi, mis ortofoto (Joonis 13). Kuna autori loodud mudelid on mõõdistatud suvalises koordinaatsüsteemis, siis ka kõrgusandmed erinevad Maa-ameti omadest. Digitahhümeetri asukohale anti kõrguseks 100m ning sellest lähtuvalt mõõdistati tugipunktide kõrgused. Kõrgusmudelite lahutamiseks otsiti kõigepealt Maa-ameti kaardilt sama punkti kõrgus, kus digitahhümeeter asus ning arvutati nende punktide vahe. Seejärel lahutati autori kõrgusmudelist saadud vahe ning sellest omakorda Maa-ameti kõrgusmudel. Kõrgusmudeli täpsuse võrdlemiseks kasutati Maa-ameti vertikaalse täpsushinnangu kontrollmõõtmisel saadud vahemikku +/- 0,34 meetrit. Omavahelise lahutuse tulemusena saadud kõrgusmudelil ilmnis süstemaatiline viga. Mudelile oli tekkinud „kausi efekt“, kus servaalade poole liikudes kõrguste vahe suurenes (Joonis 14).



**Joonis 13.** Kevadine kõrgusmudel transformeerituna Maa-ameti ortofotole.



**Joonis 14.** Maa-ameti kõrgusmudeli ning kevadise kõrgusmudeli lahutus, kus esineb „kausi efekt“. Roheline ala jääb kontrollvahemikku +/- 0,34 m .

#### **4.3.2. Sügisene mudel**

Sügisese mudeli asukohatäpsuse puhul kasutati samuti visuaalset hinnangut. Siin oli natukene raskem hinnata ortofoto täpsust, kuna kevadise ning sügisese mõõdistuse vahepeal oli Raadi karjääris viidud läbi maaparandustööd. Tööde käigus oli karjääri maastik muutunud, mistõttu oli raskem tuvastada ühiseid punkte autori ortofotol ja Maa-ameti aluskaardil. Servaalade järgi sai siiski mingi visuaalse hinnangu, et autori ortofoto asub õiges kohas Maa-ameti ortofotol (Joonis 15, 16).

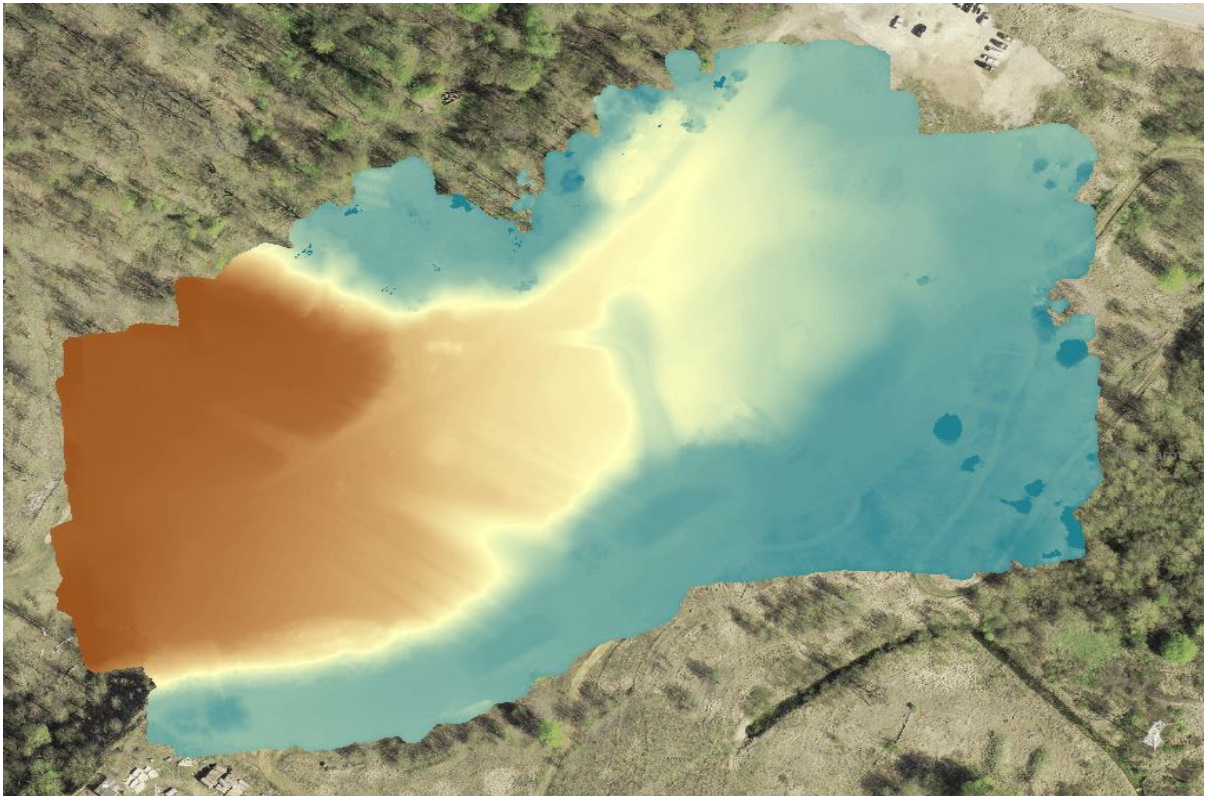


**Joonis 15.** Sügisese ortofoto paiknemine Maa-ameti ortofoto aluskaardil peale koordinaatide transformatsiooni.

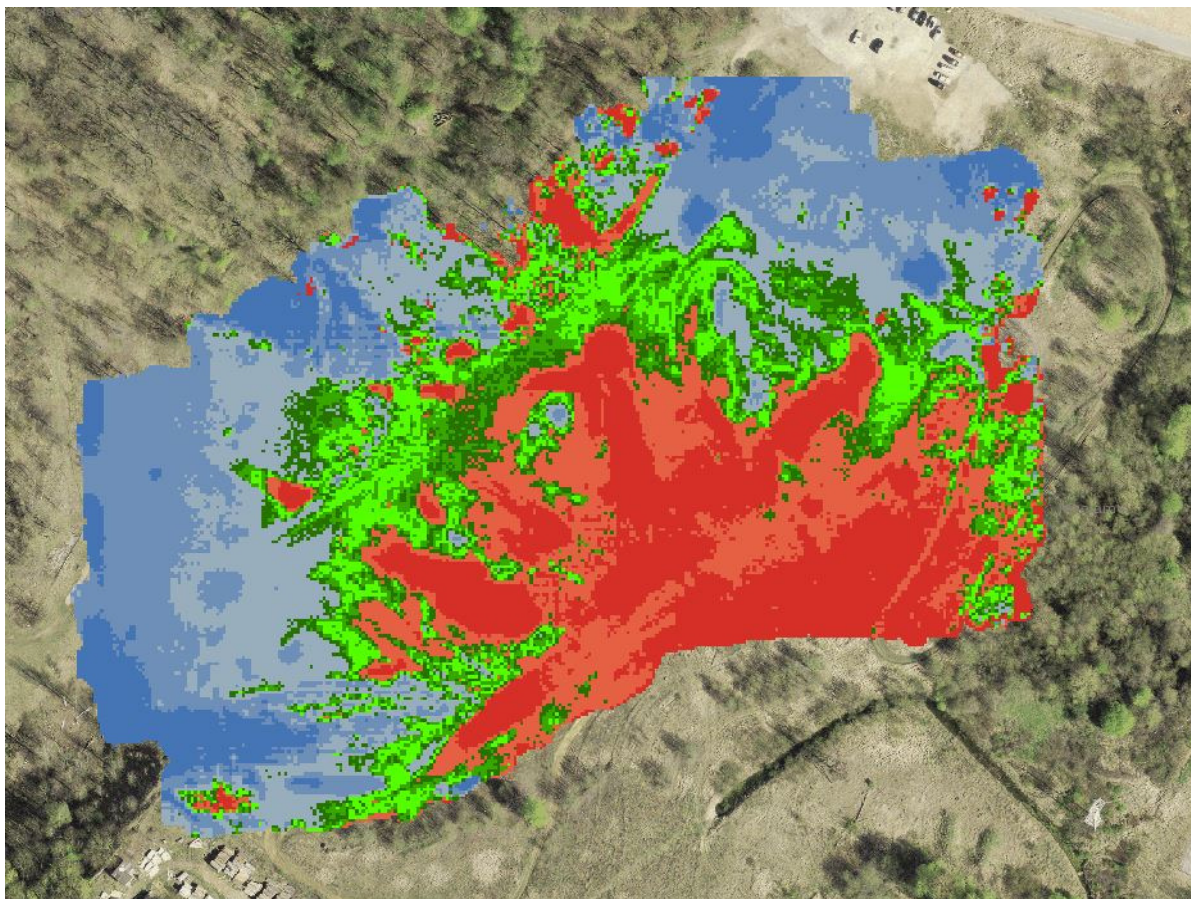


**Joonis 16.** Sügisese ortofoto paiknemine Maa-ameti ortofoto aluskaardil peale koordinaatide transformatsiooni.

Kõrgusmudeli hindamisel kasutati sama meetodit, mis kevadise kõrgusmudeli puhul. Kõigepealt transformeeriti kõrgusmudel ümber L-EST süsteemi, lahutati sellest digitahhümeetri asukoha punktide vahe ning seejärel Maa-ameti kõrgusmudel (Joonis 17). Sarnaselt kevadise kõrgusmudeli võrdlusele Maa-ameti kõrgusmudeliga, ilmnes sügisese kõrgusmudeli puhul sama süstemaatiline viga. Kui kevadisel kõrgusmudelil suurenes „kausi efekt“ servaalade suunas, siis sügisese mudeli puhul oli märgata vastupidist. Mida servaalale lähemale, seda negatiivsemaks tulemus muutub (Joonis 18). Hindamisel kasutati sama kontrollmõõdistuse skaalat +/- 0,34 meetrit.



**Joonis 17.** Sügisene kõrgusmudel transformeerituna Maa-ameti ortofotole.



**Joonis 18.** Maa-ameti kõrgusmudeli ning sügise kõrgusmudeli lahutus, kus esineb samuti „kauri efekt“. Roheline ala jääb kontrollvahemikku +/- 0,34 m.

#### 4.4. „Kauri efekt“

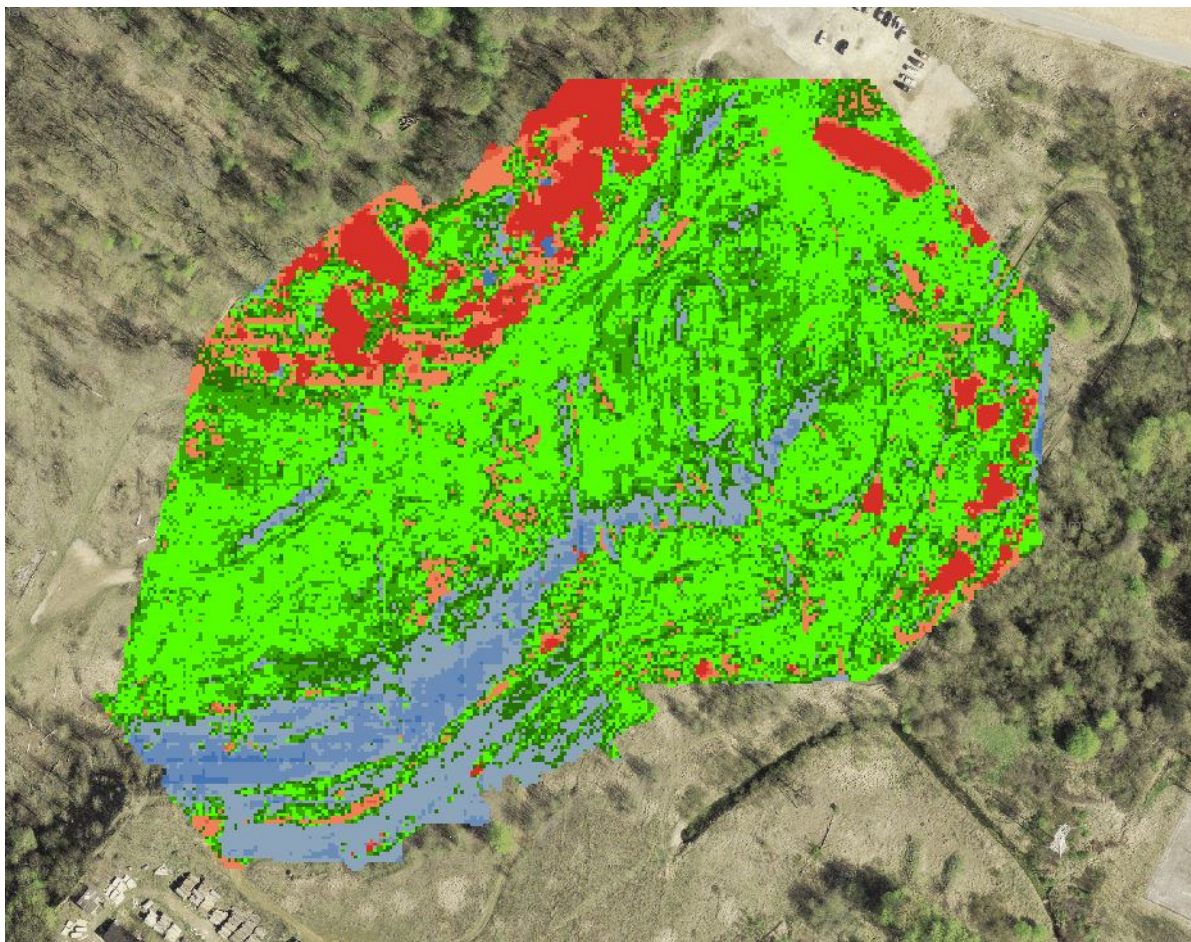
Autori loodud kõrgusmudeli võrdlemisel Maa-ameti kõrgusmudeliga esines mõlemal, nii kevadisel kui ka sügisesel kõrgusmudelil, „kauri efekt“. Kevadisel kõrgusmudelil on keskosas kõrgused madalamad Maa-ameti mudelist ja servaaladel kõrgused suuremad Maa-ameti mudelist. See tähendab, et kõrgusmudelite lahutamisel saadud kõrguste erinevus kasvab radiaalselt servaalade suunas. Sügisesel kõrgusmudelil on kõrguse väärtused mudeli keskel kõrgemad ning servaaladel madalamad kui Maa-ameti mudelis. Esimesel juhul on kõrgused võimendunud ja teisel on kõrgused justkui kokku surutud. „Kauri efekti“ on esinenud ka Bolognesi *et al.* (2015) ning Ouédraogo *et al.* (2014) töödes. Ouédraogo *et al.* (2014) töös esines „kauri efekt“ Agisoft PhotoScan'i kõrgusmudeli võrdlemisel. Yuan (2009) on öelnud, et „kauri efekt“ võib tekkida, kuna servaalade kohta on vähem pildimaterjali ja piltide ülekatte nurgad on väikesed. Seega programm kasutab vähem pildi projektsioone, et luua serva äärseid siduspunkte. Ouédraogo *et al.* (2014)

arvates tekib viga kaamera kalibratsioonimudelis. Bolognesi *et al.* (2015) töös on testitud *Agisoft PhotoScan*'i tarkvara ning testi tulemusel on mudelis ilmnunud samuti „kausi efekt“. Kasutatud on erinevaid viise „kausi efekti“ leevendamiseks või kaotamiseks: kaamera tüübi-, pildimaterjali parameetrite-, kaamera asukoha täpsustamine ning tugipunktide lisamine. Tulemusena suudeti neid meetodeid kasutades „kausi efekt“ kaotada.

„Kausi efekt“ eemaldamisel prooviti kasutada eelpoolnimetatud meetodeid, kuid „kausi efekt“ jäi siiski alles. Autori töös ilmnes „kausi efekt“ hoopis erineval põhjusel. Põhjuseks on ilmselt digitahhümeetriga mõõdistusel tekkinud kõrgusviga.

#### **4.5. Uus kõrgusmudel**

„Kausi efekt“ tõttu loodi kevadisest lennust uus kõrgusmudel. Selle jaoks võeti kõrgusandmetena kasutusele Maa-ameti kõrgusandmed, mis olid mõõdistatud tugipunktide kohal. Kevadise mudeli puhul on maastik Maa-ameti mudeliga sarnane ning tugipunktide kõrgused asendati Maa-ameti kõrgustega. Kuigi selline lähenemine ei ole päris korrektne, oli soov ikkagi teada saada, kas on võimalik luua selline kõrgusmudel, mis annab parema tulemuse. Sügisest lennust ei loodud uut mudelit, kuna karjääri maastik oli selleks ajaks ümber kujundatud ning õigeid kõrguseid sügisese mudeli jaoks on väga raske tuletada. Mudeli täpsuse hindamiseks kasutati sama meetodit, mis eelnevate kõrgusmudelite puhul (Joonis 19). Võrreldes eelmiste kõrgusmudelitega, puudub antud mudelil „kausi efekt“. Roheline värvus tähistab ala, mis jääb kontrollvahemikku. Sinise väärtusega ala on kontrollvahemikust madalam ning punane ala on kontrollvahemikust kõrgem. Sinisel alal on Maa-ameti mudelil olnud puud, kuid autori mõõdistuse ajaks olid need puud maha võetud. Punase ala põhjus seisneb selles, et Maa-ameti mõõdistus on tehtud siis, kui puud on raagus ja maapinda on näha. Autori mõõdistuse ajal on puud olnud lehtes ning seetõttu on informatsioon maapinna kohta ebapiisav. Kui need äärmused välja jätta, siis üldine kõrgusmudel on usaldusväärne ning mahub kontrollvahemiku piiridesse.



**Joonis 19.** Maa-ameti kõrgusandmetega kevadine kõrgusmudel lahutatud Maa-ameti kõrgusmudeliga. Roheline ala jääb kontrollvahemikku +/- 0,34 m.

Saadud kõrgusmudeli puhul arvatati välja ka kõrgusvahemike osakaal protsentides (Tabel 2). Roheline tähendab ala, mis jääb kontrollvahemiku +/- 0,34 m piiresse. 90,394% kogu kõrgusmudeli pindalast jääb kontrollvahemikku. 3,454% pindalast jääb kontrollvahemikust kõrgemale ning 6,152% jääb kontrollvahemikust madalamale.

**Tabel 2.** Kõrgusvahemike osakaal (%).

Ala	Osakaal (%)
Roheline	90.394
Punane	3.454
Sinine	6.152
Kokku	100.000

## 5. Arutelu

3D mudeli loomisel on oluliseks aspektiks mudeli usaldusväärsus. Nagu tulemused näitavad on drooniga mõõdistamine küllaltki usaldusväärne, kui välja jätta mõningad üles kerkinud tehnilised probleemid (digitahhümeetri mõõdistusviga). Asukohatäpsuse esmasel visuaalsel hinnangul tundub, et ortofoto transformeerimine suvalisest koordinaatsüsteemist L-EST koordinaatsüsteemi toimis hästi, mida näitas ka tugipunktide omavaheliste kauguste võrdlemine. Kui mõõdistuse oleks kohe saanud teha L-EST süsteemi, siis transformatsioon kui selline, poleks vajalik. Kuna transformeerimisel võib tekkida ka viga, siis ei hinnata enam ainult mudeli täpsust, vaid ka transformeerimisel tekkinud viga.

Kuigi kõrgusmudeli täpsuse hindamisel esines alguses mõningaid probleeme, leiti neile ka lahendused. Kõrgusmudelite võrdlemisel esines saadud tulemustes „kausi efekt“. Probleemi põhjuse väljaselgitamiseks kulus veidikene aega, kuid lõpuks jõuti järeldusele, et tegu võib olla veaga mõõdistustulemustes. Täpsemalt mõõdistusvahendis mida kasutati. Loodi uus kõrgusmudel Maa-ameti kõrgustega. Eesmärgiks oli kontrollida, kas *Agisoft PhotoScan*'i ja drooni fotogramm-meetria kasutamine uute kõrgusandmetega suudab luua kõrgusmudeli, mis sobiks Maa-ameti reljeefimudeliga. Uue kõrgusmudeli võrdlemisel Maa-ameti kõrgusmudeliga avanes pilt, mis annab juurde julgust väita, et „kausi efekt“ tuleneb digitahhümeetri mõõdistusveast. Konsulteriti ka Raivo Aunapiga, kes pakkus välja, et probleem võis tekkida trigonomeetrilise nivelleerimise läbi tekkinud digitahhümeetri nulliaseme veast. Kõrguste väärtused muutusid radiaalselt mudeli servaalade suunas. Kevadise mudeli puhul väärtused kasvasid ning sügisese mudelis kahanesid.

See viga oleks tõenäoliselt varem avastatud, kui mõõdistus oleks koheselt seotud L-EST koordinaatsüsteemiga. Põhjus, miks mõõdistused tehti suvalisse koordinaatsüsteemi seisnes selles, et samal ajal käis Raadi karjääri kõrval Eesti Rahva Muuseumi ehitus ning lähedal asuvad geodeetilise võrgustiku punktid olid mattunud ehitusjääkide alla. Ning kuna esimene mõõdistamine toimus fotogramm-meetria aluste õppeaine raames, siis limiteeritud ajaga ei hakatud mõõdistust siduma mõne kaugema geodeetilise punktiga. Veast teadmata teostati ka sügisene mõõdistamine.

Maaparandustööde tagajärjel muutus karjääri maastik oluliselt. Sügisese ortofoto transformeerimiseks L-EST süsteemi pidi leidma uued markeerimispunktid, millega

koordinaatide transformatsiooni läbi viia. See muutub keerulisemaks, kui kahe mudeli maastikulised erinevused on suured.

Drooniga kaardistamine ja 3D mudelite loomine teaduslikul ning kommertsiaalsel eesmärgil on järjest populariseerumas. Võrreldes tavalise aerofotogramm-meetria või satelliitmõõdistusega on drooni kasutamine samal otstarbel väga mugav. Drooni kasutamine kindla objekti kaardistamiseks nõuab tunduvalt väiksemat ajakulu ning rahalist ressursi. Lisaks oskuslikul kasutamisel pakub drooniga kaardistamine ka täpsemaid ja detailsemaid tulemusi kui seda on tavalistel aerofotodel või satelliidipiltidel.

Drooni fotogramm-meetria eeliseks klassikalise fotogramm-meetria ees on suures osas loodud mudeli detailsus ning kogutud andmete uudsus. Drooniga kaardistamisel saadakse madala lennuga ning kvaliteetse kaameraga maapinnast suure lahtusega pildid, mis muudavadki mudeli palju detailsemaks. Antud töö puhul on puuduseks või kitsaskohaks, Maa-ameti andmetega võrreldes, drooniga kaardistamisel saadud kõrgusmudel. Autori saadud kõrgusmudel kujutab endast pinnamudelit, aga Maa-ameti kõrgusmudel maapinnamudelit. Seega ei saa neid mudeleid päris üheselt võrrelda, vaid tuleb arvestada ka taimestikuga. Jõuti järeldusele, et kui on soov saada kõrgusandmete poolest kvaliteetsemat kõrgusmudelit, tuleb kaardistamine planeerida varasemale ajale kui maapind veel paistab taimestiku alt välja. Mudelite võrdlemise seisukohalt tasub järgmine kord selgeks teha, et kas uuritav objekt püsib aastaringselt ühesena või on sinna planeeritud maaparandustööd.

## Kokkuvõte

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks oli kasutada Tartu Ülikooli geograafia osakonna drooni ning analüüsida sellega kaardistamise tulemusena saadud fotode alusel tehtud 3D mudelite täpsust ja kvaliteeti. Töö teoreetilises osas anti ülevaade droonidest: ajaloost, ehitusest ja peamistest kasutusalaadest. Lisaks käsitleti fotogramm-meetriat, nii klassikalist kui ka antud töös kasutatud drooni fotogramm-meetriat ja selle tööetappe.

Andmete saamiseks teostati välitööde käigus drooniga kaardistamine. Esimene kaardistamine toimus 25. mail 2015. aastal, teine kaardistamine 29. oktoobril 2015. aastal. Kaardistamiste aja valikul lähtuti sobilikust aastaajast ja ilmastikutingimustest, drooniga kaardistamiseks on parim aeg varakevad ja hilissügis. Kevadine kaardistus toimus natukene hilja, kuna puud olid juba lehes, mille tõttu oli edasine andmeanalüüs veidi raskendatud. Kevadise ja sügise kaardistuse vahel olid Raadi karjääris toimunud maaparandustööd, mille tagajärjel oli maapind teatud määral muutunud.

Välitööde järgselt teostati saadud piltide kvaliteedianalüüs ning valiti sobilikud pildid 3D modelleerimiseks. 3D modelleerimine teostati tarkvaraga Agisoft PhotoScan. Kevadisel kaardistamisel tehtud piltidest kasutati 189 fotot ning sügisel kaardistamisel tehtud piltidest 225 fotot. Modelleerimise tulemusena saadi 2 mudelit: kevadine ja sügisene, mille põhjal loodi ortofotod ja kõrgusmudelid. Ortofotode täpsuse hindamiseks kasutati visuaalset hinnangut, ruutkeskmise vea väärtuse leidmist, Helmerti transformatsiooni ja tugipunktide omavaheliste kauguste erinevuste analüüsi. Kõrgusmudelite täpsuse hindamise aluseks oli Maa-ameti LIDAR mõõdistusandmete tulemusel saadud kõrgusmudel.

Töö tulemusena leiti, et kevadine ortofoto oli täpne: ruutkeskmise vea väärtus oli väike, Helmerti transformatsiooni hindamise tulemusel leiti, et ortofoto proportsioonid ei olnud transformeerimisel muutunud ning tugipunktide omavaheliste kauguste hindamisel oli keskmise vea väärtus vaid 4 cm. Sügisele ortofotole anti visuaalne hinnang, mis oli positiivne. Autori loodud kõrgusmudelite võrdlusel Maa-ameti kõrgusmudeliga ilmnis süstemaatiline viga („kausi efekt“), mille põhjuseks oli tugipunktide mõõdistamisel digitahhümeetrist tulenev viga.

Bakalaureusetöös käsitletud teematikat on võimalik edasi uurida ning uurimistulemuste täpsust ja usaldusväärsust kontrollida kasutades antud drooni erineva profiiliga maastikel ning laiendades uurimispiirkonda. Lisaks võiks suurendada ühest piirkonnast loodavate

mudelite arvu, et täpsemalt analüüsida nende täpsust nii ortofoto kui kõrgusmudeli loomisel.

# **Implementing drone photogrammetry to create ortophotos and digital elevation models in Raadi strip mine**

**Kaspar Huul**

## **Summary**

The aim of this thesis was to use University of Tartu's Department of Geography's drone and to analyze the 3D model based on the images gathered. In the theoretic part of the thesis, an overview is given on drones, their history, build and main fields of use. In addition, photogrammetry was described, including analytical and drone photogrammetry.

Field work using drone mapping was conducted, in order to gather data used in this thesis. The first mapping was conducted on the 25th of May in 2015 and the second on the 29th of October in 2015. In between these two data gathering dates, land reclamation works were done in Raadi strip mine and therefore the landscape was different during the second mapping in autumn.

After the photos were gathered, an analysis was conducted to select images of good quality that can be used in 3D modelling. The modelling was done using Agisoft PhotoScan software. 189 images from the spring mapping and 225 images from the autumn mapping were used. As a result, 2 models were created, based on which, ortophotos and digital elevation models were calculated. In order to evaluate the accuracy of ortophotos, visual evaluation, root mean square value, Helmert's transformations and the differences of distance between keypoints was evaluated. Digital elevation models were compared with Estonian Land Board's LIDAR measurements.

As a result, it was found that the spring and autumn ortphotos were of high accuracy. In the digital elevation models, a systematic error occurred, which was described as a „bowl effect“. The reason for it was a fault in digital tachymeter.

## **Tänuavaldus**

Soovin tänada enda juhendajat Edgar Seppa asjakohaste ning kasulike nõuannete eest. Lisaks tänan Raivo Aunapit huvitava teema soovitamise eest ning Tõnu Oja drooni kasutamise loa eest.

## Kasutatud allikad

1. Agarwal, S., Snavely, N., Seitz, S. M., Szeliski, R., 2010. Bundle Adjustment in the Large, in: Daniilidis, K., Maragos, P., Paragios, N. (Eds.), Computer Vision – ECCV 2010, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, pp. 29–42.
2. Barr, A., Bensinger, G., 2014. Google is testing delivery drone system. Wall Street Journal.
3. Bolognesi, M., Furini, A., Russo, V., Pellegrinelli, A., Russo, P., 2015. Testing the low-cost RPAS potential in 3D cultural heritage reconstruction. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W4, 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 25-27 February 2015, Avila, Spain
4. Eisenbeiss, H., 2009. UAV Photogrammetry. University of Technology Dresden, Zurich.
5. Furukawa, Y., Ponce, J., 2010. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis, in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, no. 8, pp. 1362-1376.
6. Gruno, A., 2012. Aerolaserskaneerimise andmed ja kasutamise perspektiivid. [URL: [http://geoportaal.maaamet.ee/docs/pohikaart/2012\\_LIDAR\\_esitlus\\_teabepaev.pdf?t=20121108143443](http://geoportaal.maaamet.ee/docs/pohikaart/2012_LIDAR_esitlus_teabepaev.pdf?t=20121108143443)] 16.05.2016.
7. Harwin, S., Lucieer, A., 2012. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. Remote Sens, 4, 1573-1599.
8. Liba, N., 2005. Fotogramm-meetria alused. Metsandus- ja maehitusinstituut, Eesti Põllumajandusülikool, Tartu.
9. LOWE, D. G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision 60(2), 91–110. Kluwer Academic Publishers. University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada. Manufactured in The Netherlands.

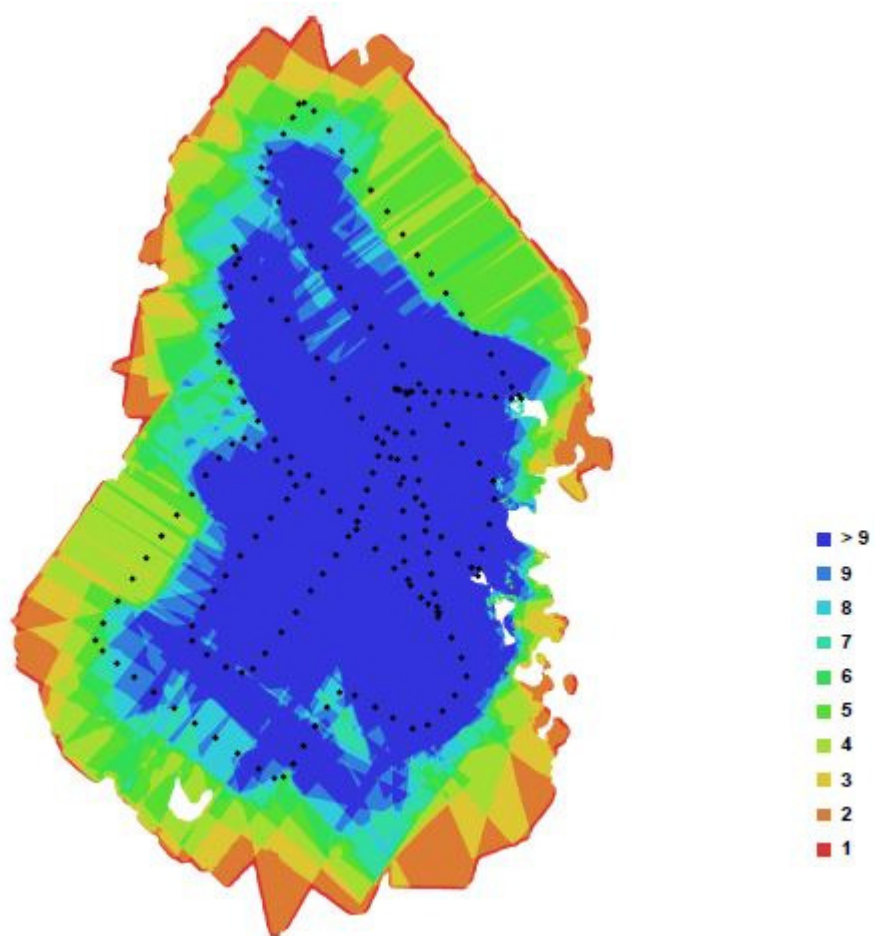
10. Montgomery, G. E., Schuch, H. C., 1993. GIS Data Conversion Handbook. GIS World Books, GIS World, Inc. Fort Collins, Colorado, USA.
11. Nichols, J. C. P., 2014. Drones. Judges' Journal, 00472972, Vol. 53, Issue 4.
12. Ouédraogo, M. M., Degréa, A., Debouche, C., Lisein, J., 2014. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. *Geomorphology*, Vol 214, pp. 339–355.
13. Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2011. UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling: Current Status and Future Perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich.
14. Schenk, T., 2005. Introduction to Photogrammetry. The Ohio State University, Columbus.
15. Seitz, S.M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., Szeliski, R., 2006. A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms, in: 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Presented at the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 519–528.
16. Shahbazi, M., Sohn, G., Théau, J., Menard, P., 2015. Development and Evaluation of a UAV-Photogrammetry System for Precise 3D Environmental Modeling. *Sensors*.
17. Snavely, K. N., 2008. Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. University of Washington.
18. Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., Fitzgibbon, A. W., 1999. Bundle Adjustment — A Modern Synthesis, in: Triggs, B., Zisserman, A., Szeliski, R. (Eds.), *Vision Algorithms: Theory and Practice*, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, pp. 298–372.
19. Valavanis, K. P., Vachtsevanos, G. J., 2014. Handbook on Unmanned Aerial Vehicles, Vol 2, Springer, Netherlands.
20. Vasuki, Y., Holden, E-J., Kovesi, P., Micklethwaite, S., 2014. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An

image analysis approach. *Computers & Geosciences*, Vol 69, pp. 22–32. The University of Western Australia, Australia.

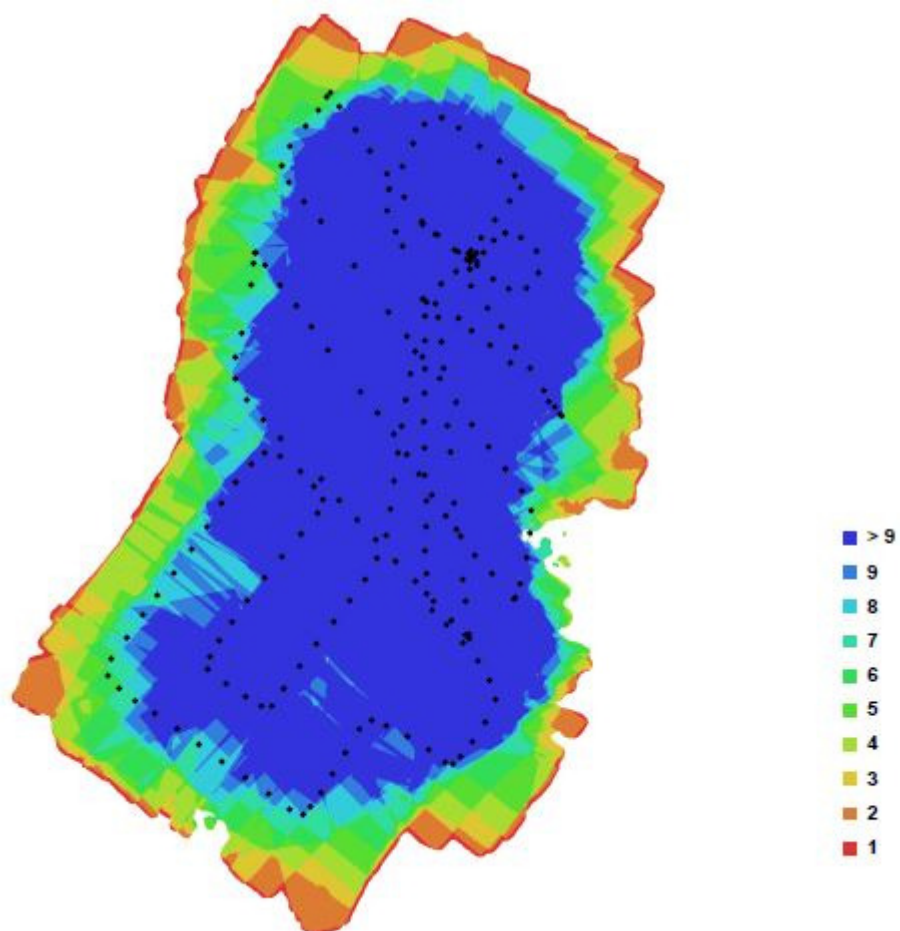
21. Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, Vol 179, pp. 300-314.
22. Yuan, X., 2009. Quality assessment for GPS-supported bundle block adjustment based on aerial digital frame imagery. *Photogramm. Rec.* 24, pp. 139–156.

## Lisad

Lisa 1. Piltide ülekatted ja asukohad kevadisel mudelil.



Lisa 2. Piltide ülekate ja asukohad sügisese mudelil.



**Lisa 3.** Tugipunktide omavaheliste kauguste risttabel

	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513
501	0.000	0.032	0.030	0.093	0.153	0.067	0.061	0.013	0.030	-0.025	0.001	-0.045	0.046
502	0.032	0.000	-0.002	0.051	0.096	-0.008	-0.002	-0.038	0.018	0.002	0.059	-0.011	0.123
503	0.030	-0.002	0.000	-0.020	0.006	-0.087	-0.040	-0.057	0.031	0.093	0.161	0.083	0.200
504	0.093	0.051	-0.020	0.000	0.030	-0.063	0.015	0.005	0.053	0.074	0.141	0.062	0.196
505	0.153	0.096	0.006	0.030	0.000	0.009	0.090	0.099	0.084	0.103	0.171	0.091	0.228
506	0.067	-0.008	-0.087	-0.063	0.009	0.000	-0.002	0.051	-0.013	-0.008	0.053	-0.020	0.113
507	0.061	-0.002	-0.040	0.015	0.090	-0.002	0.000	-0.013	0.009	0.002	0.057	-0.011	0.115
508	0.013	-0.038	-0.057	0.005	0.099	0.051	-0.013	0.000	-0.021	-0.039	0.006	-0.054	0.058
509	0.030	0.018	0.031	0.053	0.084	-0.013	0.009	-0.021	0.000	0.010	0.087	0.000	0.158
510	-0.025	0.002	0.093	0.074	0.103	-0.008	0.002	-0.039	0.010	0.000	0.070	-0.012	0.093
511	0.001	0.059	0.161	0.141	0.171	0.053	0.057	0.006	0.087	0.070	0.000	0.061	0.010
512	-0.045	-0.011	0.083	0.062	0.091	-0.020	-0.011	-0.054	0.000	-0.012	0.061	0.000	0.048
513	0.046	0.123	0.200	0.196	0.228	0.113	0.115	0.058	0.158	0.093	0.010	0.048	0.000

**Lisa 4.** Ruutkeskmise vea väärtuse leidmine.

Raadi ortofoto koordinaadid			MA ortofoto koordinaadid		
x	y		x	y	
1	660108.219	6475980.498	660108.242	6475980.498	
2	660156.241	6475939.997	660156.184	6475940.046	
3	660123.847	6475893.285	660123.788	6475893.005	
4	660115.234	6475857.017	660115.256	6475857.059	
5	660085.45	6475876.071	660085.324	6475875.926	
6	660006.901	6475907.916	660006.856	6475907.905	
7	660040.778	6475845.469	660040.474	6475845.416	
8	660060.334	6475797.587	660060.127	6475797.524	
9	659975.82	6475808.144	659975.852	6475808.017	
10	659969.831	6475865.722	659969.935	6475865.794	
Delta_x		Delta_x ruudus	Delta_y		Delta_y ruudus
1	-0.023	0.000529	0	0	
2	0.057	0.003249	-0.049	0.002401	
3	0.059	0.003481	0.28	0.0784	
4	-0.022	0.000484	-0.042	0.001764	
5	0.126	0.015876	0.145	0.021025	
6	0.045	0.002025	0.011	0.000121	
7	0.304	0.092416	0.053	0.002809	
8	0.207	0.042849	0.063	0.003969	
9	-0.032	0.001024	0.127	0.016129	
10	-0.104	0.010816	-0.072	0.005184	
<b>Ruutude keskmine</b>	<b>0.01522755</b>				
<b>RMS</b>	<b>0.12339996</b>				

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Kaspar Huul,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Drooni fotogrammeetria rakendamine kõrgusmudeli ja ortofoto loomiseks Raadi karjääri näitel“

mille juhendaja on Edgar Sepp,

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, **23.05.2016**