EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Rauno Künnapuu

MEHITAMATA ÕHUSÕIDUKI ABIL TEHTUD AEROFOTODE PÕHJAL JÄÄTMEAUNADE MAHTUDE ARVUTAMISE TÄPSUS

ACCURACY OF WASTE STOCKPILE VOLUME CALCULATIONS BASED ON UAV PHOTOGRAMMETRY

Magistritöö
Geodeesia, kinnisvara- ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: vanemlektor Natalja Liba, *PhD*

Kaasjuhendaja: doktorant Kaupo Kokamägi, MSc

Tartu 2022

www.emu.ee

Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Rauno Künnapuu		Õppekava: geodeesia ja maakorraldus	
Pealkiri: Mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal jäätmeaunade mahtude arvutamise täpsus			
Lehekülgi: 88	Jooniseid: 40	Tabeleid: 10	Lisasid: 2
Õppetool: Metsa- ja maakorralduse ning metsatööstuse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika, Geodeesia (P515) Juhendajad: vanemlektor Natalja Liba, doktorant Kaupo Kokamägi Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2022			

Keskkonnajärelevalves on vajalik jäätmeaunade mõõdistamine, et teha kindlaks, kas jäätmeloa omanik peab kinni keskkonnaloas kehtestatud nõuetest. Seni on keskkonnajärelevalves kasutatud jäätmeaunade mõõdistamisel mehitamata õhusõidukit, kuid puudub teadmine, kas antud meetodil kogutud fotodest moodustatud mudel on jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega. Varasemalt on läbi viidud uurimistöö mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode kasutamise sobivusest maavara puistangu mahtude arvutamiseks ja on leitud, et mõõtetulemused on piisavalt täpsed ning jäävad lubatud suhtelise erinevuse piiresse.

Käesoleva magistritöö eesmärk on selgitada välja, kas odava mitte RTK – võimekusega mehitamata õhusõidukiga kogutud aerofotodest moodustatud mudel on jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega ning vastab kehtivas seadusandluses kehtestatud nõuetele. Uurimistöö jaoks koguti andmed 2021. aasta kevadel Tartu maakonnas asuvas Aardlapalu ümberlaadimisjaamas. Uurimistöö objektideks olid suhteliselt korrapärase kujuga sõelumata kompostimisaun ja korrapärase kuju ning ühtlase värvitooniga, kattega kompostimisaun. Välitööde käigus viidi läbi terrestriline laserskaneerimine ja fotogramm-meetriline lend. Mahtude täpsuse hindamisel võeti etalonväärtuseks laserskaneerimise andmetest moodustatud mudeli maht.

Kõigi antud töös fotogramm-meetrilisel teel moodustatud mudelite mahud jäid määruses „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ kehtestatud lubatud erinevuse 10% piiresse. Kõige täpsemad tulemused saadi kattega kompostimisaunast kattuvuse 70% x 70% ja 21 tähise korral. Antud parameetreid kasutades saadi mudeli absoluutseks erinevuseks 1,48 m^3 ja suhteliseks erinevuseks 0,65%. Ebatäpseim oli kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest, 21 tähist kasutades moodustatud sõelumata kompostimisauna mudel, mille suhteline erinevus oli 5,76%. Uurimistöö käigus saadi kinnitust hüpoteesidele, et jäätmeauna mahtude arvutamiseks piisavat täpsust on võimalik saavutada ka odavamat ja vanemat mehitamata õhusõiduki kasutades ning spetsiaalselt fotogramm-meetriaks, projekteerimiseks ja joonestamiseks mitte ettenähtud tarkvaraga.

Märksõnad: fotogramm-meetria, digitaalne foto, keskmine ruutviga

www.emu.ee

Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Rauno Künnapuu		Curriculum: Land Surveying and Land Management	
Title: Accuracy of waste stockpile volume calculations based on UAV photogrammetry			
Pages: 88	Figures: 40	Tables: 10	Appendixes: 2
Department / Chair: Chair of Forest and Land Management and Forest Industry Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering, Geodesy (P515) Supervisors: senior lecturer Natalja Liba, doctoral student Kaupo Kokamägi Place and date: Tartu 2022			

In environmental supervision, it is necessary to measure waste piles to determine whether the activities of the waste manager comply with the established requirements. So far, unmanned aerial vehicles have been used in environmental supervision when surveying waste piles, but it is not known whether the model, formed from images, collected using this method is sufficiently accurate for carrying out waste surveying activities. In the past, research has been carried out on the suitability of the use of aerial photographs by means of an unmanned aircraft to calculate the volumes of the mineral stockpiles, and it was found that the measurement results are sufficiently accurate and within allowable relative difference.

The aim of this Master's thesis is to determine whether the model, formed from aerial photographs collected with low-priced unmanned aircraft - not with RTK capability is sufficiently accurate to carry out waste-related surveying and complies with the requirements established in the current legislation. During the research, data collected in spring 2021 at the Aardlapalu transhipment station in Tartu County. The objects of the research were an unscreened composting pile with a relatively regular shape and a covered composting pile with a regular shape and uniform colour. In the fieldwork, a terrestrial laser scanning and photogrammetric flight were carried out. When assessing the accuracy of the volumes, the reference value was the volume of the model formed from the data of laser scan.

The volumes of all models formed by the photogrammetric method in this work were within the permissible difference of 10% provided by law. The most accurate results were obtained from the covered composting pile with an overlap of 70 % x 70 % and use 21 GCP-s. Using these parameters, the absolute difference of the model was 1.48 m³ and the relative difference was 0.65 %. The most inaccurate results were obtained from the unscreened composting pile with an overlap of 80 % x 80 % and use 21 GCP-s, where the relative difference was 5,76%. The research confirmed the hypothesis that sufficient accuracy to calculate waste piles volumes can also be achieved by using a less expensive and older UAV and camera and with software not specially designed for photogrammetry, design and drawing.

Keywords: photogrammetry, digital image, mean square error

SISUKORD

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU 7
SISSEJUHATUS 9
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE 12
1.1 Digitaalse fotogramm-meetria komponendid 12
1.1.1 Elektromagneetiline kiirgus 12
1.1.2 Digitaalse foto jäädvustamine 13
1.1.3 Fotogramm-meetria printsiibid 16
1.1.4 Mehitamata õhusõiduki fotogramm-meetria 18
1.2 Mehitamata õhusõiduk 22
1.2.1 Mehitamata õhusõidukite klassifitseerimine 22
1.2.2 Mehitamata õhusõidukite lennutamise reeglid ja seadusandlus 26
1.3 Mahu määramine 28
1.3.1 Andmete kogumine 28
1.3.2 Mahtude määramise metoodikad 29
1.3.3 Nõuded mahtude arvutamise täpsusele 31
1.4 Ülevaade varasematest mehitamata õhusõidukiga teostatud uurimistöödest 32
2. MATERJAL JA METOODIKA 38
2.1 Uurimistöö eesmärk 38
2.2 Uurimistöö objekt 38
2.3 Kasutatud riistvara 40
2.4 Kasutatud tarkvara 41
2.5 Uurimistöö protsess 42
2.6 Lennu planeerimine 44
2.7 Mõõdistustööde läbiviimine Aardlapalu ümberlaadimisjaamas 45
2.8 Andmete töötlus 49
3. TÖÖ TULEMUSED NING ARUTELU 55
3.1 Lennu analüüs 55
3.2 Objektide kohta moodustatud mudelite mahud 59
3.5 Moodustatud mudelite mahtude täpsuse hindamine 60
3.6 Arutelu 64
KOKKUVÕTE 68
KASUTATUD KIRJANDUS 70
LISAD 75
Lisa 1. GNSS mõõtmiste raport 76
Lisa 2. ArcGIS Drone2Map töötlemise raport 78

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

CFA – (*Colour filter array*) digitaalse kaamera värvide tuvastamiseks kasutatav sensoril olev värviliste filtrite võrgustik, mis laseb igale pikslile langeda vaid teatud värvi valgusel, tehes need tundlikuks punasele, sinisele või rohelisele valgusele

CP - (*Check Point*) - valideerimispunkt, mille koordinaadid on teada ning mille abil on võimalik hinnata mudeli täpsust

DNG - (*Digital Negative*) - avalikult kättesaadav arhiveerimisformaat toorfailide jaoks, mis on genereeritud erinevate digitaalsete kaameratega

EASA - (*European Aviation Safety Agency*) Euroopa Lennundusohutusamet

GNSS – (*Global Navigation Satellite System*) satelliitnavigatsiooni süsteem, mis võimaldab ülemaailmset asukohamäärangut

FOV - (*Field of View*) maksimaalne ala, mida kaamera suudab jäädvustada

GCP - (*Ground Control Point*) punkt maapinnal, mille koordinaadid on teada

GIS - (*Geographic Information System*) ruumiliste andmete kogumiseks, haldamiseks, säilitamiseks, päringute teostamiseks, analüüsiks ja esituseks loodud automatiseeritud süsteem

GSD - (*Ground Sampling Distance*) piksli suurus maapinnal

HDR - (*High Dynamic Range*) ülisuure ulatusega pildistamine, mille tulemuseks olev foto saadakse kahe või enama erineva säriajaga tehtud foto liitmisel

IDW - geostatistikas kasutatav interpoleerimise meetod

ISO - kaamera valgustundlikkus

JPEG - (*Joint Photographic Experts Group*) digitaalpiltide pakkimise standard, mis on mõeldud digitaalfotograafia jaoks

Kriging - geostatistikas kasutatav interpoleerimise meetod

KRV - keskmine ruutviga

LAS - failiformaat, mis on mõeldud LiDAR-iga kogutud punktipilve andmete vahetamiseks ja säilitamiseks

LiDAR - (*Light Detection And Ranging*) kaugseire laserseade

LOIS - Lennuohutuse järelevalve infosüsteem

NIR - (*Near-infrared*) lähiinfrapuna

PDOP - (*Positional Dilution of Precision*) positsioneerimissatelliitide omavahelist paiknemist iseloomustav suurus - mida väiksem on PDOP väärtus, seda täpsem on mõõtmine

RAW - (*Raw image file*) digitaalkaamera poolt toodetav pildiformaat, mis sisaldab fotoaparaadi sensorilt saadud informatsiooni minimaalselt töödeldud kujul.

RCS - (*ReCap-Scan*) failiformaat punktipilvede salvestamiseks Autodesk ReCap tarkvaras

RGB - (*Red; Green; Blue)* punane; roheline; sinine

RTK - (*Real Time Kinematic*) mõõdistustulemuste reaalajas parandamiseks virtuaalset- või referentsjaama kasutav GNSS lahendus

SfM - (*Structure from Motion*) algoritm, mis võimaldab 3D struktuuri luua mitmetest erinevast asukohast pildistatud ülekattega 2D piltidest.

SIFT - (*Scale-Invariant Feature Transform*) masinnägemise punktide detekteerimise algoritm

Spline - geostatistikas kasutatav interpoleerimise meetod

TIN - (*Triangular Irregular Network*) kolmnurkadest moodustatud pinnamudel

UAV - (*Unmanned Aerial Vehicle*) mehitamata õhusõiduk

SISSEJUHATUS

Mehitamata õhusõidukite kasutamine kaugseires on muutumas üha tavapärasemaks. Selle peamiseks põhjuseks on tehnika kiire areng ning taskukohaseks muutumine ka tavakasutajale, mis on omakorda kaasa toonud UAV-de jõudmise masstootmiseni. Aina rohkem asutusi, sealhulgas ka riigiasutusi, kasutab oma töös andmete kogumiseks või seire teostamiseks mehitamata õhusõidukeid. Mehitamata õhusõidukid on läbi UAV fotogramm-meetria leidnud üha aktiivsemat kasutamist ka geodeesias, kus nende eelised tulevad välja ennekõike raskesti ligipääsetavate või suurte maa-alade mõõdistamisel. Sellele on aidanud kaasa fotogramm-meetria tarkvarade areng, mis võimaldab kasutada odavamaid kaameraid.

Keskkonnajärelevalves on vajalik jäätmeaunade mahu mõõdistamine, et teha kindlaks, kas jäätmeloa omanik peab kinni talle keskkonnaloaga määratud maksimaalselt üheaegselt ladustatud jäätmete koguse nõudest. Seni on Keskkonnaamet keskkonnajärelevalves kasutanud jäätmeaunade mõõdistamisel mehitamata õhusõidukit, kuid puudub teadmine, kas antud meetodil kogutud fotodest moodustatud mudel on jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega. See aga võib omakorda kaasa tuua järelevalve käigus tehtud otsuste vaidlustamise.

Uurimistöö teema „Mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal jäätmeaunade mahtude arvutamise täpsus“, valiti väljaselgitamaks, kas mehitamata õhusõidukid annavad keskkonnajärelevalves jäätmeaunade mõõdistamisel piisava täpsuse. Nii Eestis kui mujal maailmas on uuritud mehitamata õhusõiduki abil kogutud fotodest moodustatud pinnamudelite täpsuseid ning sobivust maavara puistangu mahtude arvutamiseks. Näiteks Elkhrachy (2021) uuris mehitamata õhusõiduki abil kogutud fotodest moodustatud pinnamudelite täpsuseid ning Kokamägi (2018), Ajayi (2021) ja Ajulo (2021) maavara puistangu mudelite mahtude täpsuseid. Rämman (2021) võrdles mehitamata õhusõidukiga kogutud fotodest moodustatud ehitus-lammutussegaprahi aunade mudelite mahu ja ettevõtte poolt esitatud andmete (jäätmete kogused tonnides) erinevuseid. Magistritöö koostaja ei leidnud uurimistöid, mis oleks hinnanud mehitamata õhusõiduki abil kogutud fotodest moodustatud jäätmeauna mudeli täpsuseid ning sobivust jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks.

Töö jaguneb kolmeks osaks. Esimeses osas antakse ülevaade digitaalse fotogramm-meetria komponentidest, mehitamata õhusõidukist ning lennutamist puudutavast seadusandlusest, kirjeldatakse mahtude määramist ning tutvustatakse sarnastel teemadel tehtud uurimistöid Eestis ja välismaal. Teises osas kirjeldatakse uurimistöö objekti, kasutatud riist- ja tarkvara ning antakse ülevaade uurimistöö protsessist. Kolmandas osas kirjeldatakse lähemalt uurimistöö protsessi, antakse ülevaade saadud tulemustest, analüüsitakse neid ning arutletakse saadud tulemuste üle.

Uurimistöö jaoks koguti andmed 2021. aasta kevadel Tartu maakonnas asuvas Aardlapalu ümberlaadimisjaamas. Uurimistöö objektideks olid suhteliselt korrapärase kujuga sõelumata kompostimisaun ja korrapärase kuju ning ühtlase värvitooniga, kattega kompostimisaun. Välitööde käigus viidi läbi terrestriline laserskaneerimine ja fotogramm-meetriline lend. Mahtude täpsuse hindamisel võeti etalonväärtuseks laserskaneerimise andmetest moodustatud mudeli maht. Käesoleva uurimistöö eesmärk on selgitada välja, kas odava mitte RTK - võimekusega mehitamata õhusõidukiga kogutud aerofotodest moodustatud mudel on jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega ning vastab kehtivas seadusandluses kehtestatud nõuetele.

Uurimistöö hüpoteesid on:

1. Mehitamata õhusõidukiga kogutud fotodest moodustatud mudeli mahtude arvutamise täpsus jääb määruses „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ kehtestatud lubatud erinevuse 10% piiresse.
2. Kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustatud mudel annab mahtude mõõtmisel paremaid tulemusi, kui kattuvus 80% x 80%.
3. Maapinna kontrollpunktide arvu suurenedes mudeli täpsus paraneb.
4. Ilma tähisteta moodustatud mudeli mahtude arvutamise täpsus jääb määruses „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ kehtestatud lubatud erinevuse 10% piiresse.
5. Mehitamata õhusõidukiga kogutud fotodest on võimalik täpseid mudeleid luua ja mudelite mahtu mõõta ka spetsiaalselt fotogramm-meetriaks, projekteerimiseks ja joonestamiseks mitte ettenähtud tarkvaraga.

Uurimistöö eesmärgiks on leida vastus küsimustele:

1. Kui palju erinevad mehitamata õhusõidukiga kogutud fotodest moodustatud jäätmeaunade mudelid laserskaneerimise andmetest loodud mudelitest?

2. Kas antud meetodil kogutud fotodest moodustatud mudel on jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega?
3. Kas kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustatud mudel annab mahtude mõõtmisel paremaid tulemusi, kui kattuvus 80% x 80%?
4. Kas tähiste arvu suurenedes paraneb mudeli täpsus?
5. Kas ilma tähisteta moodustatud mudel on jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega?
6. Kas jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega mudeleid on võimalik moodustada ja mudelite mahtu mõõta ka spetsiaalselt fotogramm-meetriaks, projekteerimiseks ja joonestamiseks mitte ettenähtud tarkvaraga?

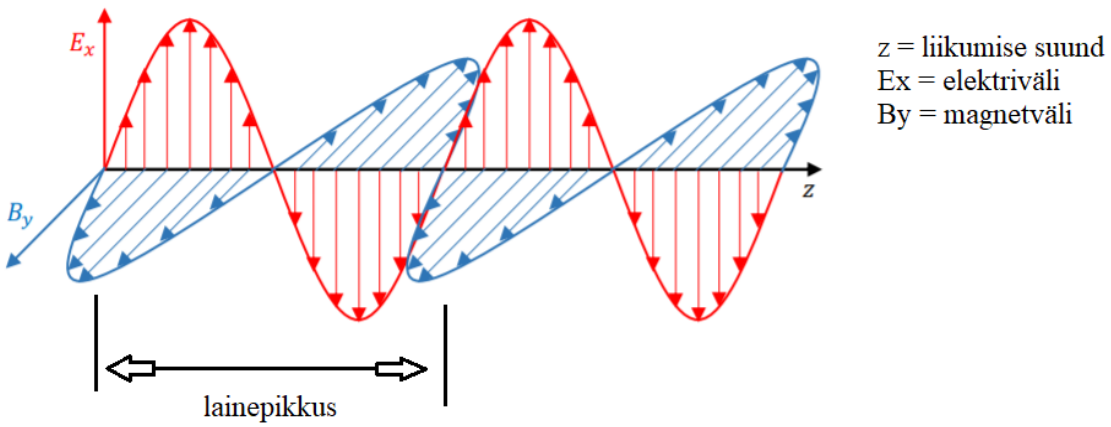
Magistritöö valmimisele aitasid kaasa juhendajad Natalja Liba ja Kaupo Kokamägi. Autor tänab oma juhendajaid suure toe ja abi eest käesoleva magistritöö valmimisse. Lisaks avaldab autor tänu osaühingule 3D PUNKT ja geodeedile Martin Sirk, kes aitas terrestrilise laserskaneerimise andmete kogumisel.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Digitaalse fotogramm-meetria komponendid

1.1.1 Elektromagneetiline kiirgus

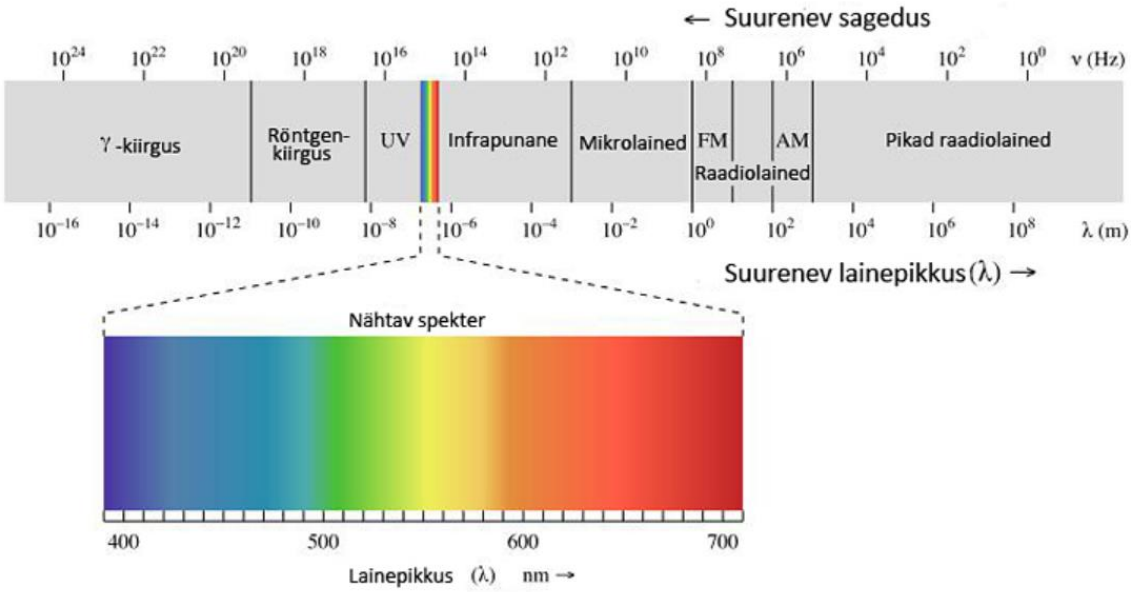
Elektromagneetiline kiirgus on energia vorm, mis ulatub madala energiatasemega raadiolainetest kuni kõrge energiatasemega gamma kiirteni. Elektromagneetiline kiirgus koosneb ajas muutuvatest elektri- ja magnetväljadest, mis levivad lainena valguskiirusel. Elektri- ja magnetvektorite tugevus muutub korrapäraselt maksimaalse väärtuseni ühes suunas ja maksimaalse väärtuseni vastassuunas, läbides keskpunktis nulli, olles alati samas faasis ja sama amplituudide suhtega igas ruumipunktis ja ajahetkes (joonis 1.1). Kui laine on moodustunud, liigub see otse allikast edasi ega vaja liikumiseks keskkonda (Jones ja Vaughan 2010)



Joonis 1.1 Elektromagnetlaine (Khoshnoud et al. 2020).

Looduses esineb erineva sageduse ja lainepikkusega elektromagnetlaineid, ning need parameetrid eristavad erinevaid tüüpe nagu nähtav valgus, röntgenkiirgus ja raadiolained. Seda jada nimetatakse elektromagnetiliseks spektriks (Jones ja Vaughan 2010). Inimsilm näeb ainult kitsast vahemikku, mida nimetatakse nähtavaks spektriks. See mahub ultraviolett- ja infrapunakiirguse vahele ning esindab kõiki vikerkaare värve (McHugh

2018). Nähtav valgus asub spektril vahemikus 380 nm kuni 700 nm (joonis 1.2). Kõige lühemad lainepikkused on lillad ja pikimad punased (Rubio 2021).



Joonis 1.2. Elektromagnetiline spekter (Stief 2014).

Valgus koosneb lainetest ning igat tüüpi valgusel on spetsiifiline lainepikkus. Lühema lainepikkusega valgusel on rohkem energiat ning see läbib objekte paremini kui pikema lainepikkusega valgus. Lainepikkused elektromagnetilises spektris ulatuvad mitmest kilomeetrist madalama energiaga lainepikkusel kuni 1 x 10^{-13} meetrini kõrgema energiaga lainepikkusel (Rubio 2021).

1.1.2 Digitaalse foto jäädvustamine

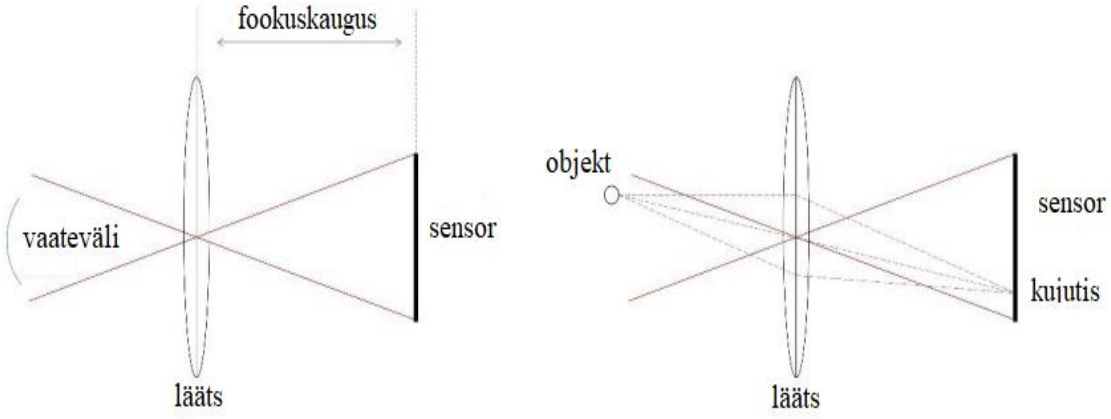
Digitaalse foto saamiseks muudetakse objektilt kiirgav või peegelduv valgus elektriliseks signaaliks, mõõdetakse ning salvestatakse. Salvestatud ala või vaateväli on võrdeline fookuskaugusega ja pöördvõrdeline sensori suurusega (joonis 1.3). Vaatevälja kirjeldab valem (Clodius 2007)

$$FoV = 2\,arctan(\frac{w}{2f}) \approx \frac{w}{f}\,, \qquad (1.1.)$$

kus FoV on maksimaalne ala, mida kaamera suudab jäädvustada;

w -sensori suurus;

f -fookuskaugus.



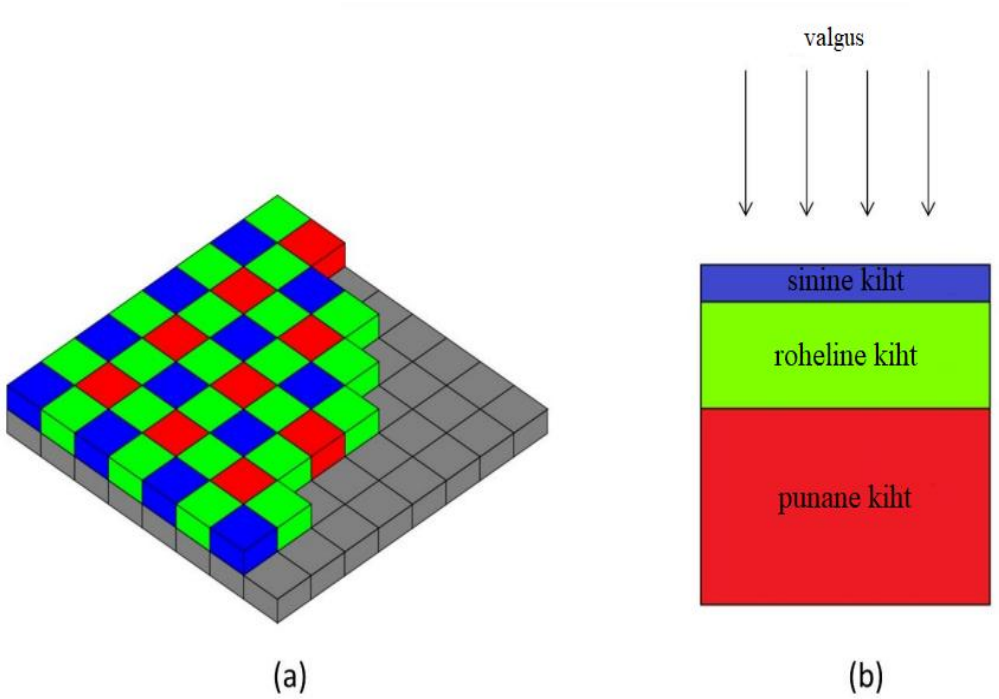
Joonis 1.3. Kaamerasüsteemi vaateväli vasakul ja andurile langevad valguskiired ning kujutise tekkimine paremal (O'Connor *et al.* 2017).

Elektroonilised kujutised moodustuvad valguskiirguse elektrilisteks signaalideks muutmise teel. Reas või maatriksis paiknevaid kristallilisest ränist valmistatud pooljuht sensoreid kasutatakse tavaliselt optoelektrooniliste muunduritena (Sandau 2010). Valgus tekitab pooljuhist sensoris elektrilise laengu, mis mõõdetakse igas sensori osas, tekitades nii tervikliku pildi (O'Connor *et al.* 2017). Antud tehnoloogia põhineb fotoelektrilisel efektil, mille puhul materjaliga kokkupuutuv valgus ergastab elektrone. Elektronide arv suureneb võrdeliselt valguse intensiivsusega, st footonite (valguskvantide) arvuga (Sandau 2010).

Suurem osa tavakaameraid kasutab värvide eristamiseks sensori peal paiknevaid värvifiltrite mosaiike (CFA), mis kitsendavad sensorite poolt salvestatavaid lainepikkuseid, muutes need tundlikuks punasele, sinisele või rohelisele valgusele. Värvilise kujutise saamiseks, interpoleerib kaamera samavärvilistelt valgustundlikelt elementidelt saadava informatsiooni kogu sensori ulatuses. Selle protsessi väljundiks on kolm erinevat värviriba, mis esindavad värvilise kujutise punast, rohelist ja sinist osa. Tavaliselt kasutatakse Bayeri mustri järgi paigutatud värvifiltrite mosaiike (joonis 1.4 a), millest pooled on rohelised, kuna inimese silm on rohelise värvi suhtes kõige tundlikum (O'Connor *et al.* 2017).

Mõned kaamerad ei kasuta värvide eristamiseks CFA-d, vaid sensorit, mis koosneb kolmest valgustundlike elementide kihist (joonis 1.4 b). Erineval sügavusel paiknevad kihid on tundlikud erinevatele värvidele, kuna valguse läbitungimisvõime sõltub lainepikkusest. Sellised pildiandurid on reeglina kallimad, kui samaväärse eraldusvõimega CFA sensorid, kuid nende väljundid ei vaja demosaiikimist ning on leitud, et nendega on võimalik

jäädvustada teravaid ääri parema kvaliteediga. Siiski pole selliste sensorite kasutamine laialt levinud ning nende sobivust geodeetiliste tööde jaoks tuleks veel testida (O'Connor *et al.* 2017).



Joonis 1.4. Värvide eristamiseks kasutatakse kas värvifiltrite võrgustikku, näiteks Bayeri mosaiiki (a) või harvem otsest pildiandurit (b), kus erineva lainepikkusega valgus (värv) tungib erinevale sügavusele (O'Connor *et al.* 2017).

Väljundina toodavad digikaamerad tavaliselt RAW pildifaili (O'Connor *et al.* 2017). RAW on digitaalse pildifailivormingu üldnimetus, mis sisaldab pildi koguandmeid sellisel kujul, nagu kaamera sensor selle jäädvustas. Algfail sisaldab jäädvustatud pildi kõiki andmeid ning sellele on suurem värvisügavus, üldiselt 30 või 36 bitti piksli kohta. Seetõttu on sellised failid väga suured, välja arvatud siis, kui neid on kadudeta tihendatud (Quieregatto *et al.* 2020). Lisaks teeb kaamera RAW failist töödeldud versiooni, mis salvestatakse 8-bitisesse JPEG pildiformaati. JPEG failid on oluliselt väiksemad kui RAW failid, kuna töötlemise ajal pakitakse andmed kokku (O'Connor *et al.* 2017).

Foto üldise valgustatuse määravad ära kolm kaamera põhiseadet: ISO ehk valgustundlikkus, säriaeg ja ava suurus. Kõrgemad ISO väärtused näitavad suurenenud sensori tundlikkust ja tulemuseks on heledamad kujutised. Samas võimendub ka müra, ning kõrgete ISO väärtuste korral võib pildi kvaliteet märgatavalt halveneda (O'Connor *et al.* 2017). Säriaeg määrab,

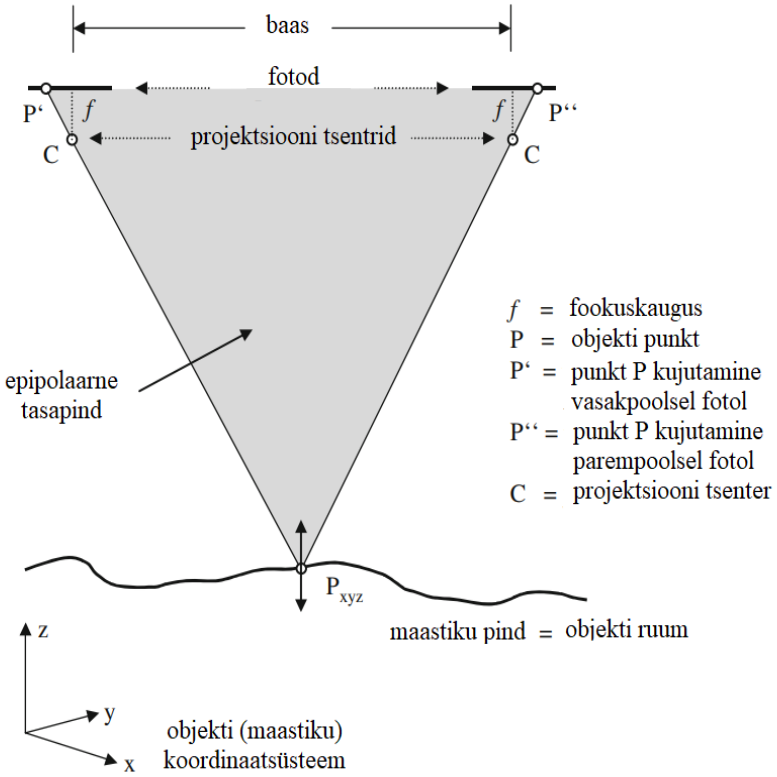
kui pika aja jooksul võimaldatakse valgusel kaamerasse siseneda. Pika säriaja korral muutuvad liikuvad objektid uduseks. Mida lahtisem on ava, seda rohkem valgust jõuab mingi säriaja vältel sensorini ning seda heledama valgustatusega on pildistatud foto. Ava vähenedes suureneb pildi teravussügavus (McHugh 2018).

1.1.3 Fotogramm-meetria printsiibid

Fotogramm-meetriat võib defineerida kui fotode mõõtmise teadust, olles üks traditsioonilise geodeesia osadest, mis kuulub kaugseire valdkonda. Määrates vahekauguseid ja pindalasid, on põhiülesandeks fotol oleva mistahes punkti koordinaatide hankimine, millest on seejärel võimalik arvutada geomeetrilisi andmeid või koostada kaarte. Ühelt fotolt on võimalik saada üksnes kahemõõtmelised koordinaadid. Selleks, et saada kolmemõõtmelised koordinaadid, peame leidma viisi, kuidas saada kolmas mõõde (Linder 2016).

Inimene on võimeline nägema objekte ruumiliselt, ning hindama selle abil objekti ja enda vahelist kaugust. Nähes ümbritsevat maailma kahe silmaga, mis saavad optilist teavet keskse perspektiivina üksteisest umbes 6,5 cm kauguselt, jõuab ajju kaks üksteisest veidi erinevat pilti. Need ühendatakse ajus, et saada ruumiline vaade. Seda stereoskoopilise vaatamise põhimõtet kasutatakse fotogramm-meetrias kolmemõõtmelise teabe saamiseks (Linder 2016).

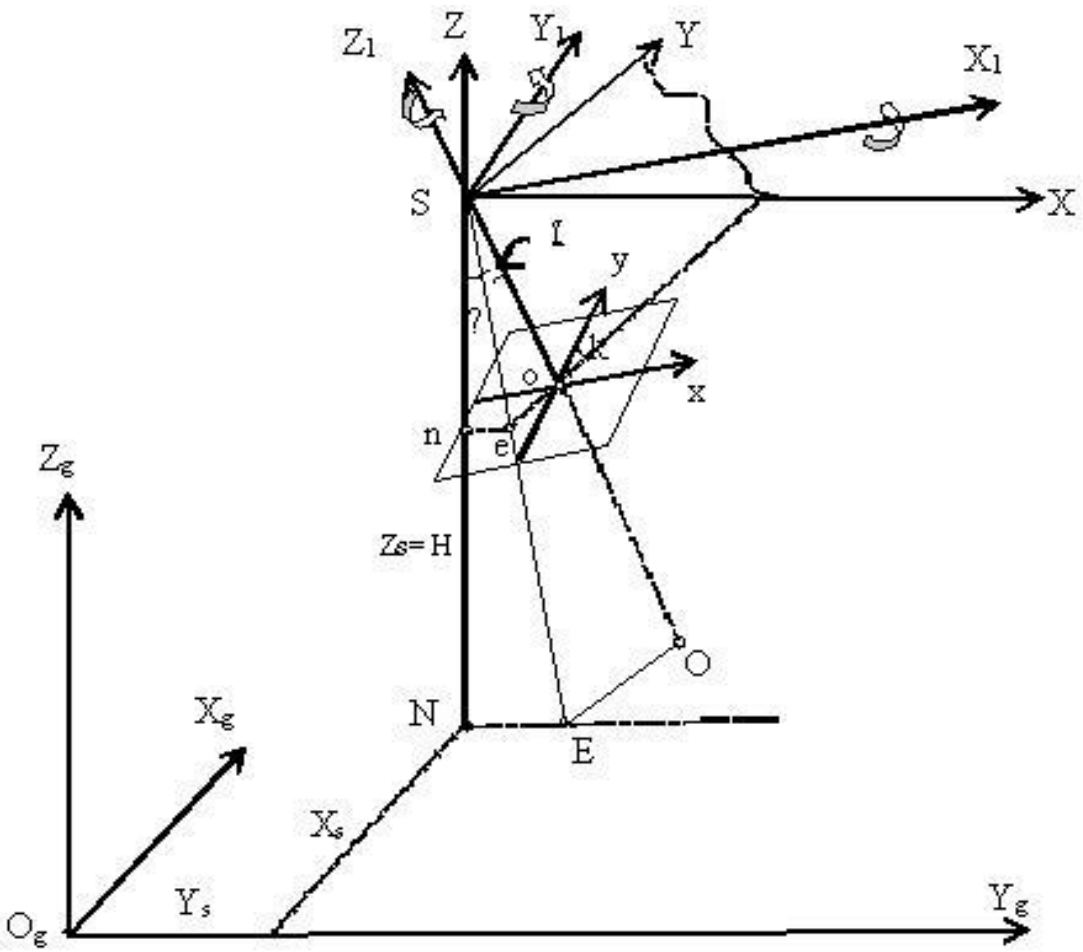
Kui meil on samast objektist kaks või enam fotot, mis on tehtud erinevatest asukohtadest, saame lihtsasti arvutada mõlemal fotol kujutatud punkti P kolmemõõtmelised koordinaadid (x, y, z). Selleks on vaja püstitada kiirte võrrandid [$P' \rightarrow P$] ja [$P'' \rightarrow P$] ning pärast seda, arvutada nende lõikepunkt (joonis 1.5). See on fotogramm-meetria põhiülesanne. Olles selleni jõudnud, on võimalik digitaliseerida punkte, jooni ja alasid kaartide valmistamiseks või arvutada vahemaid, pindalasid, mahtusid ja kaldeid (Linder 2016). Fotogramm-meetrilisi meetodeid saab rakendada põhimõtteliselt igas olukorras, kus mõõdetavat objekti saab fotograafiliselt jäädvustada (Luhmann *et al.* 2006).



Joonis 1.5. Orienteeritud stereomudeli geomeetria. Kõrguse muutumine punktis P (pinnal) viib foto punktide P′ ja P″ lineaarse liikumiseni (vasakule-paremale) mööda pildistamise baasi (Linder 2016).

Selleks, et määrata pildi järgi kindlaks punkti koordinaadid mingil maa-alal, on vaja teada projektsioonitsentri asukohta pildi suhtes ja ülesvõtte ruumilist paiknemist fotografeerimise momendil. Aerofoto ja projektsioonitsentri S asend ruumis geodeetiliste koordinaatide süsteemi suhtes on määratud, kui on teada aerofotol 9 orienteerimise elementi: 3 sisemist ja 6 välist orienteerimise elementi (Liba 2005).

Suurusi, mille abil on võimalik määrata projektsioonitsentri asukoht pilditasapinna suhtes, nimetatakse sisemise orienteerimise elementideks. Sisemise orienteerimise elemendid võimaldavad taastada projekteeritavate kiirte seost fotografeerimise momendil. Aerofoto sisemise orienteerimise parameetrid on x_0, y_0 ja f = So. Suurusi, mis määravad kindlaks projektsioonitsentri ja pilditasapinna geodeetilises koordinaatide süsteemis antud ala fotografeerimise momendil, nimetatakse välise orienteerimise elementideks. Välise orienteerimise elemente on vaja teada aerofotode transformeerimisel ja maastiku punktide koordinaatide määramisel ruumilise otselõike meetodil. Kasutusel on kaks välise orienteerimise elementide süsteemi. Välise orienteerimise elementide süsteemi on näha joonisel 1.6 (Liba 2005).



Joonis 1.6.Välise orienteerimise elementide süsteem (Liba 2005).

Välise orienteerimise elemendid on kolm joonelist elementi XS, YS, ZS ja kolm nurgalist elementi α, ω, κ. α on AF pikikaldenurk (nurk NSE tasandis XSN), ω on AF põikikaldenurk (nurk eSo tasandis YSo), κ on AF pöördenurk aerofoto tasandis. II süsteemi nurgalised elemendid kujutavad aerofoto koordinaatide süsteemiga paralleelse fotogramm-meetrilise süsteemi vastavate telgede ja geodeetilise koordinaatide süsteemi telgede vahelisi nurki. Pärast AF kolme sõltumatut pööret α, ω, κ võrra, on fotogramm-meetriliste koordinaatide abisüsteem SX1Y1Z1 asendis SXYZ, ja paralleelne geodeetilise süsteemiga OgXgYgZg (Liba 2005).

1.1.4 Mehitamata õhusõiduki fotogramm-meetria

Mehitamata õhusõidukilt pildistatud fotodel põhinevat fotogramm-meetriat nimetatakse UAV fotogramm-meetriaks (*UAV photogrammetry*). UAV fotogramm-meetria ühendab

endas terrestrilise- ja aerofotogramm-meetria ning loob uusi võimalusi lähedalt mõõdistamiseks. Tulemuseks on odav alternatiiv klassikalisele aerofotogramm-meetriale (Eisenbeiß 2009). UAV fotogramm-meetria võib osaliselt asendada andmete hankimist tavapärastel meetoditel ning pakub alternatiivi paljudes valdkondades teadusest kuni erasektorini (Remondino *et al.* 2012). Kasutajale pakuvad mehitamata õhusõidukid paindlikkust lennu aja ja planeerimise, kui ka saadaolevate andurite osas.

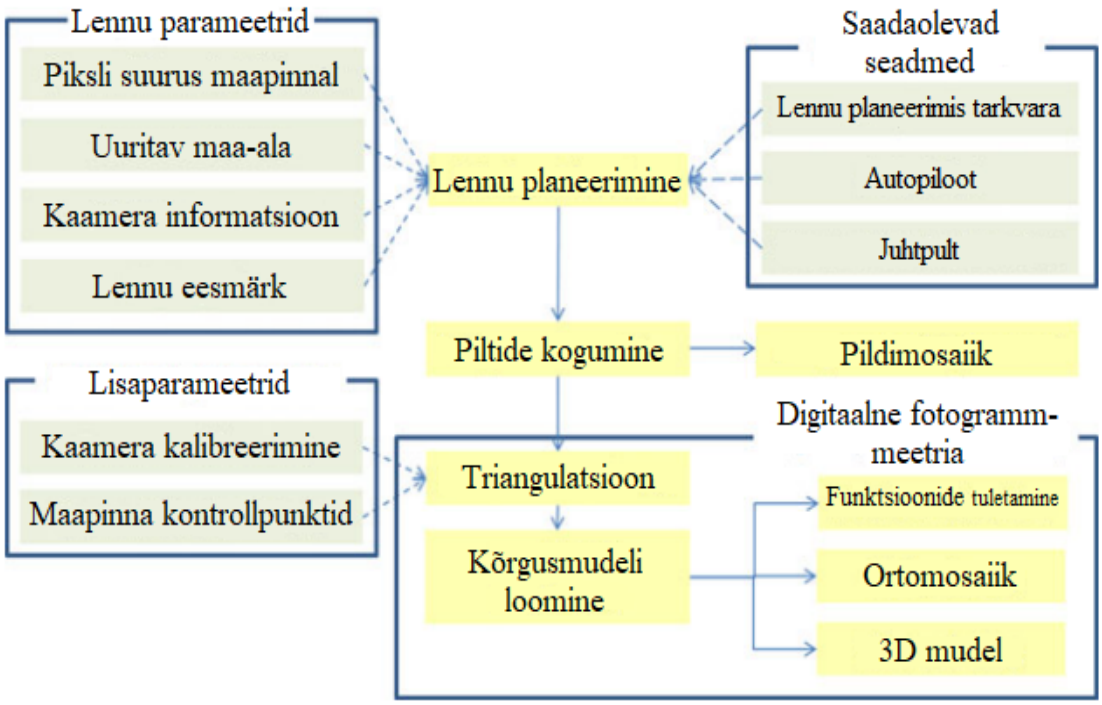
UAV fotogramm-meetria täidab tühimiku tavapärase kaugseire ja lähifotogramm-meetria vahel. See ei puuduta ainult mõõtkava maapealse eraldusvõime tähenduses, vaid võimalust realiseerida peaaegu suvaline kaamera asukoht ja perspektiiv (Remondino ja Gerke 2015). Aerofotogramm-meetria võimaldab katta suuri maa-alasid. Lähifotogramm-meetria ja UAV fotogramm-meetria sobib peamiselt üksikute objektidega seotud uuringute tegemiseks. Erinevate fotogramm-meetriliste tüüpide võrdlus on toodud välja tabelis 1.1 (Gerke 2018).

Tabel 1.1. Fotogramm-meetria tüüpide võrdlus (Gerke 2018)

Tüüp	Aerofotogramm-meetria	Lähifotogramm-meetria	UAV fotogramm-meetria
Jäädvustamise nurk	vertikaalne, kaldnurk	horisontaalne, kaldnurk	vertikaalne, horisontaalne, kaldnurk
Pindala	1-n km^2	üksikobjektid	üksikobjektid umbes 15 ha (multirootor), 45 ha (lennuki tüüpi)
Resolutsioon	> = 5 cm	mm	cm või vähem
Läbiviimine	olenevalt ilmast, aastaajast, eelarvest	nii tihti kui vajalik, kui välised piirangud seda võimaldavad	nii sageli kui vajalik, kui välised ja regulatiivsed piirangud seda võimaldavad
Optiline sensor	RGB, multispektraal, hüperspektraal, termo	RGB, NIR, termo	RGB, multispektraal, hüperspektraal, termo

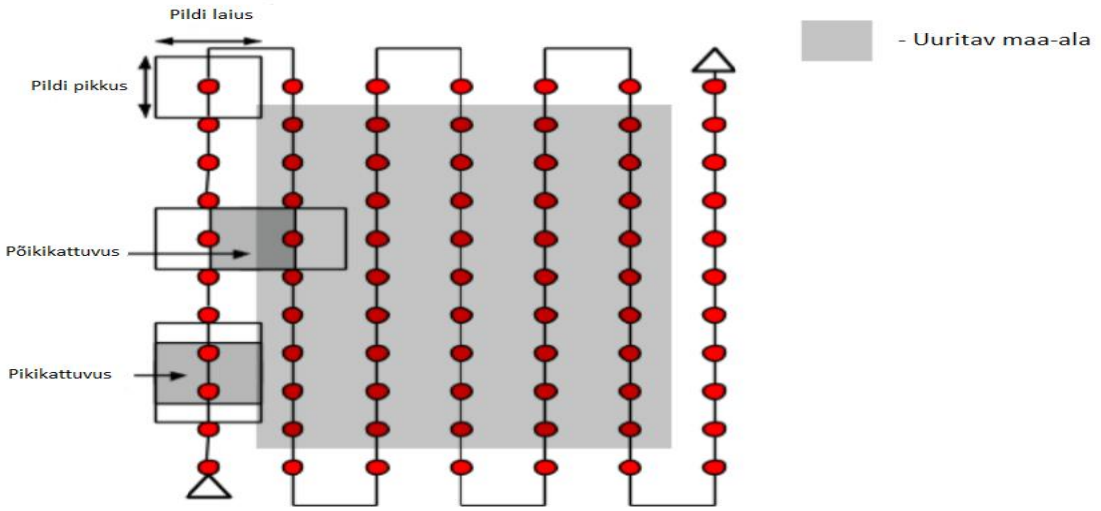
Klassikaline mehitamata õhusõidukiga teostatav uuring nõuab lennu planeerimist ning maapealsete kontrollpunktide mõõtmist georefereerimise eesmärgil. Pärast fotode kogumist, on neid võimalik kasutada omavaheliseks sidumiseks ja mosaiikimiseks või fotogramm-meetrilise protsessi sisendina (Neitzel ja Klonowski 2011). Sellisel juhul toimub kõrgusmudeli genereerimise eesmärgil kaamera kalibreerimine ja kujutise triangulatsioon. Neid tooteid saab hiljem kasutada ortomosaiigi või 3D mudeli loomiseks.

Mehitamata õhusõidukilt kogutud andmete kogumise ja töötlemise protsessi on kujutatud joonisel 1.7 (Nex ja Remondino 2014).



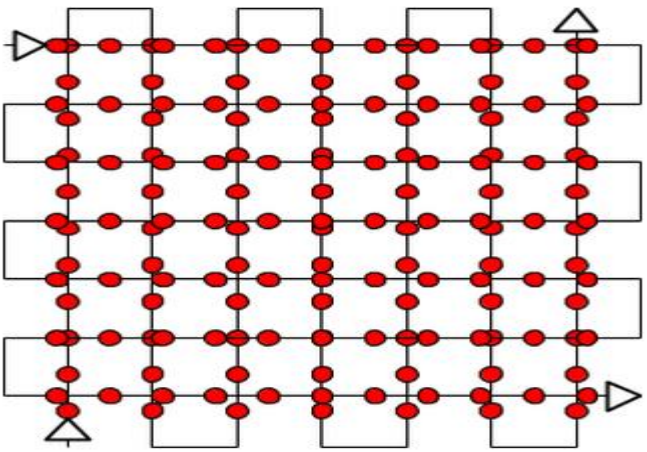
Joonis 1.7. Mehitamata õhusõidukilt kogutud andmete kogumise ja töötlemise protsess (Nex ja Remondino 2014).

Teostatav lend planeeritakse spetsiaalse tarkvaraga, alustades huvipakkuva piirkonna tundmaõppimisest, nõutavast piksli suurusest maapinnal ja mehitamata õhusõiduki külge integreeritud kaamera sisemistest parameetritest. Kaamera perspektiivitsentrid arvutatakse lennuribade piki- ja põiksuunalise kattuvuse fikseerimiseks (joonis 1.8). Kõik need parameetrid varieeruvad sõltuvalt lennu eesmärgist. Üksikasjalike 3D mudelite loomine nõuab suurema kattuvuse ja madalama kõrgusega lende, et saavutada väiksem GSD. Kiiremad lennud hädaolukorra või suurema maa-ala mõõdistamiseks võivad olla madalama resolutsiooniga (Nex ja Remondino 2014).



Joonis 1.8. Aerofotode piki- ja põikikattuvus (Image acquisition 2021).

Enamikul juhtudel on soovitatav pildistamisel kasutada paralleelseid lennutrajektoore. Aerofotode pikikattuvus peaks olema vähemalt 75% ja põikikattuvus 60%. Soovitud GSD tagamiseks tuleks kaamera hoida objekti suhtes võimalikult ühtlasel kõrgusel. Lennu kattuvus ja kõrgus tuleb kohandada sõltuvalt maastikust. Tasasel põllumaal on soovitatav kasutada vähemalt 80% piki- ja põikkattuvust. Metsa ja tiheda taimestikuga aladel suurendatakse kattuvust vähemalt 85%-ni ja lennatakse kõrgemal, et oleks lihtsam tuvastada kattuvate piltide sarnasusi. 3D kujutiste rekonstrueerimisel on soovitatav pildistamisel kasutada ristuvaid lennutrajektoore (joonis 1.9). Mitme lennuga projektidel peaksid erinevad lennud kattuma ja toimuma sarnaste ilmastikutingimuste korral (Image acquisition 2021).



Joonis 1.9. Ristuvad lennutrajektoorid (must joon) koos näidispiltidega (punased täpid) (Image acquisition 2021)

Enne mehitamata õhusõidukiga lendamist on vajalik maapinna kontrollpunktide mahamärkimine ja mõõtmine. UAV-d ei ole enamasti varustatud kõrgtäpse positsioneerimisseadmega. Mõõdistuse täpsuse tagamiseks tuleb kasutada piisavalt GCP-sid (Yang *et al.* 2020). Aladele, kuhu pole võimalik paigaldada spetsiaalseid tähiseid, võib kasutada ka olemasolevaid hästi äratuntavaid objekte, nagu näiteks teekattemärgistus. Nende punktide koordinaadid on võimalik määrata enne või pärast lendu, kasutades RTK GNSS vastuvõtjat või elektrontahhümeetrit (Eisenbeiß 2009). Soovitav on kasutada 5-10 GCP-d, kuna suurema hulga maapinna kontrollpunktide lisamine ei aita täpsust oluliselt suurendada (Do more GCPs…. 2018).

Liikumise struktuuri tehnikate (SfM) arendamine on muutnud andmete hankimise ja töötlemise võrreldes klassikalise digitaalse fotogramm-meetriaga lihtsamaks. SfM põhineb masinnägemisel, ning lahendab isekalibreerimise ning pildi geomeetria abil automaatselt kaamera sise- ja välisparameetrid, kasutades selleks piltide sobitamist ning kiirtekimbu optimeerimist (Jaud *et al.* 2020). Kiirtekimbu optimeerimisel kasutatakse mittelineaarset vähimruutude meetodit, mis võimaldab viia modelleerimisel tekkiva vea miinimumini (Agarwal *et al.* 2010). Kiirtekimbu optimeerimine StM fotogramm-meetrias on mitmevaateline optimeerimine, mis põhineb kollineaarsusvõrranditel (Jaud *et al.* 2020).

Sarnaselt on SIFT algoritm muutnud sidepunktide tuvastamise lähenemisviisi, võimaldades mõõtkavast- ja rotatsioonist muutumatute kujutiste sobitamist (Jaud *et al.* 2020). Piltide kokkusobitamisel on olulise tähtsusega punktide vastavus. Esmalt leitakse SIFT algoritmiga sidepunktide asukohad piltidel ning seejärel antakse neile spetsiifilised väärtused. Lõpptulemusena toimub piltide andmete transformeerimine mõõtkavast sõltumatusse koordinaatsüsteemi (Snavely 2008).

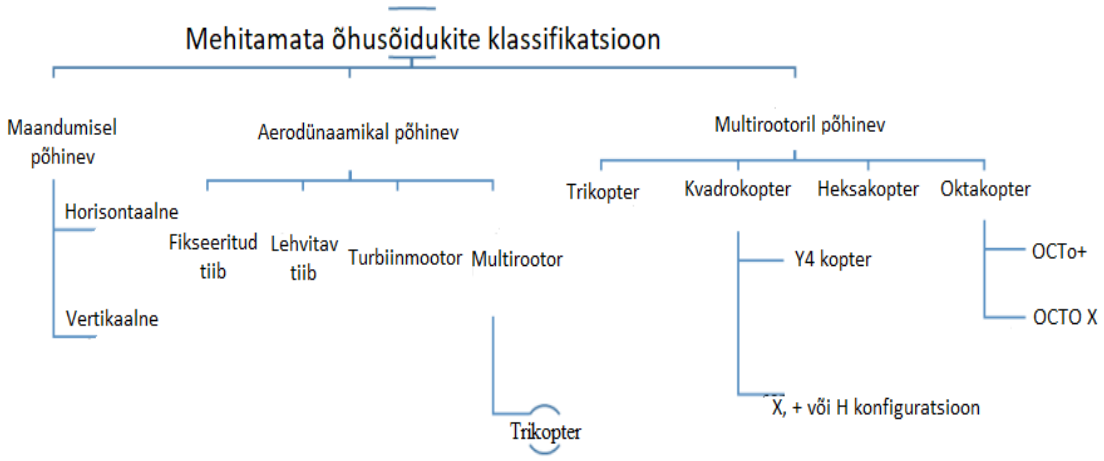
1.2 Mehitamata õhusõiduk

1.2.1 Mehitamata õhusõidukite klassifitseerimine

Vastavalt rahvusvahelisele definitsioonile on mehitamata õhusõiduk üldine õhusõiduk, mis on projekteeritud toimima ilma pardal oleva piloodita (Nex ja Remondino 2014). Mehitamata õhusõidukeid saab juhtida autonoomselt või kaugjuhtimisega (Singhal *et al.*

2018). Minevikus ajendasid UAV-süsteemide ja -platvormide väljatöötamist eelkõige sõjalised eesmärgid ja rakendused. Geodeesias kasutati mehitamata õhusõidukit esmakordselt 1970. aastate lõpus, ning nende kasutamine on viimastel aastakümnetel tänu tehnoloogia ja tarkvara arengule märkimisväärselt kasvanud (Nex ja Remondino 2014).

Välja on töötatud väga mitmesuguseid mehitamata õhusõidukite süsteeme. Mehitamata õhusõidukeid saab liigitada maandumise tüübi, ehituse ja mootorite arvu (joonis 1.10) või kaalu ning lennuulatuse järgi (tabel 1.2) (Singhal *et al.* 2018).

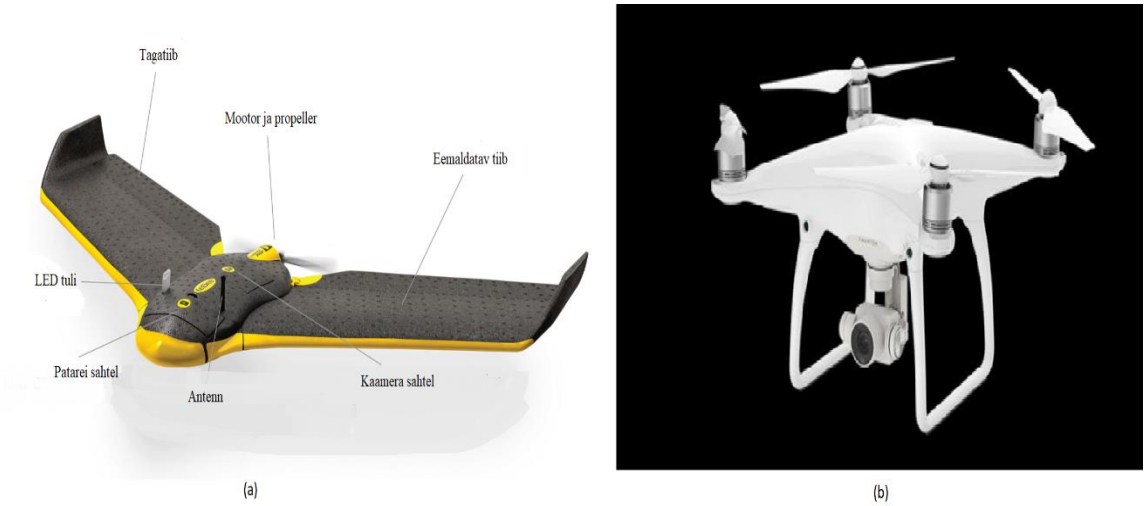


Joonis 1.10. Maandumise tüübil, ehitusel ja mootorite arvul põhinev mehitamata õhusõidukite klassifikatsioon (Singhal *et al.* 2018).

Tabel 1.2. Mehitamata õhusõidukite klassifikatsioon kaalu ja lennuraadiuse alusel (Singhal *et al.* 2018)

Tüüp	Maksimaalne kaal	Maksimaalne lennuraadius	Kategooria
Nano	200 g	5 km	fikseeritud tiib, multirootor
Mikro	2 kg	25 km	fikseeritud tiib, multirootor
Mini	20 kg	40 km	fikseeritud tiib, multirootor
Kerge	50 kg	70 km	fikseeritud tiib, multirootor
Väike	150 kg	150 km	fikseeritud tiib
Taktikaline	600 kg	150 km	fikseeritud tiib
MALE	1000 kg	200 km	fikseeritud tiib
HALE	1000 kg	250 km	fikseeritud tiib
Raske	2000 kg	1000 km	fikseeritud tiib
Üliraske	2500 kg	1500 km	fikseeritud tiib

Horisontaalse tõusu ja maandumisega mehitamata õhusõidukite peamiseks eeliseks on nende suur lennukiirus ja sujuv maandumine. Horisontaalset tõusu kasutavad peamiselt fikseeritud tiibadega lennukitüüpi mehitamata õhusõidukid (joonis 1.11 a). Vertikaalsel maandumisel põhinevate mehitamata õhusõidukite peamiseks eeliseks on see, et need on kasutatavad kitsastes tingimustes ning nendega on võimalik kohapeal hõljuda. Vertikaalset tõusu kasutavad peamiselt multirootor tüüpi (joonis 1.11 b) mehitamata õhusõidukid (Singhal *et al.* 2018).



Joonis 1.11. Fikseeritud tiibadega mehitamata õhusõiduk eBee (a) (Sykora-Bodie *et al.* 2017) ja multirootor tüüpi mehitamata õhusõiduk DJI Phantom 4 (b) (Airplane Clipart Transparent PNG)

Fikseeritud tiivaga mehitamata õhusõiduki puhul ei tulene tõstevõime mitte tiibade liikumisest, vaid läbi õhu edasi liikumisest (Eisenbeiß 2009). Kui fikseeritud tiib voolavast õhust kiiresti läbi viia, tekib tiiva kumerdatud osa peale madalam rõhk, kuid tiiva all jääb rõhk muutumatuks. Rõhkude muutus tekitab tõstejõu, mis tõstab õhusõiduki ülesse. Fikseeritud tiivaga mehitamata õhusõidukid vajavad lennu alustamiseks suuremat algkiirust. Samuti ei ole nendega võimalik hõljuda ühes kohas ning nad ei suuda säilitada madalat kiirust (Singhal *et al.* 2018).

Lehvitavate tiibadega mehitamata õhusõidukid on inspireeritud putukatest ja lindudest. Lehvitavad tiivad on oma keerulise aerodünaamika tõttu komplekssed. Erinevalt fikseeritud tiivaga mehitamata õhusõidukist, võimaldavad lehvitavad UAV-d stabiilseid lende tuulistes oludes. Insenerid ja bioloogid on teinud intensiivseid uuringuid tiibade lehvitamise kohta nende ainulaadsete manööverdamisvõime eeliste tõttu (Singhal *et al.* 2018). Turbiinmootoriga mehitamata õhusõiduk ühendab fikseeritud tiiva ja multirootori eeliseid.

Sellel on nii fikseeritud tiiva pikk lennuaeg, kui multirootori manööverdus- ja hõljumisvõime (Maqsood ja Go 2012).

Multirootor UAV-d on võimelised vertikaalseks õhkutõusmiseks, maandumiseks ning hõljumiseks. Multirootor on konstrueeritud vastavalt mootorite ja propellerite arvule ning asukohale raamil. Nende hõljumis- ja kiiruse säilitamise võime muudab need ideaalseteks vahenditeks seire teostamisel. Ainus probleem multirootorite puhul on see, et nende energiatarve on suurem ning seetõttu on piiratud ka lennuaeg. Multirootorid jagunevad mootorite arvu ja paigutuse alusel kindlatesse kategooriatesse (Singhal *et al.* 2018). Multirootor UAV-d suudavad tänapäeval kanda juba suuremat lasti ning need on stabiilsemad ja avarii oht on väiksem, kuna ühe rootori tõrke tõttu õhusõiduk veel alla ei kuku (Niethammer *et al.* 2009).

Mehitamata õhusõidukitele on võimalik integreerida erinevat tüüpi sensoreid. Andmete kogumiseks kasutatavad sensorid võivad oma tehnoloogia ja jõudluse poolest olla väga erinevad ning arvestada tuleb erineva mõõtmistäpsusega. RGB kaamera (joonis 1.12 a) pakub kõrge ruumilise eraldusvõimega kiirguse väärtusi punases, rohelises ja sinises spektriribas. RGB anduri ruumiline eraldusvõime määrab saadud piltide kvaliteedi. RGB kaameraga kogutud piltidest on võimalik luua kõrgusmudeleid ja ortofotomosaiike (Balestrieri *et al.* 2021).

Spektraalsensorid võib tulenevalt spektriribade arvust ja iga spektririba laiusest liigitada multispektraal- või hüperspektraalsensoriteks ning nad mõõdavad teabe hankimiseks sihtmärgist peegeldunud, kiiratud ja edastatud kiirgust. Sellist tüüpi sensor (joonis 1.12 b) suudab tuvastada lainepikkusi valguse nähtavast spektrist ning inimsilmale mittenähtavast lähiinfrapunasest spektripiirkonnast. Spektraalsensoreid kasutatakse taimede füsioloogilise seisundi ja taimestikuindeksi mõõtmiseks. Soojuskaamerad (joonis 1.12 c) tuvastavad elektromagnetilise energia infrapuna lainepikkuse vahemikus, muutes selle pildiks. Neid kasutatakse pinnatemperatuuri ja veestressiindeksi mõõtmiseks (Balestrieri *et al.* 2021).

Joonis 1.12. Mehitamata õhusõidukitel kasutatavad sensorid. RGB kaamera (a), multispektraal kaamera (b), termokaamera (c) ja LiDAR (d) (Thompson *et al.* 2017).

LiDAR sensorid (joonis 1.12 d) mõõdavad kaugust sihtpunktini, valgustades seda ja analüüsides peegeldunud valgust. Sellist tüüpi sensor on võimeline tagama laia vaatevälja (FOV) ja suure täpsuse. LiDAR sensori kasutamist mehitamata õhusõidukil võib takistada seadme suurus ja kaal. LiDAR sensoriga kogutud andmetest on võimalik luua üksikasjalikke digitaalseid pinna- ja maastikumudeleid, mis katavad suuri maa-alasid (Balestrieri *et al.* 2021).

1.2.2 Mehitamata õhusõidukite lennutamise reeglid ja seadusandlus

Mehitamata õhusõiduki käitaja on füüsiline või juriidiline isik, kes käitab või kavatseb käitada mehitamata õhusõidukit. Eestis kehtib Euroopa Komisjoni määrus 2019/947, mis rakendab riskipõhist lähenemist ning ei erista mehitamata õhusõidukite puhul harrastus- ja äritegevust. Määrus võtab arvesse nii mehitamata õhusõiduki kaalu, spetsifikatsiooni kui kavandatud käitamise. Eristatakse mehitatud õhusõiduki süsteemi käitamist käitamiskategooriate alusel. Riskitaseme põhjal on loodud kolm erinevat kategooriat: 1) avatud kategooria, 2) erikategooria, 3) sertifitseeritud kategooria (Droonide lennutamise reeglid 2021).

Avatud kategooria on väikseima riskiga ning annab käitajale enim vabadust. Käitamine on käitamispiirangute, kaugpiloodile ja mehitamata õhusõidukitele esitatavate nõuete alusel jagatud omakorda kolmeks alamkategooriaks. Erikategooria hõlmab riskantsemat käitamist. Ohutuse tagamiseks tuleb käitajal enne mehitamata õhusõiduki kasutamist taotleda Transpordiametilt vastav luba ning viia läbi riskianalüüs. Sertifitseeritud kategoorias on

ohurisk nii kõrge, et ohutus tuleb tagada mehitamata õhusõiduki süsteemi käitaja ja õhusõiduki sertifitseerimisega Euroopa Liidu Lennundusohutusameti (EASA) poolt (Droonide lennutamise reeglid 2021).

Mehitamata õhusõidukite süsteemide käitajad peavad end registreerima (Mehitamata õhusõidukite käitamise normide ja menetluste kohta (EL) 2019/947 2019, § 14 lg 5):

1) kui nad käitavad avatud kategooria mehitamata õhusõidukeid, mille maksimaalne stardimass on 250 g või rohkem, või mis kokkupõrke korral võivad inimesele üle kanda kineetilise energia hulga üle 80 džauli;
2) kui nad käitavad avatud kategooria mehitamata õhusõidukeid, millele on paigaldatud andur, mis on võimeline koguma isikuandmeid (välja arvatud juhul, kui see vastab direktiivile 2009/48/EÜ);
3) kui nad käitavad mehitamata õhusõidukit erikategoorias, sõltumata asjaomase õhusõiduki massist.

Mehitamata õhusõiduki käitaja peab registreerima end liikmesriigis, kus on füüsilise isiku puhul tema elukoht või juriidilise isiku puhul peamine tegevuskoht. Isik ei tohi korraga olla registreeritud rohkem kui ühes liikmesriigis. Eestis toimub registreerimine lennuohutuse järelevalve infosüsteemis (LOIS). Iga käitaja saab endale kordumatu registreerimisnumbri, mis koosneb 16 numbrist ja 3 salanumbrist ning kehtib ühe aasta. Registreerimisnumber tuleb kanda mehitamata õhusõidukile. Registreeritud isik võib lennata kõikides ELi liikmesriikides, samuti ka Šveitsis, Norras, Liechtensteinis ja Islandil (Droonide lennutamise reeglid 2021).

Loakohustuslikud alad (Droonide lennutamise reeglid 2021):

1) kontrollitav õhuruum (Tallinn, Tartu ja Ämari) ja lennuinfotsoonid (Pärnu, Kuressaare ja Kärdla);
2) keelu-, piirangu-, ajutiselt eraldatud, ajutiselt reserveeritud, langevarjuhüpete, motoparaplaanide ja tundliku faunaga alad;
3) kõikjal kõrgemal, kui 400 jalga (umbes 120 m) maapinnast.

Eestis sätestatud seaduste kohaselt tohib mehitamata õhusõidukit mittekontrollitavas õhuruumis käitada madalamal, kui kõrgusel 400 jalga (120 m) maa- või merepinnast nii, et see ei ohustaks inimesi, vara ega teisi õhusõidukeid. Loakohustuslikus alas tuleb mehitamata õhusõiduki lend Transpordiametiga kooskõlastada. Taotlus tuleb esitada

vähemalt kolm tööpäeva enne planeeritavat lendu, kui mehitamata õhusõidukit soovitakse käitada kõrgusel 400 jalga või madalamal (120 m) kontrollitud õhuruumi osas, või vähemalt seitse tööpäeva enne planeeritavat lendu, kui mehitamata õhusõidukit soovitakse käitada kõrgemal kui 400 jalga (120 m) (Droonide lennutamise reeglid 2021).

1.3 Mahu määramine

1.3.1 Andmete kogumine

Enamikes insenertehnilistes projektides toimub varude mõõtmine käsitsi. Sageli võib see olla aeganõudev ja ohtlik, eriti kui mõõdetakse kõrgeid puistanguid, mis nõuavad üles-alla ronimist. Maavara puistangute või prügilate mõõtmiseks on mitmeid mõõdistusvõimalusi. Meetodid, mida saab kasutada kolmemõõtmeliste koordinaatide saamiseks on järgmised: tahhümeetria, RTK GNSS, aerofotogramm-meetria ning õhus ja maapinnal toimuvad laserskaneerimised (Siriba *et al.* 2015).

Tahhümeetria on tavapärane mõõdistamise meetod, kus määratakse kaugused ja suunad instrumendist ning arvutatakse nende kaudu kolmemõõtmelised koordinaadid. Elektrontahhümeetrit on võimalik kasutada nii prismaga kui ilma. Mõõdistaja peab määrama kindlaks ja rajama seisupunktid ümber mõõdistatava objekti nii, et oleks tagatud nähtavus kogu objektile. Igast seisupunktist mõõdetakse maapinna määramiseks punktid puistangu jalamile ning seejärel punktid puistangu peale, et määrata ära puistangu pind. Vigade minimeerimiseks peab mõõdistaja valima punktid, mis kirjeldavad puistangu jalamit ja struktuuri võimalikult täpselt (Siriba *et al.* 2015).

GNSS kasutab satelliite punktide koordinaatide määramiseks maapinnal. GNSS mõõtmiste tulemuseks on nagu tahhümeetrias punktide kolmemõõtmelised koordinaadid. Kiirete ja täpsete andmete saamiseks kasutatakse RTK meetodit. GNSS RTK mõõtmiste täpsus on 2-5 cm, mida on võimalik pikema mõõteperioodiga parandada (umbes 30 sekundit). Mõõtmised GNSS RTK on lihtsasti teostatavad ühe inimese poolt. Negatiivne on aga see, et GNSS vastuvõtja seab piirangud taevalaotuse avatusele ning sellega ei saa töötada tiheda võrastiku või katusealuse all. Samuti tuleb minna ise mõõdetavasse punkti, mis kõrgete ja järskude puistangute puhul võib osutuda ohtlikuks (Siriba *et al.* 2015).

Terrestriline laserskaneerimine on mingil määral sarnane prismata tahhümeetrilisele mõõdistamisele. Terrestriline laserskaneerimine on lihtsasti teostatav ühe inimese poolt ja on võimeline andma väga täpseid tulemusi (Siriba *et al.* 2015). Laserskaneerimise mõõtmistäpsus on vahemikus 5-10 mm (Karsidag ja Alkan, 2012). Laserskaneerimisel luuakse punktipilve jäädvustamise teel kõrge kvaliteediga 3D kujutis. Terrestrilise laserskaneerimise negatiivseks küljeks on mõõtmata jäänud punktid, mis ei ole skanneri asukohast nähtavad ning mille tõttu võib tekkida vale ettekujutus puistangu kujust (Siriba *et al.* 2015).

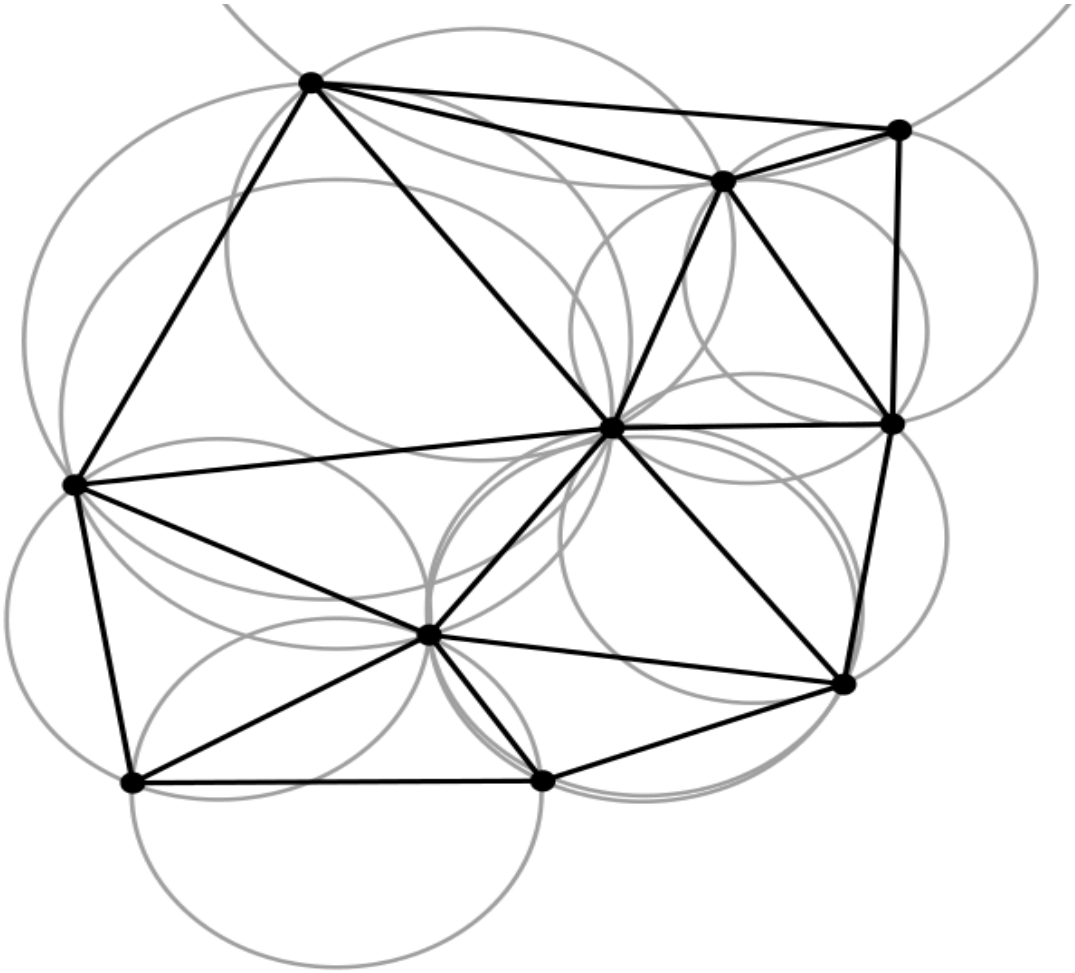
Aerolaserskaneerimine on mitmes mõttes sarnane aerofotogramm-meetriale, kus punktandmed mõõdetakse õhusõidukile paigaldatud anduriga. Mõlemas omistatakse punktidele kolmemõõtmelised koordinaadid ning tulemuseks on punktipilv. Kindlaks on tehtud, et täpse pinnamudeli loomiseks vajalik punktitihedus (punktide arv pinnaühiku kohta) sõltub uuritava pinna keerukusest. Seetõttu suudavad sellised punktiandmed taluda olulist andmete vähendamist, säilitades samal ajal kõrgusandmete vajaliku täpsuse (Liu *et al.* 2007).

1.3.2 Mahtude määramise metoodikad

Pinna modelleerimine on tänapäeval muutunud oluliseks elemendiks kolmemõõtmelise geograafilise teabe töötlemisel ja visualiseerimisel. Mudelid luuakse huvipakkuva piirkonna andmepunktide valimi põhjal. Pinna modelleerimise tehnikaid võib üldjoones jagada rasteripõhisteks interpoleerimismeetoditeks ja vektorpõhisteks triangulatsiooni meetoditeks. Rastris on kõrgusmudel loodud ruudustikuna, mis koosneb ristkülikukujulistest võrdse suurusega lahtritest, millele on interpoleeritud kõrgusväärtused. Vektoris on kõrgusmudel loodud ebakorrapäraselt paiknevatest kõrgusväärtust omavatest punktidest. Punktid on omavahel ühenduses ja moodustavad kolmnurkade võrgu (Siriba *et al.* 2015).

TIN võrgustikus tuleb iga kolmnurga moodustamisel järgida kolme põhimõtet. Iga moodustuv kolmnurk peab olema võimalikult lähedane võrdkülgsele kolmnurgale, kolmnurka moodustavad tipud peavad olema kõige lähedasemad, ja kolmnurga võrgustik peab olema kordumatu. Üksnes sellisel juhul saab võrgustik olla tegelikule maapinnale võimalikult lähedane. Kõige laialdasemalt on kasutusel Delaunay triangulatsioon (joonis

1.13). Delaunay kolmnurga võrgustik on ainulaadne ja ühegi kolmnurga tippe läbiva ringi sees ei ole teisi punkte (Yongxiao *et al.* 2021).



Joonis 1.13. Kolmnurkade moodustamine Delaunay triangulatsiooniga. Ühegi kolmnurga tippe läbiva ringi sees ei ole teisi punkte (Bornschlegel *et al.* 2012).

Muutuja väärtuste hindamist olemasolevate tulemustega kohtade vahel nimetatakse interpoleerimiseks. Kitsamas tähenduses tähendab interpoleerimine väärtuste genereerimist, kasutades üksnes teadaolevaid väärtusi. Teatud arv kindelpunkte on ette antud ja väärtuspind tuleb mingite reeglite järgi nende punktide vahel genereerida. Kõige lihtsam näide on libiseva aknaga silumine, mille puhul on mitmeid variante. Sageli on vaatluskohtade vahele jääva ala kohta teada informatsiooni, mida saab interpoleerimisel ära kasutada (Remm *et al.* 2012).

Kolm kõige levinumat ruumilise interpoleerimise tehnikat on kriging, pöördkauguse meetod (IDW) ja vähima kumeruse meetod (Spline). Kõik need interpoleerimismeetodid toimivad

hästi geomorfoloogiliselt siledate alade interpoleerimiseks. Kriging on täiustatud meetod, mis eeldab, et proovipunktide vaheline kaugus ja suund peegeldab ruumilist korrelatsiooni, mida saab kasutada pinna varieeruvuse selgitamiseks. Vähima kumeruse meetod ennustab väärtuseid, kasutades matemaatilist funktsiooni, mis minimeerib kogu pinnakõveruse. Pöördkauguse meetod eeldab, et üksteisele lähemal asuvad punktid on omavahel rohkem korreleeritud kui kaugemad (Almutlaq *et al.* 2022).

Pinna modelleerimisel loodud pinnad on oma omadustelt 2D ja 3D vahel. Mõnikord kirjeldatakse neid 2,5D pindadena. Neid pindu ei peeta tõelisteks 3D struktuurideks, kuna need ei sisalda samadel horisontaalsetel koordinaatidel mitut kõrgusväärtust. Sellest tulenevalt ei saa neid kasutada tunnelite modelleerimisel või täpsete mahuarvutuste teostamisel. Mahu arvutamisel on vaja kahte pinda, millest üks on aluspind ehk referentspind ja teine pealmine pind. Pinna ruumala määratakse ülemise ja alumise pinna vahena (Siriba *et al.* 2015).

1.3.3 Nõuded mahtude arvutamise täpsusele

Eraldi nõudeid prügilate ja jäätmeaunade mõõtmise täpsusele Eestis kehtestatud ei ole. Küll aga on kehtestatud Majandus- ja taristuministri määrusega „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ nõuded maavara kaevandamisel teostatavate mõõtmiste täpsusele ja mõõtmistulemuste dokumenteerimisele. Markšeideritööde käigus mõõdetud kahe mõõtesuuruse väärtuse erinevus kordusmõõtmisel ei tohi ületada alla 20 000 m³ puhul 10% (tabel 1.3). (Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord 2020, § 4 lg 2). Käesolevas töös on lähtutud antud nõudest, kuna uuritavate objektide suurused jäävad alla 20 000 m^3.

Tabel 1.3. Kordusmõõtmisel saadud mõõtesuuruse väärtuse lubatud erinevus esialgsest mõõtesuurusest (Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord 2020, § 4 lg 2)

Maht (tuhat m^3)	Kuni 20	20-50	50-200	200-1000	Üle 1000
Kahe mõõtmise suhteline erinevus (%)	10%	6%	4%	3%	2%

Mõõtesuuruse mahu kahe väärtuse lubatud erinevuse korral jäetakse lõplikuks mõõtetulemuseks esimese mõõtesuuruse väärtus (Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord 2020, § 4 lg 2). Markšeiderimõõdistuse läbiviimisel on lubatud kasutada mehitamata õhusõidukit, kui tagatakse määruses väljatoodud nõuete täitmine, lähtutakse määruse lisas „Fotogramm-meetrilise mõõdistuse nõuded mehitamata õhusõiduki kasutamisele markšeiderimõõdistusel“ esitatust, ja peetakse kinni lennundusseaduses sätestatud nõuetest (Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord 2020, § 1 lg 6).

1.4 Ülevaade varasematest mehitamata õhusõidukiga teostatud uurimistöödest

Eestis on viidud läbi mitu geodeesiaalast bakalaureuse- või magistritööd, mis on seotud mehitamata õhusõidukitega. Varasemad tööd on peamiselt keskendunud koordinaatide plaanilise ja kõrgusliku täpsuse hindamisele. Lisaks sellele on uuritud ka mehitamata õhusõiduki abil kogutud fotodest moodustatud maavara puistangu mudelite mahtude täpsust. Mujal maailmas on mehitamata õhusõidukite fotogramm-meetriaga seonduvaid uurimistöid läbi viidud mõnevõrra rohkem. Järgnevalt on antud ülevaade töödest, mis haakuvad käesoleva magistritööga.

2018. aastal kaitses Kaupo Kokamägi Eesti Maaülikoolis magistritööd, mille eesmärk oli hinnata mehitamata õhusõiduki abil tehtud fotode kasutamise sobivust puistangu mahtude arvutamiseks, ja saadud tulemuste vastavust sätestatud nõuetele. Uurimistöö käigus võrreldi kahte erinevat mehitamata õhusõidukit, kahte tüüpi maapinnal kasutatavaid tähiseid ja erinevatele tööetappidele kulunud aega. Uurimistöö objektideks olid korrapärase kujuga turbaaun ja ebakorrapärase kujuga purustatud kruusa puistang. Mõõtmised teostati terrestrilise laserskanneri, GNSS seadme ja kahe erineva mehitamata õhusõidukiga. Etalonväärtuseks võeti laserskaneerimise andmetest moodustatud mudeli maht (Kokamägi 2018).

Fotogramm-meetrilisel meetodil loodud mudelite mahtude suhtelised erinevused võrrelduna laserskaneerimise andmetest moodustatud mudeli mahust jäid alla 4%, mis jääb määruses „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ kehtestatud lubatud erinevuse piiresse. Uurimistöö käigus jõuti järeldusele, et mehitamata õhusõidukite

kasutamine mahtude määramisel annab piisava täpsuse ning selleks sobib ka odavam mehitamata õhusõiduk. Samuti leiti, et mahtude määramiseks saavutati piisav täpsus ka ilma maapinna kontrollpunkte kasutamata, kuigi täpsus tähiste arvu suurenedes paranes (Kokamägi 2018).

Romet Köök kaitses 2018. aastal Tallinna Tehnikaülikoolis magistritööd, mille eesmärgiks oli hinnata mehitamata õhusõiduki abil kogutud fotodest moodustatud pinnamudelite vertikaaltäpsuseid. Uurimistöö objektiks oli Võõbu katselõik. Võrreldi nii lennukõrguseid, markeeringute kasutamist kui ka kaameraid, ning hinnati erinevate tegurite mõju tulemusele. Etalonväärtusteks võeti laserskaneerimise ja GNSS-mõõdistuse andmetest moodustatud mudelite maht. Erinevatel meetoditel moodustatud mudeleid kasutati mahtude arvutamisel ning võrreldi saadud tulemusi kehtivate nõuetega (Köök 2018).

Fotode kogumisel kasutati mehitamata õhusõidukeid DJI Phantom 2 Vision Plus ja DJI S1000, millel olid kaamerad FC200 (14Mpix) ja Sony NEX-7 (24 Mpix). Fotogrammmeetrilise mõõdistuse eelselt paigaldati alale tähised, mis mõõdeti GNSS seadme abil. Uurimistöö käigus leiti, et markeeringute vähene kasutamine põhjustab maapinnamudeli moonutusi. Lisaks sellele tehti kindlaks, et kõrgema lahutusvõimega kaamera fotodest moodustatud pinnamudel oli tunduvalt täpsem võrreldes madalama kvaliteediga kaameraga tehtud fotode põhjal moodustatud pinnamudeliga (Köök 2018).

Eesti Maaülikoolis 2019. aastal Oscar Rahu ja Karmo Siimu poolt kaitstud bakalaureusetöö eesmärk oli uurida, kuidas mõjutavad erinevad faktorid ortofotomosaiikide ja 3D punktipilvede täpsusi. Faktorid, mida uuriti, olid õhusõiduki lennukiirus, mehitamata õhusõiduki lennukõrgus ja lennumarsruudil pildistatud aerofotode omavaheline kattuvus. Fotode kogumisel kasutati mehitamata õhusõidukit Trimble ZX5. Andmete omavaheliseks võrdlemiseks mõõdeti ortofotomosaiikidelt plaanilised koordinaadid (X,Y) ja 3D punktipilvedelt kõrguslikud koordinaadid (Z). Täpsuse hindamiseks arvutati keskmised ruutvead ja standardhälbed (Rahu ja Siim 2019).

Töö käigus leiti, et parimad tulemused saavutatakse, kui kasutada aerofotode pildistamiseks lennukõrguseid 50 m kuni 70 m, lennukiirust 400 cm/s kuni 500 cm/s ja piltide omavahelist kattuvust 70% × 70% (krv X-0,012 m; krv Y0,012 m; krv Z-0,019 m) või 80% × 80% (krv X-0,012 m; krv Y-0,012 m; krv Z-0,021 m). Samuti selgus töö käigus, et mehitamata õhusõidukiga kogutud andmed annavad piisava täpsuse. Parimate tulemuste parameetrite

kasutamine võimaldab valmistada suurema täpsusega ortofotomosaiike, 3D punktipilvesid või -mudeleid (Rahu ja Siim 2019).

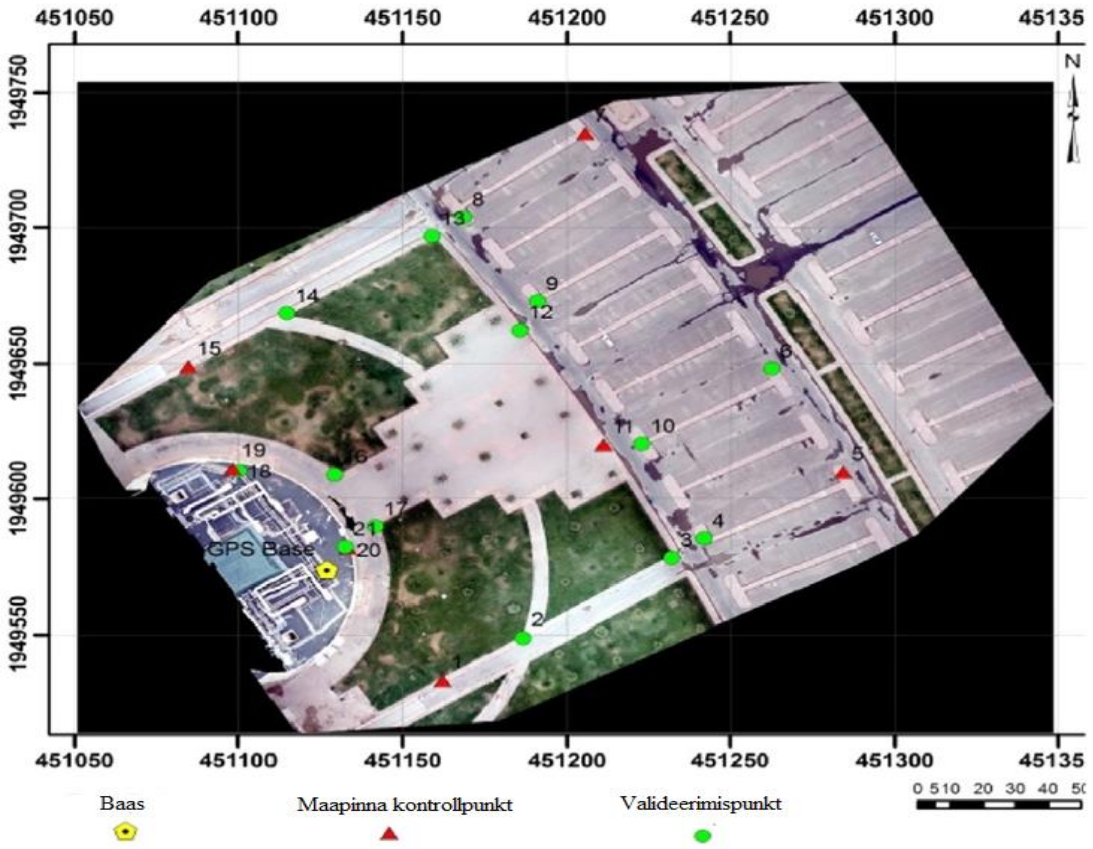
Kaidi Rämmani poolt 2021. aastal Eesti Maaülikoolis kaitstud magistritöö eesmärk oli välja selgitada ehitus- ja lammutusjäätmete aunade mahu analüüsi võimalus mehitamata õhusõiduki fotogramm-meetria abil, ning saadud tulemuste kasutusvõimalusi keskkonnaalases järelevalves. Uurimistöö käigus võrreldi mehitamata õhusõidukiga kogutud fotodest moodustatud ehitus-lammutussegaprahi aunade mudelite mahtu ettevõtte poolt esitatud jäätmete laoseisuga (jäätmete kogused tonnides). Ettevõtte poolt esitatud jäätmete kogused teisendati kuupmeetriteks, kasutades Jäätmearuandluse juhendmaterjali lisas 1 toodud soovituslike jäätmete teisendamiskoefitsiente.

Magistritöö käigus leiti, et mehitamata õhusõiduki kasutamine keskkonnaalaseks järelevalveks, sh jäätmehunnikute mõõdistamiseks, on otstarbekas ja võimalik. Saadud andmeid on võimalik kasutada nii haldusmenetluse läbiviimisel ja ettekirjutuse koostamisel kui ka väärteomenetluses. Lisaks leidis autor, et usaldusväärsem on kasutada erinevate jäätmehunnikute kaardistamiseks ühte kindlat mehitamata õhusõidukit ja kaamerat, ning teha arvutused ühe tarkvara abil. Samuti selgus, et ettevõtte poolt esitatud andmed jäätmete koguse osas ja mehitamata õhusõiduki fotogramm-meetria abil saadud mahtude ning Jäätmearuandluse juhendmaterjali lisa 1 koefitsientide osas on suurte erinevustega.

2021. aastal Ismail Elkhrachy poolt läbi viidud uurimistöö eesmärk oli hinnata mehitamata õhusõiduki abil kogutud fotodest moodustatud pinnamudelite täpsuseid. Uurimistöö viidi läbi Saudi Araabias Najrani Ülikooli linnakus asuval 0,05 km^2 suurusel maa-alal (joonis 1.14). Fotode kogumisel kasutati mehitamata õhusõidukit DJI Mavic Pro Platinum. Fotode orienteerimisel ja punktipilvede moodustamisel kasutati tarkvarasid Agisoft Metashape ja Pix4dmapper. Kokku paigaldati uuritavale alale 21 tähist, mis mõõdeti GNSS seadmega. Mudelite orienteerimisel kasutati 3, 4, 5 ja 7 maapinna kontrollpunkti. Iga stsenaariumi korral kasutati täpsuse hindamisel valideerimispunktidena valimist ülejäänud GCP-sid (Elkhrachy 2021).

Uurimistöö käigus leiti, et mudelite koostamine ilma maapinna kontrollpunkte kasutamata, annab madala absoluutse täpsuse. Sellise mudeli horisontaalne keskmine ruutviga Pix4D tarkvara kasutades oli 1.408 m ja vertikaalne keskmine ruutviga 45.235 m. Kasutades Agisoft Metashape tarkvara, olid vastavad näitajad 0.883 m ja 42.748 m. Parim täpsus saadi

7 maapinna kontrollpunkti kasutades, kus vertikaalseks keskmiseks ruutveaks saadi 0,06 m ja horisontaalseks 0.038 m ja 0.05 m. Sellisest täpsusest piisaks infrastruktuuriprojektide planeerimiseks ja arendamiseks. Mudelite koostamisel andis mõnevõrra parema tulemuse tarkvara Agisoft Metashape (Elkhrachy 2021).



Joonis 1.14. Pix4d tarkvaraga moodustatud uuritava maa-ala ortomosaiik (Elkhrachy 2021).

Oluibukun Gbenga Ajayi ja John Ajulo Nigeeria Föderaalsest Tehnikaülikoolist hindasid 2021. aastal oma uurimistöös UAV fotogramm-meetria kohaldatavust puistangu mahtude hindamisel. Uuringu käigus võrreldi tahhümeetri ja UAV-ga kogutud andmetest moodustatud puistangu mudelite mahtusid. Fotode kogumisel kasutati mehitamata õhusõidukit DJI Mavic Air. Fotogramm-meetriline lend teostati kõrgusel 50 m, kattuvusega 70 x 80 m. Fotode orienteerimisel ja punktipilvede moodustamisel kasutati tarkvara Agisoft Metashape Pro. Fotode georefereerimisel kasutati 3 maapinna kontrollpunkti (Ajayi ja Ajulo 2021).

Mahu määramisel võeti referentsväärtuseks sõelast läbilastud materjali hulk 2750,0 m^3. Tahhümeetriliste mõõtmiste käigus kogutud andmetest moodustatud mudelite mahuks saadi

2830,72 m^3. UAV-ga kogutud fotodest moodustatud mudelite mahuks saadi 2686,25 m^3. Mudelite absoluutsed erinevused olid vastavalt 80,72 m^3 ja −63,74 m^3 ning suhtelised erinevused 2,9% ja -2,3%. Uurimistöö käigus jõuti järeldusele, et mehitamata õhusõiduki peamised eelised on mõõtmise kiirus välitingimustes, saadud punktipilve suur tihedus ning terviklikkus, ning UAV madal hind. Peamiste puudustena toodi välja kõrgemad nõuded riistvarale ning pikem järeltöötluse aeg (Ajayi ja Ajulo 2021).

2021. aastal Ali Ulvi poolt läbi viidud uurimistöö eesmärk oli välja selgitada suure täpsusega tulemuse saavutamiseks vajalik maapinna kontrollpunktide arv ning paigutus. Uurimistöös viidi läbi kolm stsenaariumit. Esimese variandi puhul paigutati tähised uuringuala serva, teise variandi puhul keskele ning kolmanda variandi puhul ühtlaselt üle kogu uuringuala. Esimese stsenaariumi korral toetasid servaaladel paiknevaid punkte kesksed GCP-d (joonis 1.15) ning teise variandi puhul vastupidi. Iga stsenaariumit alustati nelja GCP-ga ning jõuti maksimaalselt 35 GCP-ni. Lisaks kasutati 30 valideerimispunkti. Kokku moodustati uurimistöö käigus 33 ortofotomosaiiki ja digitaalset pinnamudelit (Ulvi 2021).

Joonis 1.15. Ühtlaselt uuringuala servas paiknevad maapinna kontrollpunktid ning neid toetavad punktid ala keskel (Ulvi 2021).

Uurimistöö käigus saadi parim xy koordinaatide täpsus (krv 0,033 m) esimese variandiga, kus tähised olid paigutatud uuringuala serva. Lisaks sellele leiti, et parima tulemuse annab variant, kus servaalades paiknevaid kontrollpunkte toetavad 5 GCP uuringuala keskosas. Parim z koordinaadi täpsus (krv 0,048 m) saadi kolmanda variandiga, kui maapinna kontrollpunktid olid jaotatud ühtlaselt kogu uuringualale. Kõige madalam oli täpsus kasutades 4 maapinna kontrollpunkti ja kõige kõrgem 35 GCP korral. Xy koordinaatide keskmine ruutviga varieerus esimese variandi puhul 0,073 m ja 0,033 m, teise variandi puhul 0,161 m ja 0,069 m ning kolmanda variandi puhul 0,089 m and 0,050 m piires (Ulvi 2021).

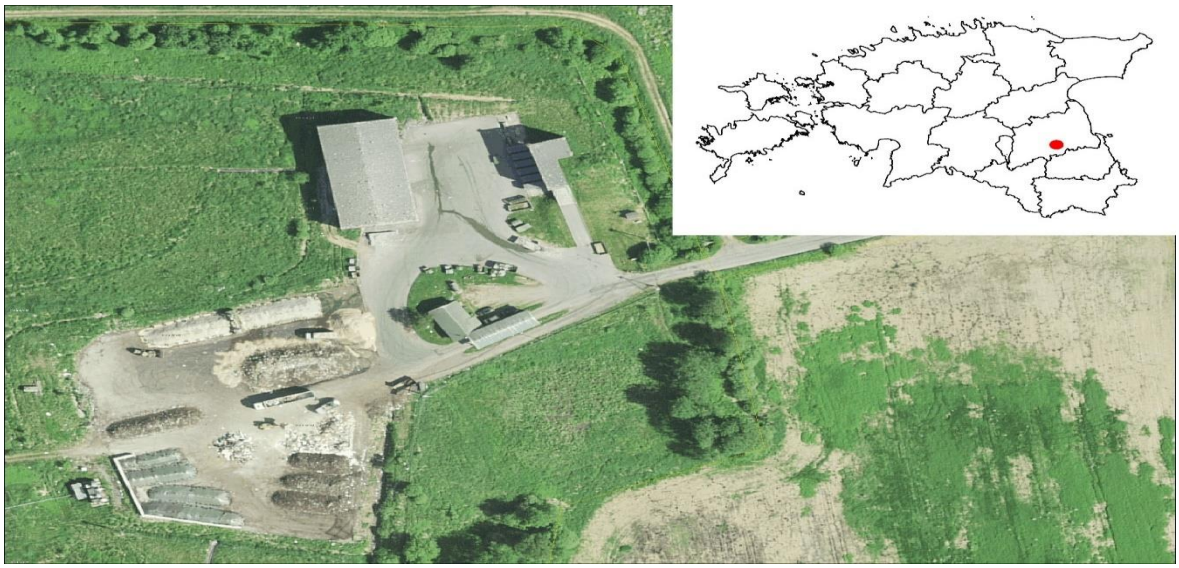
2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1 Uurimistöö eesmärk

Uurimistöö eesmärk oli selgitada välja, kas odava mitte RTK - võimekusega mehitamata õhusõidukiga kogutud aerofotodest moodustatud mudel on jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega ning vastab kehtivas seadusandluses kehtestatud nõuetele. Odavama mehitamata õhusõiduki näol on eelkõige silmas peetud UAV-d, millel on sisseehitatud madala resolutsiooniga kaamera ning puudub RTK - võimekus. Eesti Maaülikooli bakalaureuse- ja magistritöö jaoks toimusid 02.06.2021 objektil RTK GNSS mõõtmised, terrestriline laserskaneerimine ning fotogramm-meetrilised lennud mehitamata õhusõidukiga.

2.2 Uurimistöö objekt

Uurimistöö objektideks valiti Tartu maakonnas Kambja vallas Uhti külas Aardlapalu prügila katastriüksusel asuvas Aardlapalu ümberlaadimisjaamas paiknevad kaks jäätmeauna (joonis 2.1).



Joonis 2.1. Aardlapalu ümberlaadimisjaama asukoht Eesti kaardil on toodud punase ringina (autori joonis).

Esimeseks objektiks valiti ümberlaadimisjaama edelaosas paiknev suhteliselt korrapärase kujuga sõelumata kompostimisaun (joonis 2.2).

Joonis 2.2. Vaade korrapärase kujuga sõelumata kompostimisaunale (autori foto).

Teise objektina uuriti platsi põhjaosas paiknevat korrapärase kuju ja ühtlase värvitooniga, kattega kompostimisauna (joonis 2.3). Kompostimisaunad on oma kujult tüüpilised objektid, mille mahtu geodeedid igapäevaselt mõõdavad.

Joonis 2.3. Vaade korrapärase kuju ja ühtlase värvitooniga, kattega kompostimisaunale (autori foto).

Aardlapalu ümberlaadimisjaam asub endisel Aardlapalu prügila territoorium ning on praegu aktiivses kasutuses. Platsi mõõtmed põhja-lõuna suunas on hinnanguliselt 100 m ja ida-lääne suunas 70 m. Ümberlaadimisjaama haldab Eesti Keskkonnateenused AS, kellele on väljastatud keskkonnaluba number L.JÄ/333513 jäätmete käitlemiseks Aardlapalu ümberlaadimisjaamas.

2.3 Kasutatud riistvara

Fotode kogumisel kasutati mehitamata õhusõidukit DJI Phantom 3 Professional (joonis 2.4). Phantom 3 Professionali näol on tegemist 2015. aastal väljalastud nelja rootoriga kopteri tüüpi UAV-ga. Seade on tavakasutajale kättesaadav ja võrdlemisi odav, makstes umbes 800-1000 eurot. Tegemist on lihtsasti käsitletava seadmega, mida saab ühendada ja juhtida nutitelefoniga. UAV läbimõõt on 35 cm, kaal 1280 g, maksimaalne lennukiirus 58 km/h ja hinnanguline lennuaeg 23 minutit. Õhusõidukile on integreeritud RGB kaamera, mille eraldusvõime on 12,4 MP, fookuskaugus 3,61 mm ja sensori suurus 6,17 x 4,55 mm. Väljundina toodab kaamera JPEG või DNG (RAW) formaadis fotosid (Phantom 3 Professional Kasutusjuhend 2015).

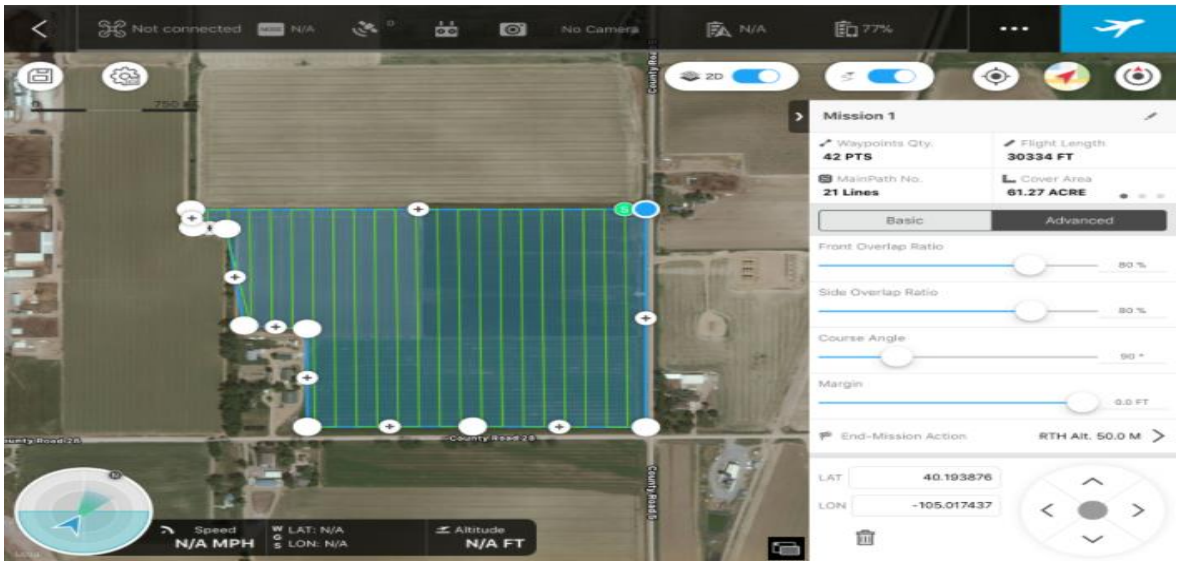
Joonis 2.4. Mehitamata õhusõiduk DJI Phantom 3 Professional (Phantom 3 Professional specs).

Tähiste mõõtmiseks ning laserskanneri orienteerimiseks kasutati RTK GNSS vastuvõtjat Trimble R4-3 ja Trimble TSC3 väliarvutit. Trimble R4-3 GNSS vastuvõtja staatilise positsioneerimise horisontaalne täpsus on 3 mm ja vertikaalne täpsus 3,5 mm. RTK positsioneerimise täpsused on vastavalt 8 ja 15 mm. Trimble R4-3 vastuvõtjaga on võimalik kasutada nii GPS, Glonass[1], Galileo[1] kui ka BeiDou[1] satelliite (Trimble R4 GNSS system datasheet 2022).

Jäätmeaunad skaneeriti laserskanneri Faro FocusS 70 abil. FocusS 70 laserskanner sobib fassaadide, tootmishoonete, keeruliste struktuuride ja suuremahuliste komponentide skaneerimiseks. Tänu integreeritud värvikaamerale ja HDR-funktsioonile, tagab seade ülitäpse ja realistliku värvilise skaneerimise. Faro FocusS 70 laserskanner mõõdab kuni 1 000 000 punkti sekundis. Laserskanneri vertikaalne ja horisontaalne nurgaline täpsus on 19“ ja kauguse mõõtmise täpsus 1 mm. Mõõdetud punkti koordinaatide täpsus skannerist 25 m kaugusel on 3,5 mm (Focus laser scanner data sheet 2021).

2.4 Kasutatud tarkvara

DJI Phantom 3 Professionali lennu planeerimisel kasutati tarkvara DJI GS Pro (joonis 2.5). DJI GS Pro on iPadi rakendus, mis võimaldab lennu planeerimist erinevate meetodite abil. Programm ühildub iPadi tootesarja ning paljude DJI mehitamata õhusõidukitega.



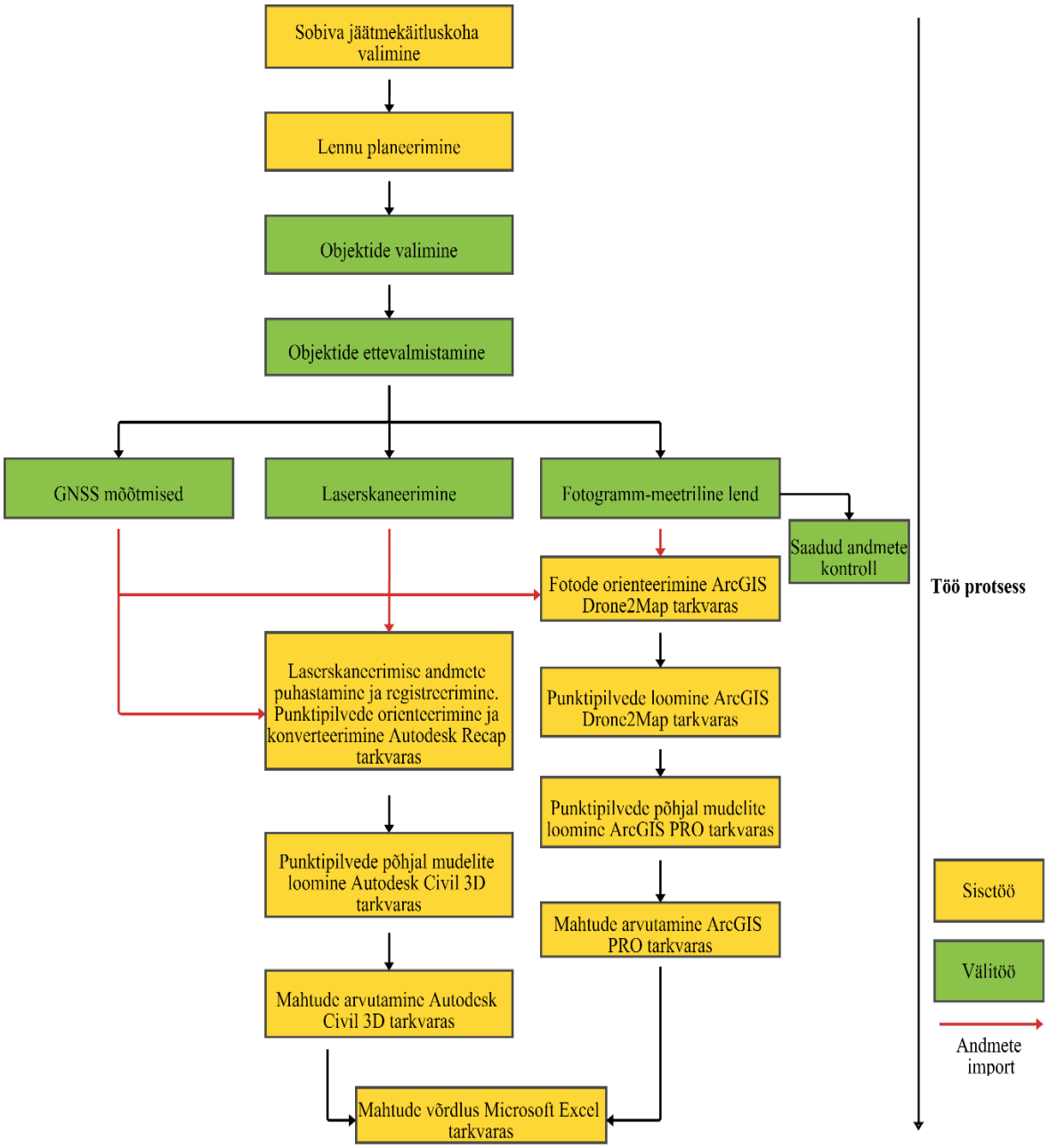
Joonis 2.5. Lennu planeerimise tarkvara DJI GS Pro (Using DJI GS Pro to Plan….2018).

Laserskannerist saadud punktipilve puhastamine, orienteerimine ja konverteerimine toimus Autodesk Recap PRO 2022 tarkvaras. Recap on Autodeski poolt loodud rakendus, mis võimaldab luua ortomosaiike, kõrgusmudeleid, töödelda 3D skaneeringuid, punktipilvesid ja salvestada andmeid. Mudelite loomine ja mahtude arvutamine laserskaneerimisel saadud punktipilvedest toimus projekteerimistarkvaras Autodesk Civil 3D 2021.

Fotogramm-meetrilisel lennul saadud fotode orienteerimine ja punktipilvede loomine toimus tarkvaras ArcGIS Drone2Map. Programm võimaldab andmetest luua erinevaid väljundeid - kõrgusmudeleid, ortomosaiike, 3D punktipilvesid ja 3D mudeleid. Mudelite loomine ja mahtude arvutamine fotogramm-meetrilisel lennul saadud punktipilvedest toimus GIS tarkvaras ArcGIS Pro. Mõlemad tarkvarad on loodud Ameerika geoinfosüsteemide arendaja Esri poolt. Tulemuste analüüsiks kasutati tarkvara Microsoft Excel.

2.5 Uurimistöö protsess

Püstitatud eesmärkide täitmiseks viidi läbi uurimistöö, mille tööprotsess on kujutatud joonisel 2.6. Esmalt toimus sobiva jäätmekäitluskoha valimine. Seejärel tehti kindlaks lennuks sobilike ilmastikutingimustega kuupäev, valiti välja instrumendid ning valmistati ette lennu projektid. Välitöödest toimus esmalt uurimistöö objektiks olevate jäätmeaunade väljavalimine. Pärast seda toimus objektide ettevalmistus, mille käigus markeeriti aerosooliga fotogramm-meetrilised tähised, paigaldati laserskaneerimise tähised ning teostati GNSS mõõtmised. Seejärel viidi läbi terrestriline laserskaneerimine ja fotogramm-meetrilised lennud. Andmete kogumise järel kontrolliti need objektil üle.



Joonis 2.6. Uurimistöö protsess.

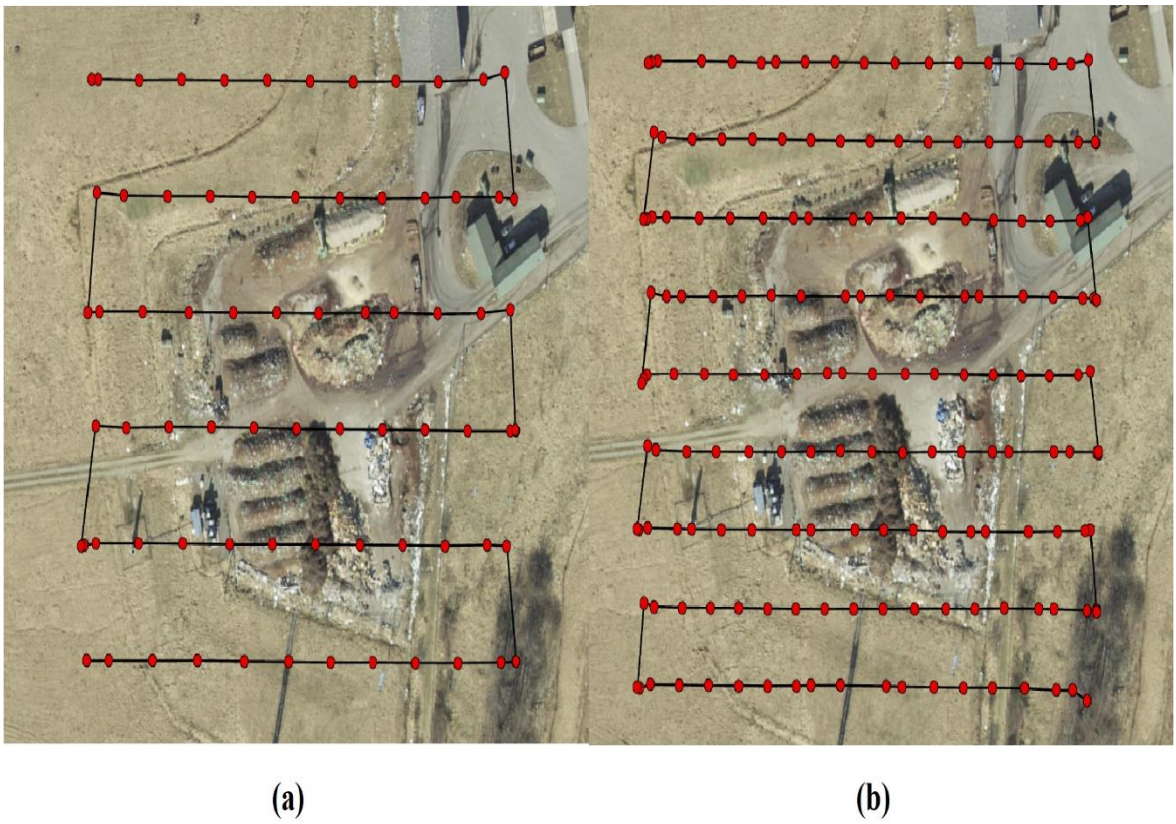
Seejärel viidi läbi andmete töötlus. Esmalt toimus fotogramm-meetrilistel lendudel saadud piltide orienteerimine ja punktipilvede loomine ArcGIS Drone2Map tarkvaras. Seejärel moodustati punktipilvede põhjal mudelid ja arvutati aunade mahud ArcGIS Pro tarkvaras. Pärast seda toimus laserskaneerimisel saadud andmete puhastamine, registreerimine ning punktipilvede orienteerimine ja konverteerimine Autodesk Recap tarkvaras. Punktipilvedest mudelite loomine ja mahtude arvutamine toimus Autodesk Civil 3D tarkvaras. Mahtude arvutamise järel võrreldi erinevate meetoditega koostatud mudelite mahtude suhtelist ja absoluutset erinevust üksteisest.

2.6 Lennu planeerimine

Uurimistöö esimese osana toimus töö läbiviimiseks sobiliku jäätmekäitluskoha valimine. Ühe valikukriteeriumina võeti arvesse, et objekt asuks Tartu linna vahetus läheduses. Kuna jäätmekäitluskohad on aktiivses kasutuses, toimub seal pidev jäätmete sisse- ja väljavedu ning seetõttu on oluline, et mõõdistused teostatakse võimalikult väikese ajaraami sees. Teise kriteeriumina arvestati erinevate omadustega aunade olemasolu. Eelnevatele kriteeriumitele osutus vastavaks Tartu linnast umbkaudu 5 km lõunas asuv Aardlapalu ümberlaadimisjaam.

Mehitamata õhusõidukiga lendamiseks sobilike ilmastikutingimustega kuupäeva ja kellaaja valimine toimus veebilehel UAV Forecast. Veebilehel on võimalik hinnata tunni täpsusega lennu teostamise asukohas tuule- ja tuulepuhangute kiirust, temperatuuri, sademete tõenäosust, pilvekatte tihedust, nähtavust, nähtaval olevate satelliitide arvu ja geomagneetilise tormi indeksit. Samuti on veebilehe abil võimalik hinnata satelliitide arvu millega saadakse side ning anda hinnang lennu sobilikkuseks. Tuginedes UAV Forecasti hinnangule valiti välitööde kuupäevaks 02.06.2021.

Lendude planeerimine toimus vahetult enne objektile minekut kameraalselt. Lennud planeeriti tahvelarvutis, kasutades tarkvara DJI GS Pro. Kokku planeeriti kaks lendu piki- ja põikikattuvusega 70% x 70% (joonis 2.7 a) ja 80% x 80% (joonis 2.7 b). Lennud planeeriti paralleelsete lennutrajektooridega ning lennukõrguseks määrati 50 m. Lendude piki- ja põikikattuvuse ning kõrguse määramisel tugineti Oscar Rahu ja Karmo Siimu 2019. aastal Eesti Maaülikoolis kaitstud bakalaureusetööle, mille kohaselt saadi koordinaatide parim absoluutne täpsus pildistades 70% x 70% piltide omavahelise kattuvusega. Peaaegu sama täpsed tulemused saadi piltide omavahelisel kattuvuse 80% x 80% korral. Kõrguslikult saadi parimad tulemused, teostades lend 50 meetri kõrgusel. Paralleelsed lennutrajektoorid valiti, kuna need on mahtude määramisel kõige levinumaks fotode kogumise viisiks. Ristuvad lennutrajektoorid annavad küll detailsema 3D kujutise, kuid samas suureneb ka piltide arvu kasvu tõttu lennu läbiviimise ja järeltöötluse aeg ning nõudmised riistvarale.



Joonis 2.7. Lennutrajektoor (must joon) ja pildi asukoht (punane täpp) kattuvuse 70% x 70% korral (a) ning kattuvuse 80% x 80% korral (b).

Eelpool mainitud parameetreid kasutades saadi piksli suurus maapinnal (GSD) 2,10 cm. Lendude planeerimine võttis hinnanguliselt aega 20 minutit.

2.7 Mõõdistustööde läbiviimine Aardlapalu ümberlaadimisjaamas

Nagu varem mainitud, viidi välitööd läbi 02.06.2022. Esmalt toimus sobilike jäätmeaunade väljavalimine. Esimeseks objektiks valiti suhteliselt korrapärase kujuga sõelumata kompostimisaun (joonis 2.8). Aun sisaldas lisaks kompostmullale ka rohkes koguses erivärvilisi kilekotte.

Joonis 2.8. Vaade uurimistöö objektiks valitud sõelumata kompostimisaunale (Foto: Kaupo Kokamägi).

Teiseks objektiks valiti korrapärase kuju ja ühtlase värvitooniga, kattega kompostimisaun (joonis 2.9). Aun oli kaetud helepruuni riidega ning äärtesse oli paigutatud raskuseks autorehvid.

Joonis 2.9. Vaade uurimistöö objektiks valitud kattega kompostimisaunale (Foto: Kaupo Kokamägi).

Mõõdistamine toimus Eesti Maaülikooli, 3D PUNKT OÜ ja geodeedi Martin Sirk koostööna. Mõõdistuste läbiviimisel kasutati Eesti Maaülikooli RTK GNSS-vastuvõtjat

Trimble R4-3 ja Trimble TSC3 väliarvuti. Terrestriline laserskaneerimine teostati 3D PUNKT OÜ laserskanneriga Faro FocusS 70. Fotogramm-meetriline lend viidi läbi Keskkonnaameti mehitamata õhusõidukiga DJI Phantom 3 Professional. Pärast jäätmeaunade väljavalimist toimus objekti ettevalmistamine. Ettevalmistamise käigus markeeriti ühtlaselt üle ala valge (joonis 2.10 a) ja roosa (joonis 2.10 b) aerosooliga 25 fotogramm-meetrilist tähist.

(a) **(b)**

Joonis 2.10. Valge (a) ja roosa (b) aerosooliga markeeritud tähised (Fotod: Kaupo Kokamägi).

Pärast maapinna kontrollpunkti markeerimist, mõõdeti tähiste keskpunkt RTK GNSS Trimble R4-3 vastuvõtjaga. Igal tähisel mõõdeti 20 epohhi. Kuna jäätmekäitluskoht asus lagedal väljal, oli taevalaotuse avatus hea. Trimble R4-3 mõõtmisraporti kohaselt saadi mõõtmiste käigus andmeid 16 kuni 21 satelliidilt. PDOP oli 1,1 kuni 1,7 ja punktide horisontaalne täpsus jäi 0,8 ja vertikaalne 1,3 sentimeetri piiresse. GNSS raport on toodud lisas 1.

Seejärel paigaldati spetsiaalsed tähised laserskanneri orienteerimiseks (joonis 2.11 a) ning erinevate seisupunktide sidumiseks (joonis 2.11 b). Pärast tähise paigaldamist teostati mõõdistus RTK GNSS Trimble R4-3 vastuvõtjaga. Igal tähisel mõõdeti 20 epohhi. Mõõtmisraporti kohaselt saadi mõõtmiste käigus andmeid 17 kuni 22 satelliidilt. PDOP oli 1,0 kuni 1,4 ja punktide horisontaalne täpsus jäi 0,7 ja vertikaalne 1,1 sentimeetri piiresse. GNSS raport on toodud lisas 1. Pärast GNSS mõõtmisi viidi läbi aunade terrestriline laserskaneerimine Faro FocusS 70 seadme abil.

(a) (b)

Joonis 2.11. Tähis laserskanneri orienteerimiseks (a) ja erinevate seisupunktide sidumiseks (b) (Fotod: Kaupo Kokamägi).

Viimasena viidi läbi fotogramm-meetrilised lennud mehitamata õhusõidukiga DJI Phantom 3 Professional (joonis 2.12). Lendamist soosis kuiv ja tuulevaikne ilm. Lennud toimusid autonoomsena, kasutades programmi DJI GS Pro. Kokku viidi läbi kaks lendu piki- ja põikikattuvusega 70% x 70% ja 80% x 80%.

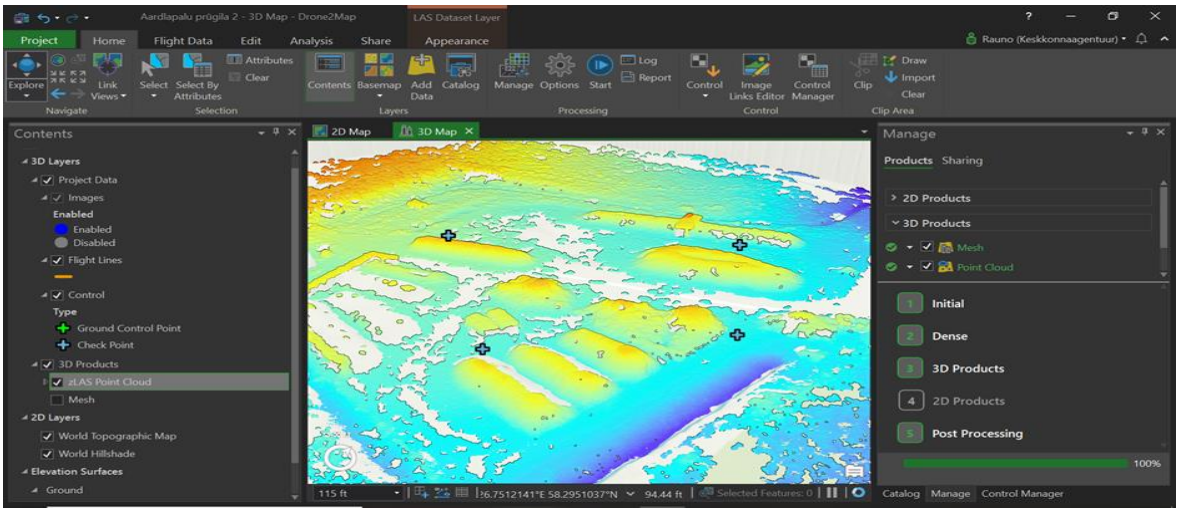
Joonis 2.12. Fotogramm-meetrilise lennu läbiviimine mehitamata õhusõidukiga DJI Phantom 3 Professional (Foto: Natalja Liba).

Esimesena viidi läbi lend kattuvusega 70% x 70%. Lend kestis 5 minutit ja kokku tehti alast 75 fotot. Pärast seda teostati lend kattuvusega 80% x 80%. Lennu läbiviimiseks kulus 8 minutit ja koguti 170 fotot. Mõlemal lennul toimus piltide kogumine paralleelsete lennutrajektooridega. Lendude kõrgus oli 50 m ja GSD 2.10 cm. Lendude järgselt toimus tulemuste kontroll.

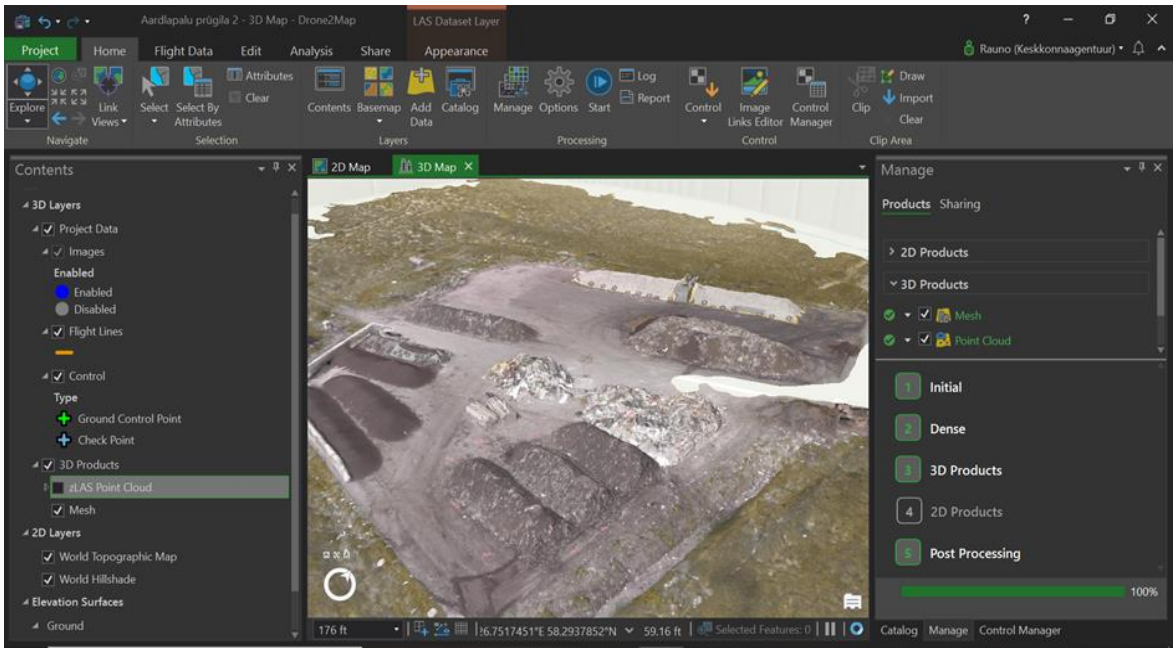
2.8 Andmete töötlus

Uurimistöös kasutati objektil RTK GNSS vastuvõtjaga kogutud punktide koordinaate, laserskaneerimise tulemusena saadud punktipilvi ning mehitamata õhusõidukilt kogutud JPEG pilte koos metaandmetega. Fotogramm-meetrilisel meetodil punktipilvede loomiseks imporditi fotod programmi ArcGIS Drone2Map. Piltide orienteerimiseks sisestati programmi fail tähiste koordinaatidega ning kinnitati vastavad punktid manuaalselt piltidel nähtavate tähiste külge. Kokku markeeriti tähis vähemalt neljal erineval fotol. 25 mõõdetud maapinna kontrollpunktist kasutati punktipilvede moodustamisel maksimaalselt 21 punkti. 4 punkti kasutati kontrollpunktidena (*Check Point*, CP), et vajadusel kontrollida koordinaatide absoluutset täpsust.

Projekti väljundfailiks valiti LAS formaadis punktipilv (joonis 2.13), mis loodi optimaalse (*Optimal*) tihedusega ja tekstuuriga võrgustik (*Textured Mesh*), mida on näha joonisel 2.14. Punktipilv ja tekstuuriga võrgustik loodi L-Est97 koordinaatsüsteemis ning EH2000 kõrgussüsteemis.



Joonis 2.13. ArcGIS Drone2Map tarkvaras loodud punktipilv.



Joonis 2.14. ArcGIS Drone2Map tarkvaras loodud tekstuuriga võrgustik (*Textured Mesh*).

Kokku kulus kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest punktipilve moodustamiseks keskmiselt 8 minutit. Vastav näitaja kattuvuse 80% x 80% korral oli 44 minutit. Projekti raport kuvas enne punktipilve tihendamist maa-ala ortofotomosaiigi, mida on näha joonisel 2.15 a ja hõreda digitaalse pinnamudeli eelvaate, mis on kajastatud joonisel 2.15 b. ArcGIS Drone2Map töötlemise raport on toodud lisas 2.

(a) **(b)**

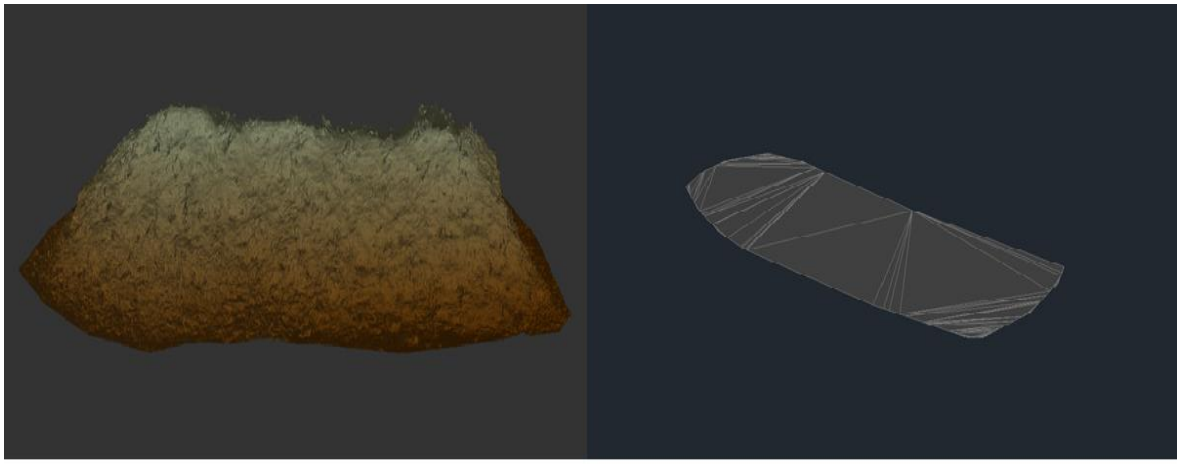
Joonis 2.15. ArcGIS Drone2Map tarkvaras loodud Aardlapalu ümberlaadimisjaama ortomosaiigi eelvaade (a) ja digitaalse pinnamudeli eelvaade (b).

Fotogramm-meetrilisel meetodil loodi objektide kohta 6 erinevat punktipilve (tabel 2.1).

Tabel 2.1. Fotogramm-meetrilisel meetodil loodud erinevad punktipilved

Kattuvus	Orienteerimisel kasutatud tähised
70% x 70%	21 tähist
70% x 70%	5 tähist
70% x 70%	ilma tähisteta
80% x 80%	21 tähist
80% x 80%	5 tähist
80% x 80%	ilma tähisteta

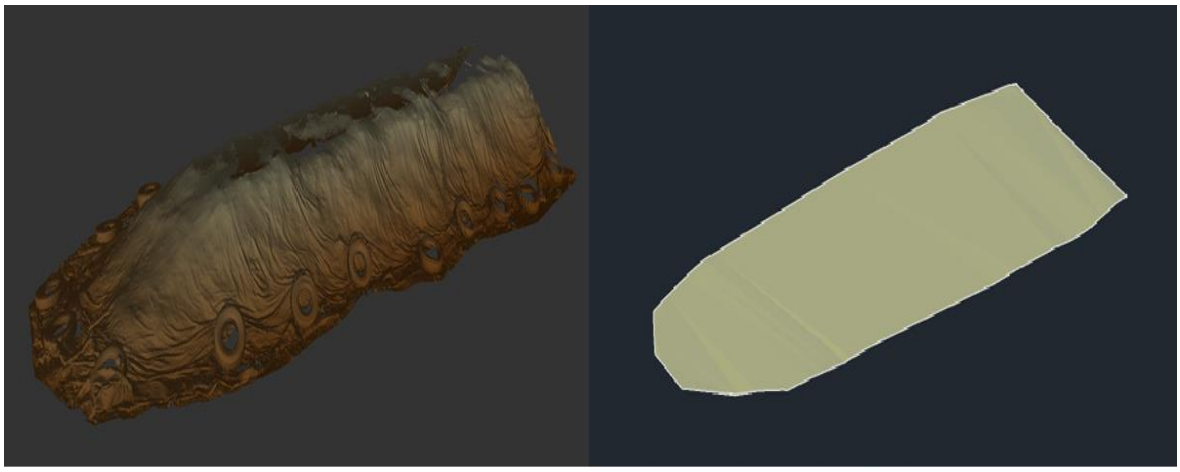
Laserskaneerimise käigus saadud punktipilved imporditi tarkvarasse Autodesk Recap 2022, kus need registreeriti ja orienteeriti. Samuti toimus seal punktipilvede puhastamine ning aunade kontuuri väljalõikamine. Saadud punktipilved salvestati rcs formaati, et neid oleks parem Autodesk Civil 3D tarkvaras töödelda. Pärast seda imporditi punktipilved Civil 3D 2021, kus moodustati esmalt sorteerimata kompostimisauna mudel (joonis 2.16 a) ning auna aluse pind (joonis 2.16 b).



(a) (b)

Joonis 2.16. Tarkvaras Autodesk Civil 3D 2021 laserskaneerimise tulemustest moodustatud sõelumata kompostimisauna (a) ja kompostimisauna aluse pinna mudel (b).

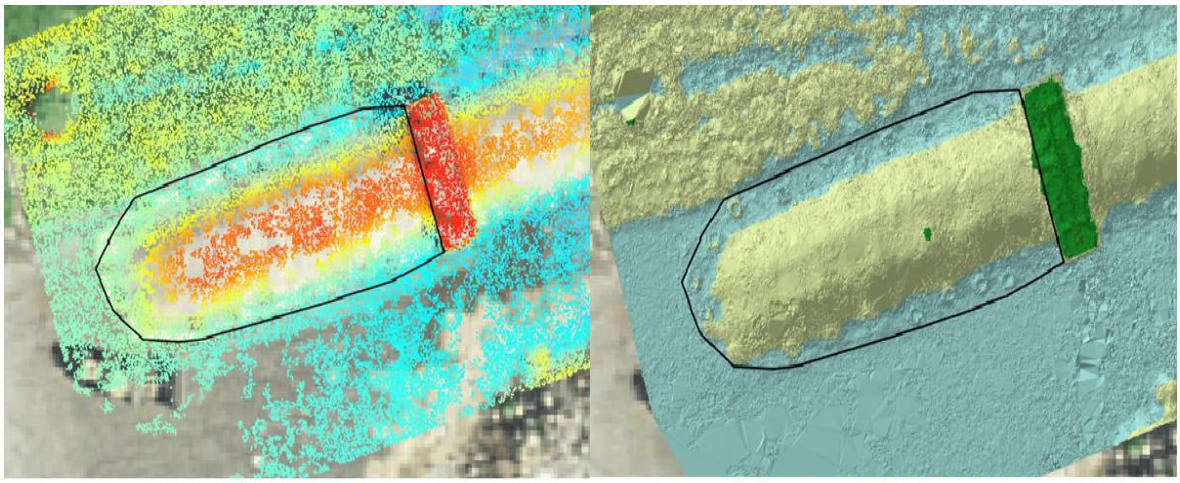
Seejärel moodustati kattega kompostimisauna mudel (joonis 2.17 a) ning auna aluse pind (joonis 2.17 b). Punktipilvi hõrendati nii, et punktivaheks jäi 3 cm ning mudelite loomiseks kasutati TIN meetodit. Seejärel võrreldi pindade kõrgusi ning arvutati välja aunade ruumala.



(a) (b)

Joonis 2.17. Tarkvaras Autodesk Civil 3D 2021 laserskaneerimise tulemustest moodustatud kattega kompostimisauna (a) ja kompostimisauna aluse pinna mudel (b).

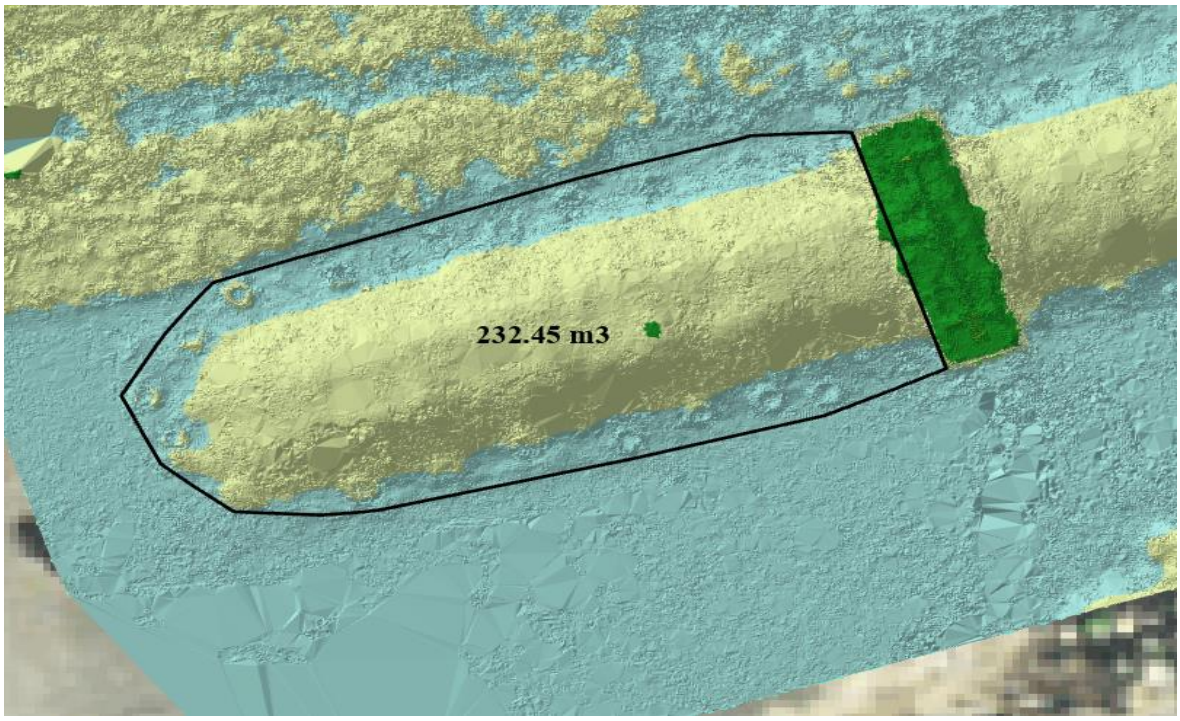
Pärast seda imporditi fotogramm-meetrilisel meetodil loodud punktipilv ja Autodesk Civil 3D loodud auna kontuur tarkvarasse ArcGIS Pro (joonis 2.18 a). Seejärel loodi fotogramm-meetrilisel teel moodustatud punktipilvest auna mudel, kasutades TIN meetodit (joonis 2.18 b). Mudelite loomisel punktipilve ei hõrendatud.



(a) (b)

Joonis 2.18. Fotogramm-meetrilisel meetodil loodud punktipilv ja auna kontuur (a) ning fotogramm-meetrilisel lennul kogutud fotodest moodustatud kattega kompostimisauna mudel (b) tarkvaras ArcGIS PRO.

Auna kontuurile lisati z-väärtused ja arvutati tööriista lisa Z informatsioon (*Add Z information*) abil kompostimisauna aluse pinna mudel. Aluse pind loodi arvestades kontuuri tippude keskmist Z väärtust. Viimaks võrreldi pindade kõrgusi ning arvutati välja aunade ruumala (joonis 2.19). Eelpool kirjeldatud protsess viidi läbi 12 korral.



Joonis 2.19. Kattega kompostimisauna mahu mõõtmine tarkvaras ArcGIS Pro.

Terrestrilisel laserskaneerimisel ja fotogramm-meetriliselt lennul kogutud andmetest moodustatud mudelite mahtude arvutamise järgselt, kanti andmed Microsoft Excel tarkvarasse ja võrreldi neid objekti põhiselt omavahel. Mitmete uurimuste tulemusena on selgunud, et laserskaneerimine on üks täpsemaid mahtude määramise meetodeid ning sellest tulenevalt, loetakse laserskaneerimine mudelite loomisel fotogramm-meetrilisest meetodist täpsemaks. Toetudes eelnevale, võeti käesolevas magistritöös etalonväärtusteks laserskaneerimise tulemustest moodustatud mudelite maht.

Andmete võrdlemise käigus leiti ruumala absoluutne- ja suhteline erinevus ning erinevate fotogramm-meetrilisel teel loodud mudelite keskmised ruutvead. Absoluutne erinevus näitab, kui palju mõõtmistulemus erineb mõõdetava suuruse referentsväärtusest. Suhteliseks erinevuseks nimetatakse absoluutse erinevuse ja referentsväärtuse suhet, mis on väljendatud protsentides.

Keskmise ruutvea arvutamiseks kasutati Gaussi keskmise ruutvea valemit (Randjärv 1997)

$$m = \pm\sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}, \tag{3.1.}$$

kus Δ^2 on laserskaneerimise andmetest saadud mudeli mahu ja fotogramm-meetrilisel teel saadud mudeli mahtude vahede ruutude summa, ja n on erinevate mudelite arv. Keskmise

ruutvea m täpsuse hindamiseks arvutati tulemuse keskmine ruutviga valemiga (Randjärv 1997)

$$m_m = \pm \frac{m}{\sqrt{2n-1}}, \qquad (3.2.)$$

kus m on keskmine ruutviga ja n on erinevate mudelite arv.

3. TÖÖ TULEMUSED NING ARUTELU

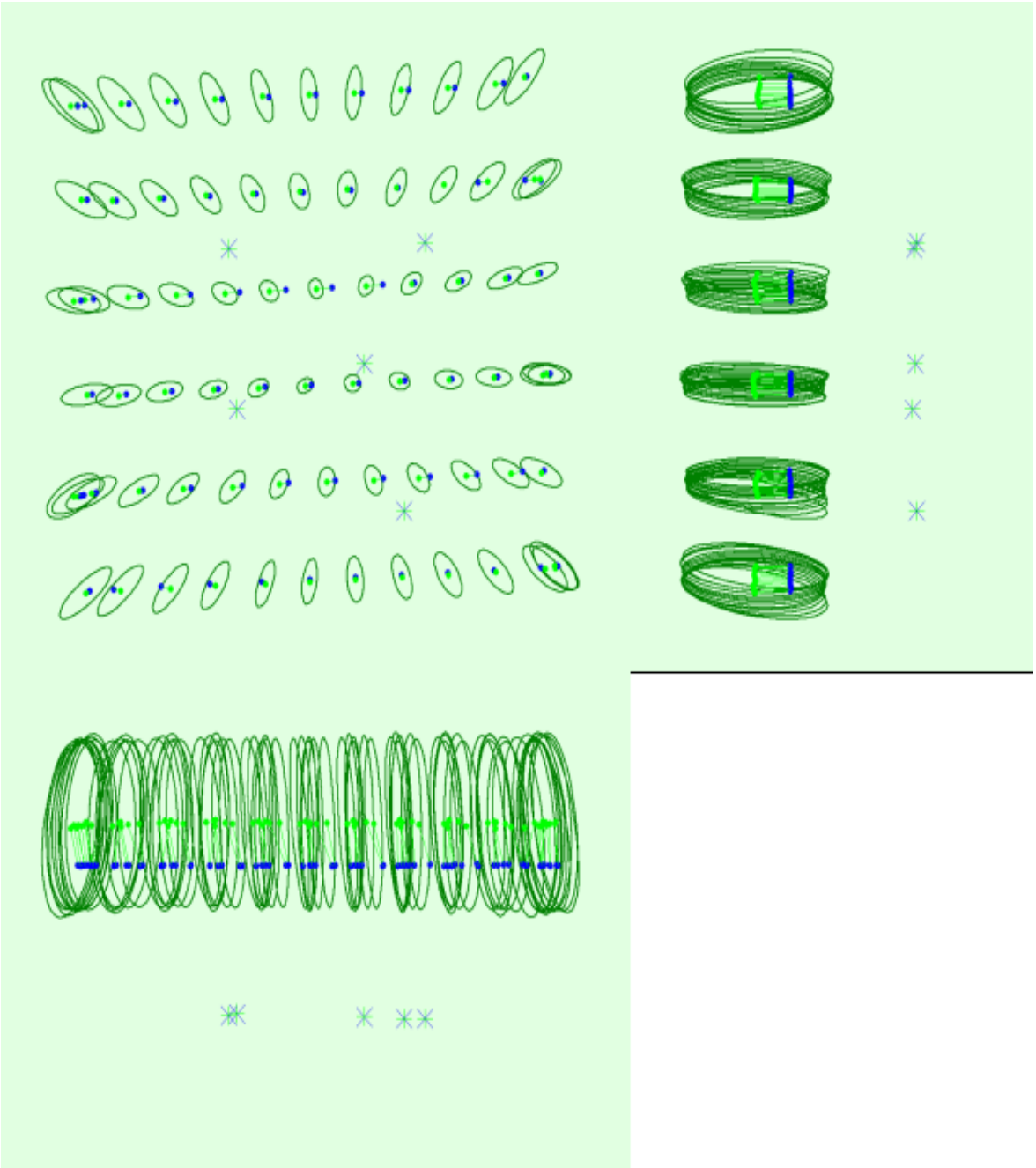
3.1 Lennu analüüs

Nagu varem mainitud, sisaldab ArcGIS Drone2Map projekt üksikasjalikku aruannet, mis kuvab saadud tulemused ja nende kvaliteedi. Kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest mudeleid moodustades, tuvastas programm keskmiselt 41 070 sidepunkti pildi kohta. Vastav näitaja kattuvuse 80% x 80% korral oli 39 754 sidepunkti pildi kohta. Heaks näitajaks loetakse, kui programm tuvastab üle 10 000 sidepunkti pildi kohta (Processing report 2020). Kõikide mudelite moodustamisel on programm kalibreerimisel kasutanud kõiki kaasatud pilte. Hea on näitaja, kui kalibreerimisel on kaasatud rohkem kui 95% piltidest (Processing report 2020).

Esialgse ja optimeeritud fookuskauguse keskmine erinevus on kattuvuse 70% x 70% korral 7,52% ja kattuvuse 80% x 80% korral 7.60%. Antud näitaja on esitatud kõikides raportites hoiatusteatega. Selle üheks põhjuseks võib olla liiga madal pildikvaliteet või vale pildi geolokatsioon. Kiire ja jõulise optimeerimise tagamiseks peaks väärtus jääma 5% piiresse (Processing report 2020). Kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest mudeleid moodustades, tuvastas programm keskmiselt 16 736 vastet kalibreeritud pildi kohta. Vastav näitaja kattuvuse 80% x 80% korral oli 20 697 vastet kalibreeritud pildi kohta. Heaks näitajaks loetakse, kui programm tuvastab üle 1000 vaste pildi kohta (Processing report 2020).

Nihet foto algse ja arvutatud asukoha ning maapinna kontrollpunkti algse ja arvutatud asukoha vahel on näha joonisel 3.1. Vähesel määral on näha nihke joone painutatud kuju külg- ja eestvaates, mis võib viidata probleemile kaamera parameetrite optimeerimisel. Kaamera parameetrite optimeerimise probleemile oli viidatud ka raporti esimeses osas. Lisaks eelnevale on joonisel kajastatud määramatuse ellipsid, mis näitavad kiirtekimbu optimeerimise tulemuse absoluutset asukohamääramatust. On näha, et ellipsid on väiksemad maapinna kontrollpunktide lähedal, kus andmete usaldusväärsus on kõrgem ning suuremad kontrollpunktidest kaugemal ja projekti servaaladel, kus andmete usaldusväärsus

on madalam ning teavet on vähem. Antud näitajat saab parandada, kui jaotada GCP-d uuritavale alale ühtlaselt laiali (Processing report 2020).



Joonis 3.1. Nihe foto algse (sinised punktid) ja arvutatud (rohelised punktid) asukoha ning GCP algse (sinised ristid) ja arvutatud (rohelised ristid) asukoha vahel pealtvaatest (XY tasand), eestvaatest (XZ-tasand) ning külgvaatest (YZ-tasand). Tumerohelised määramatuse ellipsid näitavad kiirtekimbu optimeerimise tulemuse absoluutset asukohamääramatust.

Koostatud aruannete kohaselt oli kõige suurem absoluutne asukohamääramatus kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest ja ilma tähisteta moodustatud mudeli korral (tabel 3.1). Kõige

väiksem oli absoluutne asukohamääramatus kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest ja 21 tähist kasutades moodustatud mudeli korral (tabel 3.1). Kaamera absoluutne määramatus viitab sellele, mil määral on tarkvara kindel iga pildi arvutatud asukohas ja orientatsioonis. 21 tähise korral on parim tulemus loogiline, kuna maapinna kontrollpunktid jagunevad ühtlaselt uuritavale maa-alale laiali. Ilma maapinna kontrollpunkte kasutamata, peaks kaamera absoluutne asukohamääramatus olema sarnane eeldatava GPS-i täpsusega (Processing report 2020).

Tabel 3.1. Kaamera asukoha ja orientatsiooni absoluutne määramatus

		X (m)	Y (m)	Z (m)	Omega [kraadi]	Pii [kraadi]	Kapa [kraadi]
70% x 70% (ilma tähisteta)	keskmine	0,134	0,132	0,215	0,063	0,063	0,063
	sigma	0,019	0,017	0,007	0,001	0,002	0,00
80% x 80% (21 tähist)	keskmine	0,01	0,009	0,038	0,009	0,01	0,002
	sigma	0,004	0,003	0,001	0,004	0,004	0,001

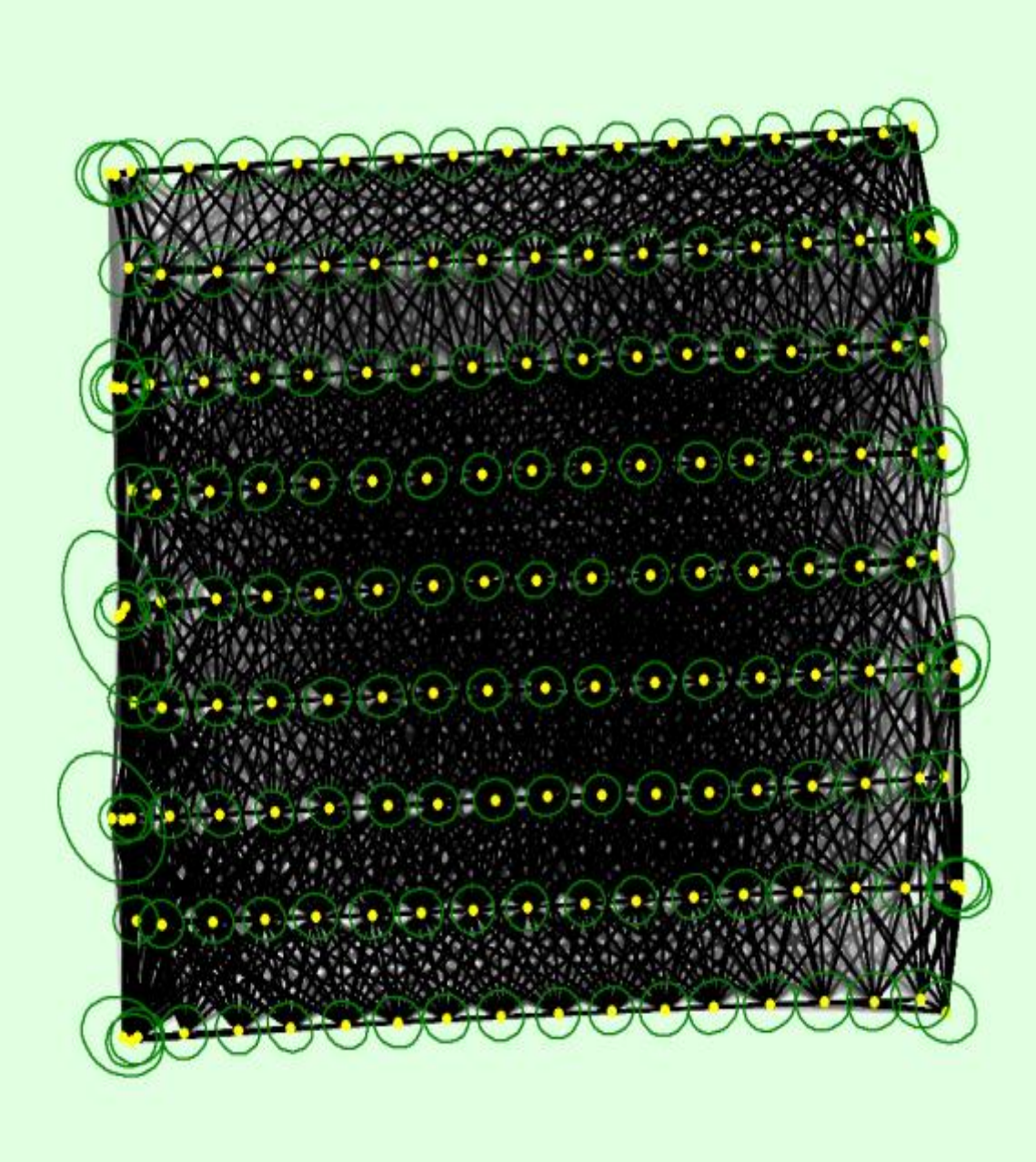
Koostatud aruannete kohaselt oli kõige suurem suhteline asukohamääramatus kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest ja 21 tähist kasutades moodustatud mudeli korral (tabel 3.2). Kõige väiksem oli suhteline asukohamääramatus kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest ja ilma tähisteta moodustatud mudeli korral (tabel 3.2). Kaamera keskmine suhteline asendi määramatus peaks jääma GSD mõne kordse väärtuse piiresse ning keskmine orientatsioonimääramatus olema väiksem, kui 0,1 kraadi (Quality Report Help 2019). Kõikide projektide puhul jääb kaamera asukoha ja orientatsiooni suhteline määramatus eelpool mainitud näitajate piiresse.

Tabel 3.2. Kaamera asukoha ja orientatsiooni suhteline määramatus

		X (m)	Y (m)	Z (m)	Omega [kraadi]	Pii [kraadi]	Kapa [kraadi]
70% x 70% (21 tähist)	keskmine	0,005	0,005	0,011	0,022	0,024	0,002
	sigma	0,001	0,001	0,007	0,012	0,013	0,001
80% x 80% (ilma tähisteta)	keskmine	0,004	0,004	0,006	0,011	0,013	0,002
	sigma	0,001	0,001	0,003	0,006	0,006	0,001

3D punkt moodustatakse sidepunktidest, mida on vaadeldud vähemalt kahel pildil. Kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest ja 21 tähist kasutades moodustatud mudeli korral oli 3D punktide arv, mida oli näha 2 fotol 508287, 3 fotol 184954, 10 fotol 9513 ja 48 fotol 1. Arvutatud fotode asukohad koos sobitatud fotode vaheliste ühendustega kattuvuse 80% x 80% ja 21 tähise korral on kujutatud joonisel 3.2. On näha, et ühendused on tugevamad

projekti keskel ning nõrgemad äärealadel, kus kattuvaid fotosid vähem. Samuti viitavad nõrgemad ühendused aladele, kuhu oleks vaja lisada kattuvaid fotosid või sidepunkte.



Joonis 3.2. Arvutatud fotode asukohad (kollased punktid) koos sobitatud fotode vaheliste ühendustega (mustad jooned). Ühenduste tumedus näitab fotode vahel sobitatud 2D sidepunktide arvu. Heledad ühendused näitavad fotode nõrka ühendust ning nõuavad rohkem fotosid või käsitsi sidepunktide paigaldamist. Tumerohelised määramatuse ellipsid näitavad kiirtekimbu optimeerimise tulemuse suhtelist asukohamääramatust.

Kui arvata välja esialgse ja optimeeritud fookuskauguse keskmine erinevus, võib kõigi koostatud projekti aruannete põhjal väita, et kõik mudelid on hea kvaliteediga.

3.2 Objektide kohta moodustatud mudelite mahud

Mahtude arvutamise täpsust erinevatel meetoditel moodustatud mudelitest uuriti kahel objektil. Nagu varem mainitud, olid objektideks suhteliselt korrapärase kujuga sõelumata kompostimisaun ja korrapärase kujuga kattega kompostimisaun. Erinevateks meetoditeks olid terrestriline laserskaneerimine ja UAV fotogramm-meetria. Fotogramm-meetrilisel meetodil loodi mitu mudelit erineva kattuvusega kogutud piltidest ning orienteerimisel erinevat tähiste arvu kasutades. Loodud mudelite mahte võrreldi terrestrilisel laserskaneerimisel kogutud andmetest moodustatud mudeli mahuga, mis võeti etalonväärtuseks.

Sõelumata kompostimisauna terrestrilise laserskaneerimise käigus kogutud andmetest moodustatud mudeli mahuks saadi 189,01 kuupmeetrit. Fotogramm-meetrilisel meetodil kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustatud mudelite mahud olid järgmised: ilma tähisteta 184,61 m^3, 5 tähisega 197,98 m^3, 21 tähisega 197,78 m^3 ning kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest moodustatud mudelite mahud: ilma tähisteta 186,45 m^3, 5 tähisega 199,62 m^3, 21 tähisega 199,89 m^3 (tabel 3.3).

Tabel 3.3. Sõelumata kompostimisaunast fotogramm-meetrilisel meetodil moodustatud mudelite mahud

Kattuvus	Orienteerimisel kasutatud tähised	Maht (m^3)
70% x 70%	ilma tähisteta	184,61
	5 tähist	197,98
	21 tähist	197,78
80% x 80%	ilma tähisteta	186,45
	5 tähist	199,62
	21 tähist	199,89

Tabel 3.4. Kattega kompostimisaunast fotogramm-meetrilisel meetodil moodustatud mudelite mahud

Kattuvus	Orienteerimisel kasutatud tähised	Maht (m^3)
70% x 70%	ilma tähisteta	222,17
	5 tähist	230,20
	21 tähist	230,06
80% x 80%	ilma tähisteta	216,50
	5 tähist	232,45
	21 tähist	233,80

Kattega kompostimisauna terrestrilise laserskaneerimise käigus kogutud andmetest moodustatud mudeli mahuks saadi 228,58 kuupmeetrit. Fotogramm-meetrilisel meetodil kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustatud mudelite mahud olid järgmised: ilma tähisteta 222,17 m^3, 5 tähisega 230,20 m^3, 21 tähisega 230,06 m^3 ning kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest moodustatud mudelite mahud: ilma tähisteta 216,50 m^3, 5 tähisega 232,45 m^3, 21 tähisega 233,80 m^3 (tabel 3.4).

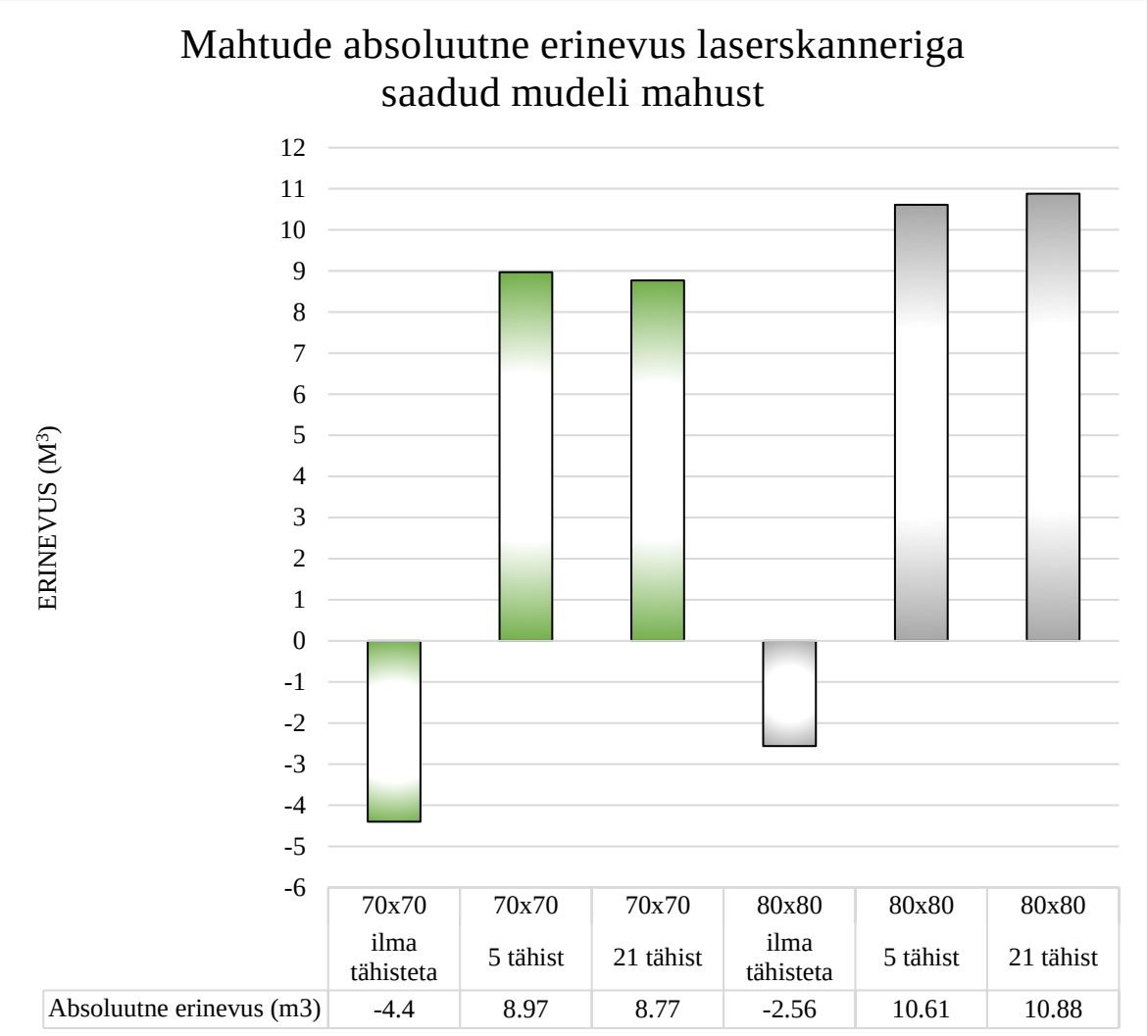
3.5 Moodustatud mudelite mahtude täpsuse hindamine

Sõelumata kompostimisaunast moodustati kokku 7 mudelit, arvutati mudelite mahud ja võrreldi neid terrestrilise laserskaneerimise käigus kogutud andmetest loodud mudeli mahuga. Sõelumata kompostimisaunast moodustatud mudelite mahtude erinevused laserskaneerimisel loodud mudeli mahust on toodud tabelis 3.5.

Tabel 3.5. Sõelumata kompostimisaunast fotogramm-meetrilisel meetodil moodustatud mudelite mahtude erinevused terrestrilise laserskaneerimise andmetest loodud mudelist, koos keskmiste ruutvigadega

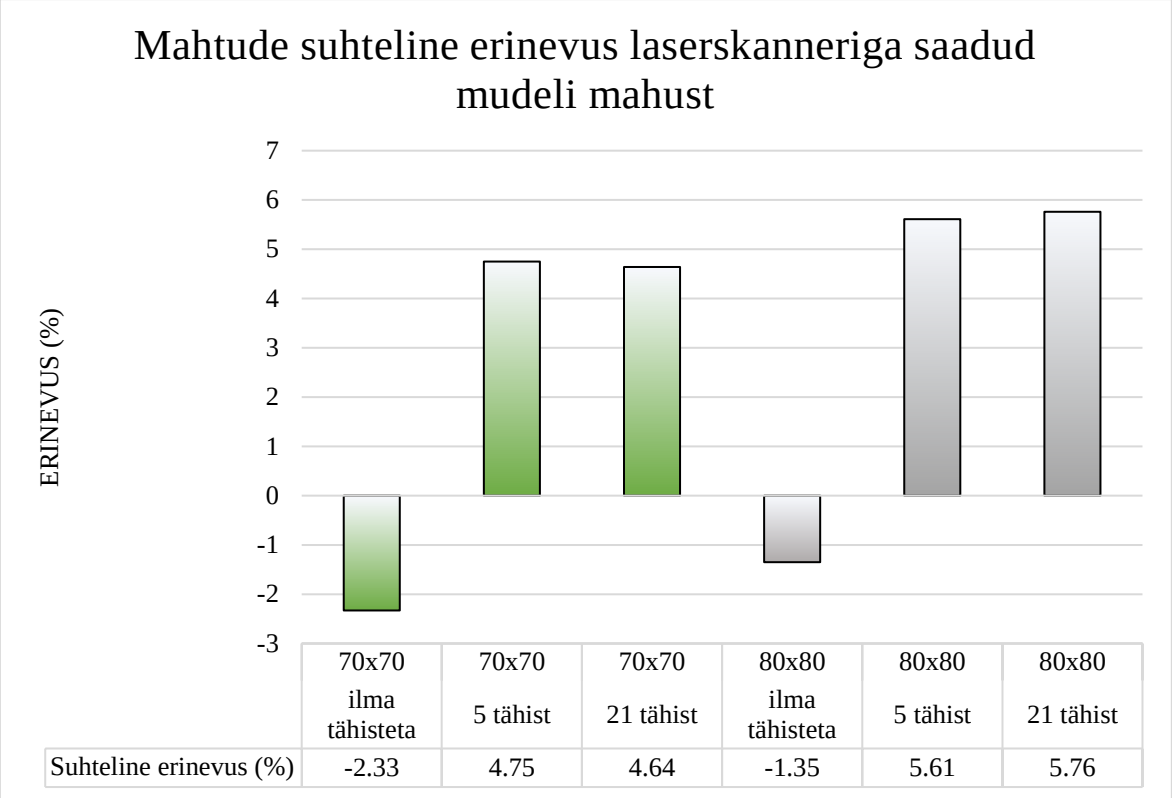
Kattuvus	Tähised	Maht (m^3)	Erinevus (m^3)	Suhteline erinevus (%)	Erinevuse ruut	Keskmine ruutviga (m^3)
Laserskanner Faro FocusS 70		189,01	0	0		
70% x 70%	ilma tähisteta	184,61	-4,40	-2,33	19,36	7,68
	5 tähist	197,98	8,97	4,75	80,46	
	21 tähist	197,78	8,77	4,64	76,91	
80% x 80%	ilma tähisteta	186,45	-2,56	-1,35	6,55	8,90
	5 tähist	199,62	10,61	5,61	112,57	
	21 tähist	199,89	10,88	5,76	118,37	

Kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustati 3 erinevat mudelit. Fotogramm-meetrilisel meetodil moodustatud mudelite mahtude absoluutne erinevus laserskaneerimise andmetest loodud mudelist oli järgmine: ilma tähisteta -4,40 m^3, 5 tähisega 8,97 m^3 ja 21 tähisega 8,77 m^3 (joonis 3.3). Mudelite mahtude suhteline erinevus oli järgmine: ilma tähisteta -2,33%, 5 tähisega 4,75% ja 21 tähisega 4,64% (joonis 3.4). Kattuvusega 70% x 70% kogutud piltidest moodustatud mudelite mahtude keskmiseks ruutveaks saadi 7,68 m^3 ning keskmise ruutvea täpsus oli 3,43 m^3.



Joonis 3.3. Sõelumata kompostimisaunast moodustatud mudelite absoluutne erinevus laserskaneerimise andmetest loodud mudelist.

Kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest moodustati fotogramm-meetrilisel meetodil samuti 3 erinevat mudelit. Loodud mudelite mahtude absoluutne erinevus laserskaneerimise andmetest moodustatud mudelist oli järgmine: ilma tähisteta -2,56 m^3, 5 tähisega 10,61 m^3 ja 21 tähisega 10,88 m^3 (joonis 3.3). Mudelite mahtude suhteline erinevus oli järgmine: ilma tähisteta -1,35%, 5 tähisega 5,61% ja 21 tähisega 5,76% (joonis 3.4). Kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest fotogramm-meetrilisel meetodil moodustatud mudelite mahtude keskmiseks ruutveaks saadi 8,90 m^3 ning keskmise ruutvea täpsus oli 3,98 m^3.



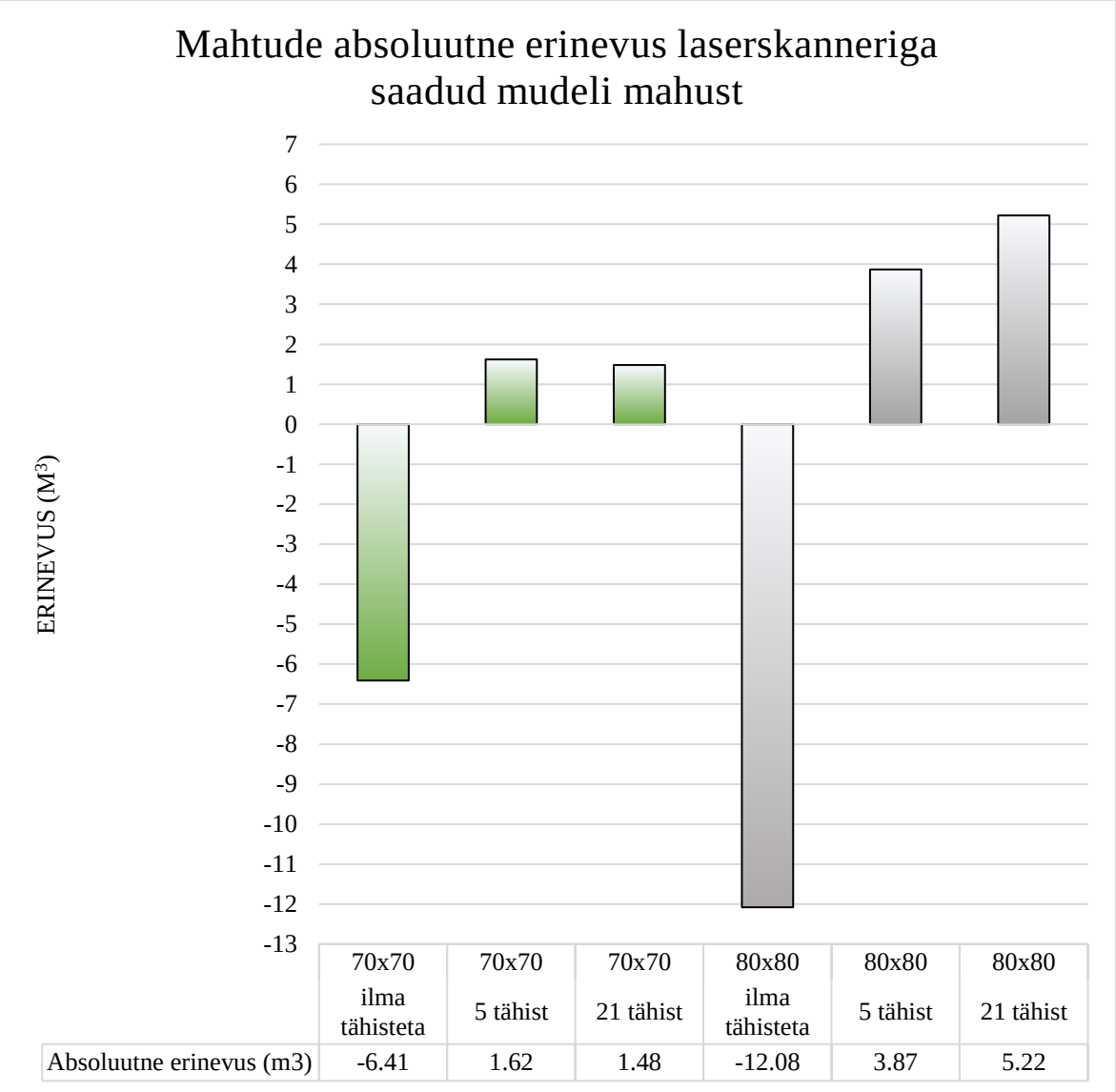
Joonis 3.4. Sõelumata kompostimisaunast moodustatud mudelite suhteline erinevus laserskaneerimise andmetest loodud mudelist.

Kattega kompostimisaunast moodustati kokku 7 mudelit, arvutati mudelite mahud ja võrreldi neid terrestrilise laserskaneerimise käigus kogutud andmetest loodud mudeli mahuga. Kattega kompostimisaunast moodustatud mudelite mahtude erinevused laserskaneerimisel loodud mudeli mahust on toodud tabelis 3.6.

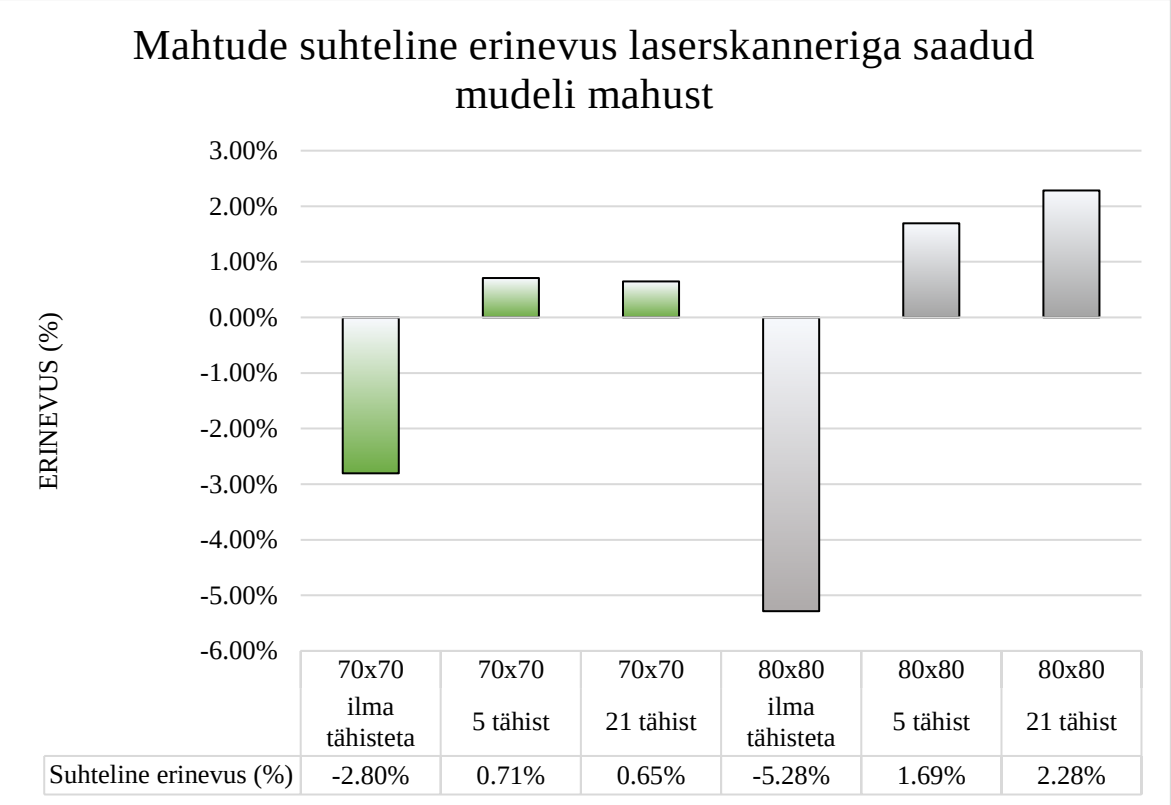
Tabel 3.6. Kattega kompostimisaunast fotogramm-meetrilisel meetodil moodustatud mudelite mahtude erinevused terrestrilise laserskaneerimise andmetest loodud mudelist koos keskmiste ruutvigadega

Kattuvus	Tähised	Maht (m^3)	Erinevus (m^3)	Suhteline erinevus (%)	Erinevuse ruut	Keskmine ruutviga (m^3)
Laserskanner Faro FocusS 70		228,58	0	0		
70% x 70%	ilma tähisteta	222,17	-6,41	-2,80	41,09	3,91
	5 tähist	230,2	1,62	0,71	2,62	
	21 tähist	230,06	1,48	0,65	2,19	
80% x 80%	ilma tähisteta	216,5	-12,08	-5,28	145,93	7,92
	5 tähist	232,45	3,87	1,69	14,98	
	21 tähist	233,8	5,22	2,28	27,25	

Kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustati 3 erinevat mudelit. Fotogrammmeetrilisel meetodil moodustatud mudelite mahtude absoluutne erinevus laserskaneerimise andmetest loodud mudelist oli järgmine: ilma tähisteta -6,41 m^3, 5 tähisega 1,62 m^3 ja 21 tähisega 1,48 m^3 (joonis 3.5). Mudelite mahtude suhteline erinevus oli järgmine: ilma tähisteta -2,80%, 5 tähisega 0,71% ja 21 tähisega 0,65% (joonis 3.6). Kattuvusega 70% x 70% kogutud piltidest moodustatud mudelite mahtude keskmiseks ruutveaks saadi 3,91 m^3 ning keskmise ruutvea täpsus oli 1,75 m^3.



Joonis 3.5. Kattega kompostimisaunast moodustatud mudelite absoluutne erinevus laserskaneerimise andmetest loodud mudelist.



Joonis 3.6. Kattega kompostimisaunast moodustatud mudelite suhteline erinevus laserskaneerimise andmetest loodud mudelist.

Kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest moodustati fotogramm-meetrilisel meetodil samuti 3 erinevat mudelit. Loodud mudelite mahtude absoluutne erinevus laserskaneerimise andmetest moodustatud mudelist oli järgmine: ilma tähisteta -12,08 m^3, 5 tähisega 3,87 m^3 ja 21 tähisega 5,22 m^3 (joonis 3.5). Mudelite mahtude suhteline erinevus oli järgmine: ilma tähisteta -5,28%, 5 tähisega 1,69% ja 21 tähisega 2,28% (joonis 3.6). Kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest fotogramm-meetrilisel meetodil moodustatud mudelite mahtude keskmiseks ruutveaks saadi 7.92 m^3 ning keskmise ruutvea täpsus oli 3,54 m^3.

3.6 Arutelu

Valitud kahest objektist saadi oodatult täpsemad tulemused kattega kompostimisauna kohta. Selle ühe põhjusena võib välja tuua auna peale paigaldatud riidest katte, mis muutis selle pinna tasaseks. Lisaks sellele oli aun korrapärase kuju ja selge väliskontuuriga. Takistuseks ei saanud ka katteriide ühtlane värvus ning programm suutis tuvastada sidepunktid ja luua tiheda punktipilve.

Sõelumata kompostimisaunast moodustatud mudelite madalam täpsus on mitut moodi selgitatav. Esiteks auna pinna ebatasasus ning mõnevõrra korrapäratum kuju. Samuti puudus auna ühel küljel selge väliskontuur ning see kattus osaliselt teise puistanguga. Kuna ArcGIS Pro näol pole tegemist spetsiaalselt projekteerimiseks ja joonestamiseks mõeldud tarkvaraga, ei suuda see sellises olukorras luua nii täpset auna aluse pinna mudelit. Seetõttu võivad auna aluse pinna mudeli kõrgusandmed teise puistanguga kattuvas pinnamudeli osas olla mõnevõrra moonutatud.

Võrreldes etalonväärtusega saadi fotogramm-meetrilisel meetodil kõige täpsemad tulemused kattega kompostimisaunast kattuvuse 70% x 70% ja 21 tähise korral. Selliseid parameetreid kasutades saadi mudeli absoluutseks erinevuseks 1,48 m^3 ja suhteliseks erinevuseks 0,65%. Kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustatud kattega kompostimisauna absoluutsed erinevused varieerusid 1,48 ja -6,41 m^3 ning suhtelised erinevused 0,65 ja -2,80% piires. Mudelite keskmine ruutviga oli 3,91 m^3 ning keskmise ruutvea täpsus 1,75 m^3.

Kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest moodustatud kattega kompostimisauna mudelite täpsused olid võrreldes kattuvusega 70% x 70% mõnevõrra ebatäpsemad. Kõige paremad tulemused saadi kasutades 5 maapinna kontrollpunkti, kus absoluutne erinevus oli 3,87 m^3 ja suhteline erinevus 1,69%. Sarnaselt kattega kompostimisaunale andis kattuvus 70% x 70% parema tulemuse ka sõelumata kompostimisauna mõõdistamisel. Sellisele järeldusele jõudsid 2019. aastal Eesti Maaülikoolis kaitstud bakalaureusetöös ka Oskar Rahu ja Karmo Siim, kes leidsid, et parim tulemus saadi pildistades 70% × 70% piltide omavahelise kattuvusega, kus X-koordinaadi määramise krv oli 0,012 meetrit, Y-koordinaadi määramise krv 0,012 meetrit ja Z-koordinaadi määramise krv 0,019 meetrit.

Mõlemast objektist ilma tähisteta moodustatud mudelite puhul saadi sarnased ja kohati isegi täpsemad tulemused, kui maapinna kontrollpunkte kasutades. Ilma tähisteta moodustatud mudelite suhtelised erinevused varieerusid -5,28 ja -1,35% piires. Võttes aluseks määruses „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ kehtestatud lubatud erinevuse 10%, jäid kõik ilma tähisteta fotogramm-meetrilisel teel loodud mudelite mahud üsna suure varuga lubatud erinevuse piiresse. Seda on enda 2018. aastal Eesti Maaülikoolis kaitstud magistritöös täheldanud ka Kaupo Kokamägi.

Üllatavalt saadi ilma tähisteta moodustatud sõelumata kompostimisauna mudelite korral täpsemad andmed, kui maapinna kontrollpunkte kasutades. Kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest ilma tähisteta moodustatud mudeli absoluutne erinevus laserskaneerimise andmetest loodud mudelist oli -4,40 m^3 ja suhteline erinevus -2,33%. Samad näitajad kattuvuse 80% x 80% korral olid -2,56 m^3 ja -1,35%. Seda võis põhjustada mudeli madal absoluutne täpsus, mistõttu oli vajalik auna väliskontuuri nihutamine. Kuna sõelumata kompostimisauna üks külg kattus osaliselt teise puistanguga, võib ka väike ebatäpsus auna kontuuris tuua kaasa muudatused mahus.

Reeglina aitas rohkemate tähiste kasutamine mõlemal objektil tulemuste täpsust parandada. Võrreldes omavahel kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustatud sõelumata kompostimisauna mudelite täpsuseid, saadi suhteliseks erinevuseks 5 tähisega 4,75% ja 21 tähisega 4,64%. Kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustatud kaetud kompostimisauna mudelite suhtelised erinevused olid 5 tähisega 0,71% ja 21 tähisega 0,65%. Täpsuse paranemisele tähiste arvu suurendades viitab oma 2021. aastal läbiviidud uurimistöös ka Ali Ulvi. Samas on uurimistööde käigus tehtud ka kindlaks, et vajalik täpsus saavutatakse 4-5 GCP kasutamisega, ning suurema hulga maapinna kontrollpunktide lisamine ei aita täpsust oluliselt suurendada.

Kõigi antud töös fotogramm-meetrilisel teel moodustatud mudelite mahud jäid üsna suure varuga määruses „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ kehtestatud lubatud erinevuse 10% piiresse. Kõige ebatäpsem oli kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest, 21 tähist kasutades moodustatud sõelumata kompostimisauna mudel, mille suhteline erinevus laserskaneerimise andmetest moodustatud mudelist oli 5,76%. Kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest moodustatud sorteerimata kompostimisauna absoluutsed erinevused varieerusid -2,56 ja 10,88 m^3 ning suhtelised erinevused -1,4 ja 5,8% piires. Mudelite keskmine ruutviga oli 8,90 m^3 ning keskmise ruutvea täpsus 3,98 m^3.

ArcGIS Drone2Map projekti aruannete kohaselt olid kõikide projektide puhul hea kvaliteediga leitud sidepunktide arv, kalibreerimisel kasutatud piltide arv ja vastete arv kalibreeritud pildi kohta. Kõikides raportites esitati hoiatusteatega esialgse ja optimeeritud fookuskauguse keskmine erinevus. Vaatamata hoiatusteatele võib aruannete põhjal siiski väita, et piltide põhjal kokku pandud mudelid on hea kvaliteediga ning hoiatusteade ei mõjutanud oluliselt mudelite täpsust, kuna jäätmeaunade mudelite mahud jäid varuga

määruses „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ kehtestatud lubatud erinevuse piiresse.

Uurimistöö käigus tehti kindlaks, et jäätmeauna mahtude arvutamiseks piisavat täpsust on võimalik saavutada ka odavamat mitte RTK - võimekusega mehitamata õhusõidukit ning kaamera komplekti kasutades. Samuti leiti, et kogutud fotodest on võimalik täpseid mudeleid luua ja mudelite mahtu mõõta ka spetsiaalselt fotogramm-meetriaks, projekteerimiseks ja joonestamiseks mitte ettenähtud tarkvaraga. Kindlasti on võimalik spetsiaalselt fotogramm-meetriaks väljatöötatud tarkvara kasutades mudelite täpsust parandada. Ismail Elkhrachy kasutas 2021. aastal läbi viidud uurimistöös kahte spetsiaalselt fotogramm-meetriaks mõeldud tarkvara Agisoft Metashape ja Pix4dmapper ning tõestas, et erineva täpsusega tulemusi annavad ka spetsiaalsed tarkvarad. Täpsemad tulemused saadi, kasutades tarkvara Agisoft Metashape.

KOKKUVÕTE

Uurimistöö teema „Mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal jäätmeaunade mahtude arvutamise täpsus“ valiti, kuna keskkonnajärelevalves kasutatakse jäätmeaunade mõõdistamisel mehitamata õhusõidukit, kuid puudub teadmine, kas mehitamata õhusõidukid annavad jäätmealastel mõõdistustel piisava täpsuse. Käesoleva magistritöö eesmärk oli selgitada välja, kas odava mehitamata õhusõidukiga kogutud aerofotodest moodustatud mudel on jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega ning vastab kehtivas seadusandluses kehtestatud nõuetele.

Sõelumata kompostimisauna terrestrilise laserskaneerimise käigus kogutud andmetest moodustatud mudeli mahuks saadi 189,01 m^3. Kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustatud mudelite keskmiseks ruutveaks saadi 7,68 m^3. Sama näitaja kattuvusega 80% x 80% oli 8,90 m^3. Kattega kompostimisauna terrestrilise laserskaneerimise käigus kogutud andmetest moodustatud mudeli mahuks saadi 228,58 m^3. Kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustatud mudelite keskmine ruutviga oli 3,91 m^3. Sama näitaja kattuvusega 80% x 80% oli 7,92 m^3.

Kõigi antud töös fotogramm-meetrilisel meetodil moodustatud mudelite mahud jäid määruses „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ kehtestatud lubatud erinevuse 10% piiresse. Kõige täpsemad tulemused saadi kattega kompostimisaunast kattuvuse 70% x 70% ja 21 tähise korral. Selliseid parameetreid kasutades saadi mudeli absoluutseks erinevuseks 1,48 m^3 ja suhteliseks erinevuseks 0,65%. Kõige ebatäpsem oli kattuvusega 80% x 80% kogutud fotodest ning 21 tähist kasutades moodustatud sõelumata kompostimisauna mudel, mille absoluutne erinevus laserskaneerimise andmetest moodustatud mudelist oli 10,88 m^3 ja suhteline erinevus 5,76%.

Uurimistöö käigus saadi kinnitus hüpoteesile, et mehitamata õhusõidukiga kogutud fotodest moodustatud mudeli mahtude arvutamise täpsus jääb määruses „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ kehtestatud lubatud erinevuse 10% piiresse. See annab ka kinnituse, et mehitamata õhusõidukiga kogutud fotodest fotogramm-meetrilisel meetodil moodustatud mudelid on jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega ning vastavad kehtivale seadusandlusele. Mudelite täpsusele ei avaldanud olulist mõju ka see, et

ArcGIS Drone2Map kõikides aruannetes esitati hoiatusteatega esialgse ja optimeeritud fookuskauguse keskmine erinevus.

Magistritöö käigus leiti, et kattuvusega 70% x 70% kogutud fotodest moodustatud mudel annab mahtude mõõtmisel paremaid tulemusi, kui kattuvus 80% x 80%. Kohati saadi ilma tähisteta moodustatud mudelite korral täpsemad andmed, kui maapinna kontrollpunkte kasutades. Seda võis põhjustada mudeli madal absoluutne täpsus, mistõttu oli vajalik auna väliskontuuri nihutamine. Reeglina aitas tähiste kasutamine tulemuste täpsust siiski parandada.

Lisaks eelnevale selgus uurimistöö käigus, et ilma tähisteta moodustatud mudeli mahtude arvutamise täpsus jääb määruses „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ kehtestatud lubatud erinevuse 10% piiresse. Samuti leiti, et kogutud fotodest on võimalik täpseid mudeleid luua ja mudelite mahtu mõõta ka spetsiaalselt fotogramm-meetriaks, projekteerimiseks ja joonestamiseks mitte ettenähtud tarkvaraga.

Arvestades käesoleva uurimustöö tulemusi, võib asuda seisukohale, et mehitamata õhusõidukiga kogutud fotodest fotogramm-meetrilisel meetodil moodustatud mudelid on jäätmealaste mõõdistustööde läbiviimiseks piisava täpsusega. Käesoleva magistritöö autor annab soovituse eelistada fotogramm-meetrilise lennu läbiviimisel kattuvust 70% x 70%. Hinnangulisi mõõdistusi võib läbi viia ka ilma maapinna kontrollpunkte kasutamata, kuid menetluse käigus teostatavate mõõdistuste puhul on vajalik tähiste kasutamine, et tagada mudeli parem täpsus. Takistuseks võib osutuda, et eraldi nõudeid prügilate ja jäätmeaunade mõõtmise täpsusele Eestis hetkel kehtestatud ei ole. Seni on soovituslik teostada mõõdistused, järgides määrust „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“.

Kuna käesolevas magistritöös uuritud objektid on oma omadustelt ja kujult suhteliselt lihtsad, teeb autor ettepaneku uurida tulevikus keerukama kujuga jäätmeaunade mahtude arvutamise täpsuseid. Lisaks sellele võiks uurida ka kattuvuse vähendamise mõju mudeli täpsusele. Huvi võiks pakkuda ka tarkvara ArcGIS Drone2Map võrdlemine mõne spetsiaalselt fotogramm-meetriaks mõeldud tarkvaraga.

KASUTATUD KIRJANDUS

Agarwal, S., Snavely, N., Seitz, S. M., Szeliski, R. (2010). Bundle Adjustment in the Large. /Koost. K. Daniilidis *et al*.. Computer Vision – ECCV 2010, Lecture Notes in Computer Science. Berlin Heidelberg: Springer, lk 29–42.

AgEagle. (2018). Using DJI GS Pro to Plan Agricultural Survey Missions. [veebileht] https://agribotix.zendesk.com/hc/en-us/articles/115000814654-Using-DJI-GS-Pro-to-Plan-Agricultural-Survey-Missions (18.04.2022).

Ajayi, O. G., Ajulo, J. (2021). Investigating the Applicability of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Photogrammetry for the Estimation of the Volume of Stockpiles. - *Quaestiones Geographicae*. Nr. 40. [e-ajakiri] https://www.sciendo.com/article/10.2478/quageo-2021-0002 (21.04.2022).

Almutlaq, F., Nahas, F., Mulligan, K. (2022). Calculation of the Rub' al Khali Sand Dune Volume for Estimating Potential Sand Sources. - *Remote Sensing*. Nr. 14. [e-ajakiri] https://doi.org/10.3390/rs14051216 (10.03.2022).

ArcGIS Drone2Map Help. Processing report. [veebileht] https://doc.arcgis.com/en/drone2map/help/processing-report.htm (26.05.2022).

Multispectral and Hyperspectral Image Processing, Part 1: Initial Processing. – Encyclopedia of Optical Engineering. (2007). /Ed. W. B. Clodius. New York: Marcel Dekker Inc. [on-line] https://books.google.ee/books?id=4hBTUY_2BMIC&pg=PA1439&lpg=PA1439&dq=Multispectral+and+Hyperspectral+Image+Processing+clodius&source=bl&ots=kH9onHcc0f&sig=6J3NCUa8rYUdFw0Bh7Bto2QUX1I&hl=et&sa=X&ved=0ahUKEwjDk7Se4_jaAhW72JCJoKHaTgAMQQ6AEIJjAA#v=onepage&q=Multispectral%20and%20Hyperspectral%20Image%20Processing%20clodius&f=false (26.02.2022)

DJI. (s.a). Phantom 3 professional specs. [veebileht] https://www.dji.com/ee/phantom-3-pro (18.04.2022).

FARO. (2021). Focus laser scanner data sheet [veebileht] https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resources/2_TECH-SHEET/TechSheet_Focus_Laser_Scanner/TechSheet_Focus_Laser_Scanner_EN.pdf?rev=1291d7f5ef814fe99d471dde60321833 (15.04.2022).

Balestrieri, E., Daponte, P., Vito, L. D., Lamonaca, F. (2021). Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview. - *Sensors*. Nr. 21. [e-ajakiri] https://doi.org/10.3390/s21041518 (13.03.2022).

Bornschlegel, T., Muangnak, N., Aimmanee, P., Makhanov, S., Uyyanonvara, B. (2012). Finding curves's convergence using Delaunay search. - *The First Asian Conference on Information Systems.* Siem Reap, Cambodia, lk. 1-5. https://www.researchgate.net/publication/262070442_FINDING_CURVES'S_CONVERGENCE_USING_DELAUNAY_SEARCH (15.04.2022).

Eisenbeiß, Henri. 2009. UAV Photogrammetry. Doktoritöö. Šveitsi Föderaalne Tehnikainstituut. Zürich. 203 lk. https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/20976 (22.02.2022).

Elkhrachy, I. (2021). Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. - *Alexandria Engineering Journal*. Nr. 60. [e-ajakiri] https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.011 (25.04.2022).

Gerke, M. (2018). Developments in UAV-Photogrammetry. - *Journal of Digital Landscape Architecture.* Nr. 3. [e-ajakiri] https://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/DLA_2018/537642028.pdf (20.03.2022).

Jaud, M., Bertin, S., Beauverger, M., Augereau, E., Delacourt, C. (2020). RTK GNSS-Assisted Terrestrial SfM Photogrammetry without GCP: Application to Coastal Morphodynamics Monitoring. - *Remote Sensing*. Nr. 12. [e-ajakiri] https://doi.org/10.3390/rs12111889 (05.03.2022).

Jones, H. G., Vaughan, R. A. (2010). Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications. Oxford: Oxford University Press. 353 lk.

Karsidag, G., Alkan, R. M. (2012). Analysis of the Accuracy of Terrestrial Laser Scanning Measurements. - *FIG Working Week 2012*, Rome, Italy, lk 1-16. https://www.researchgate.net/publication/335230161_Analysis_of_the_Accuracy_of_Terrestrial_Laser_Scanning_Measurements (06.04.2022).

Khoshnoud, F., Quadrelli, M. B., Esat, I. I., Robinson, D. (2020). Quantum Cooperative Robotics and Autonomy. - *Instrumentation Journal*. Nr. 6. [e-ajakiri] https://arxiv.org/abs/2008.12230 (19.02.2022).

Kokamägi, Kaupo. 2018. Mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal puistangu mahtude arvutamise täpsus. Magistritöö. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 89 lk.

Köök, Romet. 2018. Mehitamata lennumasinate (UAV) fotogramm-meetriliste mõõdistuste põhjal koostatavate pinnamudelite täpsus tee-ehituslike rakenduste näitel. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse ja arhitektuuri instituut. Tallinn. 92 lk.

Liba, N. (2005) Fotogramm-meetria alused. Tartu: OÜ Halo Kirjastus. 303 lk.

Linder, W. (2016). Digital photogrammetry: A practical course. (4. tr.). Düsseldorf: Springer. 209 lk.

Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., Chandra, S. (2007). The Effect of LiDAR Data Density on DEM Accurace. - *International Congress on Modeling and Simulation*. Christchurch, New Zealand, lk. 1363-1368. https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.4833&rep=rep1&type=pdf (07.04.2022).

Luhmann, T., Robson, S., Kyle S. (2006). Close-Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications. Dunbeath: Whittles. 497 lk.

Maqsood, A., Go, T. H. (2012). Design Improvement of a Versatile Ducted-Fan UAV. - *Journal of Mechanical Engineering*. Nr. 9. [e-ajakiri] https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/8397/1/AJ_ADNAN%20MAQSOOD%20JME%2012.pdf (18.03.2022).

Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord. (vastu võetud 10.05.2019, viimati jõustunud 21.08.2020) – *Riigi Teataja* https://www.riigiteataja.ee/akt/125012012004 (22.04.2022).

McHugh, S. T. (2018). Understanding Photography: Master Your Digital Camera and Capture That Perfect Photo. San Francisco: No Starch Press. 242 lk.

Mehitamata õhusõidukite käitamise normide ja menetluste kohta. (vastu võetud 24.05.2019, viimati jõustunud 04.04.2022). - *Euroopa Liidu Teataja* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/ALL/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.152.01.0045.01.EST (02.04.2022).

Neitzel, F., Klonowski, J. (2011). Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. - *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Nr. 38. [e-ajakiri] https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-1-C22/39/2011/ (23.02.2022).

Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D Mapping Applications: A Review. - *Applied Geomatics*. Nr. 6. [e-ajakiri] https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-013-0120-x (21.03.2022).

Niethammer, U., Rothmund, S., Joswig, M. (2009). UAV-based remote sensing of the slow-moving landslide Super-Sauze. - *Proceedings of the International Conference on Landslide Processes: from geomorpholgic mapping to dynamic modelling*. (Eds. J. P. Malet, A. Remaître, T. Boogard), Strasbourg, France, lk 69-74. https://www.semanticscholar.org/paper/UAV-based-remote-sensing-of-the-slow-moving-Niethammer-Rothmund/d120009a51e6929af77f775544ff1f732c7bf9f2 (24.03.2022).

Pix4D. Image acquisition. [veebileht] https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002471546-Image-acquisition (25.02.2022).

Pix4D. Do more GCPs equal more accurate drone maps. [veebileht] https://www.pix4d.com/blog/GCP-accuracy-drone-maps (26.02.2022).

Pix4D. Quality Report Help. [veebileht] https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558689-Quality-Report-Help (26.05.2022).

Pngwing. Airplane Clipart Transparent PNG. [veebileht] https://www.pngwing.com/en/free-png-dvbqu (22.03.2022)

Prokaamera. DJI Phantom 3 Professional kasutusjuhend. [veebileht] https://www.prokaamera.ee/DATA/www_files/dji/juhendid/Phantom_3_Professional_juhend.pdf (18.04.2022).

O'Connor, J., Smith, M., James, M.-R. (2017). Cameras and Settings for Aerial Surveys in the Geosciences: Optimizing Image Data. - *Progress in Physical Geography*. Nr. 41. [e-ajakiri] https://doi.org/10.1177/0309133317703092 (22.02.2022).

Quieregatto, P. R., Neto, M. S., Furtado, F., Quieregatto, A. A., Junior, T. W. T., Ferreira, L. M. (2020). JPEG and Raw Image Files Compared to Direct Measurement of the Breast Region. - *Acta Cirúrgica Brasileira*. Nr. 35. https://doi.org/10.1590/s0102-865020200100000008 (21.02.2022).

Rahu, Oscar., Siim, Karmo. 2019. Mehitamata õhusõidukiga pildistatud aerofotodest valmistatud ortofotomosaiikide ja 3D- punktipilvede täpsust mõjutavad faktorid. Bakalaureusetöö. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 120 lk.

Randjärv, J. (1997). Geodeesia I osa. Tartu. 399 lk.

Ruumiliste loodusandmete statistiline analüüs (2012). /Ed. K. Remm, J. Remm, A. Kaasik. Tartu: Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut. [on-line] ebrary (22.03.2022).

Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D. (2012). UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling - Current status and future perspectives. - *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Nr. 38. [e-ajakiri] https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-1-C22/25/2011/ (23.02.2022).

Remondino, F., Gerke, M. (2015). Oblique Aerial Imagery – A Review. - *Photogrammetric Week '15 kogumik.* Belin, Germany, lk 75-83. https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo15/090Remondino.pdf (18.03.2022).

Rubio, E. (2021). Understanding and Using Visible Light. New York: Enslow Publishing, LLC. 64 lk.

Rämman, Kaidi. 2021. Ehitusjäätmete mahu analüüs droonidega. Magistritöö. Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Tartu. 112 lk.

Sandau, R. (2010). Digital Airborne Camera. Dordrecht: Springer Netherlands. 343 lk.

Singhal, G., Bansod, B., Mathew, L. (2018). Unmanned Aerial Vehicle Classification, Applications and Challenges: A Review. - *Preprints.* Nr. 1. [e-ajakiri] https://www.preprints.org/manuscript/201811.0601/v1 (17.03.2022).

Siriba, D. N., Matara, S. M., Musyoka, S. M. (2015). Improvement of volume estimation of stockpile of earthworks using a concave hull- footprint. – *Micro, Macro & Mezzo Geo Information*, Nr. 5. [e-ajakiri] https://www.researchgate.net/publication/287196050_Improvement_of_volume_estimation_of_stockpile_of_earthworks_using_a_concave_hull-footprint (20.03.2022).

Snavely, Keith. 2008. Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. Doktoritöö. Washingtoni Ülikool. Washington. 210 lk. https://www.cs.cornell.edu/~snavely/publications/thesis/thesis.pdf (06.03.2022).

Stief, T. (2014). Editorial: Hemostasis activation in inflammation. - *Hemostasis Laboratory*. Nr. 7. [e-ajakiri] https://www.researchgate.net/publication/274993678_EDITORIAL_HEMOSTASIS_ACTIVATION_IN_INFLAMMATION (19.02.2022).

Sykora-Bodie S. T., Bezy, V., Johnston, D. W., Newton, E., Lohmann, K. J. (2017). Quantifying Nearshore Sea Turtle Densities: Applications of Unmanned Aerial Systems for Population Assessments. - *Scientific Reports.* Nr. 7. [e-ajakiri] https://www.nature.com/articles/s41598-017-17719-x (18.03.2022).

Thompson, L., Shi, Y., Ferguson, F. B. (2017). Getting Started with Drones in Agriculture. - *Nebraska Extension.* [e-ajakiri] https://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/g2296.pdf (28.03.2022).

Transpordiamet. (2022). Droonide lennutamise reeglid. [veebileht] https://transpordiamet.ee/droonid (29.03.2022).

Trimble. (s.a). Trimble R4 GNSS system datasheet [veebileht] https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-468267/022543-490E_TrimbleR4GNSS_DS_0413_LR.pdf (15.04.2022).

Ulvi, A. (2021). The Effect of the Distribution and Numbers of Ground Control Points on the Precision of Producing Orthophoto Maps with an Unmanned Aerial Vehicle. - *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. Nr. 20. [e-ajakiri] https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1973479 (29.04.2022).

Yang, H., Li, H., Gong, Z., Dai, W., Lu, S. (2020). Relations between the Number of GCPs and Accuracy of UAV Photogrammetry in the Foreshore of the Sandy Beach. - *Journal of Coastal Research*. Nr. 95. https://doi.org/10.2112/SI95-263.1 (02.04.2022).

Yongxiao, W., Xitun, Y., Xiongfei, Y., Hang, Z., Qi, H. (2021). Research on Earthwork Calculation Based on TIN Model. - *3rd International Conference on Civil Architecture and Energy Science (CAES 2021).* (Eds. L. Wang, V. Yepes), Hangzhou, China, lk 1-4. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124803001 (25.03.2022).

LISAD

Lisa 1. GNSS mõõtmiste raport

Point coordinates for job 02062021								
Point	North	East	Elev	Code	Hz Prec	Vt Prec	PDOP	Sats
1	6464804.191	661315.386	35.801		0.008	0.014	1.7	16
3000	6464769.434	661303.752	35.865		0.008	0.013	1.4	16
3001	6464774.123	661303.567	35.846		0.007	0.012	1.4	16
3002	6464773.581	661305.479	35.804		0.007	0.011	1.4	16
3003	6464763.814	661310.97	35.774		0.007	0.011	1.4	16
3004	6464760.573	661319.747	35.547		0.008	0.012	1.5	16
3005	6464767.244	661326.847	35.477		0.007	0.012	1.4	16
3006	6464772.193	661327.137	35.504		0.007	0.012	1.4	16
3007	6464799.695	661328.956	35.582		0.008	0.012	1.4	16
3008	6464810.259	661326.447	35.658		0.008	0.013	1.4	16
3009	6464804.212	661315.389	35.799		0.007	0.012	1.4	16
3010	6464800.437	661306.596	35.921		0.007	0.011	1.4	16
3011	6464789.158	661307.071	35.852		0.006	0.011	1.4	18
3012	6464781.085	661308.022	35.744		0.006	0.01	1.4	18
3013	6464784.308	661284.626	36.213		0.006	0.011	1.3	18
3014	6464788.128	661265.152	36.742		0.006	0.01	1.4	18
3015	6464802.462	661264.117	36.636		0.006	0.01	1.4	18
3016	6464831.578	661262.645	36.231		0.006	0.01	1.4	17
3017	6464817.16	661280.937	35.984		0.006	0.01	1.4	17
3018	6464836.079	661309.317	35.61		0.006	0.009	1.4	17
3019	6464833.168	661326.492	35.478		0.006	0.009	1.4	17
3020	6464815.865	661332.697	35.486		0.006	0.01	1.4	17
3021	6464818.584	661341.085	35.552		0.006	0.009	1.4	17
3022	6464810.707	661342.7	35.807		0.006	0.009	1.4	17
3023	6464826.933	661279.149	35.945		0.006	0.009	1.1	21
3024	6464830.316	661290.862	35.759		0.006	0.01	1.1	21
M1	6464768.369	661326.925	35.497		0.006	0.01	1.4	17
M10	6464791.313	661328.657	35.504		0.005	0.008	1.2	22
M11	6464811.265	661342.729	35.819		0.006	0.011	1.4	20
M12	6464814.565	661332.171	35.509		0.005	0.01	1.4	20
M13	6464822.818	661285.652	35.893		0.005	0.009	1.4	21
M14	6464819.658	661278.031	36.043		0.005	0.009	1.3	22
M15	6464821.512	661269.545	36.179		0.005	0.009	1.3	21
M16	6464832.186	661266.307	36.191		0.005	0.009	1.3	21
M2	6464761.885	661323.782	35.507		0.006	0.01	1.4	17
M3	6464759.937	661310.441	35.736		0.006	0.009	1	21
M4	6464763.666	661304.412	35.869		0.006	0.009	1.1	20
M5	6464777.747	661303.97	35.849		0.007	0.01	1.1	20
M6	6464799.359	661310.153	35.858		0.006	0.009	1.1	21

Lisa 1 järg

M7	6464804.144	661317.427	35.772		0.006	0.01	1.2	20
M8	6464804.946	661323.997	35.675		0.005	0.009	1.1	21
M9	6464796.149	661329.844	35.561		0.005	0.009	1.2	22

Lisa 2. ArcGIS Drone2Map töötlemise raport

Processing Report

Generated with ArcGIS Drone2Map

Summary

Project	Aardlapalu
Processed	2021-06-23 19:35:20
Camera Model Name(s)	FC300X_3.6_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.10 cm / 0.83 in
Area Covered	0.043 km^2 / 4.2699 ha / 0.02 sq. mi. / 10.5566 acres
Time for Initial Processing (without report)	05m:18s

Quality Check

Images	median of 41070 keypoints per image	✓
Dataset	75 out of 75 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	7.34% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	⚠
Matching	median of 16754.6 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.038 m	✓

Preview

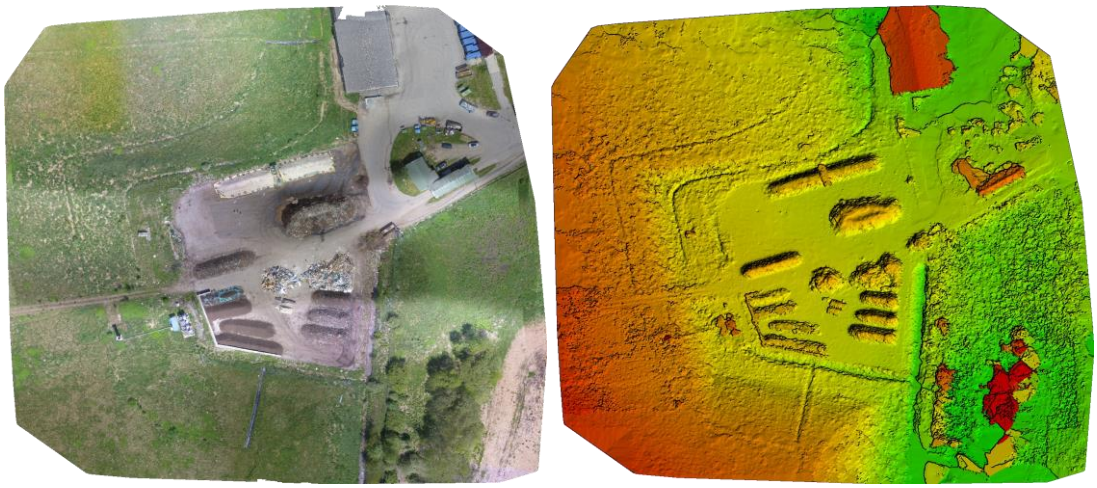


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Number of Calibrated Images	out of 75
Number of Geolocated Images	out of 75

Calibration Details

Initial Image Positions

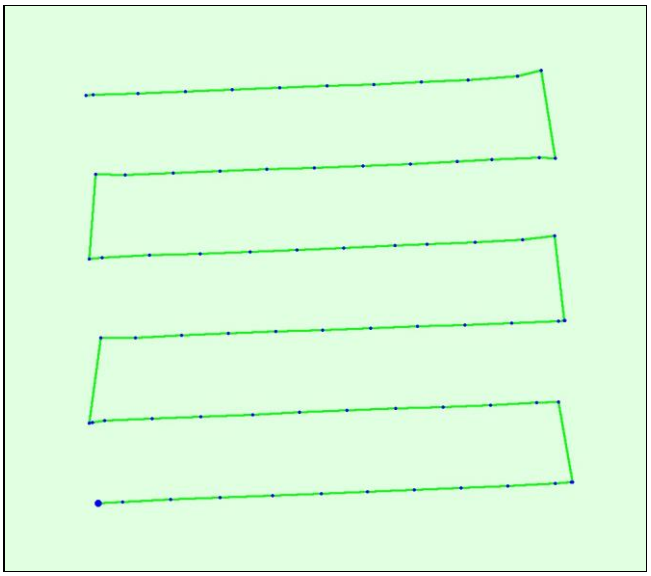
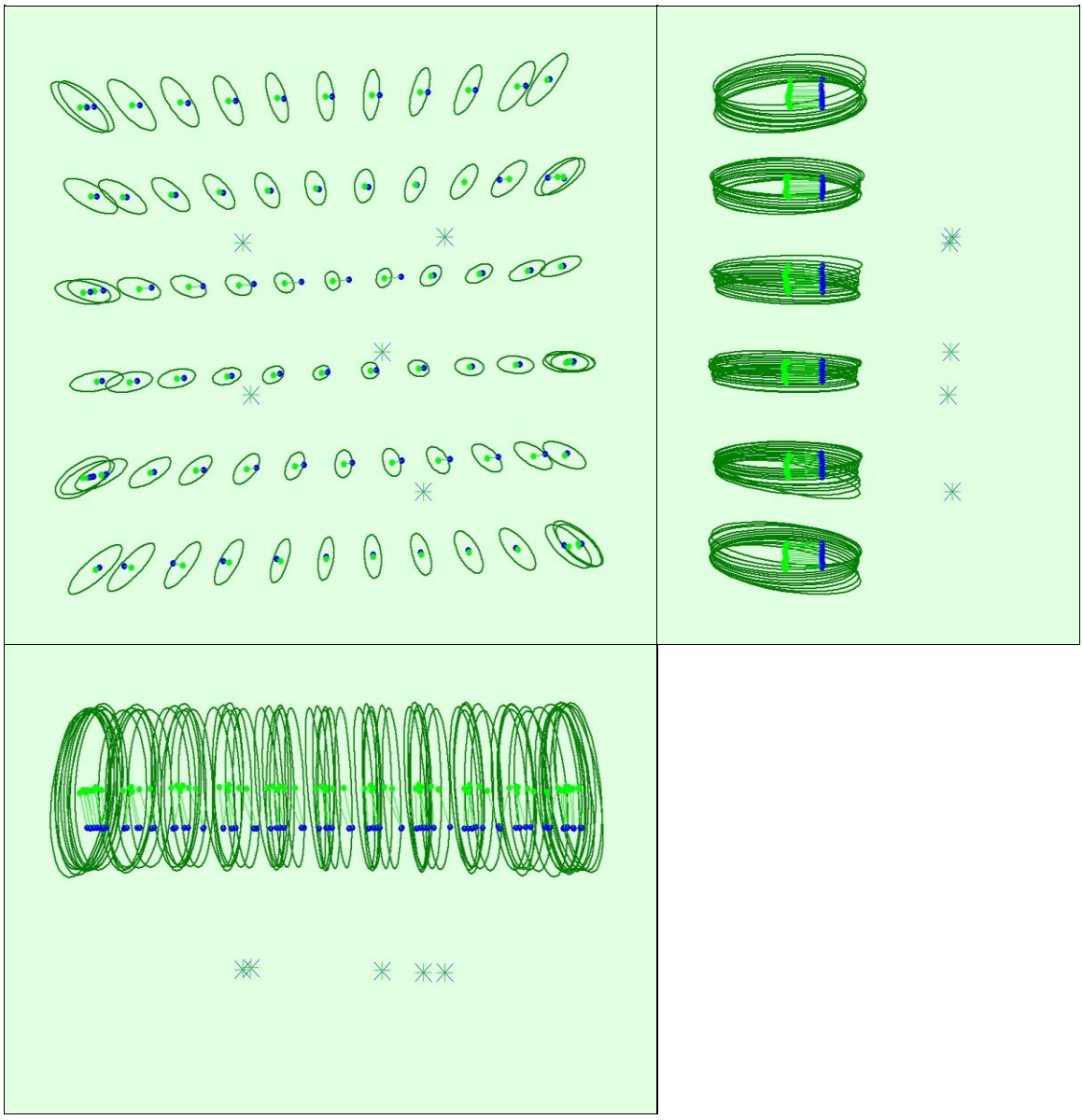


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Lisa 2 järg

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 500x

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Absolute camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.011	0.009	0.046	0.010	0.012	0.002
Sigma	0.004	0.003	0.001	0.004	0.005	0.000

Lisa 2 järg

Overlap

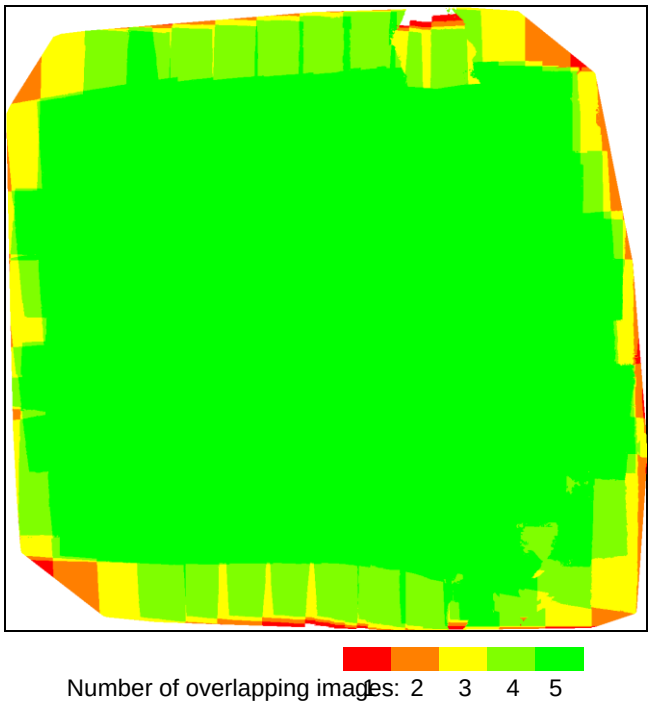


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic.
Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

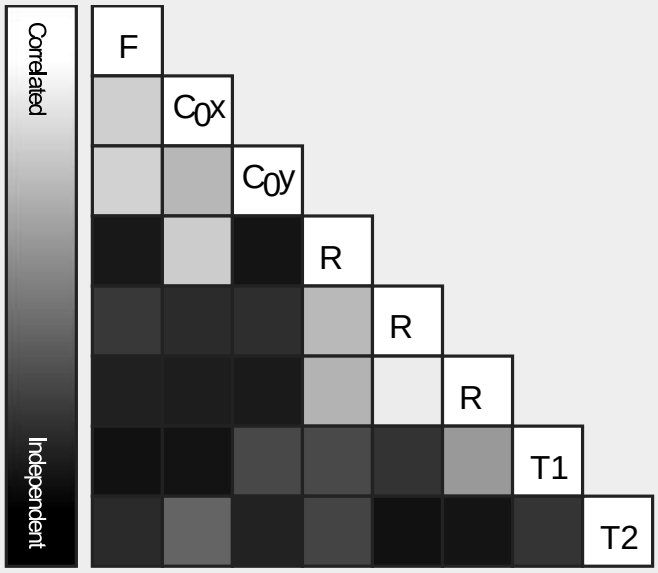
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1362565
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	464812
Mean Reprojection Error [pixels]	0.226

Internal Camera Parameters

FC300X_3.6_4000x3000 (RGB). Sensor Dimensions: 6.317 [mm] x 4.738 [mm]

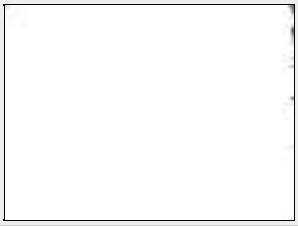
EXIF ID: FC300X_3.6_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2285.722 [pixel] 3.610 [mm]	2000.006 [pixel] 3.159 [mm]	1500.003 [pixel] 2.369 [mm]	-0.014	0.013	-0.000	0.001	0.000
Optimized Values	2453.684 [pixel] 3.875 [mm]	1995.436 [pixel] 3.152 [mm]	1474.015 [pixel] 2.328 [mm]	-0.007	0.013	0.004	0.000	-0.000
Uncertainties (Sigma)	2.153 [pixel] 0.003 [mm]	0.164 [pixel] 0.000 [mm]	0.158 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



The correlation between camera internal parameters determined by the bundle adjustment. White indicates a full correlation between the parameters, ie. any change in one can be fully compensated by the other. Black indicates that the parameter is completely independent, and is not affected by other parameters.

Lisa 2 järg

	The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	41070	16755
Min	20743	5448
Max	54436	33344
Mean	39529	18168

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	286239
In 3 Images	89351
In 4 Images	35316
In 5 Images	17856
In 6 Images	11328
In 7 Images	7785
In 8 Images	5592
In 9 Images	3370
In 10 Images	2335
In 11 Images	1827
In 12 Images	1800
In 13 Images	772
In 14 Images	457
In 15 Images	337
In 16 Images	256
In 17 Images	120
In 18 Images	60
In 19 Images	11

Lisa 2 järg

2D Keypoint Matches

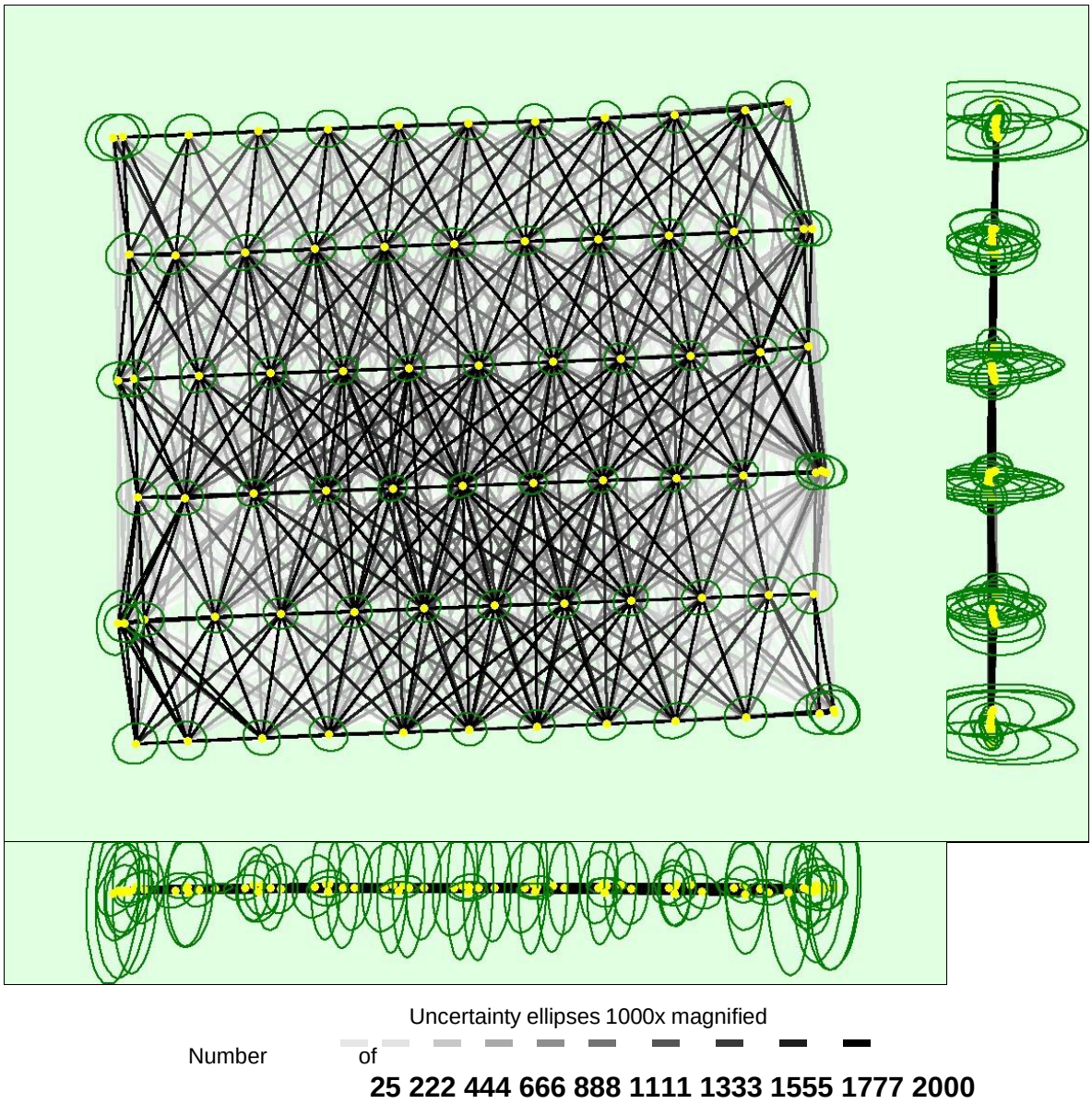


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Lisa 2 järg

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.004	0.004	0.008	0.016	0.019	0.002
Sigma	0.001	0.001	0.005	0.009	0.010	0.001

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
3004 (3D)	0.008/ 0.012	-0.028	-0.066	0.004	1.293	5 / 5
3010 (3D)	0.007/ 0.011	-0.019	0.001	-0.046	1.367	5 / 5
3014 (3D)	0.006/ 0.010	0.052	-0.038	-0.045	0.681	5 / 5
3016 (3D)	0.006/ 0.010	0.036	0.027	0.021	0.623	5 / 5
3019 (3D)	0.006/ 0.009	-0.051	0.052	0.034	0.697	5 / 5
Mean [m]		-0.001925	-0.004877	-0.006220		
Sigma [m]		0.039448	0.042916	0.033286		
RMS Error [m]		0.039495	0.043192	0.033862		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Lisa 2 järg

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	6.67	0.00	0.00
-3.00	0.00	44.00	50.67	60.00
0.00	3.00	42.67	49.33	40.00
3.00	6.00	6.67	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		1.499929	0.217836	-11.166014
Sigma [m]		1.763087	0.248382	0.613756
RMS Error [m]		2.314792	0.330373	11.182869

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	1.499929	0.217836	-11.166014

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	2.092
Phi	2.066
Kappa	2.320

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU @ 1.80GHz RAM: 40GB GPU: Intel(R) UHD Graphics (Driver: 27.20.100.9320)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	GCS_WGS_1984 (EGM 96 Geoid)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	Estonia_1997_Estonia_National_Grid (EGM 96 Geoid)
Output Coordinate System	Estonia_1997_Estonia_National_Grid (EGM 96 Geoid)

Processing Options

Detected Template	3D Mapping
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Rauno Künnapuu,

Sünniaeg 18.08.1990,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal jäätmeaunade mahtude arvutamise täpsus,
mille juhendaja(d) on Natalja Liba ja Kaupo Kokamägi,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks 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.

Lõputöö autor /allkirjastatud digitaalselt/
(*allkiri*)

Tartu, 30.05.2022
(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Natalja Liba /allkirjastatud digitaalselt/ 30.05.2022
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

Kaupo Kokamägi /allkirjastatud digitaalselt/ 30.05.2022
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)