



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu kolledž

**OPTIMAALSE AEROFOTOGRAMM-MEETRIA
METOODIKA VÄLJATÖÖTAMINE
LINNAKESKKONDA**

**DEVELOPMENT OF OPTIMAL AERIAL
PHOTOGRAMMETRY METHODOLOGY FOR THE URBAN
ENVIRONMENT**

RAKENDUSKÕRGHARIDUSE LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Hendrik Neivelt

Üliõpilaskood 178559EDTR

Juhendaja: MSc Rinaldo Rüütli, insener

Tartu 2021

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“11” jaanuar 2021

Autor: /allkirjastatud digitaalselt/
/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusetöö esitatud nõuetele

“11” jaanuar 2021

Juhendaja: /allkirjastatud digitaalselt/
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Hendrik Neivelt (sünnikuupäev: 29.08.1998)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Optimaalse aerofotogramm-meetria meetodika väljatöötamine linnakeskkonda,

mille juhendaja on Rinaldo Rüütli

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh
Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni
autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna
kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni
autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka
autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

/allkirjastatud digitaalselt/ (allkiri)

11. jaanuar 2021 (kuupäev)

Taltech Tartu kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Hendrik Neivelt, 178559EDTR

Õppekava, peeriala: EDTR17/17, Küberfüüsikalised süsteemid
Juhendaja: Insener, Rinaldo Rüütli, +372 620 4808

Lõputöö teema:

Optimaalse aerofotogramm-meetria meetodika väljatöötamine linnakeskkonda
Development of Optimal Aerial Photogrammetry Methodology for the Urban
Environment

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Luua optimaalne aerofotogramm-meetria meetodika linnakeskkonda.
2. Uurida erinevate fotogramm-meetria parameetrite mõju 3D-mudeli kvaliteedile.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Materjalide läbitöötamine ja kirjanduse ülevaate koostamine	31.10.2020
2.	Lennumetoodikate katsetamine	31.10.2020
3.	Tulemuste analüüsimine ja järelduste tegemine	10.1.2021

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "11" jaanuar 2021.a

Üliõpilane: Hendrik Neivelt /allkirjastatud digitaalselt / "11" jaanuar 2021.a
/allkiri/

Juhendaja: Rinaldo Rüütli /allkirjastatud digitaalselt/ "11" jaanuar 2021.a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISUKORD	5
EESSÕNA.....	7
SISSEJUHATUS	8
1 MEHITAMATA ÕHUSÕIDUKIGA MÕÕDISTAMINE	9
1.1 Fotogramm-meetria põhiolemus.....	9
1.1.1 Tänapäevase fotogramm-meetria põhiprintsiip	10
1.2 Fotogramm-meetria mõisted	11
1.3 Drooni turvaline käitamine linnakeskkonnas	15
1.4 Teised sarnased uurimistööd.....	15
2 METOODIKA	18
2.1 Uuritav ala	18
2.1.1 Tähtsama hooned ja objektid	19
2.2 Välitööde metoodika.....	20
2.2.1 Töös kasutatav droon	20
2.2.2 Lennuplaani koostamine.....	21
2.2.3 Drooni kohapealne kontroll	22
2.2.4 Mõõtmete võtmine objektilt	22
2.3 Sisetööde metoodika	23
2.3.1 <i>Mesh</i> mudeli genereerimine	23
2.4 Tulemuste analüüsimine	24
2.4.1 Kvantitatiivne hindamine	25
2.4.2 Kvalitatiivne hindamine	26
2.4.3 Parimate metoodikate väljavalimine	26
3 TULEMUSED	27
3.1 Mõõdud Maa-ameti ortofotolt	28
3.2 Mõõdud objektidelt	29
3.2.1 Mõõtude analüüs.....	32
3.3 Kvalitatiivne hindamine.....	33
3.3.1 Optimaalsete mudelite valimine	36
3.4 Uuritavad lisaalad	39
3.5 Arutelu	40
KOKKUVÕTE.....	42

SUMMARY	43
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	44
LISAD	47

EESSÕNA

Käesoleva töö teema pakkus autorile välja juhendaja Rinaldo Rüütli. Töös valminud meetodikad on välja töötatud eelkõige silmas pidades Hades Geodeesia vajadusi. Tööks vajalikke fotosid tehti peamiselt Tallinnas Valdeku tänava – Männiku tee ristmikul.

Tööks vajaliku drooni ja tarkvara andis autorile Hades Geodeesia. Autor tänab kõiki Hades Geodeesia töötajaid koostöö eest.

Märksõnad: fotogramm-meetria, droon, Agisoft Metashape, rakenduskõrgharidusetöö

SISSEJUHATUS

Fotogramm-meetria abil täpsete linnamudelite loomine on viimastel aastatel muutunud väga odavaks ja lihtsaks. Eelkõige on see seotud fotogramm-meetria tarkvara ja mehitamata õhusõidukite arengu tõttu. Aerofotogramm-meetria eeliseks on võrreldes teiste andmehõivemetoditega kiirus. Drooniga on võimalik teha fotosid, mis katavad suuri alasid ja millest on võimalik luua täpseid mudeleid.

Käesolev lõputöö teema valiti eelkõige tema vajalikkuse pärast. Teema on vajalik Hades Geodeesiale, kellel eelnevalt puudus optimaalne aerofotogramm-meetria meetodika linnakeskkonda. Eelnevalt tehtud uurimistööd ei olnud tarkvara kiire arengu tõttu piisavalt ajakohased ja ei hõlmanud soovitud parameetritele sobiva 3D-mudeli loomist.

Töö peamiseks eesmärgiks on välja töötada aerofotogramm-meetria meetodika linnakeskkonda, mis arvestab Hades Geodeesia vajadusi. Meetodika rakendamisel on võimalik genereerida etteantud kvaliteedinäitajatele vastav 3D-linnamudel. Töö sisuks on minimeerida kaardistamise ja töötlemise ajakulu. Ajakulu minimeeritakse peamiselt piltide arvu vähendamisega. Töö teiseks eesmärgiks on uurida fotogramm-meetria parameetrite mõju 3D-mudelile.

Autor seab hüpoteesiks, et kõikidelt mudelitelt võetud mõõdud erinevad objektilt mõõdulindiga võetud mõõtudega keskmiselt kuni 6 cm. Mõõdu võtmise eelduseks on objekti täielik nähtavus mudelil.

Töös kirjeldatud nõuded tagavad, et 3D-mudelit saab kasutada küberfüüsikaliste süsteemide simuleerimiseks, visualiseerimiseks ja seisu fikseerimiseks. Lend peab olema võimalikult ohutu. Kogu loodav meetodika peab olema dokumenteeritud ja seletatud selgelt selleks, et see oleks üheselt arusaadav kõigile Hades Geodeesia geodeetidele ja küberfüüsikaliste süsteemide inseneridele.

Uurimistöö peamiseks objektiks on Valdeku tänava – Männiku tee ristmik Tallinnas. Lisaks on objektid Tallinna vanalinnas ja Tartu kesklinnas. Töös kasutatakse mehitamata õhusõidukit DJI Phantom 4 RTK ja peamise tarkvarana Agisoft Metashape 1.6.

Meetodika hindamine on toimunud kvantitatiivselt Männiku – Valdeku alal. Kvalitatiivne on toimunud mitmel objektil üle Eesti. Töös on kolm peamist osa. Kõigepealt selgitatakse fotogramm-meetria põhiprintsiipe, siis meetodikat ja viimaseks osaks on tulemuste analüüs.

1 MEHITAMATA ÕHUSÕIDUKIGA MÕÖDISTAMINE

Järgnevas peatükis tutvustatakse fotogramm-meetria põhimõtteid, peamiseid töös kasutatavaid mõisteid ja tuuakse välja teised sarnased uurimistööd.

1.1 Fotogramm-meetria põhiolemus

Fotogramm – meetriat kasutades on võimalik kattuvate piltide abil genereerida 3D-kujutisi. Peamiselt kasutatakse fotogramm-meetriat 3D-objektide loomiseks, mis on genereeritud 2D-piltide abil ja millelt saab võtta mõõte, arvutada ruumala ja pindala. Fotogramm-meetria abil on võimalik genereerida maapinna/taimkatte kõrgusmudeleid ja punktivilvesid. [1] Lõputöös on peamise fotogramm-meetriat rakendava tarkvarana kasutatud *Agisoft Metashape 1.6* rakendust, mis põhineb klassikalisel fotogramm-meetrial ja tema edasiarendustel.

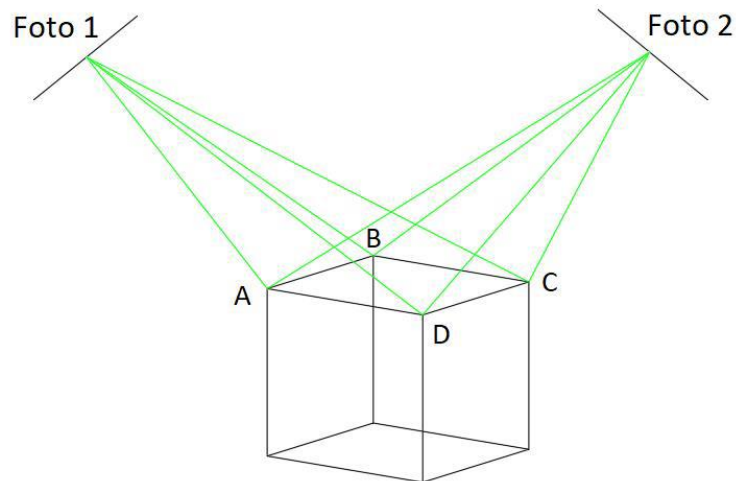
Klassikalised fotogramm-meetria põhiprintsiibid põhinevad peamiselt projektiivsel geomeetrial. Projektsiooniks nimetatakse kõiki ruumis punkte läbivate sirgete ja projektsioonpinna lõikepunktide kogumit. [2]

Fotogramm-meetria sisendiks on fotod, mis põhinevad perspektiivsel projektsioonil ehk kõik kiired läbivad projektsiooni keskpunkti. Kuna aga perspektiivsest projektsioonist tingitud moonutused mõjutavad fotogramm-meetria väljundeid, tuleb moonutused eemaldada. Selleks muudetakse perspektiivne projektsioon ortogonaalseks projektsiooniks, kus projektsiooni kiired on muudetud paralleelseteks ja tasandit risti lõikavaks. Muutmise nõudeks on vähemalt kahe erineva perspektiiviga kujutist ja seda samal alal. [2]

Perspektiiviteoorias on kolm olulist põhimõtet:

1. „Punkti perspektiiv on alati punkt“ [2]. Maapinnale vastab üks punkt aerofotol. Aerofotol võib vastata mitu punkti maapinnal [2].
2. „Sirgjoone perspektiiv on sirge“ [2]. Maastikul olevad sirgjooned on ka aerofotol sirged. Aerofotol olevad sirgjooned võivad aga olla kõver või murdjooned. [2]
3. „Kahe lõikuva joone perspektiiv on kaks lõikuvat joont ning perspektiivide lõikepunkt on nende joonte lõikepunktide perspektiiv“ [2]. Kui on vajalik kahe sirgjoone perspektiivi konstrueerimist, siis piisab sirgete lõikepunktist ja mõlema sirgjoone punkti perspektiivist. [2].

Eelnevalt kirjeldatud printsiipe ja kollineaarsust kasutades leitakse peamised punktid, jooned ja tasandid ning konstrueeritakse perspektiivid. Põhiprintsiipi illustreerib joonis 1.1. Joonisel on kujutatud fotogramm-meetria põhiolemust, kus kahe foto põhja leitakse objektile ühiseid punkte. [2]



Joonis 1.1 Fotogramm-meetria põhiolemus kahe foto näitel [3]

1.1.1 Tänapäevase fotogramm-meetria põhiprintsiip

Tänapäeval on klassikaline fotogramm-meetria arenenud tänu mitmele algoritmile. Üks neist on *Structure From Motion*, edaspidi SFM. SFM algoritmi peamiseks ülesanneteks on arvutada välja objektide kujusid teades kaamera asukohti või arvutada välja kaamera asukohti teades kindelpunkti. Peamiseks eelisteks võrreldes klassikalise fotogramm-meetriaga on võimalus teha kindlaks teadmata kaamera asukohti ka mujal kui kõrgel taevast. [4]

SFM algoritmi üheks suurimaks eeliseks on vähesed nõuded kaameratele – kui klassikaline fotogramm-meetria nõuab professionaalseid kaameraid, siis SFM algoritmi jaoks piisab keskmiste spetsifikatsioonidega tavatarbija kaamerast. Kaamera vaatenurgad võivad algoritmi rakendamisel olla erinevad ja fotosid võib teha erinevaid kaameraid kasutades. [5]

Erinevad tarkvarad kasutavad erinevaid algoritme, kuid töös kasutatav *Agisoft Metashape* kasutab järgnevaid etappe ortofoto ja 3D-pinna genereerimiseks:

1. Programmi laetavatelt fotodelt punktide leidmine [2].

2. Fotodelt leitud punktide sobitamine üksteisega. Kaamera parameetrite ja asukohtade leidmine. Etapi jooksul tekib hõre punktipilv, mida kasutatakse järgnevatel etappidel. [2] [1]
3. Tiheda punktipilve loomine kasutades eelnevate etappide jooksul teada saadud parameetreid [2].
4. Mudeli ja pinna loomine kasutades punktipilve. Pinna loomiseks tekitatakse punktide vahele hulknurgad, millele tekstuuri lisamine annab fotorealistliku mudeli. [1]

1.2 Fotogramm-meetria mõisted

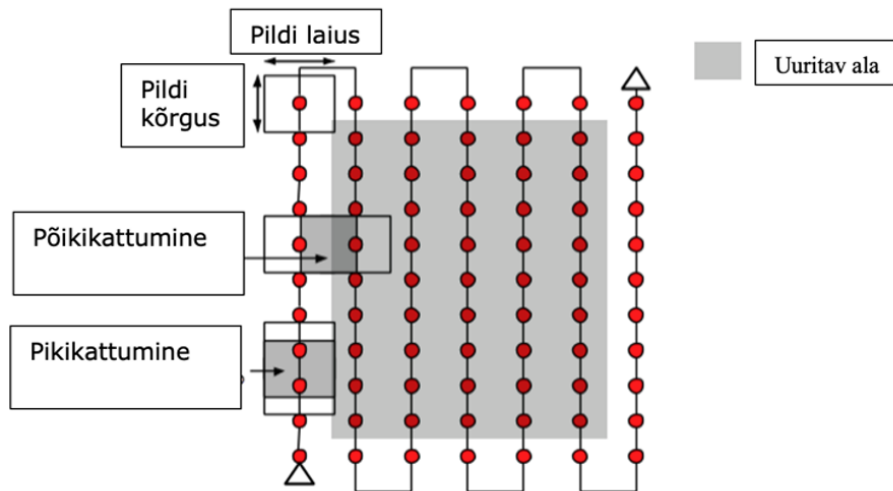
Aerofotogramm-meetria

Aerofotogramm-meetria puhul tehakse fotogramm-meetria meetodile vajalikud pildid õhusõidukilt. Sageli on kaamera vaateväli suunatud maapinnale. Pilte tehakse üldiselt liikumise pealt. [6] Käesoleva töö raames kasutatakse selleks mehitamata õhusõidukit ehk drooni.

Ülekate

Fotogramm-meetria vajab oma olemuse tõttu kattuvate osadega fotosid. Piltide kattuvus tekib kui kahel või rohkemal fotol on näha samad objektid või pind. Aerofotogramm-meetria puhul tekivad kattuva sisuga fotod kui lennubahend liigub mööda oma lennutrajektoori ja valitud aja tagant tehakse fotod. [7] Ülekatet võib jagada piki- ja põikikattumiseks. Pikikattumine tekib lennusuunalisel kahel järjest tehtud fotodel. Põikikattumine tekib kahel paralleelsel lennul tehtud fotode äärtel. Suurust kirjeldatakse protsentides [8] Joonis 1.2 illustreerib kahe erineva ülekatte liigi põhimõtteid.

Piki - ja põikiülekatte suurus valitakse vastavalt objektile ja soovitud tulemusele. Vähekontrastsete pindade puhul on soovitav kasutada kõrgemat ülekatet (suurem kui 60 %). Oluline on jälgida, et soovitud põhipunktid ja objektid oleks nähtavad vähemalt kolmel fotol. Objektide nähtavus vähemal fotodel põhjustab lõplikus mudelis pragusid, auke ja muid probleeme. Liiga suur piki- ja põikiülekatte väärtus suurendab piltide arvu ja selle tõttu suureneb kogu protsessi ajakulu. Programmidele on üldiselt parem kui neil on kasutada pigem rohkem fotosid. Väikene fotode hulk tekitab rohkem probleeme. [9] Fotogramm-meetria tarkvara looja *Pix4D* soovib pikiülekatteks vähemalt 75% ja põikiülekatteks 60%. [10]

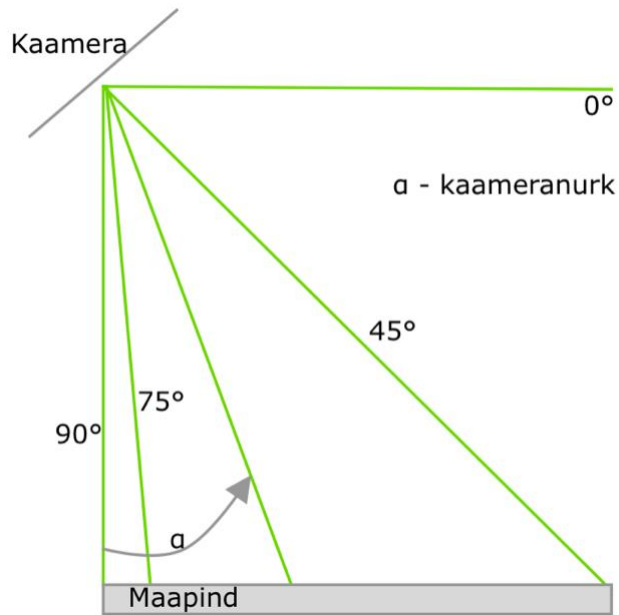


Joonis 1.2 Ülekatte selgitus [10]

Fotode tüübid

Fotode tegemise viisi järgi saab fotosid jagada kaldega ja kaldeta fotodeks. Kaldeta fotode tegemiseks peab kaamera vaateväli olema suunatud maapinnale. Kaldega fotode puhul on vaateväli suunatud maapinnast eemale. Suure kaldega fotodel on näha horisont. [2] Fotode arv sõltub projektist, kuid töös kasutava programmi puhul on oluline hoida piltide arv optimaalsena. Optimaalne piltide arv aitab vähendada mudeli genereerimise aega ja müra. [11]

Käesolevas töös kasutatakse kaldeta ja kaldega fotosid. Kaldeta fotode puhul on kaamera vaateväli suunatud 90 kraadil alla maapinnale. Kaldeta fotosid tähistatakse käesolevas töös 90 kraadise suurusega. Käesolevas töös on kasutusel 45 – 90 kraadise kaameranurgaga tehtud fotod. Fotode kaldenurki illustreerib Joonis 1.3



Joonis 1.3 Kaamera vaatenurga selgitus

Kaameranurga valikul on lähtunud 2019.aastal Even Kirsi poolt kirjutatud uurimistööst. Uurimistöös uuriti Eesti Maaülikooli Kreutzwaldi õppehoone möödistanmist, kus kasutati nadiirist 70 kraadise kaameranurga tehtud fotosid. Autor soovitas proovida parema tulemuse saamiseks 45 – 60 kraadise kaameranurgaga fotosid. [12] 45 kraadist kaameranurka on kasutatud ka teistes uurimistöodes [13] [11].

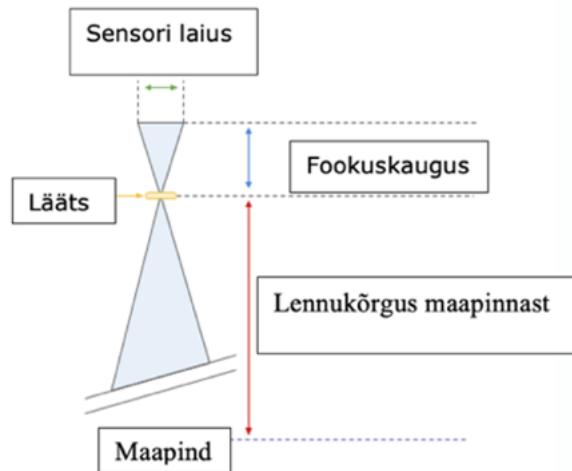
GSD ja täpsus

GSD on vahemaa kahe järjestikuse piksli vahel digitaalsel pildil. GSD kirjeldab pildi detailsust ehk ruumilist lahutust. Mida kõrgem on GSD, seda raskem on tuvastada väiksemaid detaile. GSD näitab kui suur on üks piksel pildil. Näiteks, kui GSD on 2 cm, siis piksli suurus on 2 cm x 2 cm. GSD arvutamiseks on vajalik teada kaamerast tulevad pildi mõõtmeid pikslites (täpsemalt piksleid vertikaalsuunas), fookuskaugust, sensori kõrgust ja lennukõrgust. Joonis 1.4 selgitab GSD valemis olevaid põhimõisteid [14].

GSD suurus on antud töö raames valitud alla 2 cm.

Valem [14]:

$$GSD = \frac{\text{lennukõrgus} * \text{sensori kõrgus}}{\text{fookuskaugus} * \text{pildi kõrgus}}$$

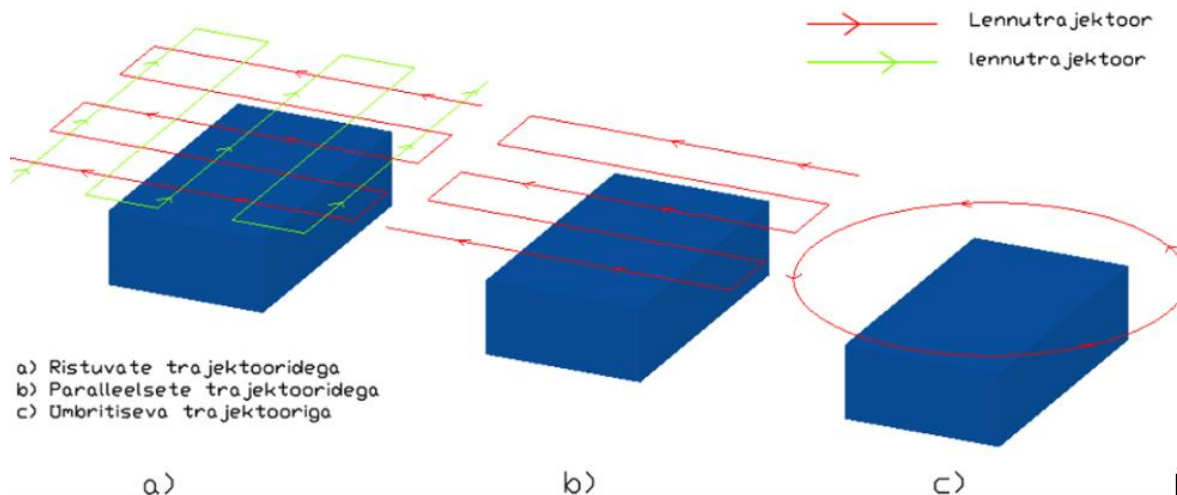


Joonis 1.4 GSD valemis sisalduvate termineid seletav joonis [14]

Täpsust jagatakse peamiselt kaheks - absoluutne ja suhteline täpsus. Absoluutse täpsus on seotud mudeli tegeliku asukohaga aluskaardil või maapinnal. Eriti oluline on see kaardistamisel. Suhteline täpsus on seotud peamiselt mõõtmetega mudelil ehk kui sarnased on mudelilt võetud mõõdud reaalsest maailmast võetuga. [15] Töö käigus uuritakse absoluutset täpsust.

Lennutrajektor

Aerofotogramm-meetria rakendamiseks on kasutusel mitmed lennutrajektorid. Peamiselt kasutatakse ristuvate trajektoridega, paralleelsete trajektoridega ja ümbritsevaid lende. Paralleelsete trajektoridega lende soovitatakse teha 2D-kaartide tegemiseks, suurte ja siledate alade puhul. Ümbritsevaid lende tehakse väikesel alal ja üksikute hoonete puhul. Ristuvate trajektoridega lendudega saab teha 3D-mudeleid. Soovitatakse lennata suhteliselt lähedal objektidele. [16] Joonis 1.5 kujutab kolme erinevat lennutrajektorit.



Joonis 1.5 Erinevate trajektoride ülevaade [14]

Antud töö käigus tehakse paralleelsete ja ristuvate trajektoridega lende. Valitud trajektorid on tehtud vastavalt kasutatavale tarkvarale.

1.3 Drooni turvaline käitamine linnakeskkonnas

Linnakeskkonnas mehitamata õhusõiduki käitamisel peab jälgima mitmeid lennunduslike ja privaatsust sätestavaid nõudeid. Oluline on jälgida, et linnakeskkonnas ei esineks kõrgeid rajatisi, hooneid, millest droon üle ei lenda. Tuul ei tohi ületada seadme tootja poolt ettenähtud tugevust. Antud töös kasutatava drooni puhul on suurimaks lubatud tuule kiiruseks 10 m/s. Alati peab olema tehtud drooni tootja poolt ettenähtud kalibreerimised anduritele ja seadmetele (kompas). Positsiooni määramiseks peab olema tugev signaal satelliitnavigatsioonisüsteemiga. Turvalisuse huvides on soovitatav vältida lendamist rahvarohketest kohtades. Drooni navigeerimiseks vajalikku kompassi võivad häirida kõrgepingeliinid, suured metallist rajatised ja erinevad sidemastid. Lennata on soovitatav keskkonnas, kus ei esine udu ega vihma ja temperatuur on üle 0°C. [17]

1.4 Teised sarnased uurimistööd

Sarnaselt selle tööga on fotogramm-meetrias tehtud mitmeid uurimistöid. Tabel 1.1 näitab töid, mida on antud töö juures kasutatud.

Tabel 1.1 Lennuparameetrite näited, mille järgi on töös lähtutud

Töö nr	Autor/väljaandja	Lennukõrgus (m)	Ülekate (%)	Kaamera-nurk (kraad)	Lennutrajektoor
1 [12]	Even Kirs	50 m	80%	70 Soovitas 45- 60	Ristuv
2 [11]	<i>Planning Malaysia</i>	150 m -200 m	min 80%/ 65%	45	Ristuv
3 [18]	<i>DroneDeploy</i>	Varieeruv	80%	45	Ümbritsev
4 [19]	<i>UAV photogrammetry for generating 3D campus model</i>	105	85%/ 85%	teadmata	Paralleelne

Digitaalsed linnad

Töö käigus töötatakse välja metoodika, mille rakendamisel on võimalik luua linnakeskkonnast 3D-mudeleid. 3D-mudeleid on võimalik rakendada erinevates insenertehnilistes projektides. Mitmed piirkonnad ja linnad on varasemalt teinud keskkonnast terviklikke mudeleid.

Eestile lähim fotogramm-meetria mudeli ja üldise 3D-linna loomise näide on Helsingi linn. Helsingist on tehtud 2017. aasta fotode põhjal terve linnast 3D-mude 2017. aastal alustati Helsingis digitaalse Kalasadama projektiga. Eesmärgiks oli pakkuda 3D-mudelit Kalasadama piirkonnast kõigile soovijatele. Mudelit soovitati kasutada innovaatiliste lahenduste väljatöötamiseks. Projektis kasutati fotogramm-meetria ja laserskaneerimist. Eelnevates mudelitest Helsingis on Kalasadama piirkond täpsem (GSD 7,5 cm). *Mesh* mudeli jaoks tehti fotosid lennukilt 12-ruutkilomeetrise alal. *Mesh* mudel sisaldab kõiki objekte, mis fotode tegemise hetkel alal olid ja see võimaldab teha erinevaid simulatsioone ja analüüse, kus on objektide geomeetria tähtis. Projekti käigus tehtud mudeleid on kasutatud näiteks tuule mõju hindamiseks ja päikesevalguse hindamiseks. Projekti raames on testitud lisaks lennukile ka droonide kasutamist mudelite tegemiseks. Seal järeldati, et droonid on sobilikud väiksemate alade puhul. [20]

Tervikliku 3D-mudeli teiseks näiteks on Singapur, kus alates 2018. aastast on olemas 3D- linnamudel. Mudel võimaldab teha erinevaid virtuaalseid eksperimente, näitena tuuakse mobiilivõrkude planeerimist, hoonete evakuatsiooni planeerimist

hüdaolukorraks ja uute rajatiste planeerimist. Eesmärgiks on hoida mudel koguaeg ajakohasena ja seda alates hoonete kujudest kuni seal olevate andurite simuleerimiseni. [21]

Eestis on 3D-andmete kasutamine hakanud muutuma aina laialdasemaks. Üks suuremaid uuendusi on Ehitisregistri järk-järgult toimuvad uuendused. Ehitisregistri uuenduse valmimisel saab hooneid vaadelda ruumiliselt. Lisaks lisanduvad 2021. aastal maa-alused kommunikatsioonid. Hoonete detailsus on linnades täpsem kui maapiirkondades. [22] Ehitisregistri andmed sisaldavad aga peamiselt andmeid registrist, mis ei pruugi vastata tegelikule olukorrale. Selles situatsioonis on kasu töö käigus välja töötatavast meetodikast, kus mudelile jääb kogu mõõdistamise hetkel objektile olev situatsioon.

2 METOODIKA

Metoodika peatükk on jagatud neljaks. Esimeses osas kirjeldatakse peamist uuritavat ala, teises välitööde metoodikat, kolmandas sisetööde metoodikat ja neljandas mudeli analüüsimise peamisi printsiipe.

2.1 Uuritav ala

Uuritav ala asub Tallinnas Nõmme Linnaosas, Valdeku tänava ja Männiku tee ristmikul. Ala suurus on ligikaudu 100 m x 200 m. Ala hõlmab ristmikku, haljastust, tanklat ja kortermaju. Alal asuvad nii leht- kui ka okaspuud. Alal on mitmed objektid ja rajatised, mis võivad fotogramm-meetria metoodikaid kasutades osutada keerukaks. Eelkõige on probleemiks hooneid varjavad puud. Ala suurus on valitud optimaalne ristuvate trajektooridega ja suure piki- ja põikiülekattega (üle 80%) fotodega lendude jaoks. Eesmärgiks on välitöödeks kuluvat aega hoida ühe metoodika katsetamist alla 1 tunni.

Uuritav ala jääb 2016. aastal Tallinna lennujaama lähedusse loodud Tsoon 9 piirkonda. Piirkonnas tohib drooni ilma lennuluuba taotlemata tõusta 60 m kõrgusele. Piloodi ja drooni vahemaa ei tohi ületada 250 m. [23] Mõõdistusallas on suhteliselt sile maapind ja alas olevad teepinnad on hea kvaliteediga. Joonis 2.1 kajastab hoonete paiknemist uuritaval alal.



Joonis 2.1 Hoonete paiknemine Valdeku tänava – Männiku tee ristmikul [24]

2.1.1 Tähtsama hooned ja objektid

Männiku tee 101

Tegemist on 2-korruselise 1958.aastal kasutusele võetud büroohoonega. Hoone on seinad ja katus on kaetud plekiga. [25] Hoone teeb fotogramm-meetria jaoks keerukaks ees ja taga olevad katusealused, kuhu drooni kaamera ei pruugi näha. Samuti varjavad nii eest kui ka taga fassaadi puud. Hoone lõunaküljel on keldrisse minev trepp, mille kohal on varikatus. Lõunaküljest saab alguse võrkaed. Hoone otstest on suured reklaamid, mis hea struktuuriga aitavad mudelit kokku panna. Ehitisregistri andmetel on hoone kõrguseks 13,1 m, pikkuseks 32,5 m ja laiuks 14,5 m [25].

Neste tankla

Teiseks uuritavaks objektiks on 1996. aastal [25] valminud Neste automaattankla, mis asub aadressil Männiku tee 99. Tegemist on ilma kõrvalhooneta oleva tanklaga, kus on ainult katusealune koos tankuritega. Eemal asub Nestest eraldi olev müügipunkt, mis on oma mõõtmetelt väike. Suletud netopinda on ehitisregistri andmetel 184 m² [25].

Männiku tee 97

Kolmandaks uuritavaks objektiks on 2-korruseline kollane kivimaja. Põhjaküljel asub keldrisse minev trepp. Esiküljel on kaks trepikoda, mille uste kohal on kivist tehtud kaunistused. Kaunistused teevad antud objekti detailide uurimise mõttes heaks. Maja ees on kõrge aed.

Männiku tee 92

Tegemist on 1956 aastal valminud 3-korruselise, kuid nüüdseks renoveeritud ühiselamuga [25]. Hoone teeb huvitavaks tema aknad, mis on hoone sisse ulatuvad. Trepikojad on nii ees kui ka taga. Tagakülg on kaetud laudisega, ülejäänud küljed on krohvitud, hoone katust katab plekk-katus. Hoone põhjaküljes on esimeselt kolmandale korrusele kulgev keerdtrepp. Hoone ees on madal hekk, hoone fassaadi varjav lehtpuu on põhjapoolses tee pool asuvas nurgas Ehitisregistri andmetel on hoone kõrguseks 14,5 m, pikkuseks 39,6 m ja laiuks 13,7 m. [19]

Männiku tee 90

1957. aastal valminud elu- ja ärihoone [25]. Hoone on fotogramm-meetriliseks moodistuseks oma lihtsuse mõttes hea, kuid keerukaks teeb tema põhjapoolne ots, kus kasvavad lähedal lehtpuud.

Männiku tee 88

1939. aastal kasutusele võetud elumaja [25]. Esikülge katab suur lehtpuu. Krunti ümbritseb ümara nurgaga aed, mida mudelite analüüsimisel jälgitakse.

Männiku – Valdeku ristmik

Tegemist on 4-harulise fooriga ristmikuga, kus on olemas nii jalakäijate kui ka sõidukite foorid. Ristmikul on suhteliselt tihe liiklussagedus. Uurimisel jälgitakse ristmikul olevaid liiklusmärke, foore ja tänavavalgustuse poste.

2.2 Välitööde metoodika

Välitööde metoodika sisaldab kõike, mis ei ole seotud andmete töötlemisega. Eelkõige selgitatakse kõike drooniga seonduvat ja mõõtmiseks vajalike mõõtude võtmist. Drooniga mõõdistamised algasid 27.07.2020 ja lõppesid 17.10.2020. Üldiselt on kõik lennud tehtud aastaajal, mil puudel on rohelised lehed. Kui viimastel lendudel on puudel lehed värvi muutnud, siis on seda ka analüüsimisel arvestatud.

2.2.1 Töös kasutatav droon

Lõputöös kasutatakse Hades Geodeesiale kuuluvat *DJI Phantom 4 RTK* suure täpsusega drooni. Droon on tootja poolt kohandatud eelkõige geodeetiliste tööde jaoks sobivaks. Võrreldes laiemalt tuntud *DJI Phantom 4* drooniga on seadmele lisatud RTK moodul, mis tootja spetsifikatsioonide andmetel tagab sentimeetrites mõõdetava positsioneerimistäpsuse. Seadme 20 Mpx kaamera on mehaanilise katikuga, mis aitab vältida fotodel liikumisega tekkivat udusust. Tootja luba GSD väärtuseks 100 m kõrgusel 2,74 cm, mis võimaldab teha ka kõrgel täpseid mõõdistusi. Drooni komplektis on pult, mis kasutab *DJI GS RTK* rakendust. Puldi ekraan on 5,5 tolline, võimaldades tööd planeerida objektile olles ilma muid lisaseadmeid kasutamata. [26] Kõik drooniga tehtavad lennud on autonoomsed ehk töö autor ei sekku lendamisse. Joonis 2.2 peal on kujutatud kasutatavat drooni.



Joonis 2.2 Kasutatava drooni ja puldi foto [27]

2.2.2 Lennuplaani koostamine

Kuna antud töö on rakendusliku iseloomuga, siis oluline osa mehitamata õhusõiduki lennust on kaardistatava ala eelnev uurimine. Autor kasutas kõikide lendude planeerimiseks järgnevaid etappe:

1. Drooni.app rakenduses lennuloa vajalikkuse kontroll. Veebilehel otsitakse üles uuritava ala keskpunkt ja tõmmatakse sinna ring. Veebileht näitab, kas antud alal peab olema lennuluba ja mis tingimustel. Uuritaval Valdeku – Männiku ristmikul ei olnud lennuluba vajalik. Lisaks tuleb uurida erinevaid ajutisi lennunduslikke teateid, töö käigus otsiti informatsiooni Lennuliiklusteeninduse Aktsiaseltsi kodulehelt [27]. Lisaobjektidel oli lennuluba vajalik ja see taotleti vastavalt kehtestatud lennureeglitele.
2. X-Gis 2.0 rakenduse abil hoonete kõrguste hindamine. Hoonete kõrguste hindamiseks Maa-ameti rakenduses tuleb sisse lülitada maakatte kõrgusmudel. Kõrgusmudel näitab hoonete ja haljastuse kõrgust maapinnast. Selle abil saab uurida, millised on kõrgeimad hooned ja rajatised. Kuna andmed põhinevad aerolaserskaneerimisel, mille punktide vahe on kuni 2,6 m, siis väiksemad objektid võivad puudu olla [24].
3. Maa-amet fotolaost [28] piltide uurimine. Fotoladu võimaldab vaadelda ala erineval ajal tehtud fotode pealt, mis annab indikatsiooni, millised on valitud alal tekkivad probleemid. Rakendus võimaldab soovitud objekti valimisel vaadelda pilte kõikidest ilmakaartest.
4. KML failide loomine. KML fail sisaldab piirjooni, mille abil saab õhusõiduki puldis määrata uuritava ala piirid.
5. Lõpliku lennuplaani koostamine puldis. Lennuplaan koostatakse drooni puldis olevas *DJI GS RTK* rakenduses. Lennuplaani koostamine algab lennurežiimi valikuga. Käesolevas töös on kasutusel peamiselt ristuvate trajektooriga režiim. Kui lennurežiim on valitud, siis tuleb märgistada lennatav ala. Ala on KML faili kasutades alati samasugune. Rakendus valib vastavalt kaamera sätetele vastava lennuala, lähtudes selles, et kaldega fotode puhul peab olema trajektoor laiem kui uuritav ala. Laiema ala vajadus on seotud uuritava ala äärtes olevate

hoonetega, mille fassaadid on nähtavad ainult uuritavast alast väljas olles. Lisaks tuleb valida lennukõrgus, kiirus ja kaamera sätted. Kaamera seadeid käsitsi ei muudeta, jälgitakse ainult, et oleks valitud õige ilmastikule vastav režiim. Lennukõrgus arvestatakse drooni õhikutõusmiskohast. Kaamera nurka valitakse vastavalt soovidele, seda arvestatakse kaamera nadiirist. Lennu kiirus valitakse lennuplaanile vastavalt maksimaalne. Maksimaalne kiirus sõltub peamiselt lennukõrguse ja ülekatte suuruselt.

Lennuparameetrite valimisel on lähtutud printsiibist, et töö tulemustes tekiks arusaam lennukõrguse, ülekatte ja kaamera nurga mõjust mudelile.

2.2.3 Drooni kohapealne kontroll

Drooni õhikutõusmine peamisel uuritaval alal toimub Valdeku tänav 132 parklas. Asukoht on valitud eelkõige vastavalt tootja poolt ette nähtud turvalisusnõuetele. Tootja soovib õhku tõusta avatud alas, kus poleks erinevaid takistusi ja suuri metallist hooned, objekte mis võivad mõjutada kompassi tööd [17].

Enne drooniga mõõdistamist on koostatud lennuplaan. Lennuplaanis muudetakse vajadusel ainult ilmastikule vastavaid kaamerasätteid. Drooniga mõõdistamine algab drooni füüsilise seadistamisega. Kõigepealt tuleb droonil külge panna propellerid, siis aku ja mälukaart. Pärast seda tuleb sisse lülitada pult ja seejärel droon. Droon tuleb asetada võimalikult turvalisse kohta, kus ta ei segaks õhikutõusmisega muud maa peal toimuvat liiklust. [17] Antud töös on õhikutõusmiseks kasutatud parkla osa, kus autosid on vähe ja on võimalik hoida vähemalt 5 m distantssi drooni, inimeste ja objektide vahel.

Kuna antud töös olev mõõdistusala on Tallinna lähiala hõlmavas Tsoon 9 piirkonnas, siis droonipiloodi ja drooni vahel on alati tagatud otsenähtavus ja kaugus ei ületa 250 m.

Drooniga lendamise alustamisel fikseeritakse kohapeal esinevad ilmaolud. Tuule tugevus võetakse Ilmateenistus.ee lehelt. Lisaks pannakse kirja kõik akuvahetused ja lennul esinevad probleemid. Ajakulul arvestatakse esimese ja viimase foto tegemise ajavahemikku. Eelkõige on valik tehtud sellepärast, et objektile lendamise ja tagasituleku aeg on valitud seadete tõttu sama.

2.2.4 Mõõtmete võtmine objektilt

Esmaselt võrreldakse mudelil olevaid mõõte Maa-ameti ortofotolt pärinevate mõõtmega. Maa-ameti ortofoto piksli suurus on 10 cm [29]. Maa-ameti ortofotolt võetakse nelja erineva objekti laius või objektide vahemaa. Eelkõige soovitakse võrrelda mudelite erinevust Maa-ametilt võetud keskmise mõõduga. Kuna Maa-amet

täpsushinnang pole võrrelda töös oleva täpsusega, siis on mõõtmete võrdlemise eesmärgis avastada suuri erinevusi erinevatel mudelitel.

Möödulindiga fikseeritakse lihtsasti ligipääsetavate objektide mõõtmed. Iga mõõtmist tehakse vähemalt kolm korda ja tulemustest võetakse keskmine. Protsess võimaldab vähendada mõõtmisest tekkivaid vigu. Mõõtmisviis on töö jaoks on mõõtmisviis piisavalt täpne.

2.3 Sisetööde metoodika

Alapeatükis kirjeldatakse peamiselt mudeli genereerimise metoodikat. Genereerimise osa on kõige olulisem kasutava programmi *Agisoft Metashape 1.6* parameetrid. Programmi kasutatakse *mesh* mudeli genereerimiseks ja mõõtude võtmiseks. Peatüki eesmärgiks on ära kirjeldada parameetrid programmis, mis töö käigus on hoitud samad, et tagada võrreldavus erinevate metoodikate vahel. Täpsuse ja tulemuste analüüsimiseks kasutatakse *Microsoft Excel* programmi.

2.3.1 Mesh mudeli genereerimine

Mesh mudeli genereerimises kasutavaid parameetreid iseloomustab tabel 2.1.

Tabel 2.1 Agisoft Metashape programmi parameetrid

Etapp	Parameeter	Suurus/näitaja
<i>Load photos</i>	<i>Estimate image quality</i>	Kustutatakse < 0.5
<i>Align photos</i>	<i>Tie point limit</i>	4000
<i>Align photos</i>	<i>Accuracy</i>	High
<i>Align photos</i>	<i>Key point limit</i>	40000
<i>Build Mesh</i>	<i>Source data</i>	<i>Depth maps</i>
<i>Build Mesh</i>	<i>Quality</i>	<i>Ultra High</i>
<i>Build Texture</i>	<i>Texture size</i>	8192 x 4

Mesh mudeli genereerimist võib jagada lihtsustatult kahte erinevasse etappi:

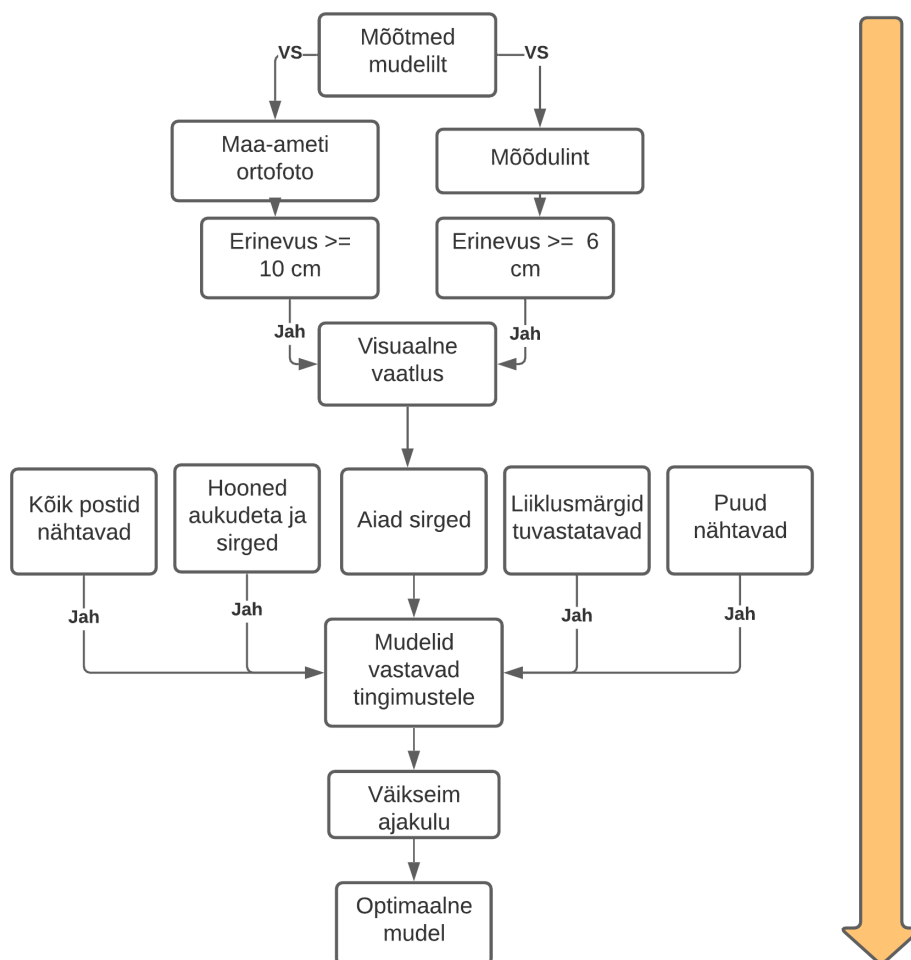
1. Piltide laadimine programmi ja esmane joondamine(ingl.k *load photos, align*) Etapi käigus laaditakse fotod programmi, määratakse koordinaatide täpsus, arvutatakse piltide kvaliteet. Kui need etapid on tehtud joondatakse pildid ja genereeritakse esmane punktipilv.

2. *Mesh* mudeli loomine. *Mesh* mudeli loomiseks kitsendatakse vastavalt KML failist pärinevatele piiridele eelnevalt genereeritud hõre punktipilv. Kui hõre punktipilv on

piiritletud ja vaatlusel tundub reaalsele olukorrale vastav, siis alustatakse mudel genereerimist. Pärast genereerimist on mudel ühevärviline. Mudeli tekstuur lisatakse kasutades funktsiooni *Build Texture*.

2.4 Tulemuste analüüsimine

Tulemuste analüüs toimub kolmes põhilises etapis(Joonis 2.3). Kõikides etappides valitakse välja meetodika kriteeriumitele vastavad mudelid, mida järgnevates etappides edasi uuritakse. Mudelid, millel esineb suuri kõrvalekaldeid meetodikas paika pandud kriteeriumitest, edasi ei uurita. Kõigepealt toimub kvantitatiivne analüüs, kus võrreldakse mudelilt võetud mõõte kõigepealt Maa-ameti ortofoto andmetega ja objektilt võetud mõõtetudega. Selle etapiga selekteeritakse välja mudelid, kus esineb lubatust suuremaid mõõtmishälbeid. Teiseks etapiks on kvalitatiivne hindamine, kus hinnatakse mudeli visuaalset poolt. Kolmandas osas valitakse soovitud tulemustele vastav optimaalne mudel kasutades kvantitatiivse ja kvalitatiivse hindamise kombineerimist. Eelkõige toimub valik kvalitatiivselt.



Joonis 2.3 Meetodika kirjeldus

2.4.1 Kvantitatiivne hindamine

Kvantitatiivne hindamine toimub mudelilt võetud mõõtude võrdlemisega Maa-ameti ortofotolt mõõdetud andmetega ja mõõdulindiga võetud mõõtudega. Eelkõige on kvalitatiivne hindamine mõeldud hüpoteesi kinnitamiseks. Maa-ameti ortofotolt võetud mõõtmetega võrdlemine aitab märgata suuremaid plaanilisi vigu, mis võivad mudeli genereerimisel tekkida. Mõõtude võtmise eesmärgiks on kinnitada, et lisaks visuaalsele informatsioonile on võimalik sealt võtta indikatiivseid mõõte.

Kvantitatiivne hindamine toimub vastavaid parameetreid silmas pidades:

1. Maa-ameti ortofotoga võrreldes tohib mudeli keskmine viga olla kuni 10 cm.
2. Mõõdulindiga võetud mõõtmetega võrreldes tohib mudeli keskmine viga olla kuni 6 cm.
3. Mõõdud võetakse mudelilt ainult nendelt kohtadelt, mis on nähtavad ja kergesti ligipääsetavad. Kui üksikudel mudelitel pole vajalikke mõõtmepunkte võimalik võtta, siis mudelit edasiseks analüüsiks ei kasutata. Kõikide mudelilt võetud mõõtude puhul hinnatakse nende õigsust.

Mõõtude võtmine mudelist toimub sarnaselt *mesh* mudeli genereerimisega *Agisoft Metashape 1.6* programmis. Kuna RTK seadmega varustatud õhusõidukilt tulevad andmed on väga täpsed, siis mudelile skaalat määrama ei pea. Mõõtude võtmiseks kasutatakse programmis olevat *Ruler* funktsiooni. Funktsiooni kasutatakse tekstuuriga mudelil. Tekstuuriga mudel võimaldab näha soovitud mõõdetavaid objekte täpsemalt. Mudelite mõõtude hindamiseks kasutatakse peamiselt keskmist viga, mis näitab mudeli mõõtude keskmist kõrvalekallet. Vea arvutamiseks lahutatakse mudelilt mõõdetud väärtusest, kas ortofotolt või mõõdulindiga võetud mõõdud. Lisaks on kasutusel keskmine ruutviga (KRV), mis iseloomustab mudelilt võetud mõõtude täpsust. Keskmise ruutvea arvutamiseks kasutatakse Gaussi valemit.

Valem [30]:

$$KRV = \pm \sqrt{\frac{[\Delta]}{n}},$$

kus n – mõõtmiste arv

$[\Delta]$ – juhuslike vigade ruutude summa.

Ajakulu hindamine

Ajakulu arvestamiseks analüüsitakse nii välitöödele kui ka genereerimisele kuluvat aega. Genereerimise ajakulu sisse arvestatakse kõikide eelnevalt kirjeldatud *Agisoft Metashape* etappidele kulunud aegade koondsummat. Ajakulu sisse ei ole arvestatud programmi andmete sisseandmist ja programmi parameetrite määramist. Eelkõige on tehtud valik sellepärast, et autor pole eelneval kogemusele tuginedes märganud suurt ajalist vahet erinevate andmete sisseandmisel ja seadete määramisel. Lisaks sõltub programmi kasutamise aeg kasutaja oskustest. Välitöödele kuluv aeg sisaldab lendamisele kulunud aega. Lendamiseks kuluv aeg on esimese ja viimase tehtud foto vaheline aeg.

2.4.2 Kvalitatiivne hindamine

Kvalitatiivne hindamine toimub järgnevaid parameetreid silmas pidades:

1. Mudelid peavad vastama reaalsele olukorrale – aiad on sirged, puud on tuvastavad. Objektide piirile tõmmatakse joon, kust on näha, kas piirid on selged või lainetavad. Mudelis esinevad augud peavad olema suletavad *Agisoft Metashape* programmis kasutades funktsiooni *close holes*. Kui mudelisse on jäänud augud, siis hinnatakse palju mudelis esinev auk häirib mudeli üldist väljanägemist.
2. Tänavapostid, liiklusmärgid peavad olema tuvastatavad – tänavapostidel peab olema võimalik tuvastada maapinnal oleva posti alguspunkt ja üleval oleva osa asukoht, kuju. Märgid peavad olema loetavad.

2.4.3 Parimate meetodikate väljavalimine

Kui eelnevad hindamised on tehtud, siis hinnatakse tulemuste mõju ja ajakulu vahelist seost ja valitakse välja autori arvates parimad mudelid ja nende põhilised kasutuskohad.

3 TULEMUSED

Erinevate lennuparameetrite hindamiseks tehti kokku 10 lendu, millega testiti kaheksat meetodikat. Lendudest kaheksa on tehtud Valdeku tänava – Männiku tee ristmikul ja kolm erinevates Eesti paikades. Lennud tehti vahemikus 27.07.2020 – 17.10.2020. Kõik lennud toimusid päevasel ajal. Jälgiti, et lendude ajal ei esineks sademeid ega suuri veelompe. Ilmastikuolud olid üldiselt kõikide lendude puhul vahelduvad.

Erinevate meetodikate katsetamisel lähtuti eelkõige katse 1 parameetritest. Katse 1 vastas esmaselt kõigile meetodikas seatud nõuetele. Lennuparameetrid valiti lähtudes drooni puldis oleva rakenduse DJI GS RTK rakenduse võimalustes.

Kõik Valdeku tänava – Männiku tee ristmikul katsetatud parameetreid sisaldab tabel 3.1 Kõikide katsete juures jälgiti, et fotode arv oleks väiksem kui katse 1 puhul. Katse 8 juures on kasutatud eelnevalt testitud parameetrite kombineerimist. Lennukõrguseks on peamiselt valitud 40 m. Kuna soov oli loodavat meetodikat laiendada kõrgema hoonestusega aladele, siis kahe lennu jaoks valiti 60 m lennukõrgus. Kinnitamaks meetodikaid tehti kaks lendu põhiobjektist erinevas asukohas.

Möödulindiga mõõtmised on võetud 2.12.2020 hästi ligipääsetavatest kohtades. Ortofotolt võeti mõõtmised 31.12.2020.

Tabel 3.1 Põhiobjekti katsete ülevaade

Katse	Lennukõrgus (m)	Kaameranurk (kraadides)	Ülekate (%)	Lennutrajektoor	Fotode arv (tk)
1	40	45	80/80	Ristuv	889
2	40	90	80/80	Ristuv	634
3	40	45	65/65	Ristuv	393
4	40	45	65/80	Ristuv	580
5	40	60	65/65	Ristuv	231
6	40	75	65/65	Ristuv	314
7	60	45	65/65	Ristuv	291
8	60	45 ja 90	65/65	Ristuv ja paralleelne	324

3.1 Mõõdud Maa-ameti ortofotolt

Maa-amet ortofotolt võeti kokku neli plaanilist mõõtu. Valitud objektid on lihtsasti mõõdetavad Maa-ameti ortofotolt. Mudelilt võetud mõõte võrreldi Maa-ameti andmetega tuvastamiseks suuremaid vigu mudelilt, mis võivad tekkida mudeli genereerimise käigus. Mõõte võeti vastavalt metoodikale mudelilt ja Maa-ameti ortofotolt kolm korda. Maa-ameti andmetest arvutati aritmeetiline keskmine, mis loeti õigeks väärtuseks. Keskmine ruutviga arvutati mudelilt võetud mõõtudele, võrreldes neid ortofotolt võetud mõõdu keskmise tulemusega. Arvestama peab, et ortofotol oli 10 cm pikslivahe tõttu raske võtta täpseid mõõte. Tabel 3.2 sisaldab objektide asukohainfot ja mõõte.

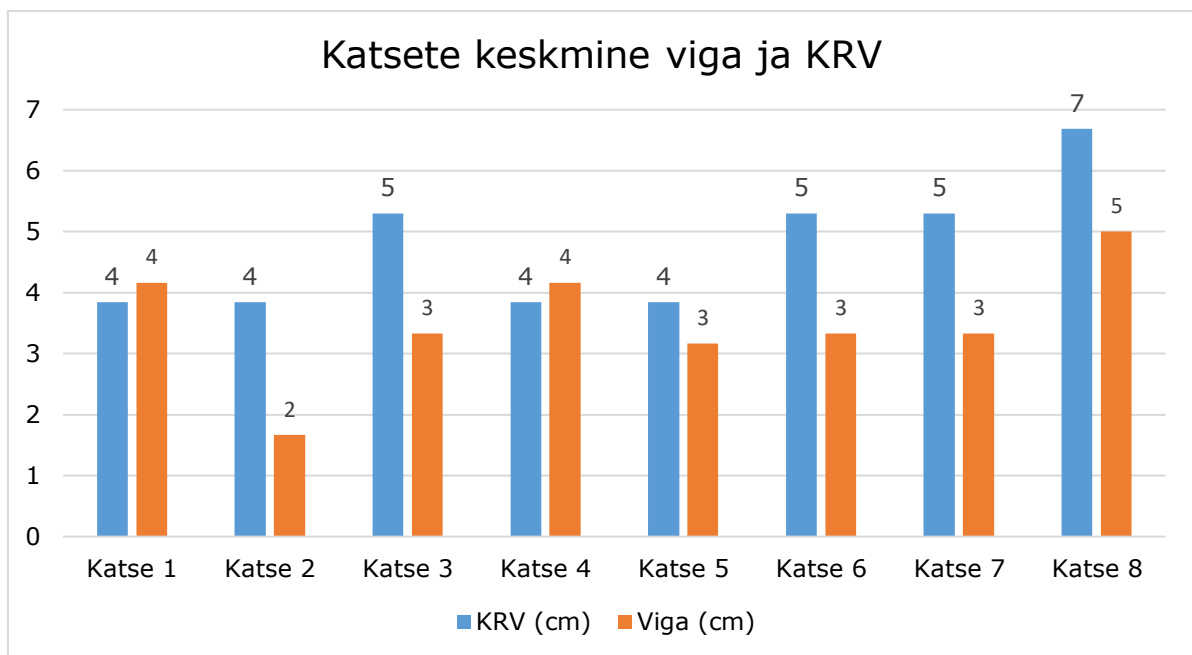
Tabel 3.2 Ortofotoilt võetud objektide mõõdud

Objekt	Mõõt(m)
Männiku tee 92 otsasein	13,7
Männiku tee 90 otsasein	14,7
Männiku tee 97 betoonäär	14,5
Kaevude vahe tanklas	14,8

Joonis 3.1 näitab, et kõikide katsete käigus loodud mudelilt võetud mõõdud on suhtelised sarnased. Kõikide metoodikate puhul jäi keskmine ruutviga 4 cm ja 7 cm vahele. Keskmine viga oli kõikide katsete jooksul vahemikus 2 cm ja 5 cm. Kõikide katsete tulemused näitavad, et suurte objektide vahemaa mõõtmisel on loodud mudelite mõõtmised piisavalt täpsed ja nende juures ei esine suuri mõõtmega seotud probleeme.

Katse 2 keskmisest väiksemad näitajad on tingitud sellest, et mudel oli plaaniliste objektide osas väga selge ja sealt oli lihtne mõõte võtta. Eelkõige on see tingitud 90 kraadisest kaameranurgast. Katse 8 oli ainuke, mis on sooritatud eelnevatest hämaramal päeval, see põhjustas aga fotodel ja lõpuks ka mudelil udusust. Arvestama peab, et suurematelt objektidelt mõõtude võtmine on suhteliselt keerukas ja vigade suurus näitab mudelite probleeme ainult indikatiivselt.

Indikatiivselt Maa-ameti andmetega võrreldes võib öelda, et suurusjärk mõõtmel on sarnane ja kõikide katsete käigus loodud mudelid sobivad edasiseks analüüsiks.




Joonis 3.1 Erinevate katsete keskmine viga ja ruutviga




3.2 Mõõdud objektidelt

Mudeli täpsuse kontrolliks võeti Valdeku tänava – Männiku tee ristmiku ümbrusest kuuelt objektilt mõõdud. Kõik mõõdud on võetud mõõdulindiga lihtsasti ligipääsetavatest kohtadest. Kuna eelnevatest töodes on analüüsitud hoonete mõõtmeid, mis on osutunud üsna täpseteks, siis siin võeti erinevatel hooneid ümbritsevate objektide mõõtmeid. Tabel 3.3 toob välja objektid, millelt võeti kontrolliks mõõte. Objektide valikul arvestati, et seal esineks nii plaanilisi kui ka kõrguslike mõõte.

Tabel 3.3 Mõõdulindiga võetud mõõdud

Jrk nr	Objekti ligikaudne asukoht	Kõrgus (cm)	Laius (cm)	Fotod objektist
1	Tankla parkla idapoolse aia kolmas aialipp	200,0		
2	Tankla põhjapoolse aia kolmas aialipp	175,0		
3	Tankla tabloo laius (valgeks värvitud joonete vahe)		183,0	

Tabel 3.3 järg

Jrk nr	Objekti ligikaudne asukoht	Kõrgus (cm)	Laius (cm)	Fotod objektist
4	Männiku tee 101 oleva betoontee laius		100,0	
5	Männiku tee 92 tänavapoolne kaev	70,0	70,0	
6	Männiku tee 92 hoone ees olev lillepeenra ots		125,0	

3.2.1 Mõõtude analüüs

Mõõtude võtmine mudelitelt osutus suhteliselt keerukaks. Eelkõige oli see tingitud väikesemate objektide selgusest. Mõõdulindiga võetud mõõdud sisaldasid nii plaanilisi kui ka kõrguslike mõõte. Tabel 3.4 sisaldab tabelis 3.3 välja toodud objektide mõõtmega seotud probleeme mudelis.

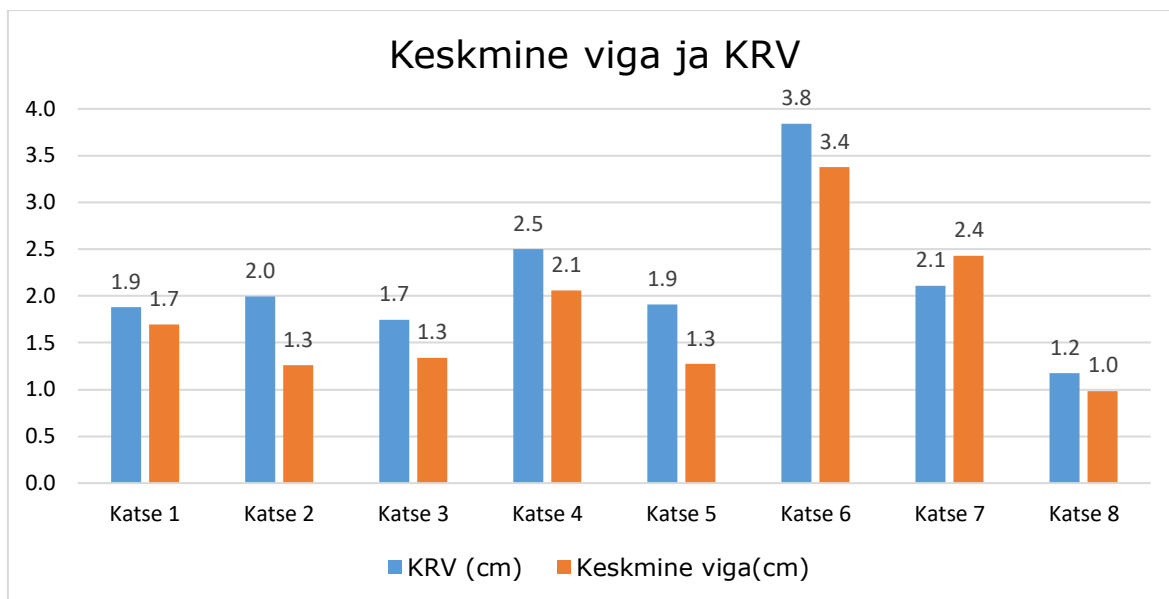
Tabel 3.4 Mudelis olevate objektide ruutkeskmine ja viga

Objekti jrk nr	Keskmine viga (cm)	KRV (cm)
1	2,8	3,4
2	1,2	2,5
3	1,9	2,1
4	0,3	1,9
5	1,1	1,4
6	0,6	1,3

Erinevaid objekte analüüsid selgus, et kõikide objektide keskmised vead jäid 0,3 cm ja 2,8 cm vahele. Keskmised ruutvead olid vahemikus 1,3 cm ja 3,4 cm. Kõige suurem keskmine ruutviga oli Valdeku tänava ja Männiku tee aial. Eelkõige oli see tingitud mõõtude võtmise keerukusest. Kõige täpsemini mõõdetavaks osutus kaev. Tee laiuse suhteliselt suure keskmise ruutviga on tingitud tee äärtel, mis ei olnud täiesti sirged. Kõige täpsem on mudelitel võtta plaanilisi mõõte, mis antud töös olid objektid 4 - 6.

Katsete keskmised vead ja keskmise ruutvead

Katsete keskmist viga ja keskmist ruutviga näitab joonis 3.2. Erinevate katsetes valminud mudelite keskmised vead jäid vahemikku 1,0 cm kuni 3,4 cm. Keskmise ruutvead olid vahemikus 1,2 cm kuni 3,8 cm. Kõige täpsemaks katseks osutus 8. Eelkõige võib see olla tingitud kahe kaameranurga kombineerimisest, mis parandas vertikaalsete objektide kuju. Halvimaks osutus katse 6, see võib olla tingitud kasutatud drooni jaoks valitud vales kaameranurgas. Eelkõige näitab katse 8 tulemus, et väiksemate objektide puhul on võimalik ka kergelt uduselt mudelilt võtta täpseid mõõte. Maa-ameti ortofotoga mõõtmete võrdlemisel osutus katse 8 halvimaks. See näitab, et uduste objektide puhul on lihtsam võtta objektidel mõõte lähedalt. Eelmises võrdluses võeti mõõte kaugelt.



Joonis 3.2 Katsete põhilised näitajad

Kvantitatiivse uurimise tulemused

Mudelites selgus, et väikestel objektidel mõõtude võtmine on suhteliselt täpne ja võrreldav mõõdulindiga võetavate mõõtudega. Mudelite kvantitatiivsel analüüsimisel selgus, et selgesti nähtavate objektidel on mõõdud võrreldavad Maa-amet ja mõõdulindiga võetud arvuliste väärtustega. Kõiki katsetel valminud mudelid on sobilikud edasiseks analüüsimiseks.

3.3 Kvalitatiivne hindamine

Kvantitatiivse analüüsimises mingeid probleeme mudelite juures ei märganud. Need mõõdud aga mudeli tervikpilti ei kajasta. Tervikliku ülevaate saamiseks tuleb mudeleid vastavalt metodikale kvalitatiivselt hinnata, mis annab hinnangu metodikatega loodud mudelite kvaliteedist. Järgnevalt on tabel 3.5 näitel tutvustatud kõikide mudelite peamiseid probleeme ja antud hinnang sobivusele.

Tabel 3.5 Metoodikate visuaalse hinnangu ülevaade

Nr	Puude kvaliteet/liiklusmärgid/postid/seinte sirgus/aiad	Suurimad probleemid	Võrreldes eelmisega paranes?	Selgus	Sobilik
1	<ul style="list-style-type: none"> •Puud selged •Seinad suures osas selged •Liiklusmärgid tuvastavad •Aiad sirged aga laiuselt valed 	<ul style="list-style-type: none"> •Männiku tee 90 hoone ots ei eristu puudest •Osade aedade laius ei vasta reaalsusele •Tankla katusealusel vale kuju 		Selge	Jah
2	<ul style="list-style-type: none"> •Puudel info puudulik •Seinad sirged aga kohati puudulikud •Liiklusmärgid suures osas loetavad •Postid kohati puudu •Aiad sirged, kuid kohati puudulikud 	<ul style="list-style-type: none"> •Katusealustel info puudub •Männiku tee 90 hoone ots ei eristu puudest •Männiku tee 101 ei eristu Männiku tee poolsest puust •Puudulikud objektid •Tankla katusealuse vale kuju 	Aedade laius	Selge	Ei
3	<ul style="list-style-type: none"> •Puud selged •Seinad kohati lainetavad •Märgid loetavad •Postid olemas •Aiad kohati paksud, üldine kvaliteet halb 	<ul style="list-style-type: none"> •Liiga valgest keskkonnast tekkinud lainetamine heledatel hoonetel •Männiku tee 90 hoone ots ei eristu puudest •Heledatest hoonetes info puudu 	Võrreldav katse 1 mudeliga	Selge	Jah
4	<ul style="list-style-type: none"> •Puud selged •Märgid loetavad •Seinad sirged •Aiad kohati paksud 	<ul style="list-style-type: none"> •Männiku tee 90 hoonete ots ei eristu •Heledatel hoonetel esineb probleeme •Tankla katusealuse vale kuju 	Võrreldav katse 1 mudeliga	Selge	Jah
5	<ul style="list-style-type: none"> •Puud kohati udused •Märgid suures osas loetavad 	<ul style="list-style-type: none"> •Männiku tee 90 hoone ei eristu •Objektid halvemad kui eelnevad mudelil 	Halvenes eelmisega võrreldes	Selge	Ei

Tabel 3.5 jätk

Nr	Puude kvaliteet/liiklumärgid/postid/seinte sirgus/aiad	Suurimad probleemid	Võrreldes eelmisega paranes?	Selgus	Sobilik
5	<ul style="list-style-type: none"> •Seinad kohati lainetavad •Märgid suures osas leotavad 	<ul style="list-style-type: none"> •Tankla katusealune 			
6	<ul style="list-style-type: none"> •Puud udused •Märgid suures osas loetamatud •Seinad lainetavad •Aiad puudulikud 	<ul style="list-style-type: none"> •Hooned ja aiad ei ole sirged •Hooned ei eristu puudest •Tankla katusealuse vale kuju 	Sarnane eelnevaga	Udune	EI
7	<ul style="list-style-type: none"> •Puud tuvastatavad •Liiklumärgid tuvastavad •Seinad sirged •Aiad lainetavad 	<ul style="list-style-type: none"> •Männiku tee 90 läheb puuga ühte •Aedade kvaliteet •Tankla katusealuse vale kuju 	Jah	Kergelt udune	Jah
8	<ul style="list-style-type: none"> •Liiklumärgid kergelt udused •Aiad sirged kuid üksikud augud •Puud suures osad tuvastatavad 	<ul style="list-style-type: none"> •Männiku tee 90 läheb puuga ühte •Üldine udusus •Aiad kohati lainetavad •Tankla katusealuse vale kuju 	Ei	Udune	Jah

Visuaalselt mudeleid analüüsid oli selgelt näha, et erinevad kaameranurgad mõjutavad mudeli tulemust märgatavalt. Kui teha fotosid 90 kraadise nurga all, siis paranevad kitsaste objektide laiused – eriti on seda näha aedade juures. Kuid selle juures võivad olla erinevad katusealused, puud ja seinad küljelt vaadates reaalsusele mitte vastavad. Kõikide erinevate kaameranurkadega tekkis probleem Männiku tee 90 hoonega, kus Valdeku tänava poolsel küljel oli mudelist raske eristada puud ja hoonet. Teiseks läbivaks probleemiks oli tankla katusealune, kuhu droon oma vaatevälja tõttu ei näe. Tankla katusealune tuli kõige paremini välja meetoodikatel, kus kasutati 45 kraadist kaameranurka. Kõikides mudelites oli probleemiks Männiku tee 101 juures asuv võrkaed, mis ühegi mudeli puhul reaalsusele vastavalt kujutatud ei ole.

Katsed 1,3,4,7,8 vastasid suurel määral kõik nõuetele. Neil kõigil oli puudujääke, kuid üldise plaanis kajastasid reaalsust väga hästi. Kõige paremaks visuaalses mõttes saab

pidada katse 1 abil loodud mudelit. Joonis 3.3 näitab kahe erineva kaameranurga all tehtud fotode mõju mudeli kvaliteedile. Seal on selgelt näha, millised praod võivad tekkida hoonete ülemistesse äärtesse.



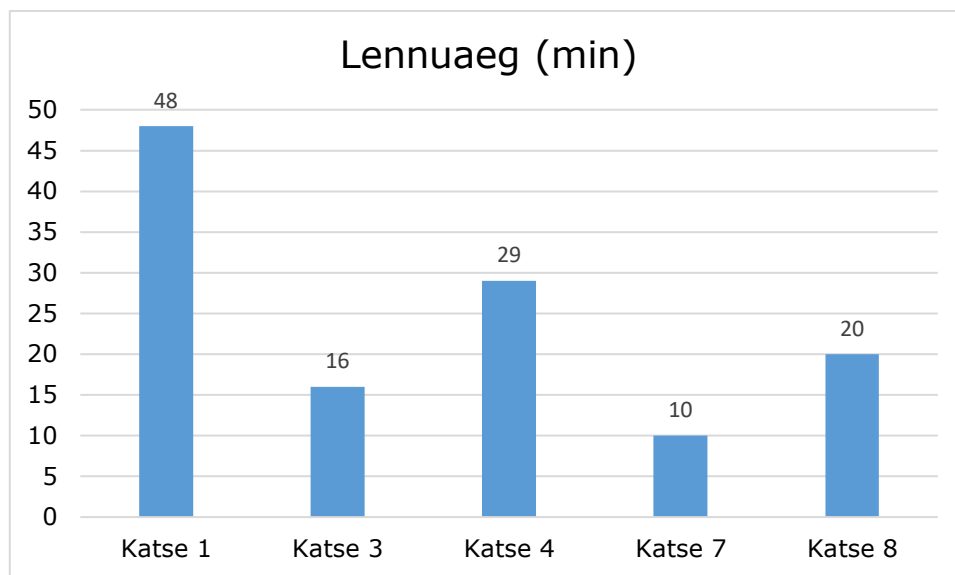
Joonis 3.3 katse 3(vasak foto) ja katse 2(parem foto) visuaalne võrdlus Männiku tee 97 hoone näitel

Katsetest osutusid sobivaks katsed 1,3,4,7,8. Katse 2 puhul oli probleemiks puuduv informatsioon vertikaalsetel pindadel. Eelkõige oli see tingitud kaamera vaatevälja piiratusest. Nähtaval oli objektid üleval alla vaadeldes ja see kajastus ka mudelist. Katse 2 juures olid hästi välja joonistunud objektide laiused ja seinte, aedade sirgusega probleeme ei esinenud. Metoodika 2 positiivseid külgi kasutati katse 8 juures, kus oli soov teha universaalne metoodika. Katse 5 ja 6 juures oli näha, et nende kvaliteet on halvem kui teistel mudelitel, mis on tehtud 45 kraadise nurga all kammeraga. Eelkõige olid probleemid tingitud sellest, et objektid olid nähtavad vähemate fotode peal kui ülejäänud metoodikate puhul. Lähtudes tulemustest, jätkatakse katsete 1,3,4,7,8 analüüsimisega.

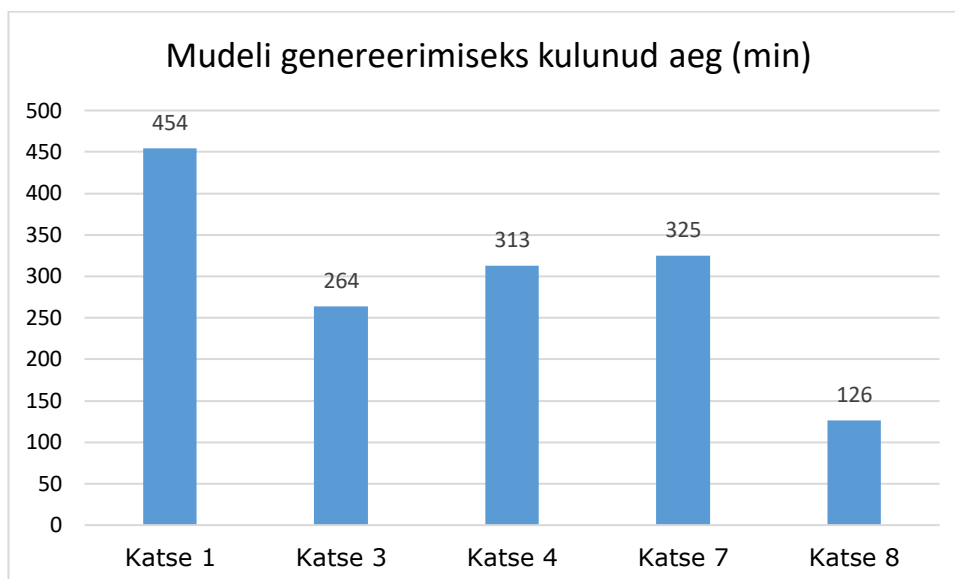
3.3.1 Optimaalsete mudelite valimine

Vastavalt eelnevatele tulemustele võrreldakse 1,3,4,7,8 katse ajakulu. Kuna võrdlusesse jäid nii 60 m kui ka 40 m kõrguselt tehtud fotodega mudelid, siis valitakse järgnevas etapis välja kaks parimat mudelite, üks 40 m ja teine 60 m variant. Järgnevalt

näitab joonis 3.4 lennuaeg ja joonis 3.5 mudeli genereerimisele kulunud aega. Katse 8 lennuajas sisaldub kaks lendu. Lennuplaani vahetus tehti vahepeal drooni maandamata.



Joonis 3.4 Lennuaeg minutites



Joonis 3.5 Katse ajakulu

Lennuaja poolest on kõige väiksemad katse 3 ja katse 7. Mudeli genereerimiseks kulunud on katse 7 puhul arvestades fotode hulka suur, ilmselt on see tingitud arvuti probleemist. Arvestades eelnevaid tulemusi on kõige optimaalsem katse 3 parameetrid. 60 m kõrgusel tehtud lendudest on küll väiksema ajakuluga meetodika 7, kuid arvestades, et objektid oli paremini välja joonistunud katse 8 puhul, siis osutub valituks see. Katse 8 puhul oli teistest lühem genereerimiseks kulunud aeg. Seda saab seostada piltide vähese arvuga(324).

Kuna eelnevalt olid valitud välja suhteliselt sarnase kvaliteediga katsete jooksul tehtud mudelid, siis valiku peamiseks kriteeriumiks oli aega. Tabel 3.6 võtab kokku paremad töös valminud katsete abil valitud meetodikat. Vastavalt on ka nimed antud.

Tabel 3.6 Parimad meetodikad

Näitaja	Metoodika 1 (katse 3)	Metoodika 2 (katse 8)
Ülekate	65% / 65%	
Kaameranurk	45 kraadi	
Lennukõrgus (m)	40	60
Sobilik hoonestus kõrgus	Kuni 35 m	Kuni 55 m
Ajakulu lendamisel (min)	16	20
Kogu ajakulu (min)	280	146
Pilte 1 ha	196	162
Keskmine viga (cm) – võrrelduna mõõdulindiga võetud mõõtmega	1,3	1
Keskmine ruutviga (cm)	1,7	1,2
GSD	1,1	1,64
Metoodika head küljed	<ul style="list-style-type: none"> • Hea visuaalse väljanägemisega • Lühike lennuaeg 	<ul style="list-style-type: none"> • Objektid on mudelis suures osas reaalsusele vastavad • Parandab eelnevate meetodikate vigu
Suurim probleem	<ul style="list-style-type: none"> • Aedade laius ei vasta reaalsusele 	<ul style="list-style-type: none"> • Üldine selguse vähenemine võrreldes meetodika 3 tulemustega
Soovitused	<ul style="list-style-type: none"> • Lisaks soovitav paralleelsete trajektooriga 90 kraadise kaameranurgaga lend – parandab peenikesi objekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Eelkõige valida meetodika objektidele, kus on kõrgemad kui 35 m hooned
Üldised soovitused	<ul style="list-style-type: none"> • Vältida tuleks suurima drooni lubatud kiirusega sõitmist pimedas või tugevalt pilvise ilmaga • Objektidel, kus on palju heledaid hoone/objekte on soovita lennata pilvise ilmaga – üldiselt päikeseline ilm suuri mudeleid parandab(probleemiks ainult varjud) 	

3.4 Uuritavad lisaalad

Metoodika 8 oli autori arvates kõige universaalsem metoodika enamikele Eestis asuvatele hoonestatud linnakeskkondale. Metoodika kinnitamiseks ja vigade teadasaamiseks kasutati metoodika 8 parameetreid Tartu kesklinnas ja Tallinna vanalinnas. Objektidel kasutatud parameetrid on toodud välja tabelis 3.7.

Tabel 3.7 Lisaobjektide lennuparameetrid

Parameeter	Tallinna kesklinn	Tartu kesklinn
Lennukõrgus (m)	60	
Ülekate(%)	65	
Kaameranurk (kraadides)	45 + 90	
Uuritav ala (ha)	4	5
Fotode arv(tk)	463	670

Objekt 1: Tartu Kesklinn

Mudeli tegemisel seati eesmärgiks luua võimalikult optimaalne 3D-mudel Tartu raekoja ümbrusest. Lennatav piirkond oli Kүүetri ja Poe tänava vaheline kvartal. Lennukõrgus valiti ohutust silmas pidades. Madalamal kõrgusel toimus raekoja mõõdistamine täpsemal viisil, mida siin töös ei kajastata. Visuaalselt tuli mudel eelnevalt kirjeldatud metoodikale vastavalt hea. Heledamatel pindadel, kuhu paistis päike, tekkisid mudelis reaalsusest erineva kujuga lainetused – seinad ei olnud sirged. Probleeme esines ka tekstuuris, mis varjude tõttu ei olnud kohati reaalsusele vastav. Lendamine oli piirkonnas turvaline ja seda eelkõige madala hoonestuse tõttu. Madala hoonestus võimaldas näha pidevalt drooni ja ühendus puldiga oli stabiilne. Tartu kesklinna projekt tõestas, et madala hoonestusega aladel toimib metoodika väga hästi ja 4 ha ala on optimaalne *DJI Phantom 4 RTK* drooni tarbeks. Autor peab reaalseks, et drooni komplektis oleva 4 akuga on võimalik lennata kuni 10 ha ala.

Objekt 2: Tallinna kesklinn

Tallinna kesklinnas oli eesmärgiks vähendada lennatavad ja testida mudeli kvaliteedi kohas, kas asuvad üksikud kõrgemad hooned(objektil oli selleks umbes 50 m kõrgune kirikutorn). Lennatava ala vähendamine tähendas seda, et huvipakkuvast alast ei väljutud. Lennatav ala oli Pika ja Laia tänava vaheline kvartal. Objektile tulid välja mõned probleemid. Esiteks hoonestuse tõttu ei olnud droon pidevalt vaateväljas, mis tekitas probleeme puldi ja drooni vahelise leviga. Teiseks vähendas ala kitsendamine mudeli kvaliteeti nähtavalt mudeli äärtes – esines auke ja valesid kujusid. Sarnaselt Tartuga tekitas probleeme ere päike, kuna mõõdistus tehti ajal, kui päike paistis ainult üksikutele hoonetel, siis üldist mudeli kvaliteeti see ei vähendanud. Objektile tulid teadmised, et

soovitav on lennata ala hoida pigem suurem uuritavast alast, see tagab kindlasti parema kvaliteedi. Teiseks on planeerimise osas tehtavad muudatused. Alati tasub enne lendu arvestada, et kitsastel tänavatel ja linnakeskkonas ei pruugi puldi ja drooni vaheline ühendus olla stabiilne. Selle vältimiseks on soovitatav puldiga viibida avatud alas, kus droon on pidevalt nähtaval. Joonis 3.6 illustreerib tulemust.



Joonis 3.6 Tallinna vanalinna ülevaade mudelist

Kahe objekti peale kokku saab öelda, et katse 8-ga seoses väljatöötatud parameetrid osutusid teistel objektidel paremaks kui Valdeku tänava – Männiku tee ristmikul. Eelkõige tingis mõlemal objektil hea tulemuse head valgusolud, mis võimaldasid droonil teha suure kiirusel häid ja selgeid fotosid. Kui võtta aluses põhiobjekt, siis tuleksid paremad tulemused 40 m kõrgusel, kuid ohutuse tagamiseks on paljudes kohtades mõistlik lennata 60 m kõrgusel.

3.5 Arutelu

Erinevate katsete läbiviimisel selgus, et mudeli kvaliteeti muudab kõige rohkem fotode tegemise nurk. Enamikel katsetel oli see 45 kraadi ja see osutus ka kõige paremaks. Eelkõige on 45 kraadise kaameranurga hea küljeks see, et objektid jäävad lisaks lähedalt ka kaugelt tehtud fotode peale. See suurendab fotode arvu, kus on kindlad

punktid nähtavad. Eriti tuli eelis välja põhiobjektile oleva tankla katusealuse juures, kus selgelt oli näha 45 kraadise kaameranurgaga tehtud fotode mõju mudeli kvaliteedile. Negatiivseks küljeks saab tuua valitu kaameranurga mõju väiksematele objektidele, peamiselt oli tegemist aedadega, mille laius mudelis ei vastanud reaalsusele. Katse 8 ja lisaobjektid tõestasid, et ühe paralleelsete trajektooriga 90 kraadise kaameranurgaga lend parandab tulemust piisaval määral.

Kaameraparametrite juures on oluline jälgida, et tööobjektile oleks piisavalt valgust. Töö käigus selgus, et automaatsete kaameraparametritega ja suurima programmi lubatud kiirusega lennates võisid jääda pildid udused. Probleem kerkis esile katse 8 juures. Järgnevates töödes võiks uurida, mis oleksid DJI Phantom 4 RTK drooni kõige universaalsemad kaameraparametrid. Lisaks liigsele pimedusele tekitasid probleeme ereda päikesega ilmad. Eelkõige tõusis see esile heledate hoonete puhul, kus programm ei suutnud liigse valgusega tehtud fotodelt leida ühiseid punkte, mis lõpuks kajastus mudeli halvemas kvaliteedis. Lisaks tekivad päikesega varjud, mis peamiselt tekitasid probleeme tekstuurile, mis ei pruukinud vastata tegelikkusele. Ereda valgus võimaldas suurima kiirusega lennates teha selgeid pilte, mis pimedate ilmade puhul ei olnud võimalik.

Peamisel uuritava alal olid mitmed aiad, mis kaldega fotosid kasutades ei joonistunud laiuses reaalsusele vastavalt välja. Selle probleemi parandamiseks õpiti katse 2 vigadest ja katse 8 puhul kombineeriti juba kahte kaameranurka.

KOKKUVÕTE

Käesolevas lõputöös töötati välja aerofotogramm-meetria meetodika linnakeskkonda. Töö käigus testiti kokku kaheksat erinevate meetodika. Meetodikate katsetamisel kombineeriti erinevaid kaamera vaatenurki, fotode piki- ja põikiülekatte suuruseid ja lennukõrguseid. Ühte parimat meetodikat testiti lisaks põhiobjektile veel Tallinna vanalinnas ja Tartu kesklinnas.

Meetodikate analüüsimise tulemusena osutusid parimateks kaks eri lennukõrgustega meetodikat. Esimesel oli piki- ja põikiülekatte suuruseks 65%, kaameranurgaks 45 kraadi ja lennati ristuvate trajektooriga 40 m kõrgusel. Mõõtude võrdlemisel mõõdulindiga tuli keskmiseks veaks 1,3 cm ja keskmiseks ruutveaks 1,7 cm. Teise meetodika tarbeks tehti kaks lendu 60 m kõrgusel. Mõlemal lennul oli piki- ja põikiülekatteks 65%. Esimese lennu puhul oli kaamera vaatenurgaks 45 kraadi, lennati ristuvate trajektooriga. Teisel lennul puhul lennati paralleelsete trajektooriga ja tehti fotosid 90 kraadise kaameranurgaga. Keskmiseks veaks kujunes 1 cm ja keskmiseks ruutveaks 1,2 cm. Mõlemad meetodikat vastasid tingimustele ja sobivad eesmärgi täitmiseks.

Hüpotees pidas paika, kõikide mudelite keskmine viga oli alla 6 cm. Mõõte oli sellise täpsusega võimalik mudelitelt võtta.

Järgmiste tööde juures on soovitatav rohkem tähelepanu pöörata kaamerale määratud parameetritele. Töö käigus loodud mudelitel esines probleeme heledate ja läikivate pindadega hoonetest mudelite loomisel. Teiseks probleemiks oli drooni valesti valitud kiirus, mis peamiselt väljendus fotode udususes. Fotode udusus mõjutab aga otseselt mudelite kvaliteeti. Lisaks peaks uurima, kas fotode kvaliteedil on mõju mudeli genereerimisajale. Vastupidiselt üldisele printsiibile oli töös märgata, et vähene fotode arv võib teatud tingimustel põhjustada aeglast genereerimist.

SUMMARY

The aim of this thesis was to develop aerial photogrammetry methodology for the urban environment. Methodology is specifically for Hades Geodeesia. In order to achieve goals of this thesis, a total of 8 methodologies were tested combining different camera angles, photo overlaps and flight altitudes. Methodologies have been tested using a DJI Phantom 4 RTK drone and Agisoft Metashape 1.6 photogrammetry software. The main flying area was in Männiku, Tallinn and additional areas were located in Tallinn Old Town and Tartu Town Hall.

Two methodologies at different flight altitudes proved to be the best. One of the best methodology photos would be collected at 40 m altitude, at 45 degrees camera angle with 65% x 65% photo overlap. Flight path was double grid. The average error of measurement was 1.3, cm and mean squared error 1.7 cm. Second methodology uses photos that would be collected at 60 m flight altitude, at 45 degree camera angle with 65% x 65% front and side overlap and in addition of this methodology uses photos that would be collected at 90 degree camera angle. The methodology combined doubled grid and single grid flight paths. The average error of measurement was 1 cm and mean squared error 1.2 cm Both methodologies gave good results and were suitable for this work.

The hypothesis was correct. The average error of all models was less than 6 cm.

In the following work, it is recommended to pay more attention to the parameters set to the camera. The models created during the work had problems in creating models of buildings with bright and shiny surfaces. Another problem was the wrong choice of drone speed which was mainly reflected in blurry photos. Some of the pictures were blurry and this made models less clear. In addition, it should be examined whether the quality of photographs has an impact on the model generation time. It was noted in the work that the number of few photos could, under certain conditions lead to slow generation.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Agisoft LLC, „Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.6,” 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf. [Kasutatud 24 10 2020].
- [2] J. Roosaare, K. Mõisja ja R. Aunap, Geoinformaatika, Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus, 2019.
- [3] J. Reserv, „UAV fotogramm-meetria kasutamine hoone välisgeomeetria ja deformatsioonide mõõdistamisel Tallinna Lennusadama näitel,” Tallinn, 2019.
- [4] A. Shalaby , M. Elmogy ja A. A. El-Fetouh , „Algorithms and Applications of Structure from Motion (SfM): A Survey,” *International Journal of Computer and Information Technology* , kd. 6, nr 06, 11 2017.
- [5] Humboldt State University, „Structure from Motion (SfM),” 2017. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson8-2/SfM.html. [Kasutatud 09 09 2020].
- [6] GIS Resources, „Basics of Photogrammetry,” 01 09 2013. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: http://www.gisresources.com/basic-of-photogrammetry_2/. [Kasutatud 11 11 2020].
- [7] Bon A. DeWitt, Paul R. Wolf, Benjamin E. Wilkinson, Elements of Photogrammetry with Application in GIS, Fourth Edition, McGraw-Hill Education, 2014.
- [8] Pix4D, „Image acquisition,” [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002471546-Image-acquisition>. [Kasutatud 20 09 2020].
- [9] A. J.T.Chesley, „Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA,” 1 06 2017. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817300817?casa_token=sqeWPneZzloAAAAA:S3V0vBND0NI6DchT43JD4MEjXQ_Tt-h-0lN0scMwMnGGokZs9C993wrQ6pi8jz3ZuYhw3wq0Vky. [Kasutatud 5 12 2020].
- [10] PIX4D, „Image acquisition,” [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002471546-Image-acquisition>. [Kasutatud 09 11 2020].
- [11] Norzailawati Mohd Noor, Ahmad Afiq Aiman Abdullah, Alias Abdullah, Illyani Ibrahim & Saadman Sabeek, „3D city modeling using multicopter drone for city heritage conservation,” *PLANNING MALAYSIA: Journal of the Malaysian Institute of Planners*, kd. 17, nr 1, pp. 338 - 349, 2019.
- [12] E. Kirs, „Hoone aerofotogramm-meetiline mõõdistamine UAV-ga,” 2019. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: http://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/5172/Even_Kirs_2019mag_GE_taistekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [13] Giuseppina VaccaAndrea DessiAlessandro Sacco, „The Use of Nadir and Oblique UAV Images for Building Knowledge,” 2017. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.researchgate.net/publication/321448042_The_Use_of_Nadir_and_Oblique_UAV_Images_for_Building_Knowledge.
- [14] Propelleraero.com, „What is Ground Sample Distance (GSD) and How Does it Affect Your Drone Data?,” [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.propelleraero.com/blog/ground-sample-distance-gsd-calculate-drone-data/>. [Kasutatud 1 11 2020].

- [15] Delair, „Delair,” 16 4 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://support.delair.aero/support/solutions/articles/24000044930-how-is-accuracy-defined-in-mapping-by-drone->. [Kasutatud 09 09 2020].
- [16] PIX4D, „Types of mission / Which type of mission to choose,” [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/209960726-Types-of-mission-Which-type-of-mission-to-choose>. [Kasutatud 09 11 2020].
- [17] DJI, „Disclaimer and Safety Guidelines v1.0,” 2018. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_rtk/20181015/For_NA_EU_Phantom_4_RTK_Disclaimer_and_Safety_Guidelines_v1.0.pdf. [Kasutatud 10 09 2020].
- [18] DroneDeploy, „Dronedeploy,” 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://support.dronedeploy.com/docs/3dmodeling-with-drones#best-practice-to-capture-oblique-image>. [Kasutatud 1 12 2020].
- [19] Muliady MuliadyMuliady MuliadyErwani Merry SartikaErwani Merry SartikaCindrawaty, LesmanaCindrawaty, LesmanaElizabeth, „UAV Photogrammetry for Generating 3D Campus Model,” 04 2019. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.researchgate.net/publication/332620660_UAV_photogrammetry_for_generating_3D_campus_model. [Kasutatud 07 11 2020].
- [20] City of Helsinki, „The Kalasatama Digital Twins Project The final report of the KIRA-digi pilot project,” [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.hel.fi/static/liitteet-2019/Kaupunginkanslia/Helsinki3D_Kalasatama_Digital_Twins.pdf. [Kasutatud 01 01 2021].
- [21] Singapore Government, „Virtual Singapore,” [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>. [Kasutatud 01 01 2021].
- [22] M. Pärli, „Uus ehitisregister hakkab kasutajatele avanema adventikalendrina,” *ERR uudised*, 2020.
- [23] Droon.ee, „Droon.ee,” [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://droon.ee/ohuruumi-kontrollitud-alad-lennuinfotsoonid-ja-pusivad-piirangualad/>. [Kasutatud 01 11 2020].
- [24] Maa-amet, „Maa-ameti X-GIS,” [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://xgis.maaamet.ee/>. [Kasutatud 09 11 2020].
- [25] „Ehitisregister,” [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.ehr.ee/>. [Kasutatud 01 11 2020].
- [26] DJI, „DJI Phantom 4 RTK,” DJI, [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.dji.com/ee/phantom-4-rtk>. [Kasutatud 24 10 2020].
- [27] E. L. A. I. osakond. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://aim.eans.ee/>. [Kasutatud 01 01 2021].
- [28] Maa-amet, „Maa-ameti Fotoladu,” [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://fotoladu.maaamet.ee/>. [Kasutatud 01 01 2021].
- [29] Maa-amet, „Ortofotod,” Maa-amet, [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Ortofotod-p99.html>. [Kasutatud 30 12 2020].
- [30] T. T. Rein Ruus, „Mõõtmistulemuste matemaatiline töötlemine,” 2012. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://eprints.ttkk.ee/id/eprint/147/1/gaussi_ja_besseli_valem.html. [Kasutatud 2020 12 06].

- [31] Lennuamet, „MEHITAMATA ÕHUSÕIDUKITE (sh droonide) MÜÜGI JA KÄITAMISE JUHEND,“ [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.ecaa.ee/sites/default/files/contenteditors/ops/droonid/meelespea_kaitajale.pdf. [Kasutatud 09 09 2020].
- [32] Monica Maharani, Anna Charieninna , Hary Nugroho, „Identification of photo number effect for 3D modeling in Agisoft software,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/500/1/012073/pdf>. [Kasutatud 11 2020].
- [33] City of Helsinki, „City of Helsinki,“ 06 12 2019. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.hel.fi/helsinki/en/administration/information/general/3d/how-were-the-3D-models-made/>. [Kasutatud 2021 01 01].
- [34] DJI, „Phantom 4 RTK,“ [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.dji.com/ee/phantom-4-rtk>. [Kasutatud 01 01 2021].

LISAD

Lisa 1 Katse 3 käigus valminud mudeli fotod



Lisa 2 Katse 8 käigus valminud mudelite fotod

