



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Tartu kolledž

**KALDAEROFOTODE TEGEMISE MÕJU  
FOTOGRAMM-MEETRILISE MUDELI  
KVALITEEDILE LINNAKESKKONNAS**

**EFFECT OF OBLIQUE PHOTOGRAPHY ON THE QUALITY  
OF A PHOTOGRAMMETRIC MODEL IN AN URBAN  
ENVIRONMENT**

LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Georg Erik Kolina

Üliõpilaskood 183598EDTR

Juhendaja: MSc Rinaldo Rüütli, insener

Tallinn 2022

## 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.

20.05 2022.a

Autor: .....  
/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

20.05 2022.a

Juhendaja: .....  
/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Georg Erik Kolina

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „KALDAEROFOTODE TEGEMISE MÕJU FOTOGRAFF-MEETRISE MUDELI KVALITEEDILE LINNAKESKKONNAS“

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.

---

20.05.2022

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Georg Erik Kolina - 183598EDTR  
**Õppekava, peeriala:** EDTR17/18 - Telemaatika ja arukad süsteemid  
**Juhendaja(d):** Rinaldo Rüütli, insener, 6204808

## Lõputöö teema:

Kalderofotode tegemise mõju fotogramm-meetrilise mudeli kvaliteedile linnakeskkonnas

Effect of oblique photography on the quality of a photogrammetric model in an urban environment

## Lõputöö põhieesmärgid:

1. Välja selgitada kaamera kaldenurga mõju fotogramm-meetrilisele linnakeskkonna mudelile.
2. Leida sobiv kaldenurk erinevate linnakeskkonna struktuuride pildistamiseks.
3. Anda soovitusi kaamera kaldenurga kasutamise osas.

## Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade	01.04
2.	Kolledži linnaku pildistamine	12.04
3.	Tulemuste analüüs	03.05

**Töö keel:** eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 20.05 2020. a

**Üliõpilane:** Georg Erik Kolina ..... 20.05 2020. a  
/allkirjastatud digitaalselt/

**Juhendaja:** Rinaldo Rüütli ..... 20.05 2020. a  
/ allkirjastatud digitaalselt//

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

# SISUKORD

EESSÕNA .....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1 MEHITAMA ÕHUSÕIDUKITEGA FOTOGRAMM-MEETRILINE MÕÕDISTAMINE .....	8
1.1 Mis on fotogramm-meetria .....	8
1.2 Ülevaade fotogramm-meetriast .....	9
1.3 Ülevaade mehitamata õhusõidukitest .....	10
1.4 Mehitamata õhusõidukitega mõõdistamine .....	12
1.5 Linnade 3D modelleerimine .....	12
2 METOODIKA .....	14
2.1 Uuritav ala .....	14
2.2 Aerofotode tegemiseks kasutatav droon .....	14
2.3 Lennuplaanide koostamine .....	15
2.4 Drooniga aerofotode tegemine .....	17
2.5 Piltide põhjal 3D mudelite genereerimine .....	17
2.6 Tulemuste analüüsimine .....	19
2.6.1 Kolledži C hoone juurdeehituse oranž puitfassaad ja katus .....	20
2.6.2 Kolledži C hoone valge osa fassaad ja katus .....	21
2.6.3 Ehituse labori katsemajad .....	22
2.6.4 Kolledži õueala .....	22
3 TULEMUSED .....	23
3.1 50° kaldenurga mudel .....	23
3.2 60° kaldenurga mudel .....	25
3.3 70° kaldenurga mudel .....	27
3.4 80° kaldenurga mudel .....	28
3.5 90° kaldenurga mudel .....	30
3.6 Arutelu .....	31
KOKKUVÕTE .....	33
SUMMARY .....	34
KASUTATUD KIRJANDUS .....	35

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema on sõnastatud juhendaja algatusel. Lõputöö praktiline osa viidi läbi TalTech Tartu Kolledži territooriumil, mille põhjal genereeriti töös kasutatavad mudelid. Andmete töötlus toimus kolledži labori arvutites.

Soovin tänada oma juhendajat Rinaldo Rüütlit, kes oli abiks praktilise osa igal etapil ja küsimuste korral andis alati kiired ja konkreetsed vastused, millest oli palju abi töö kirjutamisel.

Fotogramm-meetria, kaldenurk, 3D-mudel, linnakeskkond, rakenduskõrgharidustöö

## SISSEJUHATUS

Linnade 3D modelleerimine on viimase kümnendi jooksul hakanud äratama tähelepanu nii professionaalide kui ka teadlaste seas ja on tekkinud nõudlus efektiivsete meetodite järgi, mis aitaks linnade 3D mudelite loomisel. Fotogramm-meetriast on tänapäeval välja kujunenud kõige odavam ja kiirem viis ehitiste ja hoonete modelleerimiseks, kuna nõuded fotogramm-meetrias kasutatavatele kaameratele praktiliselt puuduvad. Seetõttu on fotogramm-meetrias kasutatavate fotode tegemiseks võetud laialdaselt kasutusele droonid, mis võimaldavad katta suuri alasid lühikese ajaga. See kõik on võimalik tänu fotogramm-meetria ja selles kasutatavate algoritmide kiirele arengule, mis on oluliselt tõstnud sellisel viisil genereeritud mudelite kvaliteeti.

Fotogramm-meetrias sõltub lõpliku mudeli kvaliteet oluliselt programmile ette antud piltidest ja nende parameetritest. Linnades esineb palju erinevaid struktuure ja alasid, ning seega on nende võimalikult täpseks modelleerimiseks vaja teada antud situatsioonis kõige paremini sobivaid kaamera parameetreid, et tagada fotogramm-meetria tulemusel saadud mudeli maksimaalne kvaliteet. Varasemalt on uuritud, milliseid parameetreid tuleks kasutada täpse mudeli saamiseks kindlates situatsioonides, sealhulgas soovitatavat kaldenurka aerofotode jaoks, kuid pole otseselt uuritud kaldenurga mõju genereeritavale mudelile. Antud töös võetaksegi uurimise alla aerofotode tegemisel kasutatavad erinevad kaldenurgad, et leida, kuidas kaamera kaldenurk mõjutab uuritava objekti erinevaid omadusi.

Käesolev töö võtab uurimise alla Tartu TalTech Kolledži ülikoolilinnaku. Kolledži linnak koosneb mitmest erinevast hoonest ning analüüsimiseks on seega lai valik erinevaid ehitise omadusi. Et tulemused oleks rakendatavad ka väljaspool kolledži linnakut, analüüsiti linnaku üldisemaid omadusi, milleks olid mitmesugused vertikaalsed pinnad, erinevad horisontaalsed pinnad ja linnaku haljasala. Töös kasutatavate aerofotode hankimiseks kasutati DJI Mavic 2 Pro drooni. Fotogramm-meetriliste mudelite genereerimiseks kasutati Agisoft Metshape Professional programmi. Tulemuste analüüsimine toimus kvalitatiivselt.

Töö on jaotatud kolmeks osaks. Esimene osa annab ülevaate fotogramm-meetriast ja selle arengutest, mehitamata õhusõidukitest ja nende ajaloost, mehitamata õhusõidukitega mõõdistamisest ja linnade 3D modelleerimisest. Töö teine osa, ehk meetodika, seletab lahti töös tehtud valikud, vahendid ja töö protsessi. Kolmas peatükk võtab kokku erinevate kaldenurkadega genereeritud mudelite tulemused ja arutleb nende üle.

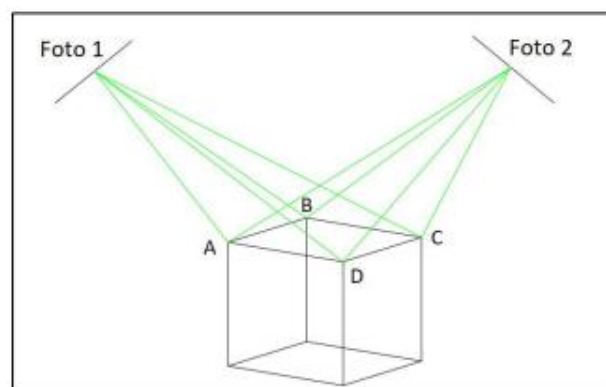
# 1 MEHITAMA ÕHUSÕIDUKITEGA FOTOGRAMM-MEETRILINE MÕÕDISTAMINE

Järgnev peatükk annab ülevaate fotogramm-meetria olemusest, droonidega mõõdistamisest, mõõdistusel kasutatavatest algoritmidest ja nendega seotud parameetritest.

## 1.1 Mis on fotogramm-meetria

Fotogramm-meetria on teadus, milles kasutatakse pilte objektist selle mõõtmete, kuju ja asendi määramiseks. Fotogramm-meetria tulemuseks on tavaliselt kas kaart, mõõtmed või 3D mudel päris maailmast. Fotogramm-meetria abil on tehtud suurem osa tänapäeval laialdaselt kasutatavatest kaartidest [1].

Fotogramm-meetria põhineb triangulatsioonil. Tehes objektist pilte kindlalt teada olevatest asukohtadest, saame määrata objekti kindlatele punktidele  $x$ ,  $y$  ja  $z$  koordinaadid. Oluline on, et määratav punkt oleks nähtav mõlemal pildil [1][2]. Fotogramm-meetria abil mitme erineva punkti trianguleerimist on kujutatud joonisel 1.1.



Joonis 1.1 Fotogramm-meetria abil punktide A,B,C ja D trianguleerimine.[3]

Fotogramm-meetria jaguneb eraldi kolmeks haruks sõltuvalt kaamera asukohast pildistamise hetkel. Nendeks on [1]:

- lähifotogramm-meetria, kus objekti pildistatakse kindlalt määratud punktidest, üldiselt objekti lähedalt ja kaamera nurk on horisontaalne või lähedal sellele;
- aerofotogramm-meetria, kus objekti pildistatakse õhust, tavaliselt lennukilt, ning kaamera vaatenurk on vertikaalne või lähedal sellele;



- kosmose fotogramm-meetria, kus fotogramm-meetria on peamiselt kasutusel kaugete objektide omaduste määramiseks.

Antud lõputöös keskendutakse edaspidi aerofotogramm-meetriaale.

## 1.2 Ülevaade fotogramm-meetriast

Fotogramm-meetria kirjeldas esimest korda aastal 1851 Prantsuse leiutaja Aimé Laussedat, keda peetakse ka fotogramm-meetria isaks. Ta kirjeldas seda protsessi kui ala koha peal kaardistamist looduslike perspektiivide abil. Laussedat kirjeldas fotogramm-meetria kui tehnikat juba enne, kui olid leiutatud esimesed kaamerad, sellest tulenevalt tehti kõik joonised ja arvutused paberil [4][5].

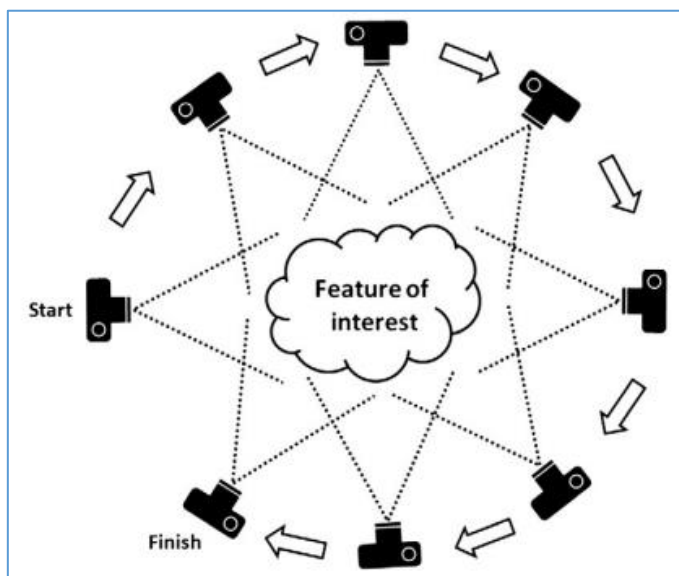
Järgmiseks fotogramm-meetria arengu sammuks võib pidada analoog fotogramm-meetria, mis sai alguse 20. sajandi esimeses pooles. Analoog fotogramm-meetrias rekonstrueeritakse geomeetria optiliste või mehaaniliste seadmete abil. Kaks pilti on seadmete abil võimalik kokku sobitada nii, et need moodustavad 3D mudeli. Selles faasis oli fotogramm-meetria peamiseks rakenduseks kalkulatsioonide vältimine ja tööprotsessi kiirendamine [5].

Tänu arvutite arengule sai 20. sajandi teises pooles alguse analüütiline fotogramm-meetria. Analüütilises fotogramm-meetrias kirjeldatakse seoseid pildidel olevate punktide vahel kalkulatsioonide ja kollineaarsete funktsioonide abil. See tagas oluliselt kõrgema täpsuse kui analoog fotogramm-meetria. Lisaks aitasid analüütilised fotogramm-meetrilised süsteemid operaatorit, juhendades teda kaamera paigutamisel ja seadistamisel [5].

Koos esimeste digitaalsete kaameratega hakkas 20. sajandi teises pooles arenema ka digitaalne fotogramm-meetria. Digitaalsete kaameratega kadus vajadus pildid arvutis töötlemiseks sisse skaneerida, sest pildid on juba digitaalsel kujul kaameras olemas. See tegi kogu protsessi oluliselt efektiivsemaks, sest mõõdistuste tegemiseks piisas ainult digitaalsest kaamerast [5][6].

Suurima hoo sai sisse fotogramm-meetria 21. sajandil. Kui varasemalt võrreldi objekti mõõtude saamiseks ainult kahte pilti ja kaamera positsioon pidi teada olema, siis tänapäeval on kasutusele võetud *structure-from-motion* (edaspidi SfM) algoritm. SfM

sarnaneb varasematele fotogramm-meetrilistele meetoditele selle poolest, et 3D mudeli kokku panemine käib kahel pildil asuva punkti koordinaatide välja kalkuleerimisega, eeldades, et teada on kaamera positsioon. SfM puhul ei ole aga vaja kaamera positsiooni pärast muretseda. See kalkuleeritakse automaatselt välja tehtud piltide ja nendel esinevate ühtsete punktide põhjal. Sellest tulenevalt on SfM'il suur eelis, sest seda on võimalik kasutada peaaegu ükskõik millise digitaalse kaameraga, ilma et oleks vaja määrata täpne kaamera positsioon ja asend. See omakorda teeb selle tehnoloogia kättesaadavaks kõigile inimestele. Lisaks on oluline erinevus see, et võrreldes eelnevate meetoditega, saab kasutada korraka mitut pilti (joonis 1.2). [7].



Joonis 1.2 Structure-from-motion algoritmi kirjeldav joonis [7].

*Structure-from-motion* on tänapäeval kasutuses kõikides fotogramm-meetria programmides. Sellest on saanud uus standard tänu tema lihtsusele ja kättesaadavusele.

### 1.3 Ülevaade mehitamata õhusõidukitest

Mehitamata õhusõiduk ehk droon on lendav masin, millel puudub piloot ja reisijad. Mehitamata õhusõidukeid tuntakse ka kui UAV (ingl k. *unmanned aerial vehicle*) [8].

Mehitamata õhusõidukeid juhitakse kas distantsilt juhtpuldi abil või kasutatakse eelnevalt määratud lennuplaani, mille abil saab droon autonoomselt talle määratud teekonna läbida [8].

Mehitamata õhusõidukid olid algselt kasutusel peamiselt militaarsetel eesmärkidel, kuid tehnoloogia arengu ja komponentide odavnemise tõttu on droonid jõudnud ka tsiviilkasutajateni [8][9]. Mehitamata õhusõidukid leiavad kasutust nii militaarvaldkonnas, liikluse suunamisel, maa-alade kaardistamisel, pildistamisel ja filmimisel, inimeste otsinguil, põllumajanduses ja meelelahutuslikel eesmärkidel [10].

Mehitamata õhusõidukid hakkasid tsiviilkasutajate seas oluliselt populaarsust koguma aastal 2010, kui Prantsuse juhtmevabade seadmete tootja Parrot tutvustas esimest korda rahvusvahelisel tarbijaelektronika näitusel (ingl k. *International Consumer Electronics Show* ehk CES) oma liitreaalsusdrooni. Parroti droon oli väike nelja tiivikuga droon, mille turvaline juhtimine toimus läbi telefoni rakenduse. Tänu lihtsasti mõistetavale telefonirakendusele jõudis droon ka rohkemate kasutajateni [9].

Aastal 2013, mõni aasta pärast Parroti esmast drooni esitlust, tuli droonide tootmisele ja arendamisele keskenduv ettevõtte DJI välja oma esimese *Phantom* tüüpi drooniga [11]. *Phantom* droonid andsid alguse ülemaailmsele droonihullusele, ning seeläbi sai ettevõtte paari aastaga tootjaks 80% tsiviilkasutuses olevatele droonidele [9][12].

Droonid jagunevad oma disaini poolest nelja erinevasse gruppi. Nendeks gruppideks on: multirootor-droonid, jäigatiivalised droonid, ühe tiivikuga droonid ja jäigatiivalised hübriid-droonid vertikaalse õhkutõusmise ja maandumise (ingl k. *vertical take off and landing* ehk VTOL) võimalusega [13].

Fotogramm-meetriliste mõõdistuste tegemiseks on peamiselt kasutusel fikseeritud tiibadega ja mitme tiivikuga droonid. Nende kahe drooniliigi peamine erinevus seisneb lennukiiruses, lennuulatuses ja stabiilsuses. Sõltuvalt mõõdetavast alast tuleks valida vajadustele vastav droon. Fikseeritud tiibadega drooni lennuulatus on oluliselt suurem, kuid see-eest on tema käsitlemine oluliselt raskem, sest sellega õhku tõusmiseks on vaja rohkem ruumi ja õhus püsimiseks peab droon kogu aeg liikuma. Fikseeritud tiibadega drooni tuleks kasutada juhul, kui mõõdetav ala on väga suur. Mitme tiivikuga droonid on lihtsasti juhitavad ja kontrollitavad, mis tagab neile stabiilsuse, kuid nende lennuulatus ja kiirus on oluliselt väiksem. Sellest tulenevalt tuleks neid kasutada sel juhul, kui mõõdetav ala pole väga suur ja oluline on täpsus [13].

## 1.4 Mehitamata õhusõidukitega mõõdistamine

Mehitamata õhusõidukite arengu tõttu on tänapäeval aerofotode tegemine kiirem, täpsem, turvalisem ja odavam. Lisaks võimaldavad droonid kaardistada alasid, kuhu inimestel puudub ligipääs või on liiga ohtlik minna [10][7].

Mehitamata õhusõidukid leiavad ka rakendust pärandkultuuriobjektide 3D modelleerimisel. Tihti on sellistele objektidele ligipääs piiratud ja oluline on, et mõõdistuste käigus ei rikutaks objekti. Mehitamata õhusõidukitega mõõdistamise eeliseks on, et mõõdistuste tegemiseks pole vaja objektil ollagi, mis tähendab, et objekt jääb puutumata. Mõõtmised tehakse ära õhust [14].

Aerofotogramm-meetrias kasutatavate droonide täpsus sõltub erinevatest faktoritest nagu näiteks lennu kiirus, kõrgus, kaamera parameetrid ja ilmastikuolud [13][10]. Sellest omakorda sõltub ka lõpliku mudeli täpsus. Tänapäeva droonidega on võimalik saavutada georefereerimisel asukohaline ja kõrguslik täpsus alla 5cm [10]. See aga eeldab, et kasutatakse RTK või PPK süsteeme ja üldjuhul ka maamärkide kasutamist.

Samuti võimaldavad mehitamata õhusõidukid mõõdistuste tegemise protsessi automatiseerida. Kuna paljudel droonidel on võimalik lennuplaan eelnevalt ette valmistada ja droon on suuteline selle autonoomselt läbi tegema, siis loob see ideaalsed tingimused andmete kogumise automatiseerimiseks. Eelnevalt koostatud lennuplaanidega on võimalik tagada, et uuritav objekt või ala on alati samamoodi kaardistatud. Samuti võimaldab see automatiseerida korduvmõõtmisi kindlate ajavahemikega, mis annab ülevaate objekti muutumisest ajas [15].

## 1.5 Linnade 3D modelleerimine

Huvi linnade 3D mudelite vastu on viimaste aastate jooksul oluliselt tõusnud nii professionaalide kui ka teadlaste seas [16]. Hetkel kasutatavate kaartide ja linna mudelite loomiseks on peamiselt kasutatud kõrgelt tehtud aerofotosid, mis tagavad piisava kvaliteedi 2D kaartide jaoks ja üldiseks hoonete jalajälje analüüsimiseks. Kahjuks on aga nende andmete põhjal tehtud 3D mudelite kvaliteet madal ja hoonete fassaadid ei jää ilusti mudelisse või jäetakse mudelist üldse välja [16][14].

Kui varasemalt oli suurte alade detailne kaardistamine raske, sest kasutatav laseritel põhinev tehnoloogia oli kallis ja mõõdistamise protsess aeganõudev, siis tänapäeval on tänu fotogramm-meetria ja dronide kiirele arengule linnade modelleerimine oluliselt lihtsam, kiirem ja odavam. Samuti on võimalik dronidega teha kaldenurgaga aerofotosid, mis aitab oluliselt hoonete fassaadide ja detailide kvaliteedi tõstmisel. Lisaks on fotogramm-meetria kaudu võimalik saada mudelisse kõrge kvaliteediga tekstuurid [14]. Sellest tulenevalt on ka maailmas hakatud tundma rohkem huvi linnade 3D mudelite vastu.

Ka Eestis on viimaste aastate jooksul hakatud rõhku panema 3D mudelite loomisele. Hetkel maa-ameti poolt arendataval kaardil on kajastatud kõik Eestis asuvad hooned. Kuna aga kaardirakenduse mudelid põhinevad kõrgelt tehtud aerolaserskaneerimise käigus saadud punktipilve ja ETAK hoonete andmete automaatsel kombineerimisel, on mudeli kvaliteet puudulik detailide osas. Hoonetel puuduvad tekstuurid ja hoonete kujud on üldistatud, kuna kõrgelt tehtud aerolaserskaneerimisega saadud punktipilv ei ole piisavalt tihe. See tähendab, et mudel ei ole suuteline andma ülevaadet reaalsest situatsioonist linnas, vaid on pigem ülevaatlik [22][23].

## **2 METOODIKA**

### **2.1 Uuritav ala**

Töö eesmärkidest lähtuvalt valis autor uuritavaks alaks TalTech Tartu kolledži linnaku. Kolledži linnak koosneb mitmest erinevast hoonest, igaüks omamoodi kujundusega. Kuna iga hoone esindab erinevat disaini stiili, annab antud ala hea ülevaate aerofotogrammeetria mõjudest erinevate situatsioonide ja hoonete puhul.

Kolledži linnakus on ka palju keerulisi kohti aerofotogrammeetria jaoks, näiteks kolledži peaukse juures asuv katus, mis ulatub umbes ühe meetri jagu kaugemale kui maja sein. Majade külgedel on ka metallist trepid, mille põhjal saab analüüsida mudeli täpsust konkreetsete struktuursete eripärade näitel.

Uuritava ala miinuseks on hooviala äärtes asuvad puud, mis jäävad ette maja fassaadidele neid õhust pildistades. Sellest tulenevalt valiti mõõdistuste tegemiseks aeg, kus puud ei olnud lehes, et vähendada nende mõju mudelile. Maja fassaadist paraku pole pilti, kus puuduksid blokeerivad lehtedeta puuoksad, ning seetõttu genereerib programm maja tekstuuridele siiski puu oksad, mis tekstuuri kvaliteeti rikub.

### **2.2 Aerofotode tegemiseks kasutatav droon**

Uuritava ala pildistamiseks kasutati DJI Mavic 2 Pro drooni. Antud droon kasutab Hasselblad L1D-20c kaamerat, mis tagab fotode naturaalse välimuse ja kõrge kvaliteedi. Drooni tehtud fotod on 20-megapikslilised. Lisaks on droonil hulk erinevaid turvalisuse funktsioone, mis näiteks takistavad droonil aku tühjenedes alla kukkumast, tuues drooni enne aku tühjaks saamist automaatselt koju. Samuti saab droon aru oma ümbrusest kasutades selleks erinevaid andureid ja üritab aktiivselt ära hoida kokkupõrkeid ümbritseva keskkonnaga [19].

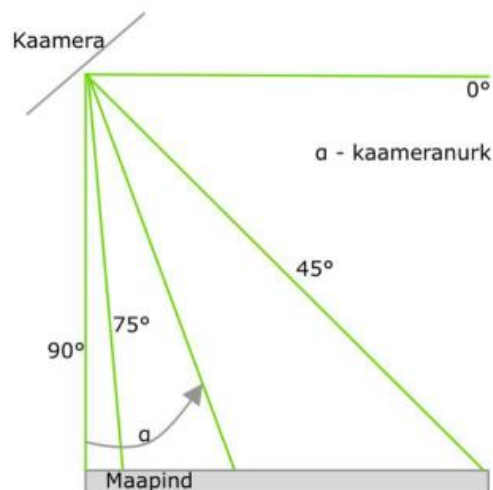


Joonis 2.2 Töös kasutatav DJI Mavic 2 Pro droon [19].

## 2.3 Lennuplaanide koostamine

Tänapäeval ei käi droonidega alade kaardistamine enam kaugjuhtimise teel. Selle asemel on olemas erinevad rakendused, mis koostavad droonile etteantud parameetrite põhjal optimaalse lennutrajektoori. Kui lennutrajektoor on paigas, siis on programm suuteline ka ise drooniga lennu läbi tegema.

Drooni lennuplaani koostamiseks on erinevaid programme, kuid neist kaks kõige populaarsemat ja enamlevinut on *Dronedeploy* ja *Pix4DCapture*. Nende populaarsusest tulenevalt oli ka autoril algselt plaan ühte neist kasutada, kuid nendega lennuplaani koostades selgus, et antud programmid ei anna kasutajale õigust pildistamisel kasutatavat kaldenurka vabalt muuta. *Dronedeploy* oli 3D kaardistamise lendude režiimis fikseerinud kaldenurga  $65^\circ$  peale ja sellest tulenevalt ignoreeris manuaalselt määratud kaldenurka. *Pix4DCapture* lubas küll kaldenurka muuta, kuid seda ainult vahemikus  $45\text{--}80$ . Kuna plaanis oli ka  $90^\circ$  kaameranurgaga lend teha, siis ei saanud seda rakendust kasutada.



Joonis 2.3 Kaamera kaldenurka seletav joonis [20].

Sellest tulenevalt kasutas töö autor lennuplaanide koostamiseks *Copter* rakendust iOS seadmetele. *Copter* võimaldas muuta kõiki vajalikke parameetreid ja on ehitatud ametliku DJI rakenduse baasil, mis võib tagada rakenduse parema koostöö drooniga.

Esmalt oli vaja määratleda kaardistatav ala. Autoril tuli määrata mõõdistatav ala natukene suuremaks, kui kolledži territoorium, sest droon hakkas tegema pilte erinevate kaldenurkadega, mitte ainult 90° nagu varasemalt kombeks. See tagas, et ka ala ääres tehtud kaldenurgaga aerofoto peale jääks ala ääres asuvate hoonete fassaadid.



Joonis 2.4 TalTech Tartu Kolledži ala kattev lennuplaan. Autori foto

Pärast mõõdistatava ala määramist pani autor paika teised lennuparameetrid, mida erinevate katsete vahel ei muudetud. Ainukeseks muutuvaks parameetriks jäi kaldenurk. Lennuparameetrid, mis olid igal lennul samad:

- Lennu kõrgus: 80m
- Põiki ülekattumine: 80%
- Piki ülekattumine: 80%

Lennu kõrguseks valis autor 80 m, sest see kajastab paremini reaalseid tingimusi pärismaailmas linnade mõõdistamisel, kus pilte tehakse kõrgelt taevast. Samuti mahub kõrgelt tehtud pildile rohkem objekte, mis vähendab tehtavate piltide arvu.

Kokku tehti 6 erinevat lennuplaani, et tulemuseks oleks 5 erinevat mudelit. Ainuke erinevus lennuplaanide vahel oli kaldenurk horisondi suhtes. Nendeks kaldenurkadeks olid: 50°, 60°, 70°, 80° ja 90°.



## 2.4 Drooniga aerofotode tegemine

Drooniga pildistamisel on äärmiselt olulised ilmastikuolud. Sellest tulenevalt valiti drooniga pildistamiseks tuulevaikne ja päikseline päev. Kõik lennud drooniga tehti 12.04.2022, mil keskmine tuulekiirus oli 3m/s ja taevas oli pilvkatteta.

Enne kui võis drooni lennutama hakata, oli vaja lennujuhtimistorni eelnevalt teavitada tehtavatest lendudest tol hetkel kehtivate lennupiirangute tõttu, lisaks oli lend eelnevalt kooskõlastatud ka transpordiametiga. Kui lennuba olemas, tehti kiire kontroll drooni kompassile ja akudele kasutades *DJI GO 4* rakendust. Kui kõik oli korras, võisid lennud alata.

Iga lennu alguses pani töö autor kirja täpse kellaaja ja lennuplaani nime, mida rakendati. See aitas pärast lihtsamini drooni SD kaardilt pilte sorteerida, sest kellaajaliselt oli lihtne õiged pildid välja sorteerida.

Hea ilma tõttu õnnestus drooniga pildistamine probleemideta. Vaikne tuul lasi droonil ilusasti oma trajektoori järgida ja puudulik pilvkate tagas selle, et valgustingimused oleks kõigil fotodel samad. Samuti ei pidanud muretsema sademete pärast.

Kui kõik lennud olid drooniga tehtud, tuli pildid droonilt arvutisse saada. Selleks võeti droonist SD kaart, kuhu pildid olid salvestatud ja ühendati see arvutiga. Drooni lendude ajal kirja saanud lennu alguse kellaegade alusel sorteeriti pildid ja need paigutati vastava lennuplaani kausta, et neid pärast lihtsam töödelda oleks.

## 2.5 Piltide põhjal 3D mudelite genereerimine

Piltide põhjal fotogramm-meetrilise mudeli genereerimiseks kasutati programmi *Agisoft Metashape*. Antud programm osutus valituks seetõttu, et selle litsentseeritud profitaseme versioon oli kooli labori arvutites juba olemas.

*Agisoft Metashape* programmis käib mudelitega töö programmi vaikimisi paika pandud töövoos alusel. See tähendab, et mudeli genereerimise protsess on optimeeritud tänu sammudele töövoos. Antud töö eesmärkidest lähtuvalt on autoril vaja vaid *mesh* mudel genereerida ja sellest tulenevalt on vaja ainult kindlaid samme kogu *workflow*'st. Iga

sammu juures rakendati kindlaid parameetreid, et erinevad mudelid oleks omavahel võrreldavad. Kasutatud *workflow* sammud ja nende parameetrid on kirjeldatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Agisoft Metashape *workflow* sammude parameetrid

Workflow samm	Parameeter	Väärtus
align photos	accuracy	high
	generic preselection	yes
	reference preselection	yes (source)
build mesh	source data	Depth maps
	quality	high
	face count	high
	depth filtering	mild
build texture	Texture type	diffuse map
	source data	images
	mapping mode	generic
	blending mode	mosaic
	texture size/count	5000 x 1

Enne kui mudeli genereerimist alustati, salvestati iga mudeli projektifail eraldi kausta vastava kaamera kaldenurga nimega. Seejärel alustati *workflow* esimesest sammust, ehk failide programmi laadimisest. Kuna eelnevalt olid pildid juba lendude kaupa kaustadesse jaotatud, jäi üle ainult programmile õige kaust piltidega ette näidata.

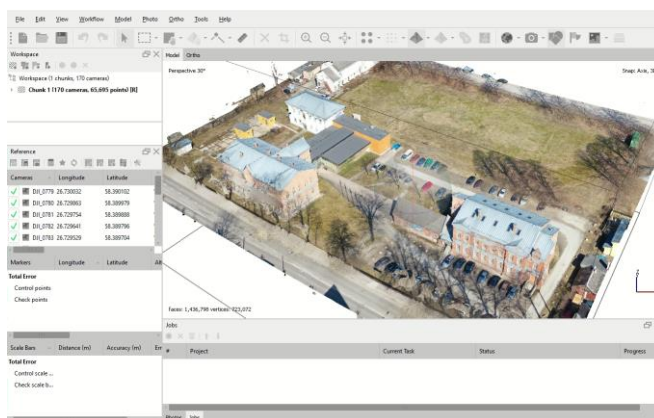
Seejärel alustati *align photos* sammuga. Selles sammus otsib programm erinevatelt piltidelt ühiseid ja lihtsasti ära tuntavaid punkte. Lisaks määrab programm ära kaamera asukoha iga pildi ajal. Kogu selle info puhul annab programm välja üpriski hõreda punktipilve, mida programm kasutab piltide joondamiseks ja mille põhjal hakatakse 3D mudelit genereerima [10]. See samm on ühtlasi ka kõige lühem samm kogu protsessi juures.

Kui *align photos* samm oli tehtud, tekkis hõre punktipilv, milles oli võimalik näha üldist mudeli kuju ja piire. Selleks, et vähendada mudeli genereerimiseks kuluvat aega ja mudeli suurust, oli vaja selle punktipilve põhjal modelleeritavat ala kärpida. Autor määras programmis kõigil mudelitel ala nii, et see jookseb kohakuti kooli ümbritseva aiaga. Kui ala määratud, võis liikuda järgmise sammu, ehk *build mesh* juurde.

*Build mesh* sammus üritab programm piltide põhjal kokku panna võimalikult täpse 3D mudeli. See on ühtlasi ka kõige pikem protsess kogu mudeli genereerimisel. Antud

sammu tulemuseks on tekstuuriidega 3D mudel, mis on genereeritud täielikult programmile ette antud piltide põhjal.

Kui 3D mudel on olemas, saame drooni piltide pealt pindadele ka tekstuurid, kasutades selleks *build texture* sammu. Antud sammus genereerib programm piltide põhjal kõikidele pindadele ka selgemad tekstuurid. See aitab hiljem mudelite analüüsimisel. Tulemuseks oli valmis 3D mudel (joonis 2.5), mida oli võimalik analüüsida kas *Agisoft metashape* programmis või eksportida analüüsiks mõnes muus programmis vabalt valitud failiformaadis. Antud töös kasutati analüüsimiseks programmi Agisoft Viewer.



Joonis 2.5 *Agisoft metashape workflow* lõplik tulemus. Autori foto

## 2.6 Tulemuste analüüsimine

Töö eesmärgiks on välja selgitada aerofoto kaldenurga mõju mudelile linnakeskkonnas, ning sellest lähtuvalt oli esmalt vaja paika panna kriteeriumid, mida hinnata, et neid oleks võimalik rakendada ka teistel linnakeskkonnas esinevatel hoonetel ja aladel. Sellest tulenevalt ei analüüsi töö autor mudelite ja majade mõõtmete ning koordinaatide vastavust tegelikkusele, vaid analüüsi alla võetakse kaldenurga mõju erinevatele horisontaalsetele ja vertikaalsetele pindadele, haljastusele ja hoonete struktuursetele eripäradele. Lisaks jälgiti analüüsitava objektide *mesh confidence*'i, ehk võrgumudeli usaldusväärust. *Agisoft Metashape* võimaldab genereeritud mudelis näidata, kui kindel ta mingite pindade võrkumudeli kujus on. Võrkumudeli usaldusväärus on esitatud skaalal sinisest punaseni, kus punane on 0% usaldusväärus ja sinine on 100% usaldusväärus (joonis 2.6).



Joonis 2.6 Vasakul pilt mudelist, paremal pilt selle mudeli *mesh confidence*'ist.

Tulemuste analüüs algas kolledži õuealalt analüüsiks sobivate alade leidmisega. Arvesse võeti eelnevalt mainitud kriteeriumid mida hinnata. Järgnevalt on alapeatükkidena välja toodud alad, mida mudelite analüüsis kasutatakse ja lühike kirjeldus, miks need valituks osutusid.

### **2.6.1 Kolledži C hoone juurdeehituse oranž puitfassaad ja katus**

Antud hoone puitfassaad on lähedal ideaaltingimustele fotogramm-meetrilise mudeli genereerimiseks. Pind on sirgejoonelise tekstuuriga, hästi valgustatud ja erinevatelt piltidelt lihtsasti leitavate tunnustega (näiteks prožektorid fassaadil). See kõik kokku annab hea pinna, mille põhjal analüüsida kaldenurga mõju vertikaalsetele pindadele. Maja klaasfassaadist umbes meetri kaugusele ulatuv katusealune ala annab hea võimaluse uurida kaldenurga mõju katuste alla jäävatele aladele, kus on madalamatel kaldenurkadel suur eelis.

Majas kolledži kõrval asuva muruplatsi poole jääval küljel on ka väiksemaid detaile: trepp ja konditsioneerisüsteem. Lisaks on antud külj päikese eest varjus, mis tähendab, et sellest küljest tehtud pildid on natukene madalama kvaliteediga.



Joonis 2.7 Pilt TalTech Tartu kolledži C hoone juurdeehituse katusest ja oranžist puitfassaadist. Autori foto

### 2.6.2 Kolledži C hoone valge osa fassaad ja katus

Antud hoone on üleni valge. Võib väita, et valgetel ja heledatel pindadel on keerulisem eristuvaid detaile erinevate piltide peal määrata, ning seega kannatab ka oluliselt valgetel pindadel kvaliteet [12]. Antud hoone võimaldab analüüsida kaldenurga mõju heledatele pindadele nii päikese käes kui ka varjus.

Lisaks on majal suhteliselt suur räästaalune osa, mis paratamatult ei jää kõrgelt aerofotosid tehes pildile. Antud koht annab võimaluse analüüsida kaldenurga mõju sellistele pindadele sarnaselt peatükis 2.6.1 välja toodud klaasfassaadi kohal olevale katusele.



Joonis 2.8 Pilt TalTech Tartu kolledži C hoone valgest osast. Autori foto

### 2.6.3 Ehituse labori katsemajad

Ehituse labori katsemajad on struktuurilt peaaegu perfektsed risttahukad. Nende ilus täisnurkne disain annab võimaluse analüüsida kaldenurga mõju vertikaalsetele pindadele, horisontaalsetele pindadele (maja katus) ja nurkadele.



Joonis 2.9 Pilt TalTech Tartu kolledži ehituse labori katsemajadest. Autori foto

### 2.6.4 Kolledži õueala

Haljastuse analüüsimiseks valis autor kolledži parkla ja kõnniteed õuealal ümber parkla. Valiku tegemisel sai määravaks see, et antud ala on oma omaduste poolest mitmekesine.

Kolledži kahte hoonet ühendab äärekiviga tänavakividest sile kõnnitee, mis on kõrgemal ümbritsevast pinnasest. Parkimisalalt kooli usteni viivad aga kõnniteed, mis on kergelt kausja kujuga ja erinevalt tänavakividega kõnniteest veidi madalamal ümbritsevast pinnasest. See annab hea võimaluse analüüsida väiksemaid haljastuse detaile ja pindade kõrguse erinevust mudelis.

Kooli A hoone peaukse kõrval on rida erinevas suuruses kivid, mis annavad võimaluse analüüsida kaldenurga mõju erinevatele väiksematele objektidele ja nende kujule.



Joonis 2.10 Pildid TalTech Tartu kolledži õuealal asuvatest kõnniteedest ja A hoone peaukse juures asuvatest kividest. Autori foto

## 3 TULEMUSED

Selles peatükis annab autor ülevaate mõõdistuste tulemustest. Iga mudeli analüüs on jaotatud eraldi alapeatükkideks mudeli genereerimisel kasutatud piltide kaldenurgast lähtuvalt.

### 3.1 50° kaldenurga mudel

#### Vertikaalsed pinnad

Puitfassaadide pinna siledus sõltub otseselt valguse kogusest. Hästi valgustatud päikeselised pinnad on siledad ja ilma deformatsioonita. Varjulised küljed on lainelised ja künklikud, eriti akende ümbruses, kuid kaugemalt vaadates on üldmulje hea. Akende ümbruse künklikkus avaldub ka *mesh confidence*'i vaadates, kuna on näha, et programm pole täiesti kindel akende kohal oleva ala suhtes. Päikeselistel külgedel oli võrkumudeli usaldusväarsus 100%.

C hoone valge osa varjuline külge on oluliselt deformeerunud ja ei vasta reaalsusele. Kogu varjulise külje vertikaalne pind on kausja kujuga maja sisemuse poole. Päikese poolt valgustatud külge on siledam ja eemalt vaadates vastab reaalsusele. Lähemal uurimisel aga on samuti näha selget deformatsiooni ja künklikkust pinnal. Nende seinade osas on võimalik programmist näha, et 100% usaldusväarsus on ainult sellistes kohtades, kus on mõni selgelt eristatav punkt lähedal. Antud maja puhul on nendeks akende raami ümbrused, ukse ümbrus ja maja nurgad. Varjulistel külgedel võib täheldada samasugust nähtust, kuid üldine usaldusväarsuse tase on oluliselt madalam.



Joonis 3.1 Vasakul C hoone valge osa. Vasakul eemalt vaadatuna ja paremal lähedalt vaadatuna 50° mudelil. Autori foto

### **Horisontaalsed pinnad**

Kõik horisontaalsed pinnad on eemalt vaadates siledad, kuid lähemalt uurides esineb pinnasel künklikkust. Otseselt mudeli kvaliteeti see ei mõjuta.

Võrkmudeli usaldusväarsuse osas etteheiteid ei ole. Kõikides horisontaalsetes pindades on programm 100% kindel.

### **Struktuursed eripärad**

Räästa ja katusealused alad on kõigist mudelitest kõige detailsemad ja reaalsusele vastavamad, kuid siiski on deformatsioon selgelt näha. Mudelil on katuse äär venitatud maja seinal kõige kõrgema kohani, kuhu kaamera pildistamisel nägi.



Joonis 3.2 C hoone deformeerunud klaasfassaad 50° mudelil. Autori foto

C hoone küljel asuv trepp ja konditsioneer on deformeerunud, kuid on aru saada, millega on tegu. Trepi ülemise osa metallvõrgust pinna asemel on auk, sest kaamera on ilmselt sellest läbi näinud. Trepil on ainult 5 esimest astet, kuid kõik astmed on selgelt eristatavad.

Ka võrkmudeli usaldusväarsuses on sarnased tulemused. Katuse aluse osa usaldusväarsuse tase kõigub 1-5% vahel. Maja kõrval asuva trepi juures on näha, et nimetatud esimesed 5 astet on peaaegu 100% usaldusväarsusega, kuid ülejäänud trepi *mesh confidence* kõigub 1% ümber.



## **Haljasala**

Antud mudelil on haljastus väga hästi ja reaalsusega võrreldes detailselt kajastatud. Parkla pinnas vastab reaalsusele, mudelisse on isegi jõudnud parkla teekattes olnud augud.

Tänavakivist kõnnitee pind on sile ja ümbritsevast maapinnast selgelt kõrgemal. Kruusa peal olevad kõnniteed on ümbritsevast pinnast natuke madalamal ja kergelt kausjad, täpselt nagu reaalsuses.

A hoone peaukse kõrval asuvad kivid on mudelil olemas ja piisavalt detailsed, et mudelil kujutatud kivi on lihtsasti kokku viidav reaalsekiviga.

Mudeli usaldusväarsuse osas etteheiteid jällegi ei ole. Kõik haljasala pinnad on 100% usaldusväarsusega.

## **3.2 60° kaldenurga mudel**

### **Vertikaalsed pinnad**

Hästi valgustatud puitfassaadid on siledad ja olulist erinevust võrreldes 50° mudeliga ei ole. Küll aga on erinevus näha varjulistel külgedel, kus pind on sarnaselt deformeerunud, kuid vea amplituud on väiksem, ehk üldiselt on pind siledam. Eriti hästi tuleb see välja akende ümbruses.

Valge maja on ka selles mudelis äärmiselt deformeerunud eriti just varjulise külje pealt. Võrreldes eelmise mudeliga on tekkinud maja varjus oleva külje nurka auk. Hästi valgustatud fassaad on praktiliselt samasugune, nagu oli 50° mudelil. Märkata on ainult vigade süvenemist.

Puitfassaadidel on võrkumudeli usaldusväarsuse osas märkata paranemist võrreldes 50° mudeliga. Alad, mille suhtes programm pole kindel, on endiselt samad, kuid üldiselt on usaldusväarsuse protsent umbes 10% suurem ja mitte kindlad piirkonnad natukene väiksemad. Valge maja osas olulisi muutusi pole, kuid nurga suhtes, kuhu oli tekkinud auk, on programmi usaldusväarsuse protsent nulli lähedal. Sellest ilmselt ka nii suur viga.



Joonis 3.3 Auk C hoone seinas 60° mudelil. Autori foto

### **Horisontaalsed pinnad**

Kõik horisontaalsed pinnad on siledamad võrreldes 50° mudeliga. Esineb endiselt künklikkust, kuid vea amplituud on väiksem. *Mesh confidence* on kõigil pindadel 100%.

### **Struktuursed eripärad**

Katusealused seinad on deformeerunud ja katuse äär on maja seinal veel rohkem allapoole venitatud, kui ta oli 50° mudelis. Üllataval kombel ei kajastu see aga mudeli usaldusväärssuses, kuna tulemus on praktiliselt identne 50° mudeliga.

C maja küljel asuv trepp on poolik, kuid olemasolevad astmed on selgelt eristatavad. Konditsioneeride süsteem on deformeerunud ja trepiga kokku sulandunud. Siiski on aru saada, millega tegu.

### **Haljasala**

Sarnaselt eelmisele mudelile on ka siin haljastus väga hästi kajastatud. Parklas on augud teekattes, tänavakivist kõnnitee on sile ja ümbritsevast pinnast kõrgemal, kruusa peal olevad kõnniteed on kausja kujuga ja ümbritsevast pinnast veidi madalamal.

A hoone peaukse juures olevatest kividest on mudelil olemas kõik peale ühe ja ühtlasi ka kõige väiksema kivi. Antud kivi on eemalt vaadates eristatav, kuid lähemal uurimisel on näha, et ta on sulandunud maapinnaga kokku ja meenutab rohkem hunnikut liiva kui kivi.

Madala detailiga kivist olenemata on *mesh confidence* siiski kõigil haljasala pindadel 100%. Seega programmi tõlgenduse kohaselt peabki see kivi selline olema.

### 3.3 70° kaldenurga mudel

#### Vertikaalsed pinnad

Võrreldes eelmiste mudelitega on 70° mudelil puitfassaadide vertikaalsed pinnad siledamad. Kui hästi valgustatud külgedel olulist muutust ei toimunud, siis varjulistel külgedel on näha, kuidas puitfassaadi pind on selgelt siledam ja akna ümber esinevad moonutused on peaaegu et kadunud. Üllataval kombel on aga *mesh confidence* üldiselt madalam kui 60° mudelil, kuid erinevus on siiski väike. Peamiselt on mõjutatud vertikaalpinna ülemised ääred.

Eelmises mudelis tekkinud auk valge maja seinas on endiselt alles. Maja varjus fassaad on samamoodi deformeerunud nagu varasematel mudelitel, erinevusi neil praktiliselt pole. Päikesepoolne fassaad on samuti identne varasema mudeliga. Vörkmudeli usaldusväärsust vaadates on näha olulist usaldusväärsuse langust just varjulistel külgedel. Samuti on mõjutatud päikeselised küljed, kus ebausaldusväärsuse alad on laienenud.

#### Horisontaalsed pinnad

Võrreldes varasemate mudelitega on horisontaalsed pinnad veelgi siledamad. Nad pole täiesti siledad, kuid vea amplituud on võrreldes 60° mudeliga veelgi vähenenud ja peale vaadates ei ole deformatsiooni näha. Viga on tuvastatav ainult siis, kui mudelit programmis suurendada. *Mesh confidence* on kõigil horisontaalsetel pindadel 100%.

#### Struktuursed eripärad

Võrreldes varasemate mudelitega on selles mudelis katuse- ja räästaalused veelgi rohkem deformeerunud. Klaasfassaad on veel eristatav, kuid katuse äär on venitatud peaaegu et maani. Vörkmudeli usaldusväärsus on kogu venitatud osa peal 0% lähedal.

C hoone trepp on antud mudelil täies mahus olemas, puudu on ainult trepi ülemine osa. Kõik astmed on mudelis kujutatud ja selgelt eristatavad. Sarnased järeldused saab teha ka vörkmudeli usaldusväärsuse põhjal, kus trepi astmete osas on peaaegu 100% usaldusväärsus ja trepi ülemine osa on 0-1%.

## Haljasala

Võrreldes varasemate mudelitega on kruusaga kaetud kõnnitee rohkem tasapinnas ümbritseva keskkonnaga, mitte niivõrd kausjas ja madalamal ümbritsevast pinnast nagu varasemates mudelites.

Ülejäänu on praktiliselt sama võrreldes muude mudelitega. Parklas on endiselt teekatte augud, tänavakivist kõnnitee on ümbritsevast kõrgemal ja äärekivi on selgelt näha. A hoone juures asuvad kivid on identsed 60° mudeli kividele.

## 3.4 80° kaldenurga mudel

### Vertikaalsed pinnad

Antud mudelis on puitfassaadidel märgata suuri muutusi võrreldes varasemate mudelitega nii päikesepoolsetel kui ka varjulistel pindadel. Päikesepoolsed küljed on ülevalt vaadates täiesti siledad, kuid võrreldes varasemate mudelitega on märgata lainelisust, mis esinevad vertikaalsete piki seina jooksvate kühmudena. Samas on varjulistel külgedel situatsioon võrreldes 70° mudeliga oluliselt paranenud ja seinad on kõikidest mudelitest kõige sirgemad. Akende ümber esinenud deformatsioonid on põhimõtteliselt kadunud. Huvitaval kombel ei kajastu need muutused võrkmodeli usaldusväärsuses, kus võrkmodeli usaldusväärsus on kõige lähemal 50° mudeli omale. Samuti on märgata umbes 5% võrkmodeli usaldusväärsuse langust hästi valgustatud puitfassaadide ülemistes äärtes, kus see muidu oli 100%.



Joonis 3.5 C hoone varjus sein ülevalt vaates. Vasakult paremale 50°, 60°, 70° ja 80° mudelid.  
Autori foto

Valge maja on võrreldes varasemate mudelitega põhimõtteliselt sama - oluliselt deformeerunud. 60° mudelis tekkinud auk seinas on veelgi suurenenud. Päikesepoolse külje vead on veelgi süvenenud, nurka on tekkinud veel üks auk ja mudel ei vasta isegi eemalt vaadatuna enam reaalsusele, kuna aknad on sulanud kokku katuse äärega. See kõik kajastub ka *mesh confidence's*, kus umbes 75% majast on punane, ehk 1% või väiksema usaldusväärsusega.

### **Horisontaalsed pinnad**

Võrreldes 70° mudeliga on kvaliteet langenud ja pinnad on muutnud künklikumaks. Horisontaalsete pindade kvaliteet on identne 60° mudeliga.

Küll aga on esimest korda selle mudeli puhul näha, et *mesh confidence* ei ole kõikidel horisontaalsetel pindadel enam 100%. See esineb ainult mustadel pindadel ja seinte ääres, kus tumesinine, ehk 100% usaldusväärsus on segatud õrna helesinisega.

### **Struktuursed eripärad**

Katuse- ja räästaalused on veelgi rohkem deformeerunud. C hoone klaasfassaad ei ole enam mudelilt eristatav, katuse äär on maapinnani välja venitatud ja tekstuur ei ole enam klaasi, vaid maapinna oma.



Joonis 3.7 C hoone deformeerunud klaasfassaad.

Hoone varjulisel küljel asuv trepp on ilusti mudelil olemas ja kõik astmed on eristatavad. Sarnaselt varasematele mudelitele on puudu ülemine metallvõrgust osa trepi tipus.

### **Haljasala**

Haljasala on identne 70° mudeliga. Ainukeseks erinevuseks võrreldes varasemate mudelitega on tänavakividest kõnnitee, mis ei ole enam sile. Kõnniteele on tekkinud

konarlikkus, mida reaalses elus seal ei ole. Konarused langevad kokku puu varjudega. Üllataval kombel ei kajastu see aga võrkumodeli usaldusväarsuses, kuna kõik haljasala pinnad on 100% usaldusväarsusega.

### 3.5 90° kaldenurga mudel

#### Vertikaalsed pinnad

Vertikaalsete pindade kvaliteet langes võrreldes varasemate mudelitega. C hoone päikesepoolsele puitfassaadile on tekkinud lainetused. Kirjeldatud lainetused ei ole siiski mudeli kvaliteeti oluliselt muutnud. Erinevus teiste mudelitega on eemalt vaadates vaevumärgatav. Varjulisel küljel on aga selged deformatsioonid, kuna terve sein on kumer maja sisemuse poole. Märgata on ka olulist langust tekstuuri kvaliteedis. Samuti on märgata olulist langust võrkumodeli usaldusväarsuses, sest ka päikeselistele külgedele on tekkinud selgelt eristatavad ebakindlad alad. Varasemalt kirjeldatud alade usaldusväarsus on samuti langenud.

C hoone valge osa on oluliselt deformeerunud. Võrreldes teiste mudelitega on seis tunduvalt hullem, sest varjulise külje maja sein on umbes 2m maa alla vajunud ja on praktiliselt äratundmatu. Samuti on päikesepoolne külg poolenisti valge, kuna aerofotodele on ette jäänud katuse äär. See kajastub ka *mesh confidence* vaadates, kuna praktiliselt maja kõik küljed on 0-5% usaldusväarsusega. Programm oli 100% kindel ainult päiksepoolse seina alumise 1-2m osas.



Joonis 3.8 C hoone valge maja 90° mudelil. Autori foto

### **Horisontaalsed pinnad**

Horisontaalsed pinnad on 90° mudelis üpriski siledad. Konarused ilmuvad alles siis, kui pindasid väga lähedalt uurida. Üldine mulje on hea. Võrkumodeli usaldusväärsus on identne 80° mudelile.

### **Struktuursed eripärad**

Struktuurid esinevad 90° mudelil täpselt samamoodi nagu 80° mudelil. Ainus erinevus, mille saab välja tuua on see, et katuse ääred on antud mudelis veelgi halvemad kui varasemates mudelites.

### **Haljasala**

Sarnaselt struktuursetele eripäradele, pole 90° mudeliga muutunud märgatavalt midagi ka haljasala osas. 90° mudel on võrdväärne 80° mudeliga.

## **3.6 Arutelu**

Kaldenurga mõjud genereeritavale mudelile olid oodatust väiksemad. Üldiselt selgus, et äärmuslikud kaldenurga väärtused ei ole sobivad universaalse mudeli genereerimiseks. Ideaalis tuleks valida vastavalt tingimustele mitu kaldenurka, teha mitu lendu ja siis genereerida neist ühine mudel. Nii saab ära kasutada erinevate kaldenurkade eeliseid.

Kaldenurga mõju vertikaalsetele pindadele avaldus peamiselt selles, kui siledad vertikaalsed pinnad olid. Oluline on märkida, et hästi valgustatud pindadel ei olnudki suuri erinevusi erinevate kaldenurkade mudelite vahel ja tegelikult sobiksid nad kõik heades valgustingimustes vertikaalsete pindade modelleerimiseks. Küll aga avaldas kaldenurk mõju pindadele, mis asusid varjus. Ilmselt tuleneb see sellest, et varjus on hämaram ja tänu sellele on drooni kaameral ka raskem detaile eristada. Mida väiksem oli kaamera kaldenurk, seda rohkem deformatsioone esines varjulistel pindadel, eriti just akende ümber. Üldiselt tähendas suurem kaldenurk ka siledamaid pindasid varjulistes kohtades. Kõige paremad tulemused vertikaalsetel pindadel tagas 80° mudel.

Horisontaalsetele pindadele kaldenurk tegelikult suurt mõju ei avaldanudki. Kõigi mudelite horisontaalsed pinnad näevad identsed välja, kui neid 3D programmis vaadata umbes 5m kauguselt. Peamised erinevused mudelite vahel tulidki välja alles siis, kui programmis kaamera vastu pinda panna. Kõige siledamad horisontaalsed pinnad olid 80° mudelil, ülejäänud mudelitel kvaliteet langes vastavalt sellele, kui palju suurem või väiksem oli kaldenurk 80 kraadist. Mida madalam oli kvaliteet, seda künklikum oli pind.

Kõige rohkem avaldas kaldenurk mõju struktuursetele eripäradele. Ideaalne näide on C hoone klaasfassaadi kohal asuv katus, mille kvaliteet mudelil sõltus otseselt sellest, kui suur oli kaldenurk. Kõige väiksema kaldenurgaga oli tulemus kõige parem, kõige suuremaga kõige halvem. C hoone küljel analüüsitud trepp oli aga suuremate kaldenurkadega puhul selgem ja paremini nähtav, ilmselt tulenevalt sellest, et madalate kaldenurkadega trepi kohalt pilti ei tehtud, vaid pildid tehti veidi eemalt diagonaalis. Sellest tulenevalt oli trepp madalatel kaldenurkadel poolik ja programm lugesi ta seinaks. Üldiselt tuleks struktuuri eripärasid arvestada igal struktuuril eraldi ja valida vastavalt sellele ka kaldenurk või siis teha mitu lendu erinevate kaldenurkadega, et aerofotodelt ära hoida nii-öelda pimedaid kohti, millest programmil pilti pole ja mille ta automaatselt ära täidab.

Kõige suuremaks üllatuseks osutus mõju haljasaladele, täpsemalt küll otsese mõju puudumine. Kõigi kaldenurkadega sai haljasala piisavalt adekvaatselt modelleeritud nii, et ühtegi olulist detaili puudu ei jäänud. Eriti üllatav oli just autode parkla, kus kõikide kaldenurkadega õnnestus jäädvustada augud parkla pinnases. Ainuke probleem, mis kahe kõige suurema kaldenurgaga esines oli kruusa kõnnitee kausja kuju puudumine. Samuti esines genereeritud mudelis konarusi kõnniteedel seal, kuhu langesid puu varjud. Need erinevused ei olnud võrreldes teiste mudelitega aga suured.

Huvitav tähelepanek oli 80° mudeli juures see, et kuigi mudeli seinad olid visuaalselt kõige sirgemad, ei olnud programm nende osas nii kindel kui näiteks 60° mudelil, kuigi 60° mudeli seinad ei olnud visuaalselt nii sirged. Tulevikus võiks seda lähemalt uurida ja võrrelda võrkumudeli usaldusväärsust ja reaalselt kvaliteeti omavahel, et selgitada välja millest sellised erinevused on tekkinud.



## KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärk oli selgitada välja kaamera kaldenurga mõju fotogramm-meetrilise mudeli kvaliteedile linnakeskkonnas. Lisaks anti soovitusi kaldenurga kasutamise osas. Eesmärgi täitmiseks võeti analüüsi alla Tartu TalTech kolledži linnak. Linnaku mõõdistamiseks kasutati DJI Mavic 2 Pro drooni. Selleks, et avalduks kaameranurga mõju mudelile, tehti drooniga 5 erinevat mõõdistust sama lennuplaani alusel, ainsaks erinevuseks lennuplaanide vahel oli kaamera kaldenurk horisondi suhtes. Nendeks nurkadeks olid 50°, 60°, 70°, 80° ja 90°. Drooni piltidest fotogramm-meetrilise mudeli tegemiseks kasutati tarkvara Agisoft Metashape Professional. Saadud tulemuste analüüsimiseks kasutati programmi Agisoft Viewer.

Erinevate mudelite analüüsimise tulemusena selgus, et kaldenurk avaldab mõju peamiselt sellistes kohtades, kus pildidel võib jääda detailidest puudu, nagu näiteks varjulised kohad või kohad, mis ei jää piisavalt hästi kaamera piltide peale. Varjulistes kohtades oli parim kvaliteet 80° kaldenurga mudelil, kõige halvem kvaliteet 45° mudelil. Kohtades kus kaamera pilditel detailidest puudu ei jäänu, nagu näiteks hästi valgustatud pinnad, olulisi erinevusi mudelite vahel ei esinenud. Kaldenurk avaldas aga suurt mõju struktuursetele eripäradele, nagu näiteks katusealused osad, kus madalam kaldenurk tagas ka oluliselt parema kvaliteedi. Haljasala ja horisontaalsete pindade kvaliteet erinevate mudelite vahel oluliselt ei erinenud. Üldiselt selgus, et äärmuslikud kaameranurgad ei ole sobilikud universaalse mudeli genereerimiseks. Parima mudeli saamiseks tuleks valida vastavalt tingimustele hoopis mitu kaldenurka, teha mitu lendu ja siis genereerida neist ühine mudel.

Järgmiste tööde juures on soovitatav uurida ka teiste kaamera parameetrite mõju fotogramm-meetria mudeli kvaliteedile. Peamiselt võiks uurida piltide ülekatte mõju mudeli kvaliteedile, kuna autori arvates oleks erinevate ülekatte väärtustega võimalik mudeli keerulised kohad paremini üles pildistada. Sellest tulenevalt oleks programmil ka rohkem andmeid mille põhjal keerulisi kohti modelleerida. Lisaks võiks suurendada piirkondade arvu, mille põhjal mudeleid genereeritakse, et paremini analüüsida kaamera parameetrite mõju erinevates situatsioonides.

## SUMMARY

The purpose of this thesis was to find out the effect of oblique photography on the quality of the photogrammetric model. In addition, recommendations were made regarding the use of the angle of inclination. In order to achieve this goal, the campus of TalTech College in Tartu was analysed. A DJI Mavic 2 Pro drone was used to survey the campus. In order to find out the effect of the camera angle on the model, 5 different measurements were taken with the drone on the basis of the same flight plan, the only difference between the flight plans was the angle of inclination of the camera from horizon. These angles were 50°, 60°, 70°, 80° and 90°. Agisoft Metashape Professional was used to make the photogrammetric models from the drone's images. Agisoft Viewer was used to analyse the results.

Analysis of different models revealed that the angle of inclination has an effect mainly in places where the camera images may lack details, such as shady places or places that can not be seen well enough on the camera's images. In shady places, the best quality was on the 80° model, the worst quality was on the 45° model. In places where the camera images did not lack detail, such as well-lit surfaces, there were no significant differences between the models. However, the angle of inclination had a great effect on structural peculiarities, such as the areas under the roof, where the lower angle of inclination also ensured significantly better quality. The quality of green space and horizontal surfaces did not differ significantly between different models. In general, it turned out that extreme camera angles are not suitable for generating a universal model. To get the best model, you should choose several angles of inclination according to the conditions, make several flights, and then generate a common model from them.

In the following works, it is also recommended to study the effect of other camera parameters on the quality of the photogrammetry model. The effect of overlap of the images on the quality of the model should be studied, as the author believes that it would be possible to better photograph locations of the model where camera pictures lacked detail with different overlay values. Consequently, the photogrammetric program would also have more data on which to model these locations. In addition, the number of regions from which the models are generated from could be increased in order to better analyse the impact of camera parameters in different situations.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „Basics of Photogrammetry“, *GIS Resources*, 1. september 2013. [https://www.gisresources.com/basic-of-photogrammetry\\_2/](https://www.gisresources.com/basic-of-photogrammetry_2/) (vaadatud 11. aprill 2022).
- [2] „Introduction to Photogrammetry“. <https://hobbydocbox.com/Photography/93007232-Introduction-to-photogrammetry.html> (vaadatud 11. aprill 2022).
- [3] J. Resev, „UAV fotogramm-meetria kasutamine hoone välisgeomeetria ja deformatsioonide mõõdistamisel Tallinna Lennusadama näitel“, [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2019. [Online]. Loetud aadressil <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/631b76ab-ed6f-4628-b70b-6cf20f828da5>
- [4] S. I. Granshaw, „Laussedat bicentenary: origins of photogrammetry“, *Photogram Rec*, kd 34, nr 166, lk 128–147, juuni 2019, doi: 10.1111/phor.12277.
- [5] „History of Photogrammetry: Four Phases of Photogrammetry (Early History, World War I, Development, Commercial Aerial Photography) - One-Stop GIS (GATE-Geoinformatics 2022)“. <https://www.onestopgis.com/Aerial-Photography/Elements-of-Photographic-Systems/History-of-Aerial-Photography/2-History-of-Photogrammetry.html> (vaadatud 13. aprill 2022).
- [6] Albertz, Jrg & Wiedemann, Albert. (1998). From Analogue To Digital Close-Range Photogrammetry.
- [7] M. J. Westoby, J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey, ja J. M. Reynolds, „‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications“, *Geomorphology*, kd 179, lk 300–314, detsember 2012, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- [8] K. Dalamagkidis, K. P. Valavanis, ja L. A. Piegl, *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. doi: 10.1007/978-94-007-2479-2.
- [9] „A Not-So-Short History of Unmanned Aerial Vehicles (UAV)“, *Consortiq*, 10. juuni 2020. <https://consortiq.com/uas-resources/short-history-unmanned-aerial-vehicles-uavs> (vaadatud 17. aprill 2022).
- [10] „Inseneeria\_11\_2013.pdf“. Vaadatud: 29. aprill 2022. [Online]. Available at: [https://www.vmb.ee/wordpress/wp-content/uploads/Inseneeria\\_11\\_2013.pdf](https://www.vmb.ee/wordpress/wp-content/uploads/Inseneeria_11_2013.pdf)
- [11] DrDrone.ca, „Timeline of DJI Drones: From the Phantom 1 to the Mavic Air“, *DrDrone.ca*. <https://www.drdrone.ca/blogs/drone-news-drone-help-blog/timeline-of-dji-drones> (vaadatud 17. aprill 2022).

- [12] R. Mac, „Bow To Your Billionaire Drone Overlord: Frank Wang’s Quest To Put DJI Robots Into The Sky“, *Forbes*.  
<https://www.forbes.com/sites/ryanmac/2015/05/06/dji-drones-frank-wang-china-billionaire/> (vaadatud 16. mai 2022).
- [13] „Drone Types: Multi-Rotor, Fixed-Wing, Single Rotor, Hybrid VTOL“, 8. november 2016. <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/> (vaadatud 17. aprill 2022).
- [14] I. Aicardi, F. Chiabrando, N. Grasso, A. M. Lingua, F. Noardo, ja A. Spanò, „UAV PHOTOGRAMMETRY WITH OBLIQUE IMAGES: FIRST ANALYSIS ON DATA ACQUISITION AND PROCESSING“, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, kd XLI-B1, lk 835–842, juuni 2016, doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B1-835-2016.
- [15] F. Carvajal-Ramírez, F. Agüera-Vega, ja P. Martínez-Carricondo, „Editorial for Special Issue “UAV Photogrammetry and Remote Sensing”“, *Remote Sensing*, kd 13, nr 12, lk 2327, juuni 2021, doi: 10.3390/rs13122327.
- [16] G. Navratil, R. Bulbul, ja A. U. Frank, „Maintainable city models for sustainable development“, *IJSSOC*, kd 5, nr 2, lk 97, 2013, doi: 10.1504/IJSSOC.2013.052910.
- [17] Maa-amet, „3D andmed“. [https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geo3D/index.php?lang\\_id=1&page\\_id=822](https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geo3D/index.php?lang_id=1&page_id=822) (vaadatud 18. mai 2022).
- [18] „Maa-amet 3D“. <https://3d.maaamet.ee/kaart/> (vaadatud 18. mai 2022).
- [19] „DJI Mavic 2 Pro | DJI Maaletooja Eestis“, *Droon.ee*.  
<https://droon.ee/toode/dji-mavic-2-pro/> (vaadatud 17. aprill 2022).
- [20] H. Neivelt, „Optimaalse aerofotogramm-meetria meetodika väljatöötamine linnakeskkonda“, [Rakenduskõrgharidustöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tartu, Eesti, 2021. [Online]. Loetud aadressil <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/f0e6abc6-619c-4d96-a648-8cd80c6c1e8f>