



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INSENERITEADUSKOND

UAV FOTOGRAHM-MEETRIA KASUTAMINE HOONE
VÄLISGEOMETRIA JA DEFORMATSIOONIDE MÕÕDISTAMISEL
TALLINNA LENNUSADAMA NÄITEL
UAV PHOTOGRAMMETRY FOR SURVEYING EXTERIOR GEOMETRY AND
DEFORMATIONS OF BUILDINGS WITH APPLICATION TO TALLINN SEAPLANE
HARBOUR

Üliõpilane: Jürgen Resev

Üliõpilaskood: 176941EAXM

Juhendajad: Prof. Artu Ellmann

Kalev Julge, PhD

Tallinn 2019

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

„.....“2019

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

„.....“2019

Juhendaja:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

„.....“2019

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

„.....“2019

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane:	Jürgen Resev, 176941EAXM	(nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala:	Ehitusgeodeesia, EAXM	(kood ja nimetus)
Juhendaja:	Prof. Artu Ellmann, 620 2603	(amet, nimi, telefon)
Juhendaja:	Lektor Kalev Julge, 620 2602	(amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

UAV fotogramm-meetria kasutamine hoone välisgeomeetria mõõdistamisel ja deformatsioonide tuvastamisel Tallinna Lennusadama näitel

UAV photogrammetry for surveying exterior geometry and deformations of buildings with application to Tallinn Seaplane Harbour

Lõputöö põhieesmärgid:

1. UAV fotogramm-meetria täpsuse hindamine hoonete välisgeomeetria mõõdistamisel
2. Deformatsioonide tuvastamine UAV fotogramm-meetria meetodil
3. Aerolaserskaneeringu kaardistuslendude andmete kasutamine hoone katuse mõõdistamisel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr.	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lähteandmete kogumine ja esmane andmetöötlus	01.03.2019
2.	Analüüs ja esmaste tulemuste kirjeldamine	01.04.2019
3.	Töö tervikmustandi esitamine	01.05.2019

Töö keel: eesti keel Lõputöö esitamise tähtaeg: „.....“2019

Üliõpilane: Jürgen Resev „.....“2019

/ allkiri /

Juhendaja: Artu Ellmann „.....“2019

/allkiri /

Juhendaja: Kalev Julge „.....“2019

/allkiri /

SISUKORD

Jooniste loetelu	7
Tabelite loetelu	11
SISSEJUHATUS	12
1. AEROFOTOGRAMM-MEETRILINE MÕÕDISTAMINE	14
1.1 Aerofotogramm-meetrilise mõõdistamise põhimõtted	14
1.2 Aeropildistamise lennuparameetrid	15
1.3 Aerofotogramm-meetria mõõdistust mõjutavad tegurid.....	18
1.3.1 Kaamera omaduste mõjud aerofoto kvaliteedile	18
1.3.2 Läätsede moonutus	19
1.3.3 Ilmastikumõjud.....	20
1.3.4 Atmosfääri refraktsioon	20
1.3.5 Metoodilised vead.....	21
1.4 UAV mõõdistamine ja selle rakendused	21
1.4.1 UAV klassifikatsioon	22
1.4.2 UAV tähised	23
1.4.3 Mahtude määramine	24
1.4.4 Topograafiliste plaanide koostamine	24
1.4.5 Hoonete modelleerimine	25
1.4.6 Deformatsioonide uuringud	27
2. AERO- JA TERRESTRILINE LASERSKANEERIMINE	29
2.1 Laserskaneerimise tööpõhimõte	29
2.2 Aerolaserskaneerimine ja selle rakendused	30
2.2.1 ALS mõõdistuse omadused	32
2.2.2 Maa-ameti aeromõõdistused.....	33
2.3 Terrestiline laserskaneerimine	34

3. UAV JA AEROLASERSKANEERIMISE MÕÕDISTUSE KOMBINEERIMINE TERRESTRILISE LASERSKANEERIMISEGA	36
3.1 Probleemi kirjeldus.....	36
3.2 Varasemad uurimistööd	37
4. ÜLEVAADE MAGISTRITÖÖS KASUTATUD MÕÕTSEADMETEST	40
4.1 Laserskanner Leica C10	40
4.2 UAV DJI Phantom 4 pro	41
4.3 Elektrontahhümeeter Trimble S6 ja GNSS seade Trimble R8	43
4.4 Kasutatud tähised.....	43
5. VÄLITÖÖ KIRJELDUS	45
5.1 Tallinna Lennusadam.....	45
5.2 Mõõdistuste alusvõrk.....	47
5.3 Laserskaneerimine	48
5.4 UAV mõõdistamine	49
6. LÄHTEANDMETE TÖÖTLEMINE	51
6.1 Aerofotode töötlemine punktipilveks	51
6.1.1 PiX4DMapper	52
6.1.2 UAV punktipilvede esialgne hindamine	53
6.2 Terrestrilise laserskaneerimise punktipilvede registreerimine	55
7. TULEMUSTE EVALVEERIMINE.....	57
7.1 Punktipilve kvaliteedinäitajad	57
7.1.1 Punktipilve hindamine visuaalselt.....	59
7.1.2 Punktipilve paksuste võrdlemine hoone fassaadi pinnal	60
7.1.3 Punktipilves detailide gabariitide võrdlemine.....	63
7.2 Hälbemudelite koostamine	64
7.2.1 RT, lennukõrgus 50 m.....	66
7.2.2 RT, lennukõrgus 50 m ja Ümbritsev, lennukõrgus 30 m	67
7.2.3 RT, lennukõrgus 40 m ja ümbritsev, lennukõrgus 30 m.....	68

7.2.4	Hälbemudelite analüüs	69
7.3	ALS madalkaardistuslendude andmete kasutamine hoone katuse modelleerimisel	69
7.4	Katusekatte deformatsioonide tuvastamine fotogramm-meetrilisel meetodil.....	76
7.5	Järeldused	80
7.5.1	UAV mõõdistuse teoreetiline täpsus.....	80
7.5.2	UAV mõõdistuse täpsuse hindamine	81
7.5.3	ALS andmete sobilikkus mõõdistusmudelisse.....	83
7.5.4	Soovitused katusekatte deformatsioonide tuvastamiseks fotogramm-meetrilisel meetodil.....	84
KOKKUVÕTE		85
SUMMARY		88
KASUTATUD KIRJANDUS.....		91
Lisa 1 UAV fotode põhjal koostatud punktipilvede kõrguslik kontrollimine tähistel kohal		96
Lisa 1 Jätk.....		97
Lisa 2 Hoone detailide gabariitide mõõtmistulemused punktipilves.....		98
Lisa 3 ALS ja TLS andmetes plaanilise nihke arvutamine		99

Jooniste loetelu

Joonis 1.1 Ühiste punktide kujutamine kahel fotol.....	14
Joonis 1.2 Aeromöödistamise piki- ja põikikattumine	15
Joonis 1.3 UAV möödistamise erinevad lennutrajektorid	16
Joonis 1.4 Kaamera vaatenurk maapinna suhtes lennujuhtimistarkvaras Pix4DCapture. Nivoopind on loodjoonega risti olev tasapind	17
Joonis 1.5 Läätse moonutused. Vasakul (A) tehtud pilt drooniga Phantom 4 Pro ja paremal (B) foto tehtud varasema põlvkonna drooniga Phantom 2. Pildil B on näha tugevaid moonutusi, mis tulenevad „kalasilma“ omadusega läätsest	19
Joonis 1.6 – Rotor-tüüpi UAV (vasakul) ja fikseeritud tiivaga UAV (paremal) [11] [12]. Vasakul on kujutatud droon DJI Phantom 4 RTK ja paremal Trimble UX5 Multispectral.....	22
Joonis 1.7 UAV möödistusel kasutatavad tähised. Lamineeritud paberleht (a) ja aerosoolvärviga (b) tehtud tähis	23
Joonis 1.8 Punktipilve pealt – ja kaldvaade (vastavalt A ja B). Pildil kujutatud objekt on Metsanurga tee, Roobuka küla, Harjumaa. Objekti kohta koostati topograafiline alusplaan Geodeesia24 OÜ poolt 2019. aasta aprillis.	25
Joonis 1.9 Hoone möödistamise põhimõtted UAV-ga. Elliptiline joon kujutab UAV lennutrajektoori, punased punktid tähistavad pildistamise asukohta ning H1 ja H2 sümboliseerivad lendude eri kõrgusi [13].....	26
Joonis 1.10 Aerofoto Halberstadt katedraali tornist ja sissesuunitud väljavõte katusel esinevast kahjustusest [15]	27
Joonis 1.11 Tugimüürile asetatud tehislik deformatsioon (vasakul) papitüki kujul ning kahe möödistuse erinevused (paremal), kus sinise värviga on kujutatud lisatud materjal ja punasega eemaldatud [16].....	28
Joonis 2.1 Aerolaserskaneerimisel kasutatavad mõõteseadmed [20]. Joonisel on kasutatud terminit GPS (<i>Global Positioning System</i>), mis kuulub termini GNSS alla	31
Joonis 2.2 Lennuki orientatsiooni parameetrid. [5] <i>Yaw</i> - Pöördenurk, <i>Pitch</i> – pikikalle, <i>Roll</i> - põikikalle	31
Joonis 2.3 – Andmekaare laius (<i>Swath width</i>) ja lasertäpi diameeter maapinnal (<i>footprint</i>) [20] ..	32
Joonis 4.1 Leica C10 laserskanner. Taustal Tallinna Lennusadam, fotol on nähtaval ka hoone nurgatorn, mille horisontaalsele katusele sai asetada laserskanneri	41
Joonis 4.2 Möödistustel kasutatud DJI Phantom 4 pro.....	41

Joonis 4.3 DJI Phantom 4 pro juhtpult koos lennuplaneerimise tarkvara sisalduva mobiiltelefoniga Huawei P10 Lite.....	42
Joonis 4.4 Magistritöös kasutatud tähised. A pildil on kujutatud laserskaneerimise tähis tsentreerituna teravikuga asfaltinaela peale. Pildil B on kujutatud <i>twin targetit</i> , mida hoiab loodis toed. UAV mõõdistamiseks kasutatud tähis, mõõtmetega 1 * 1 m, on välja toodud pildil C.....	43
Joonis 5.1 Vaade Tallinna Lennusadamale loode suunast. Foto tehtud UAV DJI Phantom 4 pro-ga välitööde käigus	46
Joonis 5.2 Alusvõrgu punktide asetus Tallinna Lennusadama suhtes. Tähistega A1...A8 on märgitud alusvõrgu punktid.....	48
Joonis 5.3 Laserskaneerimisel kasutatud TLS jaamade asukohad. Märka, et jaamad 7...10 on nurgatornide katustel.....	49
Joonis 6.1 Maapealsete tähiste manuaalne markeerimine fotogramm-meetria tarkvaras Pix4D. Vasakpoolsel pildil on kujutatud taustana ühised punktid (<i>tie points</i>), ülaosas on välja toodud UAV fotode asukohad ning roheliste kiirtena on kujutatud maapealse kontrollpunkti ja aerofotol asuva kontrollpunkti vahelised vektorid. Paremäl on kujutatud UAV tähise tsentri määramine tarkvaras erinevatel suurendusastmetel	53
Joonis 6.2 UAV mõõdistamisel kasutatud tähis A2 UAV punktipilves (b) ja suurendatud tähise tsenter (a). Vasakpoolsel pildil on punase ringiga tähistatud tähise tsenter, mustade ringidega on tähistatud välja toodud kõrguste asukohad. Punktide omavahelisest kaugusest annab aimu joonmõõtkava	54
Joonis 6.3 Tallinna Lennusadamast koostatud UAV punktipilv.....	55
Joonis 6.4 Registreeritud punktipilv. Eri värvidega on tähistatud eri TLS jaamadest skaneeritud punktipilve osad	56
Joonis 7.1 Nelja erineva punktipilve visuaalne hindamine hoone akende näitel. a) on laserskanneriga Leica C10 mõõdistatud punktipilv ning pildid b), c) ja d) on UAV mõõdistuse punktipilved. Helepunaste ristkülikutena on pildidel b), c) ja d) tähistatud laserskanneriga saadud akna asukoht	59
Joonis 7.2 Nelja erineva punktipilve visuaalne hindamine hoone fassaadi elementide näitel. a) on laserskanneriga Leica C10 mõõdistatud punktipilv ning pildid b), c) ja d) on UAV mõõdistuse punktipilved.....	60
Joonis 7.3 Punktipilve paksuse mõõtmine fassaadi pinnal. Punaste ringide sees tähistatud tähed A...C on teljed, kus mõõdeti punktipilve paksust. „Clipping box“ on mõõtpiir, mille sisse kõik punktipilved taandati, et garanteerida kõikide punktipilvede puhul samad kõrguse vahemikud paksuse mõõtmiseks	61

Joonis 7.4 Tallinna Lennusadama fassaad, mille pinnal mõõdeti punktipilve paksust. Punase noolega on tähistatud teravate servadega fassaadi element, mida uuritakse lähemalt. „Clipping box“ on lõige fassaadist	61
Joonis 7.5 Punktipilve paksuse võrdlemine fassaadi pinnal. Punktipilved on kujutatud pealtvaates. TLS punktipilves (a) on näha teravate servadega fassaadi element, mis UAV punktipilves (b) on kujutatud ümaralt. Lilla värviga on kujutatud UAV punktipilves TLS punktipilvest määratud seinasend.	62
Joonis 7.6 Hoone ristlõikes kõrguste mõõtmine. Kõikide punktipilvede puhul mõõdeti kõrgused samas kohas. Kõrguste lähtepinnaks võeti maapinna punktide pikendus hoone alla, samuti on näidatud 1. ja 2. korruse akende paiknemine (a) ja uks (b). Välja on toodud ka TLS ja UAV punktipilvede omavaheline asetsemine katuse pinnal	63
Joonis 7.7 Katuse (a) ja fassaadi (b) väljavõtted „RT, 50 m“ hälbemudelitest etalonmudeli suhtes ..	66
Joonis 7.8 Katuse (a) ja fassaadi (b) väljavõtted „RT, 50 m ja ümbritsev“ hälbemudelitest etalonmudeli suhtes	67
Joonis 7.9 Katuse (a) ja fassaadi (b) väljavõtted „RT, 40 m ja ümbritsev“ hälbemudelitest etalonmudeli suhtes	68
Joonis 7.10 ALS andmed Tallinna Lennusadama katusel. Punktipilvest on katuse osa selgelt eristuv, hoone fassaadil esinevad üksikud punktid.....	70
Joonis 7.11 Valgustorni katuse (a) tsentri ning hoone nurga (b) koordinaatide määramine ALS punktipilves. Punaste joontega tähistatud valguslaterna tsentri koordinaatide (a) leidmine ja hoone nurga koordinaatide (b) leidmine. Katuse (a) puhul tuli punktipilves katuse osa eraldada ja nurga (b) puhul eemaldati punktid, mis jäid maapinnale.....	71
Joonis 7.12 Plaaniliste nihete korrigeerimine AutoCAD keskkonnas. Hälbeid korrigeeriti nihutades ALS põhjal joonestatud hoonet arvutatud keskmiste hälvete võrra. Hälbevektor näitab ALS plaaniliste punktide kaugust ja suunda TLS joontest.	71
Joonis 7.13 Hälbemudeliga süstemaatilise kõrguse vea elimineerimine. Algne (a) hälbemudel ja süstemaatiline viga -0.026 m eemaldatud mudel (b)	73
Joonis 7.14 ALS ja TLS <i>mesh</i> mudelist tehtud hälbemudel, ühikud meetrites.....	74
Joonis 7.15 ALS ja UAV lennukombinatsiooni RT, 50 m ja ümbritsev vaheline hälbemudel. Etalonmudel on UAV mõõdistuse <i>mesh</i> mudel	75
Joonis 7.16 Tallinna Lennusadama katusekatte deformatsioonid.....	76
Joonis 7.17 Hõrendatud punktipilv, kus punktide omavaheline keskmine vahekaugus on 1 meeter	77
Joonis 7.18 Piikide eemaldamine <i>mesh</i> mudelis.....	77
Joonis 7.19 Punktipilv (a) ja <i>mesh</i> mudel (b) 3DReshaper keskkonnas	78

Joonis 7.20 Hälbemudelid 3Dreshaper keskkonnas, 3 cm alampiiriga (a) ja 4 cm alampiiriga (b) ..	79
Joonis 7.21 Punktipilve kvaliteedinäitajate KRV väärtuste histogramm	83

Tabelite loetelu

Tabel 1.1 Kaamera parameetrite suurendamise mõju pildi kvaliteedile [7]	19
Tabel 1.2. DJI Phantom 4 RTK ja Trimble UX5 Multispectral mõõdistusparameetrite võrdlemine [12] [11]	22
Tabel 4.1 DJI Phantom 4 pro GSD väärtused lennukõrgustel 10 – 50 m.....	42
Tabel 5.1 Erinevate lennurežiimide parameetrid.....	50
Tabel 6.1 UAV tähiste kõrgusliku kontrolli statistilised näitajad. Ühikud millimeetrites, kontrollpunktide arv $n = 7$ öelda, et võrluspunkte kokku oli $4 \times 7 = 28$, sealt aga jääb segaseks mean ja STD/KRV arvutamine... (need ju kõik erinevates asukohtades, kirjeldage seda	54
Tabel 6.2 Keskmised GSD väärtused erinevatel lennukombinatsioonidel.....	55
Tabel 7.1 Punkt pilve paksuse mõõtmised fassaadi pinnal, ühikud millimeetrites	62
Tabel 7.2 Punkt pilve paksuse mõõtmise statistilised näitajad, ühikud millimeetrites	63
Tabel 7.3 Punkt pilves hoone gabariitide võrdlemise tulemuste statistilised näitajad, ühikud millimeetrites	64
Tabel 7.4 Hälbemudelite statistilised näitajad erinevate lennukombinatsioonide korral. $n_{\text{katus}} = 100$, $n_{\text{fassaad}} = 100$	69
Tabel 7.5 ALS ja TLS punkt pilvedest joonestatud seina pikkuste omavaheline võrdlemine, ühikud meetrites	72
Tabel 7.6 ALS andmete kõrguslike hälvete statistilised näitajad hoone katusel peale süstemaatiliste vigade eemaldamist	74
Tabel 7.7 ALS ja UAV vaheliste erinevuste statistilised näitajad. Ühikud millimeetrites, $n = 98$	75
Tabel 7.8 DJI Phantom 4 pro teoreetiline täpsus erinevatel lennukõrgustel ja vastavus COBIM 2012 juhendis esitatud nõudele, ühikud mm	81

SISSEJUHATUS

UAV ehk mehitamata õhusõiduki kasutamine geodeetilistel töödel on kasvava levikuga nii Eestis kui ka välismaal. Kasvava populaarsuse taga on asjaolu, et UAV kasutamine võimaldab ruumiandmeid hõivata kiirelt ja efektiivselt. Teiseks suureks UAV eeliseks on võimekus koguda andmeid kohtadest, kus teiste mõõteseadmetega on ruumiandmete kogumine raskendatud. Üheks näiteks on hoonete katused – need jäävad maapealsetele mõõteseadmetele tihti kättesaamatuks, kuid UAV-d on võimelised katusepindu mõõdistama suurema vaevata.

Mehitamata õhusõiduk, tihtipeale kasutatakse ka terminit droon, on enda võimekust tõestanud mitmetes uurimistöodes üle maailma. Droonide põhiliseks kasutusvaldkonnaks on olnud seni peamiselt maapinnamudelite mõõdistamine, kaardistamine ja tehnovõrkude monitooring [1] [2] [3]. Hoonete 3D mudelite koostamisel on eelistatult kasutatud terrestrilist laserskannerit, kuid järjest enam on hakatud kasutama selleks ka droone.

3D mudel on loodusliku või ehitusliku objekti geomeetria matemaatiline ja virtuaalne representatsioon. Mudelit iseloomustavad tõetruud mõõtmed kolmes dimensioonis – pikkus, laius ja kõrgus. See tähendab, et kui objekti kõrgus tegelikkuses on 10 meetrit, siis selle kõrgusele 3D mudelis vastab samuti 10 meetrit. Matemaatilised mudelid võimaldavad olemasolevat situatsiooni dokumenteerida ja erinevatel eesmärkidel kasutada. 3D mudelid leiavad kasutust nii hoonete projekteerimisel kui ka valmis ehitatud hoonete geomeetria täpsustamisel.

Käesoleva magistr töö põhieesmärgiks on hinnata UAV mõõdistuse täpsust ja sobilikkust hoonete 3D mudeli koostamiseks. Magistr töös uuritakse ka katseobjekti katusekatte deformatsioonide tuvastamist UAV mõõdistuse põhjal. Lisaks sellele uuritakse Maa-ameti 2018. aasta aerolaserskaneeringu punktide kasutatavust püstitatud eesmärkide täitmisel.

Magistr töö katseobjektiks on valitud Tallinna Lennusadam, mille raudbetoonkoorikust katus koosneb kolmest kuplist. Kuplite keerukas geomeetria valmistab probleeme nii UAV mõõdistamisel kui ka maapealsel laserskaneerimisel. Lennusadama uuenduskuuri järgselt on põhjust uuesti mõõdistamiseks, kuna katusekattel esinevad deformatsioonid.

Katseobjekti mõõdistamiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikoolile kuuluvat terrestrilist laserskannerit Leica C10, GNSS seadet Trimble R8 ja elektrontahhümeetrit Trimble S6. Mehitamata õhusõiduk DJI Phantom 4 pro pärines ettevõttest Geodeesia24 OÜ. Töös kasutatakse ka Maa-ameti 2018. aasta aerolaserskaneerimise tulemusi.

Magistritöö koosneb seitsmest peatükist. Esimeses peatükis antakse ülevaade aerofotogramm-meetrisest mõõdistamisest, võimalikest vigadest ning UAV lennuplaneerimisest. Teise peatüki teema on aero- ja terestriiline laserskaneerimine. Käsitletakse nende tööõhimõtteid ning potentsiaalseid rakendusi. Kolmas peatükk keskendub UAV ja aerolaserskaneerimise mõõdistuse andmete kasutamisele koos terestriilise laserskaneerimise tulemustega. Kirjeldatakse andmete omavahelise ühildamise probleemi ja antakse ülevaade varasematest uurimistöödest. Neljandas peatükis antakse ülevaade uurimistöös kasutatud instrumentidest ning nende põhilistest täpsusnäitajatest. Viies peatükk kirjeldab uurimistöö raames läbi viidud välimõõdistamisi Tallinna Lennusadamas. Kuues peatükk keskendub välitöö käigus hõivatud ruumiandmete töötlemisele. Seitsmendas peatükis antakse ülevaade uurimistöö käigus saadud tulemustest ning kirjeldatakse, kuidas antud tulemusteni jõuti ja mis meetodeid nende saavutamiseks rakendati. Magistritöö lõpus on toodud autoripoolsed järeldused ning kokkuvõte.

Töö autor soovib avaldada tänu firmale Geodeesia24 OÜ ja selle juhtkonnale. Geodeesia24 OÜ tagas uurimistöö läbiviimiseks vajaliku drooni ning riistvara suurt arvutusjõudlust nõudvale andmetöötlemisele. Lisaks ettevõttele avaldatakse tänu juhendajatele Artu Ellmann ja Kalev Julge ning töö autori kursusekaaslastele Sander Varblale ja Kevin Reimannile, kes olid töö autorile välitöö ajal abiks.

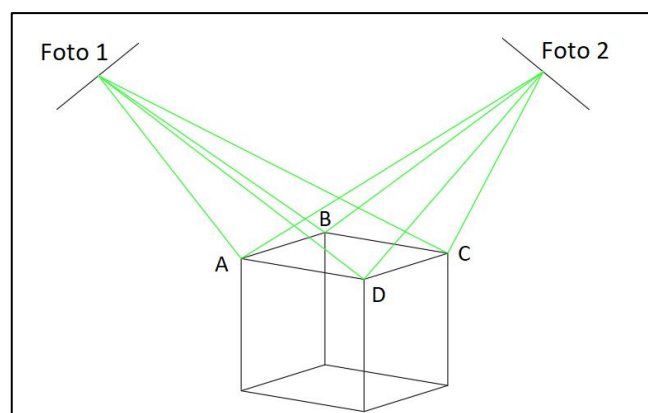
1. AEROFOTOGRAMM-MEETRILINE MÕÕDISTAMINE

Käesolevas peatükis antakse erinevate kirjandusallikate põhjal ülevaade aerofotogramm-meetrisest mõõdistamisest. Järgnevates jaotistes käsitletakse aerofotogramm-meetriselise mõõdistuse põhimõtteid, antakse ülevaade UAV mõõdistusel kasutatavatest lennuparameetritest ning mõõdistust mõjutavatest teguritest. Lisaks sellele käsitletakse UAV mõõdistuse rakendusi, kus on lisaks kirjandusallikatest pärinevatele näidetele ka toetunud magistritöö autori varasemale UAV mõõdistuse kogemusele.

1.1 Aerofotogramm-meetriselise mõõdistamise põhimõtted

Fotogramm-meetria on teadus, mis tegeleb objekti kuju, mõõtmete ja asendi määramisega fotode järgi [2]. Fotogramm-meetrial on mitmeid väljundeid, kuid põhiline neist on punktipilv. Punktipilv on üksikutest punktidest koosnev andmekogum, kus igale punktile on määratud X-, Y- ja Z-koordinaadid. Sõltuvalt objekti ulatusest võib punktipilv koosneda kuni miljonitest punktidest.

Ühe punkti koordinaatide määramiseks on vaja, et see üks punkt oleks kujutatud vähemalt kahel fotol (vt Joonis 1.1). Mõlemal fotol paiknevale punktile saab koordinaadi määrata aetroiangulatsiooni põhimõttel. Teades fotode või maapinnal asuvate kontrollpunktide koordinaate ja pildistamise suunda on võimalik määrata ühe punkti koordinaate teatud koordinaatsüsteemis. Altkoordinaate mitte teades saavutatakse ühe punkti koordinaadid suvalises koordinaatsüsteemis ja mõõtkavas. [4]



Joonis 1.1 Ühiste punktide kujutamine kahel fotol

Fotogramm-meetria jaguneb pildistamise meetodi järgi kolmeks põhiliseks suunaks [4]:

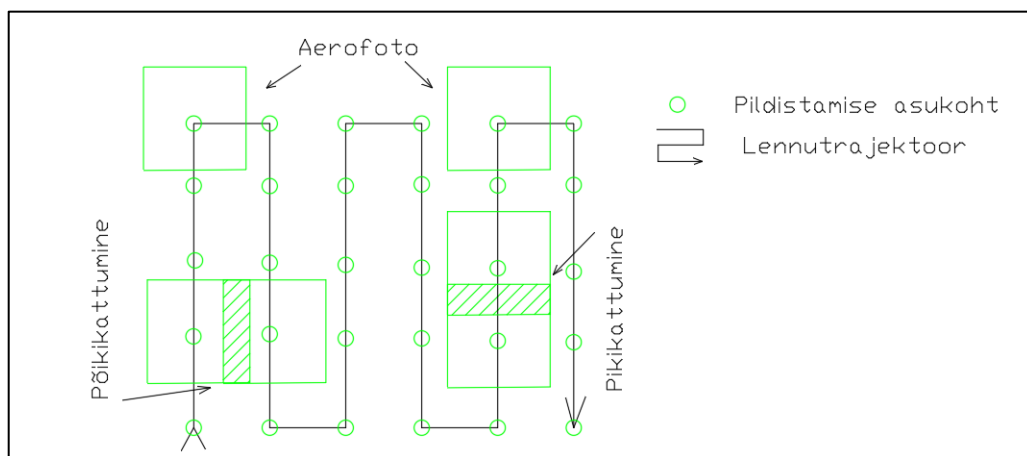
- 1) aerofotogramm-meetria – fotod tehakse lennuki või mehitamata lennuki (UAV) pardalt;
- 2) terrestriline fotogramm-meetria – fotod tehakse maapinnalt kas pildistamise adet käes või statiivil hoides;
- 3) ekstraterrestriline fotogramm-meetria – fotod tehakse satelliitidelt.

Käesolev uurimistöö keskendub aerofotogramm-meetria le, mille pildid on tehtud UAV pardalt.

1.2 Aeropildistamise lennuparameetrid

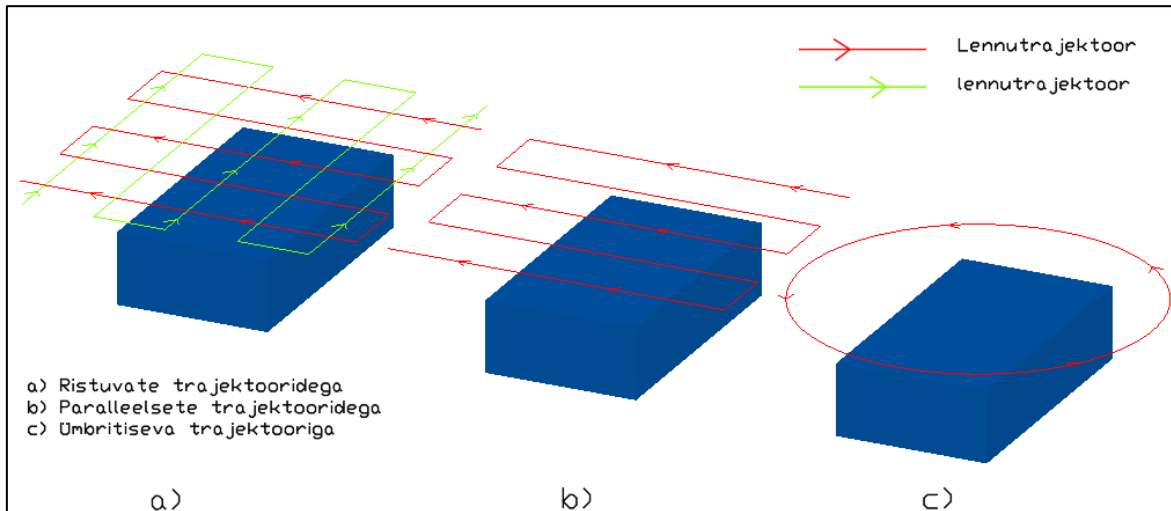
Aeropildistamise lennuparameetrid kirjeldavad lennumasina trajektoorst ja kaamera asendist tulenevaid asjaolusid. Asjaolude optimaalne valik aitab saavutada UAV mõõdistusel soovitava täpsuse ning on olulised lennu planeerimisel. Käesolevas magistritöös käsitletavat aeropildistamise lennuparameetrid on: lennukiirus, lennukõrgus, lennutrajektor, fotode ülekattumine ja kaamera asend.

Lennutrajektoorst sõltuvad kaks fotode ülekattuvust iseloomustavat suurust, milleks on piki- ja põikikattumine. Pikikattumine on lennutrajektoori suunaline kahe järjestikuse foto ühisosa, mida väljendatakse protsentides. Põikikattumine on kahe paralleelsel lennutrajektoiril asuvate fotode külgmine ühisosa, väljendatakse samuti protsentides (vt Joonis 1.2). Soovituslik põikikattumine UAV mõõdistamisel on 60 % ja pikikattumine vähemalt 75 % [5].



Joonis 1.2 Aeromõõdistamise piki- ja põikikattumine

Soovituslik on aeropildistamist läbi korrapäraste paralleelsete trajektooridena (vt Joonis 1.2). See tagab mõõdistatava ala piki- ja põikikattumise nõuete täitmise. Juhul, kui mõõdistataval alal paikneb palju hooneid või muid nähtavust piiravaid objekte, on soovituslik kasutada ristuvate trajektooriga lennurežiimi. Üksiku hoone või kõrgehitise puhul on otstarbekas kasutada objekti ümbritsevat lennutrajektoori. [5]



Joonis 1.3 UAV mõõdistamise erinevad lennutrajektoorid

Lennukõrgus on mõõdistatava objekti (näit. maapind) ja õhusõiduki vaheline vertikaalne vahemaa. Kõrgema lennu puhul jäädvustatakse ühele aerofotole suurem ala, kuid väheneb foto kvaliteet. Madalama lennukõrguse puhul on aerofotol objektid paremini eristuvad, kuid lennuaeg pikeneb ja kõrvuti asuvatel fotodel väheneb ühiste punktide arv. Lennukõrgusest oleneb üks olulisemaid UAV mõõdistuse kvaliteedinäitajaid, milleks on GSD (*Ground Sampling Distance*). GSD näitab kahe kõrvuti asuva piksli tsentrite vahekaugust, mis arvutatakse valemiga (1-1) [6]:

$$GSD = \frac{H * S_w * 100}{F_r * I_w} , \quad (1-1)$$

kus H – lennukõrgus, m;

S_w – kaamera sensori laius, mm;

F_r – kaamera fookuskaugus, mm;

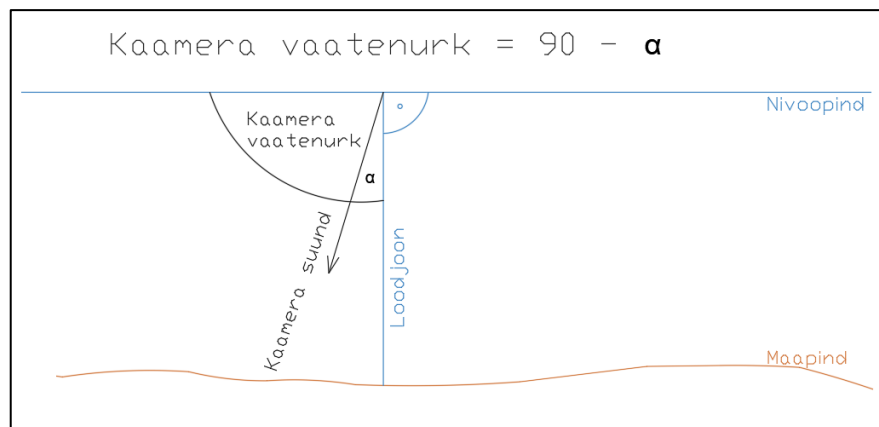
I_w - pikslite arv, pix.

Väiksema (st parema) GSD väärtus saadakse lennukõrgust vähendades või kaamera fookuskaugust suurendades. Kui muuta kaamera vaatenurka, muutub GSD väärtus foto ulatuses ebaühtlaseks.

Aerofotogramm-meetrilise mõõdistamise täpsuseks peetakse 2-3-kordset ühe aerofoto piksli suurus [6]. Optimaalset lennukõrgust saab tuletada valemist (1-1). Lennukõrguse arvutamisel kehtib reegel, et GSD väärtus võiks olla $\frac{1}{5}$ väikseima huvipakkuva objekti suurus. Näiteks kui väikseima huvipakkuva objekti suurus on 10 cm, siis peaks GSD väärtus olema 2 cm. Kasutades GSD väärtust 2 cm valemis (1-1) tuletatakse optimaalne lennukõrgus (valem (1-2)). [7]

$$H = \frac{GSD * F_r * I_w}{S_w * 100} \quad (1-2)$$

Kaamera vaatenurga väärtused ja kaamera tegelik asend võivad erineda vastavalt kasutatavale lennujuhtimistarkvarale. Antud magistritöös kasutatud lennujuhtimistarkvaras Pix4DCapture tähendab kaamera vaatenurk 90° , et kaamera on suunatud loodjoonega samas suunas st nadiiris (Joonis 1.4). Nadiirisuunaline vaatenurk on kaardistamisel optimaalne. Vaatenurga muutmisel saavutatakse kaldaerofoto [2], mis parandab nähtavust vertikaalsete objektide puhul, milleks on näiteks hoonete fassaadid.



Joonis 1.4 Kaamera vaatenurk maapinna suhtes lennujuhtimistarkvaras Pix4DCapture. Nivooipind on loodjoonega risti olev tasapind

Lennukiirus mõjutab lennuaega ja aerofotode kvaliteeti. Kiirema lennu puhul on võimalik mõõdistada suurem maa-ala, kuid ebameeldivalt suureneb võimalus tekitada aerofotodele hägusust (*motion blur*). Hägusust on võimalik hinnata valemiga (1-3). [7]

$$b = \frac{v * t}{GSD} \quad (1-3)$$

kus b – hägusus, pix;

v – lennukiirus, $\frac{m}{s}$;

t – säriaeg, s;

GSD – lahutusvõime, $\frac{cm}{pix}$.

Lennukiiruse valikul tuleks lähtuda sellest, et aerofotode hägusus jääks minimaalseks. [7]

1.3 Aerofotogramm-meetria mõõdistust mõjutavad tegurid

Aerofotogramm-meetria algseks väljundiks on aerofoto. Aerofoto kvaliteet sõltub otseselt kasutatavast kaamerast. Kvaliteeti mõjutavad veel ilmastikutingimused ja aeromõõdistamisel kasutatavad lennuparameetrid. Järgnevates jaotistes käsitletakse kaamera parameetrite mõjusid aerofotodele, ilmastikumõjusid aeromõõdistamisel ja lennuplaneerimisel esinevaid meetodilisi vigu.

1.3.1 Kaamera omaduste mõjud aerofoto kvaliteedile

Kaamera parameetritest oleneb otseselt foto kvaliteet ja sellest tulenevalt ka mõõdistuse kvaliteet. Foto teravusel ja säritusel on otsene mõju kogutud andmete kvaliteedile [7].

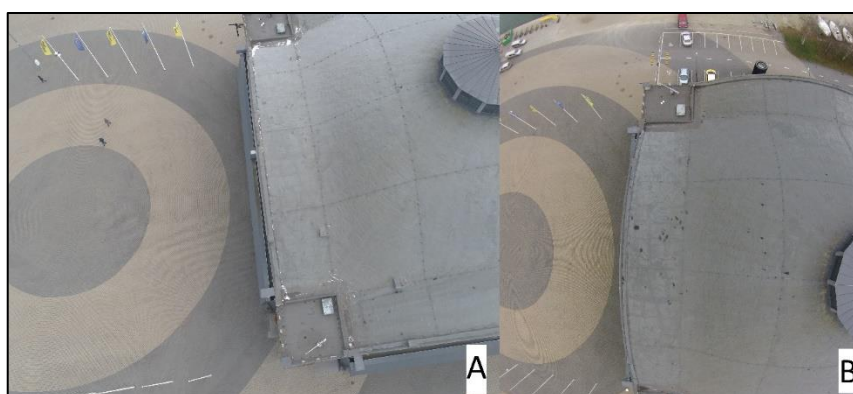
Foto säritus sõltub kolmest peamisest kaamera sättest: ISO (*International Organization for Standardization*), kaamera avaus ja säriaeg. ISO väärtus mõjutab fotode heledust – mida suurem on ISO väärtus, seda suurem on foto heledus. Kaamera avaus ja säriaeg määravad ära kui palju ja kaua valgust fotosensor saab. Avaus tähistatakse f/D , kus D on avause diameeter. Säriaeg on aeg, mis näitab kui pikalt on fotosensor avatud valgusele. Säriaja ühikuks on sekund või selle murdosa. [7] Kaamera parameetrite suurendamise mõju on esitatud tabelis 1.1.

Tabel 1.1 Kaamera parameetrite suurendamise mõju pildi kvaliteedile [7]

Kaamera parameeter	Parameetri suurendamine mõjutab
Piksli suurus	Suurem signaali-müra suhe
Fotosensori suurus	Laiem FoV (<i>Field of View</i> vaateväli)
Fookuskaugus	Väiksem GSD ja FoV
ISO	Suurem foto heledus, rohkem müra
<i>Aperture</i> – avaus	DoF (<i>Depth of Field</i> – teravussügavus) väheneb, fotode hägusus võib suurened
Säriaeg	ISO väheneb, fotode hägusus võib suurened

1.3.2 Läätsse moonutus

Läätsse moonutuste mõju ei ilmne pildi teravuses, vaid fotokujutise geometrias. Moonutused jagunevad kaheks – radiaalsed ja tangentsiaalsed. Radiaalsete moonutuste puhul näivad tegelikkuses sirged jooned fotol kõverana (vt Joonis 1.5). Tangentsiaalsed moonutused tulenevad läätsse kaldest sensori suhtes – mõju on üldiselt väga väike ja neid üldiselt ei kaasata läätsse moonutuste arvutustesse. Radiaalne moonutus jaguneb omakorda kaheks – positiivsed ja negatiivsed. Positiivsete moonutuste puhul asetsevad punktid keskpunkti suhtes kaugemal oma tegelikust asukohast. Negatiivse moonutuse korral on punktid nihkunud keskpunktile lähemale kui tegelikkuses. Moonutused ei ole foto servades ühtlaselt (*Rotationally symmetrical*), st et foto nurgad on rohkem moonutunud kui servade keskosad (vt Joonis 1.5). [8]



Joonis 1.5 Läätsse moonutused. Vasakul (A) tehtud pilt drooniga Phantom 4 Pro ja paremal (B) foto tehtud varasema põlvkonna drooniga Phantom 2. Pildil B on näha tugevaid moonutusi, mis tulenevad „kalasilma“ omadusega läätssest

Läätse moonutuste eemaldamiseks eeldatakse [8], et radiaalne moonutus on sümmeetriline ja kasutatakse eelmääratud statistilisi funktsioone, mis näitavad suhet kauguse (pildi keskpunktist) ja radiaalse moonutuse vahel. Neid funktsioone ei saa määrata analüütiliselt. Fotogramm-meetriliste kaamerate puhul on moonutuste funktsioon määratud tootja poolt.

1.3.3 Ilmastikumõjud

Parim ilm UAV mõõdistuseks on pilves, tuulevaikne ja sademeteta ilm. Ilmastikutingimused, eriti madal päike, mõjutavad pildi kvaliteeti ja sellest tulenevalt ka tulemuste kvaliteet. Madal päike võib tekitada piltidele pikki varje, mis raskendavad piltidel asuvate detailide dešifreerimist. Ilmastikutingimuste mõju on oma Tallinna Tehnikaülikooli magistritöodes välja toonud Romet Köök [6] ja Aidi Sula [9]. Romet Köök leidis enda töös, et pinnamudelite koostamisel esinesid suurimad hälbed just kohtades, kus fotol olid päikese poolt tekitatud varjud.

1.3.4 Atmosfääri refraktsioon

Atmosfäärilist refraktsiooni ja selle käitumist kirjeldab Snelli seadus. Snelli seaduse kohaselt valgus murdub siis, kui valgus läbib kahte erineva optilise tihedusega keskkonna piiri pinda. Teadaolevalt on õhumassid maa lähedal tihedamad kui suurematel kõrgustel, ka õhurõhk väheneb kõrguse kasvades. Refraktsiooni arvutamine [10] on keeruline, kuna täpne suhe kõrguse ja õhumasside paksuse kohta varieerub suuresti olenevalt meteoroloogilistest tingimustest. Üheks välja pakutud mudeliks on ARDC (*Australian Research Data Commons* – Austraalia uuringurühm) välja töötatud valem aeropildistamisel esineva atmosfääri refraktsiooni arvutamiseks, kus konstant K (ühik mikroradiaan) arvutatakse valemiga (1-3) [10]:

$$K = \frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410h}{h^2 - 6h + 250} \left(\frac{h}{H} \right), \quad (1-3)$$

kus H – lennukõrgus, km;

h – maapinna kõrgus merepinnast, km.

Refraktsiooni parandit rakendatakse kaardistamislendudel [10], mille lennukõrgused on suurusjärgus 2500 m. UAV mõõdistamisel on lennukõrgus oluliselt madalam (lennukõrgus umbes 100 m), ning seetõttu ei ole refraktsiooni parandi rakendamine UAV lendudel otstarbekas.

1.3.5 Metoodilised vead

Metoodiliste vigade alla kuuluvad vead, mis on tingitud UAV operaatori isiklikest vigadest. Need on vead, mis tulenevad lennuparameetrite ekslikust valikust. Valitavad lennuparameetrid on lennukõrgus ja -kiirus, aerofotode omavaheline ülekattuvus ja kaamera vaatenurk. Kaamera parameetrite seadistamine varieerub vastavalt kasutatavale lennutarkvarale.

Peamiseks metoodiliseks vea allikaks võib pidada lennukõrguse valikut. Liiga kõrge lennukõrguse puhul võib GSD väärtus olla liiga suur ja liiga madala lennu puhul võivad tekkida probleemid fotodel ühiste punktide leidmisega.

Tallinna Tehnikaülikooli 2015. aasta magistritöös [9] evalveeriti UAV mõõdistuse täpsust ja leiti, et ühetaolise metsaala mõõdistusel jäi 150 m lennukõrgus madalaks – fotogramm-meetria andmetötlusprogrammid ei suutnud genereerida ühtset tervet ala katvat ortofotot. Autor järeldas, et vea vältimiseks oleks pidanud kasutama kõrgemat lennukõrgust ja suurema vaateväljaga kaamerat.

1.4 UAV mõõdistamine ja selle rakendused

UAV mõõdistamine on ruumiandmete hõive kasutades selleks UAV platvormi peale paigaldatud fotokaamerat või laserskannerit. Käesolevas magistritöös keskendutatakse UAV-dele, mis kasutavad ruumiinfo kogumiseks fotokaamerat. UAV mõõdistamise üldprintsüübid ühtivad jaotises 1.1 välja toodud põhimõtetega.

Alljärgnevides jaotistes antakse ülevaade UAV klassifikatsioonist ja UAV mõõdistamiseks vajaminevatest maapealsetest kontrollpunktidest ehk tähistest. Lisaks sellele käsitletakse lähemalt mõningaid UAV mõõdistuse rakendusi.

1.4.1 UAV klassifikatsioon

UAV-sid võib liigitada näiteks kaalu, tiiva tüübi või selle järgi, kas nad kasutavad õhus püsimiseks sisemist energiaallikat. UAV klassifikatsioon varieerub vastavalt riigile ja ühtset klassifikatsiooni ei ole välja töötatud [3]. Geodeetiliste tööde läbiviimiseks kasutatakse peamiselt kahte erinevat tüüpi droone – rootor-tüüpi või fikseeritud tiivaga (Joonis 1.6)



Joonis 1.6 – Rotor-tüüpi UAV (vasakul) ja fikseeritud tiivaga UAV (paremal) [11] [12]. Vasakul on kujutatud droon DJI Phantom 4 RTK ja paremal Trimble UX5 Multispectral

Rotor-tüüpi või fikseeritud tiivaga UAV-de põhiline erinevus seisneb lennu kiiruses ja kõrguses. Järgnevalt on välja toodud võrdlus kaht erinevat liiki UAV kohta (Tabel 1.2).

Tabel 1.2. DJI Phantom 4 RTK ja Trimble UX5 Multispectral mõõdistusparameetrite võrdlemine [12] [11]

	DJI Phantom 4 RTK	Trimble UX5
Lennukiirus mõõdistamisel	18-36 km/h*	80 km/h
GSD 100 m kõrgusel	2.74 cm	6.8 cm
Lennu kestvus	30 min	45 min

* DJI Phantom 4 RTK maksimaalne lennukiirus on kõrgem, kuid aerofotode lauspildistamisel ei ole soovitatav kasutada kiirust üle 10 m/s (36 km/h).

Tulenevalt fikseeritud tiivaga UAV suuremast lennukiirusest ja sobivusest kõrgemal lendamiseks [12] sobivad fikseeritud tiivaga UAV-d pigem suureulatuslike objektide mõõdistamiseks, milleks on näiteks karjäärid või muud maardlad. Lokaalsemate ning suuremat täpsust nõudvate objektide (näit. hooned) puhul on otstarbekam kasutada rootor-tüüpi tiivaga UAV-sid.

1.4.2 UAV tähised

UAV tähised ehk maapealsed kontrollpunktid (GCP – *Ground Control Point*) on vajalikud UAV mõõdistuse kõrguslikuks ja plaaniliseks sidumiseks riikliku koordinaatsüsteemiga. Tähiste funktsioon seisneb mõõdistuse õige mõõtkava tagamisel ja mõõdistustulemuste evalveerimises.

Aeropildistamise tähiste paigaldamine on aeromõõdistamise üks olulisemaid etappe. Tähisted peavad olema ümbritsevast pinnast eristuvad ning nende tšenter peab olema fotode pealt täpselt tuvastatav. Samuti tuleks arvestada tähise suuruse valikul ka piksli suurus – tähise suurus on vähemalt nelja-viiekordne piksli suurus. [2] Soovituslikult [2] tuleks tähise üks külgedest orienteerida põhja-lõuna suunaliselt – see võimaldab andmetöötlustarkvaras tšentrit lihtsamini määrata.

UAV mõõdistusel kasutatakse tüüpiliselt must-valgeid tähiseid, mis sarnanevad laserskaneerimisel kasutatavate tähistega. Lihtsam ja väiksema ajakuluga on maapealne kontrollpunkt tähistada aerosoolvärviga (vt Joonis 1.7).



Joonis 1.7 UAV mõõdistusel kasutatavad tähised. Lamineeritud paberleht (a) ja aerosoolvärviga (b) tehtud tähis

Erinevate tähiste tüüpide kasutamine võib anda erinevaid tulemusi, kuid toetudes 2018. aastal läbiviidud uuringule [1] ei erine aerosoolvärv tähistega ja must-valgete tähistega mõõdistustulemuste põhjal koostatud pinnamudelid teineteisest märkimisväärselt. Must-valgete tähistega eelis aerosoolvärviga tehtud tähistega on selgepiiriline ja seega ka paremini eristuv tähise tšenter.

1.4.3 Mahtude määramine

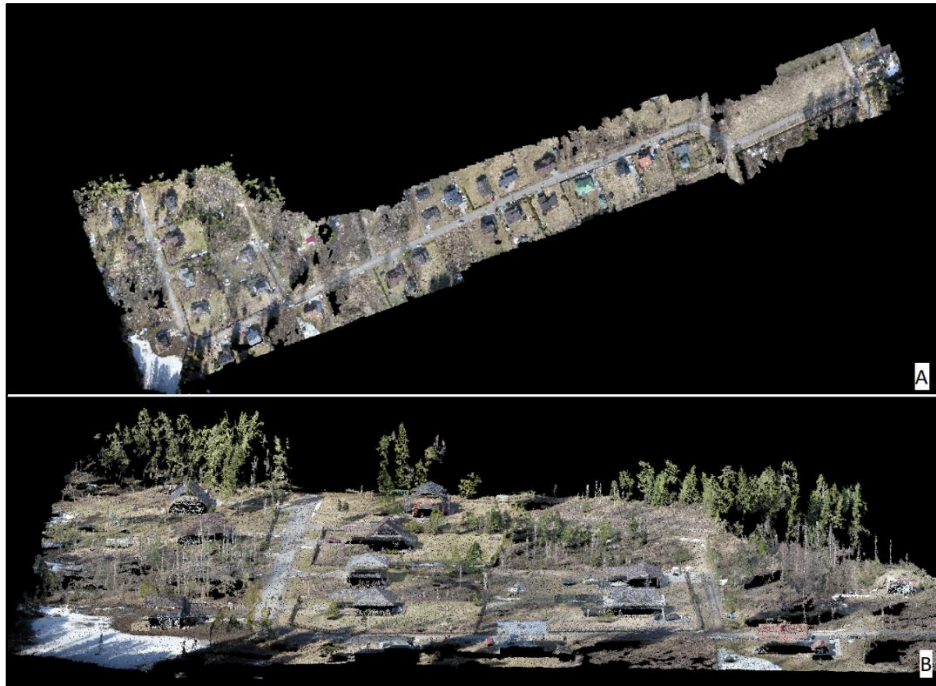
UAV mõõdistuse üheks potentsiaalseks rakenduseks on mahtude määramine. UAV mõõdistamine on võrreldes teiste meetoditega olemuselt väiksema ajakuluga [1] ning võimaldab mõõdistada kohti, mis on raskesti ligipääsetavad.

Eesti Maaülikoolis 2018. aastal koostatud magistritöös [1] leiti, et UAV aerofotode põhjal saab määrata puistangute mahtu kõrge täpsusega. Töös võrreldi fotogramm-meetriliselt määratud mahtu laserskaneerimisega saadud mahuga. Võrdlus näitas, et fotogramm-meetriliselt määratud mahu erinevus jäi alla 4 % võrreldes laserskaneerimise teel saadud mahuga. Lisaks sellele leiti, et mahtude määramisel ei ole oluline UAV maapealsete tähiste kasutamine. Tähiste kasutamine aitas täpsust parandada, aga ilma tähisteta mõõdistatud materjali maht jäi samuti lubatud piiridesse.

1.4.4 Topograafiliste plaanide koostamine

Aerofotode järeltöötluse üheks väljundiks on ortofoto mosaiik. Ortofoto mosaiik on ortofotode kogum, mis on kõik seotud ühtseks suureks pildiks. Mosaiigist on eemaldatud moonutused ja kujutis on tehtud ortogonaalseks. Tänapäevased digitaalsed ortofoto mosaiigid sisaldavad endas ka asukoha informatsiooni, st ortofoto paikneb ettemääratud koordinaatsüsteemis. Georefereeritud ortofoto mosaiikidel on abistav funktsioon topograafiliste plaanide koostamisel. Mosaiigilt saadav informatsioon aitab täpsustada või isegi määrata objektide plaanilist asetsemist looduses.

Aerofotode järeltöötluse teiseks oluliseks väljundiks on punktipilv. Punktipilv meenutab pealtvaates ortofoto mosaiiki, aga erinevus on see, et punktipilv koosneb vektorandmetest (punktidest), mitte rasterandmetest (pikslitest) nagu ortofoto mosaiik. Vektorandmed võimaldavad kasutada topograafilise plaani koostamiseks vajalikke kõrgusandmeid. Samuti on võimalik näha punktipilves detaile, mida ortofoto pealtvaade ei võimalda. Selliste detailide hulka kuuluvad näiteks hoonete fassaadid. Punktipilve näidis on esitatud (Joonis 1.8).

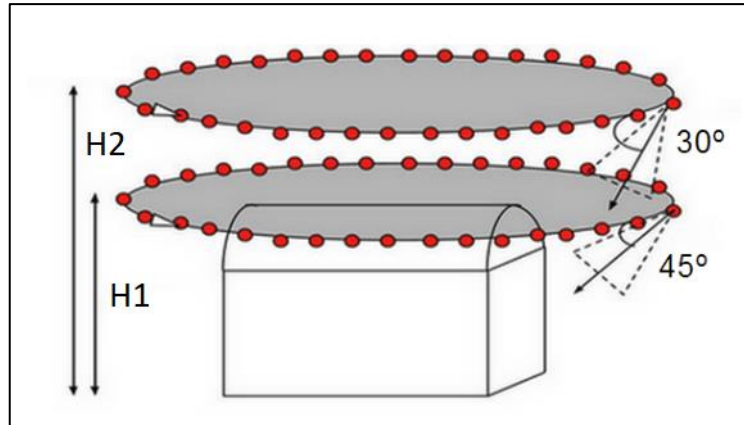


Joonis 1.8 Punktipilve pealt – ja kaldvaade (vastavalt A ja B). Pildil kujutatud objekt on Metsanurga tee, Roobuka küla, Harjumaa. Objekti kohta koostati topograafiline alusplaan Geodeesia24 OÜ poolt 2019. aasta aprillis.

Hoonete fassaadid võivad olla punktipilves kujutatud puudulikult. Kvaliteedi tõstmiseks tuleb UAV kaamera vaatenurk seadistada mittenadiirseks.

1.4.5 Hoonete modelleerimine

Hoonest kvaliteetse mudeli saamiseks tuleb UAV lendude puhul arvestada objekti kolmemõõtmelisust. Kui topograafilistel eesmärkidel tehtud UAV lendude puhul kasutatakse termineid nagu piki- ja põikikattumine, siis hoonete mõõdistusel tuleks tagada fotode vertikaalne kattuvus. See tähendab, et ühe objekti mõõdistamiseks tuleks kasutada mitut erinevat lennukõrgust ja varieerida kaamera vaatenurka (vt Joonis 1.9).



Joonis 1.9 Hoone mõõdistamise põhimõtted UAV-ga. Elliptiline joon kujutab UAV lennutrajektoori, punased punktid tähistavad pildistamise asukohta ning H1 ja H2 sümboliseerivad lendude eri kõrgusi [13]

Hoonet ümbritseva lennu korral peaks UAV pildistama iga 5 kuni 10° vahemiku tagant. See tähendab, kui ellipsi ümbermõõt on 360 m, siis pildistatakse umbes iga 5 kuni 10 meetri tagant. Järjestikustel lendudel ei tohiks järgneva lennu kõrgus olla rohkem kui kahekordne eelmise lennu kõrgus. Näiteks, kui esimene lend oli 30 meetri kõrgusel, siis järgnev lend ei tohiks ületada 60 meetrit. [13] Lendude arv ja kõrguste valik sõltub objekti suurusest ja omapäradest. Juhul, kui mõõdistatav objekt on välisperimeetri mõõtudega 100 * 50 m ja kõrgusega 20 m, siis oleks soovituslik kasutada ühte ümbritsevat lendu kõrgusega 30 m ja ühte ristuvate trajektooridega (RT) lendu kõrgusega 50 m.

UAV fotode järeltöötlemise tulemusena saadakse punktipilv, mida on võimalik kasutada hoonete modelleerimisel. Lisaks punktipilvele on võimalik genereerida fassaadist ortofotomosaiik. UAV punktipilve modelleerimisel on järgmised omapärad [14]:

- Kõrge müratase, mis raskendab pindade modelleerimist punktipilve. Võimalik kasutada filtreid müra eemaldamiseks;
- Punktipilves võib esineda tühimikke – UAV kaamera eest varjatud kohad või peegelduvad objektid (aknad, klaasid), mis raskendavad andmetöötlustarkvarade algoritmide toimimist;
- Punktipilve sümmeetria vead – objekti teravad nurgad kajastuvad punktipilves ümaralt. Modelleerimisel tuleks õige geomeetria saavutamiseks kasutada erinevate pindade lõikeid, näiteks hoone nurga määramine kahe külgsuuna seina lõikepunkt.

1.4.6 Deformatsioonide uuringud

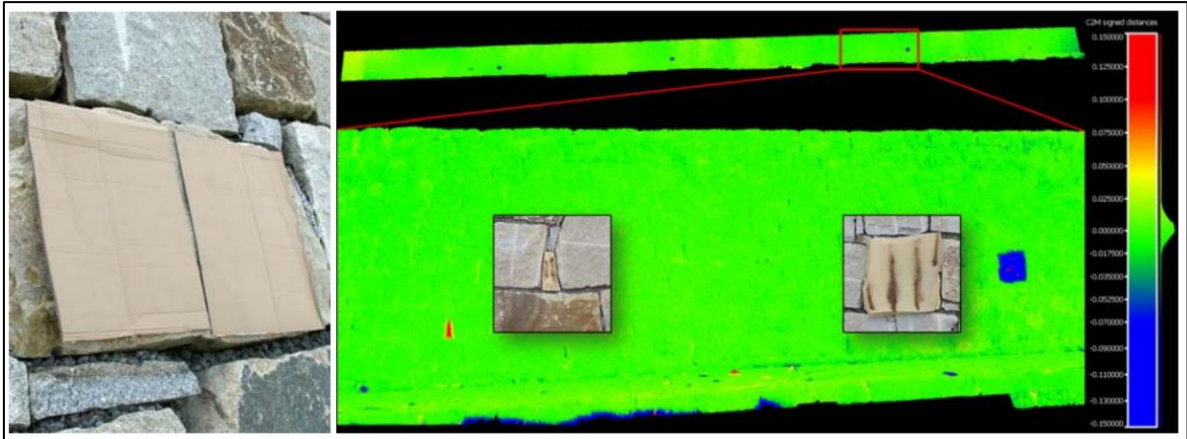
UAV-de omadus on koguda andmeid kohtadest, kust teiste mõõteseadmetega ligipääs oluliselt raskendatud. See omadus kehtib ka deformatsioonide tuvastamisel keerulistes situatsioonides, näiteks kiriku torni seisukorra tuvastamine drooniga [15]. (vt Joonis 1.10)



Joonis 1.10 Aerofoto Halberstadt katedraali tornist ja sissesuunitud väljavõte katusel esinevast kahjustusest [15]

Lisaks vaatlusele on võimalik UAV aerofotode põhjal koostada punktipilv, mis võimaldab analüüsida mõõdistatud objekti geomeetriat. Näiteks saab analüüsida objekti vertikaalsust, horisontaalsust ja teha mõõtmisi objekti detailide mõõtmete kohta.

Fotogramm-meetria sobivust deformatsioonide tuvastamisel on testitud Saksamaal ühe tugimüüri näitel [16]. Tugimüüri mõõdistati kaks korda UAV-ga. Mõõdistus kordade vahel kasutati potentsiaalsete deformatsioonidena erisuuruseid papitükke, mida kas eemaldati või lisati mõõdistuskordade vahel. Kahe mõõdistuse tulemusi võrreldi omavahel tarkvaras CloudCompare. Kui kahe mõõdistuse tulemuste erinevus oli suurem kui 6 mm, märgiti see deformatsiooniks. (vt Joonis 1.11).



Joonis 1.11 Tugimüürile asetatud tehislik deformatsioon (vasakul) papitüki kujul ning kahe mõõdistuse erinevused (paremal), kus sinise värviga on kujutatud lisatud materjal ja punasega eemaldatud [16]

Uurimistö [16] tulemused näitasid, et UAV mõõdistusega on võimalik tuvastada väiksemõõdulisi (alla 1 cm) deformatsioone. UAV lennukõrgus oli maapinna suhtes 25 m ja kaugus katseobjektist umbes 30 m. Täpsuse saavutamiseks kasutati UAV tähiseid. Kokku paigaldati kokku 20 tähist 180 meetrise tugimüüri peale, milledele määrati koordinaadid elektrontahhümeetriga.

2. AERO- JA TERRESTRILINE LASERSKANEERIMINE

Laserskaneerimine on mõõdistusviis, mis kasutab punktide mõõdistamiseks LIDAR (*Light Detection and Ranging*) tehnoloogiat. Sõltuvalt laserskanneri platvormist klassifitseeritakse laserskaneerimine kolme põhilisse kategooriasse [17]:

- 1) terrestriline laserskaneerimine (TLS) – laserskaneerimise tehnoloogia, mille puhul laserskanner paigaldatakse statiivile või mõnele muule staatilisele platvormile;
- 2) aerolaserskaneerimine (ALS) – laserskaneerimise tehnoloogia, kus laserskanner on paigaldatud lennuki või UAV pardale;
- 3) mobiilne laserskaneerimine (MLS) – laserskanner on paigaldatud mobiilsele maapealsele platvormile.

Käesoleva peatüki jaotistes antakse ülevaade laserskaneerimise tööpõhimõttest. Vaadeldakse lähemalt ALS ja TLS rakendusi. ALS puhul kirjeldatakse ka Maa-ameti poolt läbi viidavaid ALS mõõdistusi Eesti Vabariigi territooriumil. TLS tehnoloogiat on varasemates uurimistöodes (vt Martin Sobaki 2014. aasta magistritööd [18]) põhjalikult käsitletud ja seega käesolevas magistritöös selle toimimise põhimõtte selgitamisel pikemalt ei peatuta.

2.1 Laserskaneerimise tööpõhimõte

Laserskanner kasutab laserimpulsse, et määrata vahekaugus laserskanneri ja mõõdistatava pinna vahel. Samal ajal salvestab laserskanner iga laserimpulsi puhul veel horisontaal- ja vertikaalnurga (polaarkoordinaadid). Impulsside lähetamine ja töötlemine toimub väga kiirelt, mille tulemusena saadakse kuni miljonitest punktidest koosnev punktipilv. Iga punkti koordinaadid on määratud valemiga (2-1): [17]

$$P_s(t) = \begin{bmatrix} r(t) * \cos\beta(t) * \sin \alpha(t) \\ r(t) * \cos\beta(t) * \cos \alpha(t) \\ r(t) * \sin\beta(t) \end{bmatrix}, \quad (2-1)$$

kus $P_s(t)$ on üksiku punkti koordinaadid (vastavalt X, Y ja Z) laserskanneri koordinaatsüsteemis, ajahetkel t ;

r on kaldkaugus laserkannerist mõõdistatava punktini, m ;

β on vertikaalnurk horisondi suhtes ;

α on horisontaalnurk valitud/suvalise lähtesuuna suhtes.

Laserskannerid jagunevad tööpõhimõttelt kaheks – laserimpulss-skannerid ja faasinihke skannerid. Faasinihke skanneri erinevus laserimpulss-skannerist tuleneb vahemaa mõõtmisest. Faasinihke skanneritel ei mõõdeta mitte laserimpulsi liikumise jaoks kulunud aega vaid faasinihet. Faasinihke skanner võimaldab mõõta tunduvalt rohkem punkte sekundis kui laserimpulss-skanner. Laserimpulss-skannerid mõõdavad tavaliselt umbes 50 000 punkti sekundis samas faasinihke skannerid aga kuni 500 000 punkti sekundis. Faasinihke skanneri miinuseks laserimpulss-skanneri ees on piiratud mõõtekaugus – mõõteulatus umbes 120 m, laserimpulss-skanneritel võib mõõteulatus küündida mitme kilomeetrini. [19] Seetõttu leiavad laserimpulss-skannerid kasutust ulatuslike objektidel ja ALS rakendustes.

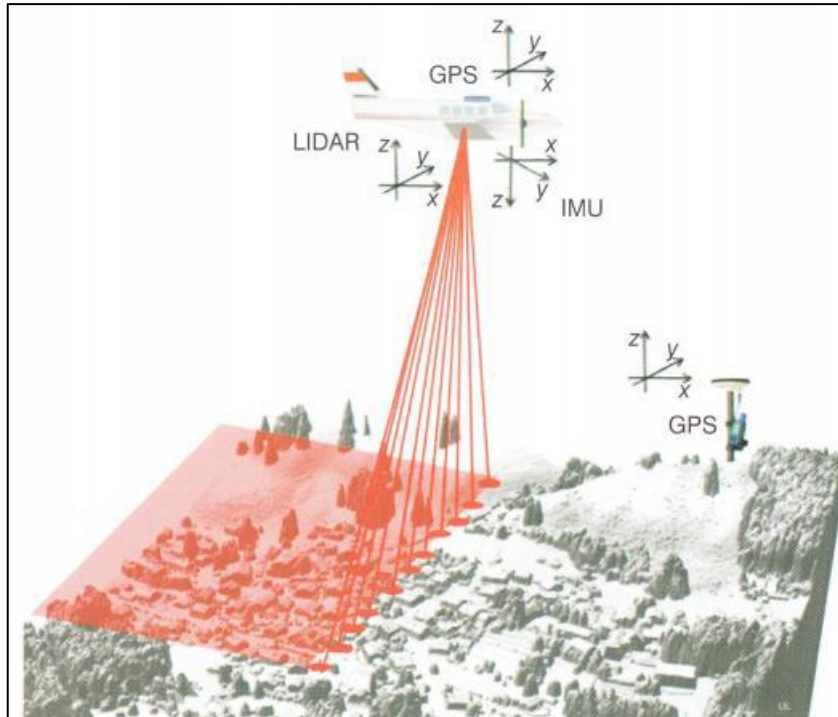
2.2 Aerolaserskaneerimine ja selle rakendused

Aerolaserskaneerimise (ALS) mõõdistamise tehnika koosneb kahest põhilisest seadmest [20] :

- Laserskanner – mõõdistab kauguse maapinnani laseriga;
- GNSS/IMU kombinatsioon – määrab lennutrajektoori asukoha ja orientatsiooni.

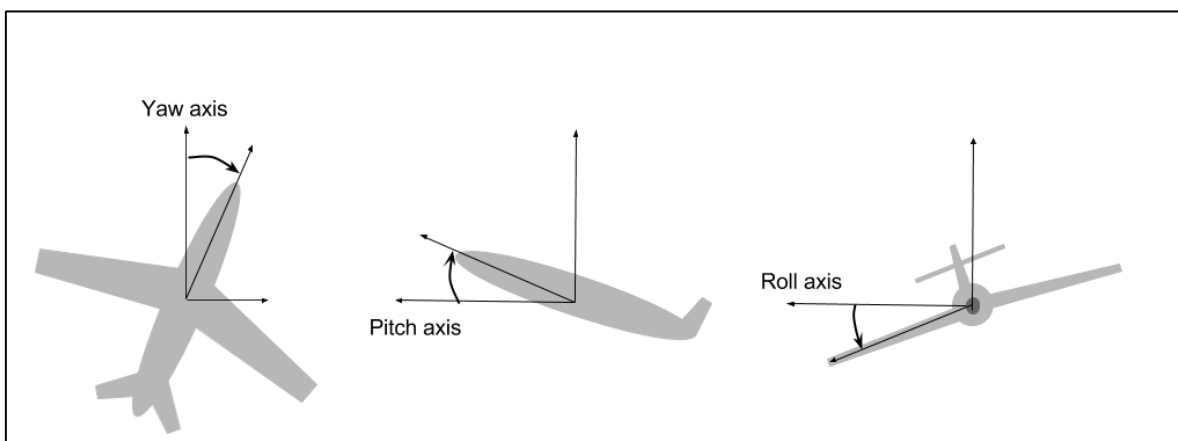
GNSS (*Global Navigation Satellite System* ehk globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem) antenn on tavaliselt kahesageduslik, mis salvestab lennuki asukohainformatsiooni. IMU (*Inertial Measurement Unit*) salvestab andmeid lennuki kiirenduse ja asendi kohta. GNSS ja IMU andmeid kooskasutades (vt ka Joonis 2.1) on võimalik arvutada lennuki trajektoori täpsemalt kui 10 cm. [20]

Aerolaserskaneerimist kasutatakse eelkõige suurte maa-alade mõõdistamiseks. Aerolaserskaneerimise andmed on kasulikud põllumajanduses, metsanduses, linnade 3D mudelite koostamisel, suurtes tööstuspiirkondades, karjäärides, hüdroloogias (üleujutusala ja jõgede valgala), geoloogias ja arheoloogias. [21] [22]



Joonis 2.1 Aerolaserskaneerimisel kasutatavad mõõteseadmed [20]. Joonisel on kasutatud terminit GPS (*Global Positioning System*), mis kuulub termini GNSS alla

GNSS/IMU andmed on vajalikud, et määrata lennuki täpne asukoht laserkiire välja saatmise hetkel. GNSS seade salvestab asukoha informatsiooni üldiselt sagedusega 2 korda sekundis (2 Hz), seega lennukiirusel 100 m/s on lennuki asukoht teada iga 50 meetri järelt. IMU salvestamisintervall on 200 korda sekundis (200 Hz), mis võimaldab arvutada lennutrajektoori suurema täpsuse ja sagedusega. IMU salvestab lisaks asukoha informatsioonile ka andmeid lennuki piki- ja põikikalde kui ka pöördenurga kohta (Joonis 2.2). [20]



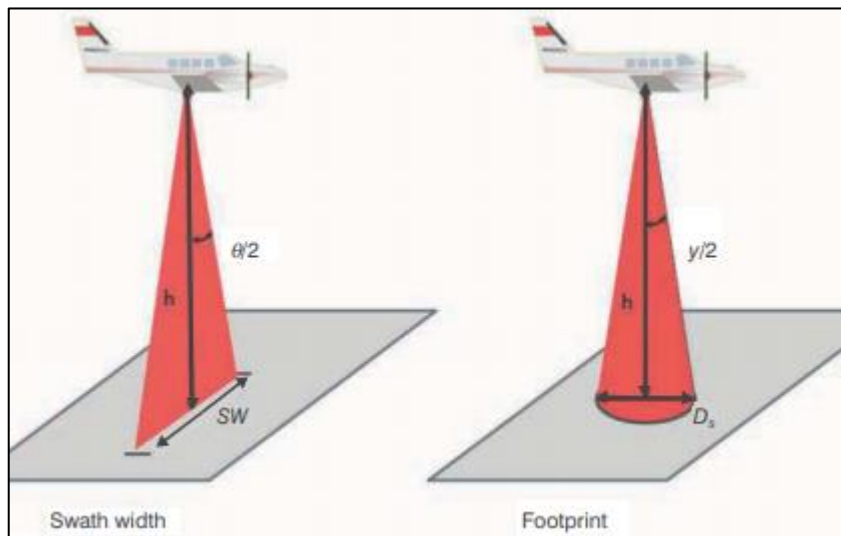
Joonis 2.2 Lennuki orientatsiooni parameetrid. [5] *Yaw* - Pöördenurk, *Pitch* – pikikalle, *Roll* - põikikalle

Lennuki orientatsiooni parameetrid jäävad sirgjoonelise lennutrajektoori puhul vähe mõjutatuks, mis valmistab probleeme IMU triivi tuvastamisel. IMU andmete täpsuse tagamiseks nõuavad IMU andurid aeg-ajalt „turgutust“. Olenevalt IMU süsteemist on kriitiline tööaja kestvus umbes 10 minutit – see tähendab, et iga 10 minuti tagant peaks lennuk oma ühetaolist trajektoori muutma, et IMU andureid „turgutada“. [20]

GNSS ja IMU andmete liitmisel [20] saavutatakse parim eeldatav lennutrajektoor. Nimetatakse ka SBET (*Smoothed Best Estimated Trajectory*). Asukohaandmed interpoleeritakse suurusjärgus 800 korda sekundis, mis võimaldab lennutrajektoori täpsust umbes 10 cm. Süstemaatilised nihked saab eemaldada järeltöötuse käigus.

2.2.1 ALS mõõdistuse omadused

Aerolaserskaneerimisel on olulised kaks LIDAR süsteemist sõltuvat parameetrit [20]: 1) *Swath width* – andmekaare laius ja 2) *Footprint* – lasertäpi diameeter maapinnal. (vt Joonis 2.3)



Joonis 2.3 – Andmekaare laius (*Swath width*) ja lasertäpi diameeter maapinnal (*footprint*) [20]

Andmekaare laiust (sw) saab arvutada valemiga (2-2) [20]:

$$sw = 2h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (2-2)$$

kus h – lennukõrgus maapinnast, m;

θ – skaneerimisnurk,

Lasertäpi diameetrit maapinnal (D_s) saab arvutada valemiga (2-3) [20]:

$$D_s = 2h \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right), \quad (2-3)$$

kus h – lennukõrgus maapinnast, m;

γ – *beam divergence* ehk laseri hajuvus.

Lasertäpi diameeter maapinnal mõjutab objektide eristatuvust punktipilves ja üksikute punktide kvaliteeti ALS andmestikus. Juhul, kui $D_s = 30$ cm, siis detailid, mille mõõtmed on väiksemad kui D_s on punktipilves eristumatud. Üksikute punktide kvaliteeti mõjutavad huvipakkuvale pinnale mitteomased detailid. See tähendab, et osa lasertäpist võib peegelduda mittehuvipakkuva objekti pealt, näiteks asfaldi kõrguse määramisel võib lasertäpp (või osa sellest) peegelduda äärekivi pealt ja tulemusena saadakse vale kõrgus [23].

ALS punktide täpsus ei ole kogu andmekaare laiuses ühtlane. Kõige täpsem tulemus on nadiiris ja kahaneb lennukist eemaldumisel. Nadiirist eemaldumisel hakkavad mõjuma kauguse mõõtmisest tingitud vead. Hälvete vähendamiseks leitakse andmekaare ülekatte aladel omavahelised hälbed, mis tasandatakse minimaalseks. [24]

2.2.2 Maa-ameti aeromöödistused

Maa-amet on teostanud kaardistamise eesmärgil aerolaserskaneerimise lende 2008. aastast. Kogu Eesti riigi territooriumi katmiseks kaardistuslendudega kulub kokku 4 aastat. Praeguseks on kogu riigi territoorium terviklikult möödistatud 2 korda ning kolmas kaardistus on hetkel pooleli. Möödistuskampaaniad jagunevad järgnevalt: [24]

- 1) Esimene ring, 2008–2011;
- 2) Teine ring, 2012–2015;

3) Kolmas ring, (2016) 2017–2020;

Möödistuskampaniate kohta saab täpsemalt lugeda Maa-ameti kodulehelt [24].

Maa-amet võttis 2017. aastal kasutusele uue aerolaserskanneri Riegl VQ-1560i. Uue laserskanneriga teostatakse tiheasustuslende lennukõrgusega 1200 m maapinnast, mis saavutab keskmise punktiheduse 18 p/m². See punktihedus võimaldab koostada üksikute hoonete kohta 3D mudeleid. Varasematel tiheasustuslendudel oli punktihedus 2,3 p/m². Üle-Eestiliste lendude puhul kasutatakse lennukõrgust 2600 m maapinnast, saavutades punktiheduse 2,1 p/m². Vana laserskanneriga oli vastav näitaja 0,45 p/m². [24]

ALS andmetes esineb mitmeid kvaliteeti vähendavaid tegureid: taimestiku mõju, klassifitseerimise ebatäpsused ning lennuplokkide omavaheline ebapiisav ülekattuvus. ALS andmete täpsuse parandamiseks kasutatakse maapealseid kontrollpunkte. Kontrollitava ala suuruse tõttu kasutatakse sõiduauto külge paigaldatud GNSS vastuvõtjat, mis salvestab koordinaadid iga 10 meetri tagant. Sõiduauto kiirust hoitakse vahemikus 60–70 km/h. Lisaks sõiduauto meetodile kasutatakse ka üksikuid maapealseid kontrollpunkte, mille koordinaadid määratakse üldjuhul GNSS seadmega. Andmetöötlusesse kaasatakse ainult kontrollpunkte, mille kvaliteedi standardhälve ei ületa 3 cm. [21] [24]

Aerolaserskaneerimise andmeid väljastatakse Maa-ameti poolt Eesti põhikaardi 1:2000 lehtede kaupa. Iga leht hõlmab endas ühe ruutkilomeetri jagu andmeid. 1. jaanuaril 2018. aastal tehti kõrgussüsteemi muutus, millega transformeeriti ALS kõrgusväärtused vanast BK77 kõrgussüsteemist uude EH2000 süsteemi. Seega on ka kõik Maa-ameti poolt väljastatavad andmed EH2000 kõrgussüsteemis. Maa-ameti ALS andmed muudeti 01.07.2018 avaandmeteks ja on kättesaadavad kõigile. Andmete levitusformaad on LAZ 1.4. [24]

2.3 Terrestriline laserskaneerimine

Terrestriliseks laserskaneerimiseks (TLS) nimetatakse ruumiandmete hõivamist staatilise laserskanneriga. Skaneerimise tulemusena saadakse kõrge resolutsiooniga punkt pilv, mille koordinaatsüsteem on instrumendikeskne, see tähendab, et koordinaatsüsteemi keskpunktiks on laserskanner. TLS-i staatilise iseloomu tõttu tuleb möödistatava objekti täieliku katvuse tagamiseks laserskaneerimist teostada mitmest erinevast jaamast. Jaamade vahel peab olema tagatud möödistatavate pindade vaheline ülekattuvus või ühiste tähistele olemasolu.

Kahe erineva punktipilve omavaheline registreerimine on punktipilvede transformeerimine ühtsesse koordinaatsüsteemi. Punktipilvede omavaheline sidumine toimub vähemalt kolme ühise (kahe, kui punktid on samas kõrgussüsteemis) punkti kaudu. Ühised punktid aitavad selgeks teha kahe punktipilve vahelise pöördenurkade erinevuse ning plaanilise/kõrgusliku nihke. [17] Nende andmete alusel saab kindlaks teha ühe punktipilve asetsemise teise suhtes ja andmestikud omavahel ühildada.

Punktipilve registreerimiseks on kaks võimalust – automaatselt tähistega või manuaalselt pilv-pilvega. Tähistega registreerimisel kasutatakse punktipilve registreerimiseks objektile tähistatuid tähiseid, millele on määratud koordinaadid. Pilv-pilvega registreerimisel kasutatakse kahe punktipilve kattavas osas ühiste punktide, joonte ja pindade omavahelist sobitamist. Kahe punktipilve omavaheline ülekattuvus peaks olema minimaalselt 30 % [19].

Terrestrilise laserskaneerimise andmed on kasulikud kõigile, kel on vaja detailset ja kvaliteetset ruumiinfot. Üheks suurimaks kasutusvaldkonnaks on hoonete modelleerimine ja BIM (*Building Information Modelling*) rakendused. (vt [22]) TLS andmestikke kasutatakse veel metsanduses, kaevandamises, deformatsioonide uurimisel, mahtude määramisel jne.

3. UAV JA AEROLASERSKANEERIMISE MÕÕDISTUSE KOMBINEERIMINE TERRESTRILISE LASERSKANEERIMISEGA

Käesolevas peatükis käsitletakse kahe kaugseire meetodi UAV ja ALS võimalikku kooskasutust terrestrilise laserskaneerimisega. Andmestike erinevused tulevad ilmsiks erinevate mõõdistusmetoodikatega saavutatud punktipilvede karakteristikutes - punktihedus ja punktide asetsemise korrapärasus. Eelmainitud mõõdistusmetoodikatel on ka põhimõtteline erinevus andmete kogumisel – TLS on staatiline ja UAV/ALS on mobiilsed mõõdistusmetoodikad.

Järgnevates jaotistes kirjeldatakse esmalt probleemi erinevate mõõdistusmetoodikate kombineerimisel ja seejärel antakse ülevaade varasemalt koostatud uurimistöödest antud teemal. UAV täpsuse valideerimine TLS andmetega on ühtlasi ka käesoleva magistritöö üheks põhieesmärkideks.

3.1 Probleemi kirjeldus

Aero- ja terrestrilise laserskaneerimise kooskasutamise probleem on sõnastatud artiklis [23] – ALS andmestik on palju hõredam ja väiksema täpsusega kui TLS ning sel põhjusel ei ole rakendatud kahe andmestiku kooskasutust. Kui on nõutud TLS-ile omast täpsust, siis üldiselt ALS andmestikke ei saa arvestada. Madalam punktipilve tihedus tekitab probleeme ka andmetöötluses, kus töötlusparameetrid sõltuvad tihti punktihedusest – filtrid, modelleerimine ning segmenteerimine. Samuti eeldatakse modelleerimisel erinevate andmestike omavahelist sobivust, kuid ALS-i ja TLS-i puhul võib esineda suuri süstemaatilisi erinevusi, mille eemaldamine ei pruugi madala punktiheduse tõttu olla lihtne ülesanne.

Terrestriline laserskaneerimine on laialdaselt kasutatud meetod hoonete mõõdistamiseks nende modelleerimise eesmärgil. TLS võimaldab hooned ja nende vertikaalsed osad jäädvustada kõrge detailsusega ja väikese ajakuluga, samas tagades kõrge täpsuse. TLS-i miinuseks on raskesti ligipääsetavad kohad nagu näiteks katused ja kõrgemate hoonete ülaosad. Raskesti ligipääsetavad kohad võivad olla UAV mõõdistusega lihtsamini ligipääsetavad. Seega tasub uurida UAV mõõdistuse sobivust hoonete modelleerimisel.

UAV ja TLS mõõdistuste andmete kooskasutus ei valmista üldjuhul probleemi. Probleemide vältimiseks saab kasutada mõlema mõõdistuse puhul samu koordineerimispunkte ehk vaadata, et tähiste asukohad on mõlemal meetodil identsed. TLS mõõdistuste puhul kasutatakse tihti ka suvalist koordinaatsüsteemi, mille korral tuleks tagada erinevate meetodite omavaheline ülekattuvus, mis hõlbustab hilisemat andmete ühildamist (registreerimist).

UAV ja TLS-i andmetulemite põhilised erinevused tulenevad genereeritud punktipilvede struktuurist ja kvaliteedist. TLS punktipilv on üldiselt ühtlaselt struktureeritud ja kõrge punktihedusega, UAV punktipilv on aga ebaühtlase jaotusega ning ka madalama punktihedusega. UAV punktipilvedel on iseloomulikult ka kõrgem müratase ning suurem objektimoonutus. Ehk objektid, mis on looduses sirged võivad olla punktipilves kõverdunud. Seega on UAV kasutamisel koos TLS süsteemidega põhiküsimuseks saavutatav täpsus ning detailide õige kujutamine.

3.2 Varasemad uurimistööd

Aero- ja terrestrilise laserskaneerimise koos kasutamist hoonete modelleerimisel on varasemalt uurinud Tallinna Tehnikaülikooli õppejõud Artu Ellmann ja Kalev Julge [23]. Uurimistöös käsitleti ajaloolise veetorni mudeli loomist. Veetorni mudeli loomiseks mõõdistati veetorn maapealse laserskanneriga, kuid kättesaamatuks jäi veetorni katus, mida terrestrilise laserskaneerimisega ei olnud võimalik mõõdistada. Veetorni täieliku mudeli saavutamiseks otsustati kaasata Maa-ameti 4 aasta (2008, 2009, 2012 ja 2013) ALS andmeid.

Eelmainitud uurimistöö [23] põhiprobleemiks kujunes ALS ja TLS andmestiku omavaheline ühilduvus. See tähendab, et andmestikud on küll samas koordinaatsüsteemis, kuid sellegipoolest võib esineda andmestike vahel süstemaatilisi erinevusi. Erinevuste tõenäolisemaks põhjuseks on ilmselt erinevad koordineerimisviisid. ALS kasutab GNSS ja IMU andmeid, et arvutada punktide koordinaate, ning TLS puhul kasutati maapealseid geodeetilisi punkte.

Kõrguslike süstemaatiliste erinevuste tuvastamiseks valiti mõlemast punktipilvest objektile lähedal asuv horisontaalne tasapind. Võrreldes kõrguste erinevusi horisontaalsel tasapinnal oli süstemaatiliste vigade tuvastamine lihtne. Plaaniliste (X- ja Y-koordinaadid) nihete tuvastamine oli keerulisem ülesanne, kuna ALS pilv ei olnud piisava punktihedusega, et tuvastada punktipilves iseloomulikke punkte või objektide ääri. Selle asemel kasutati ALS andmete puhul katuse punktide

modelleerimist koonuseks. Kusjuures koonus asetati punktipilve nõnda, et hälbed koonuse ja ALS punktide vahel oleksid minimaalsed (*best fit cone*). Koonuse tipu koordinaadid võeti katuse tsentri koordinaatideks. TLS andmetes leiti katuse tsentri plaanilised koordinaadid võttes torni läbilõikes tekkinud ringi tsentri koordinaadid. [23]

ALS andmete KRV (keskmine ruutviga) leiti, kui võrreldi omavahel üksikuid ALS punkte ja modelleeritud koonust. ALS punktide KRV oli 0.050 m ning vead jagunesid üsna ühtlaselt vahemikus -0.1...0.1 m. Koonuse modelleerimise täpsus oleneb punktide enda täpsusest kui ka punktihedusest. Sellest hoolimata tuli modelleeritud koonust ikkagi nihutada plaaniliselt 25 cm, et koonuse tsenter asuks torni keskel. [23]

Sarnase meetodikaga tehti Lõuna-Koreas uurimistöo, [25] kus vähendati LIDAR ja aerofotode vaheliste andmete omavahelist erinevust suurusjärgust 0.5 m...2 m täpsuseni 5 cm. Uurimistöös kasutatud aerofotod ja LIDAR andmed pärinevad sama lennuki pealt ja uurimistöo põhiküsimus on kuidas suurendada kahe erineva andmestiku omavahelist sobivust. Välja töötatud meetod koosnes kolmest etapist: 1) geomeetriliste primitiivide tuvastamine, 2) erinevuste arvutamine ja 3) ortofotode väliste orientatsiooniparameetrite redigeerimine. Geomeetriliste primitiivide tuvastamine tähendab lihtsate geomeetriliste objektide (katused, sirged jooned) tuvastamine ja koordineerimine mõlemas andmestikus. Primitiivide kaudu saab arvutada fotode ja LIDAR andmestiku omavahelise nihke.

UAV ja TLS kooskasutamist on uuritud ühe Itaalia ajaloolise torni 3D mudeli loomisel [26]. Torni 3D mudeli loomisel kasutati laserskannerit Microgeo RIEGL VZ-400 ja UAV-d Microgeo AeroMax 600 koos 12 megapikselse (12 * 10⁶ pikslit) kaameraga Canon S100. Tasub märkimist, et tornist ei oleks saanud koostada täielikku punktipilve UAV-d kasutamata. Laserskaneerimine koosnes 8 jaamast, mis paigutati tornist 7–10 meetri kaugusele. UAV lend sooritati tugevate tuulepuhangute tõttu manuaalses režiimis, st et UAV-le ei seadistatud lennutrajektoori ette vaid UAV lennutrajektoori kontrolliti manuaalselt. Drooni kaugus torni fassaadist jäi vahemikku 5–6 meetrit.

UAV punktipilve täpsust kontrolliti võrreldes omavahel tähiste tegelikke koordinaate ja fotogrammeetria tarkvara poolt genereeritud tähiste koordinaate. Tähiste võrdlemine näitas, et vead jäid mõne millimeetri piiresse. Teiseks täpsuse analüüsiks oli TLS ja UAV punktipilvede omavaheline võrdlemine tarkvaras CloudCompare. Eelnevalt UAV ja TLS punktipilved registreeriti omavahel, st elimineeriti süstemaailised vead otsides punktipilvedes ühiseid punkte ja ühildati need omavahel. CloudCompare tarkvaras tehtud võrdluses leiti TLS ja UAV punktipilvede vahel suurimaks erinevuseks 6 cm, kuid suuremal osast tornist jäid vead alla 1 cm [26].

Üheks võimaluseks veel UAV mõõdistamiseks on UAV peale LIDARi paigaldamine. UAV ja LIDAR koostööd hoonete mõõdistamisel on uuritud Hispaanias Vigo ülikoolis [27]. Uurimistöös kasutati 8 rootortiivikuga drooni Okto XL, mis on võimeline lendama koos LIDAR mooduliga. UAV-le lisati LIDAR Hokuyo UTM-30LX, mis mõõdistab kuni 40 000 punkti sekundis, mõõteulatusega kuni 30 meetrit. Drooni lennutrajektoori andmeid saab GPS ja IMU andmete kooskasutamisel, mis võimaldavad plaanilistele koordinaatidele 2 m täpsust ja kõrgusele 3 m. Autorid toovad välja, et see täpsus ei ole hoonete modelleerimiseks piisav.

Tulemuste hindamiseks võrreldi UAV LIDAR punktipilve Faro 3D X330 laserskanneri poolt loodud punktipilvega. Hindamise meetodika nägi ette hoone parameetrite (laius, pikkus, maht jne) omavahelises võrdlemise. UAV punktipilve mahud olid võrreldes referentsmahuga 20–30 % suuremad. Parameetrite erinevused küündisid 1.8 meetrini. Autorid järeldasid, et suurimad vead esinevad parameetrites, mis olid paralleelsed UAV lennusuunaga. [27]

Käesolevas magistristöös uuritakse samuti ALS andmete kasutamist hoone katuse mõõdistamiseks. Tallinna Tehnikaülikooli veetorni 3D mudeli loomisel [23] kasutati tol hetkel kättesaadavaid ALS andmeid, mille punktihedus on praeguste standardite kohaselt üsna väike (2.3 p/m^2). Magistristöo autorile olid kättesaadaval uuemad ALS andmed, mille punktihedus oli 18 p/m^2 (vt jaotis 2.2.2). Kõrgem punktihedus võimaldab modelleerida keerukamaid detaile ning rakendada alternatiivseid meetodeid plaaniliste nihete eemaldamiseks, näiteks analoogselt Lõuna-Koreas tehtud uurimistööga [25].

UAV ja TLS andmestike omavaheliste süstemaatiliste vigade vältimiseks kasutatakse ühiseid alusvõrgu punkte, mitte hilisemat registreerimist. See tähendab, et samadele alusvõrgu punktidele asetatakse nii TLS kui ka UAV tähised. Varasemates uurimistöodes on kasutatud peamiselt ainult ümbritseva trajektooriga (või analoogset) lennurežiimi. Käesolevas magistristöös kasutatakse lisaks ümbritseva trajektooriga lennurežiimile ka laiaulatuslikumat ristuvate trajektooriga lennurežiimi, mis võimaldab fotodele jäädvustada ka UAV tähiseid.

4. ÜLEVAADE MAGISTRITÖÖS KASUTATUD MÕÕTESEADMETEST

Käesolevas peatükis antakse ülevaade magistritöös kasutatud instrumentidest. Mõõdistusseadmete komplekti kuulusid laserskanner Leica C10, UAV DJI Phantom 4 pro, GNSS seade Trimble R8 ja elektrontahhümeeter Trimble S6. Laserskanner, GNSS seade ja elektrontahhümeeter kuuluvad Tallinna Tehnikaülikoolile ning UAV DJI Phantom 4 pro ettevõttele Geodeesia24 OÜ.

Järgnevates jaotistes tuuakse välja välitööde ajal kasutatud mõõteseadmete olulisemad täpsuse näitajad. Lisaks sellele käsitletakse mõõdistuse ajal kasutatud tähiseid. Välitööde ajal kasutati kahte erinevat tüüpi tähiseid, milleks on TLS ja UAV mõõdistamisel kasutatud tähised.

4.1 Laserskanner Leica C10

Leica C10 on laserimpulss-skanner, mis on võimeline mõõdistama kuni 50 000 punkti sekundis. Mõõteulatus on instrumendil kuni 300 meetrit. Laserskanner on varustatud kaheteljelise kompensatoriga ning ka sisseehitatud kaameraga. Olulisemad täpsuse näitajad on: [28]

- Positsiooni mõõtmise täpsus 6 mm;
- Kauguse mõõtmise täpsus 4 mm;
- Horisontaal- ja vertikaalnurga määramise täpsus 12'';
- Kompensaatori tööulatus 5';
- Kompensaatori täpsus 1.5''.

Positsiooni ja kauguse mõõtmise täpsus on esitatud 1σ (tõenäosusega 68%) usaldusväärsusega.



Joonis 4.1 Leica C10 laserskanner. Taustal Tallinna Lennusadam, fotol on nähtaval ka hoone nurgatorn, mille horisontaalsele katusele sai asetada laserskanneri

4.2 UAV DJI Phantom 4 pro

Phantom 4 pro (Joonis 4.2) on Hiina firma DJI (Dà-Jiāng Innovations) loodud droon. Droon on sobilik kasutamiseks nii professionaalidele kui ka amatööridele. Phantom 4 on nelikrootoriga droon, mille kõik 4 tiiba asetsevad sama korpuse küljes - see teeb Phantom seeria kompaktsuks ja muudab transportimise mugavamaks. Ilma tiibadeta on drooni diagonaali pikkuseks 350 mm [29]



Joonis 4.2 Mõõdistustel kasutatud DJI Phantom 4 pro

Phantom 4 pro on maksimaalne lennuaeg 30 minutit. Droonil on 5870 mAh aku, mis kaalub 468 g, samas kui droon tervikuna kaalub 1388 g. Akut võib laadida temperatuurivahemikus 5...40 °C. [29] Temperatuuri langedes 0 °C ligi, lüheneb lennuaeg tunduvalt ja miinuskraadidega lennates on risk UAV kahjustamiseks.

UAV põhja küljes on gimbaliga¹ kaamera. Kaamera sensor on 1-tolline (2,54 cm), mis saavutab 20 miljoni piksliga foto. Kaamera fookuskaugus on 8,8 mm. Gimbal kontrollib kaamera kolme põhilist orientatsiooniparameetrit (piki- ja põikikallet ja pöördenurka). [29]

Magistritöös kasutatud drooni lennujuhtimiseks kasutati DJI juhtpulti ja mobiiltelefoni Huawei P10 Lite (vt Joonis 4.3) Telefon töötab Androidi 7.0 operatsioonisüsteemil. Mobiiltelefoni oli installeeritud kaks aplikaatsiooni UAV-ga töötamiseks. Esimene nendest on Ctrl + DJI, mis ühendab drooni mobiiltelefoniga ning teine Pix4DCapture, mis on lennuplaneerimistarkvara.



Joonis 4.3 DJI Phantom 4 pro juhtpult koos lennuplaneerimise tarkvara sisalduva mobiiltelefoniga Huawei P10 Lite

Droonimöödistuse üheks olulisemaks täpsuse näitajaks on GSD väärtus teatud lennukõrgusel. Tabelisse (Tabel 4.1) on koondatud DJI Phantom 4 pro GSD väärtused lennukõrgustel 10 kuni 50 m. GSD väärtused arvutati kasutades lennujuhtimistarkvara Pix4Dcapture.

Tabel 4.1 DJI Phantom 4 pro GSD väärtused lennukõrgustel 10 – 50 m

Lennukõrgus (m)	GSD (cm/pix)
10	0.27
20	0.55
30	0.82
40	1.09
50	1.36

4.3 Elektrontahhümeeter Trimble S6 ja GNSS seade Trimble R8

Magistritöös kasutati alusvõrgu mõõdistamisel elektrontahhümeetrit Trimble S6 ja GNSS seadet Trimble R8. Trimble S6-e komplekti kuulus veel mini prisma. GNSS seadmega mõõdistati Eesti GNSS püsijaamade võrgus ESTPOS.

Elektrontahhümeetri Trimble S6 peamised täpsuse näitajad on: [30]

- Joone mõõtmistäpsus prismale 2 mm + 2ppm;
- Nurga määramistäpsus 3'';
- Kaheteljeline kompensator, täpsusega 0.5'' ja tööpiirkonnaga

GNSS seadmega mõõtes kasutati RTK (*Real Time Kinematic*) mõõtesüsteemi. Mõõdistusalale lähim baasjaam oli Mustamäe tee püsijaam, mis jäi mõõdistusalast umbes 4 kilomeetri kaugusele.

4.4 Kasutatud tähised

Laserskaneerimisel kasutati tähistena *twin target* (tõlgituna: kaksiktähis) tüüpi tähist. Antud tähise tüüp koosneb kahest võrdse pikkusega saua osast ja tähisest endast. Saua osasid on võimalik omavahel keermega ühendada (vt Joonis 4.4). Saua või tähise all on täpselt tsentreerimiseks mõeldud teravik. Mitmeosaline sau võimaldab paigaldada tähist erinevatele kõrgustele.



Joonis 4.4 Magistritöös kasutatud tähised. A pildil on kujutatud laserskaneerimise tähis tsentreerituna teravikuga asfaltinaela peale. Pildil B on kujutatud *twin target*it, mida hoiab loodis toed. UAV mõõdistamiseks kasutatud tähis, mõõtmega 1 * 1 m, on välja toodud pildil C

UAV fotogramm-meetria tarkvarades nimetatakse UAV tähiseid lühidalt GCP (*Ground Control Point*) ehk maapealsed kontrollpunktid. Kasutatakse ka terminit *marker* ehk lihtsalt tähis.

UAV tähistena kasutati 1 m * 1m lamineeritud paberlehti. Paberlehed on must-valged, mille tšenter on piltide peal hästi tunnetatav. Kasutatud paberlehtede miinuseks on asjaolu, et tähise tšentris ja nurkades puudub auk. Tšentris asuv auk aitaks paberlehte tšentreerida mõnele tasapinnalisele geodeetilisele punktile ning nurkades olevad augud võimaldaksid tähise asukoha fikseerida pinnasel (eeldusel, et tähis asub pehmel pinnasel).

5. VÄLITÖÖ KIRJELDUS

Magistritöö raames läbi viidud välitöö koosnes kahest etapist. Esimene etapp oli alusvõrgu loomine ja TLS mõõdistamine. Teine etapp oli UAV mõõdistamine. Esimene etapp toimus 23. novembril 2018. aastal ja etapil osalesid peale magistritöö koostaja veel töö autori kursusekaaslased Kevin Reimann ja Sander Varbla. Juhendavas rollis olid Artu Ellmann ja Kalev Julge. Teisel etapil, 2. detsembril toimunud droonimõõdistusel osales magistritöö koostaja üksinda.

Järgnevates jaotistes on kirjeldatud katseobjekti, alusvõrgu mõõdistamist ning esimesel ja teisel etapil läbiviidud mõõdistamisi. Katseobjekti kirjelduses räägitakse lühidalt Tallinna Lennusadama hoonest ja konstruktsioonist. UAV ja TLS mõõdistuse puhul antakse ülevaade kasutatud mõõdistusparameetritest.

5.1 Tallinna Lennusadam

Tallinna Lennusadama angaari katus (vt Joonis 5.1) on üks esimesi raudbetoonkoorikuid maailmas. Angaar on projekteeritud ja ehitatud Taani firma Christiani ja Nielsen poolt. Angaari ehitusaastaks võib pidada 1917. aastat kui augustikuus lõpetati koorikute betoneerimistööd. Muutused maailma poliitilisel maastikul ei jätnud ka Lennusadamat mõjutamata ja ehitustööd katkestati 1917. aasta oktoobris ning jäidki ettenähtud ulatusel lõpetamata. Angaarid läbisid küll 1938. aastal renoveerimise, kuid jäid pärast seda oluliste hooldustöödeta mitmeks aastakümneks. [31]

Enne 2010. aasta renoveerimistöid leiti [32], et angaari tehniline olukord oli lähenemas kriitilisse punkti, millest tagasiteed hoone taastamisele poleks enam olnud. Katusele avaldas suurimat ohtu betoonisese sarruse roostetamine, mis tekitas katuse konstruktsiooni hinnanguliselt ühtekokku 3,6 km pragusid. Katuse lagunemise peamiseks põhjuseks loeti kaitsva katusekatte puudumist. Ulatuslikud kahjud ei puudutanud ainult katust, vaid ka kõik muud hoone osad vajasisid renoveerimist – postid, diagonaalid ja tõmbid.

Angaari renoveerimisprojekt koostati Tallinna Tehnikaülikooli professor Karl Õiger ja doktor Heiki Ontoni poolt. Ehitushanke võitis Nordecon Ehitus. Renoveerimistöode käigus täideti praod injekteerimismeetodil – kõigepealt puhastati praod ja seejärel täideti kõrgsurvel spetsiaalse epoksüvaiguga. [32]



Joonis 5.1 Vaade Tallinna Lennusadamale loode suunast. Foto tehtud UAV DJI Phantom 4 pro-ga välitööde käigus

Magistritöö koostamise ajal olid Tallinna Lennusadama katusekatte peale tekkinud deformatsioonid. Targo Kalamehe poolt koostatud Lennusadama angaari konstruktsioonide tehnilise seisukorra auditis (versioon 09.05.2019, töö: A – 1 - 2019) on välja toodud katusekatte deformatsioonide põhjused. Deformatsioonide põhjustajateks on linnud, kes nokivad katusekattesse auke, mille tulemusena soojustus märgub. Soojustuseks on uretaanvaht, mis ei ole mõeldud hüdroisolatsiooniks. Märgunud uretaanvahu kihid tulevad teineteisest lahti ja tekitavad katusekattesse muhke. Nende muhkude tuvastamine UAV mõõdistusega uurimine oli antud magistritöö üheks eesmärgiks.

Angaaride katusekonstruktsiooni põhiosaks on 8 postile toetatud 3 kaksikkõverat lamedat koorikut mõõtmetega 36,4 * 36,4 m. Kooriku paksus on ülaosas 8 cm ja nurkades 14 cm. Kooriku kõverusnoole pikkuseks on 12 m. Kooriku tipus paikneb valguslatern, mille läbimõõt on u 10 m. Ääreliikmeteks on tõmbevööga kaared, mis osaliselt langevad kokku külglöövide silinderkoorikute ääreliikmetega [31]

UAV lendude kõrguste hindamiseks mõõdistatava objekti suhtes on oluline määrata objekti maksimaalsed kõrgused. Maksimaalne kõrgus katuse kooriku tipus on umbes 21 m, valguslaterna tipp 25 m. Katuse serva minimaalne kõrgus ehk ühtlasi ka nurgatornide kõrgus on umbes 10 m.

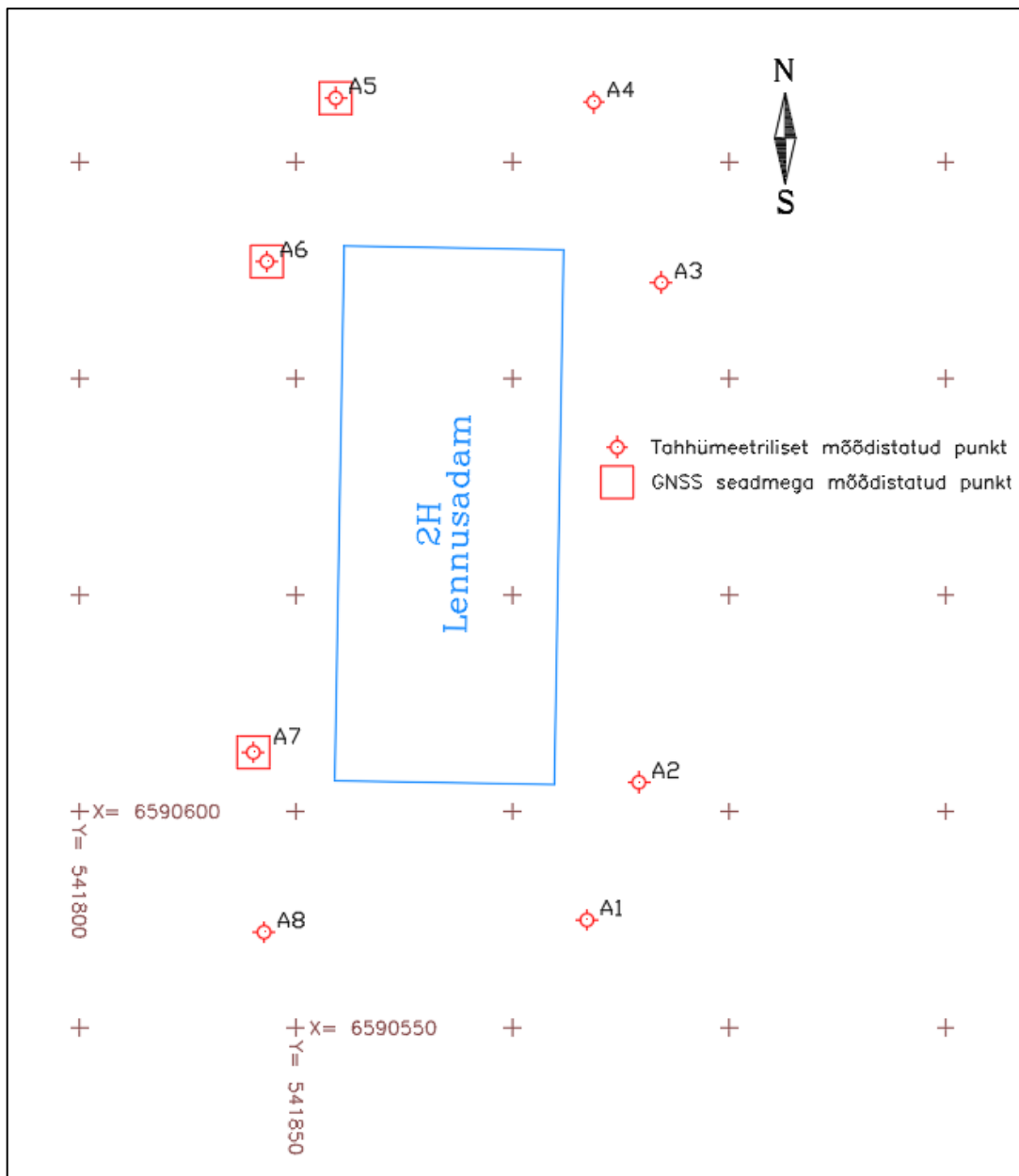
Nurgatornidest (vt ka Joonis 4.1) oli ligipääs Tallinna Lennusadama katusele. Nurgatornidest sai ohutult TLS mõõdistusi läbi viia.

5.2 Mõõdistuste alusvõrk

Alusvõrgu mõõdistamiseks kasutati elektrontahhümeetrit Trimble S6 ja GNSS seadet Trimble R8. GNSS seadmega määrati kolme punkti koordinaadid kasutades kolmekordset initsialiseerimist ning 60 mõõteepohhi. Tahhümeetri orienteerimiseks kasutati vastulõike meetodil kolme alusvõrgu punkti. Vastulõike meetodil määrati ka koordinaadid ülejäänud mõõdistusvõrgu punktidele. Kokku rajati 8 mõõdistusvõrgu punkti.

Alusvõrgu punktid kindlustati looduses väikseid asfaltnaelu kasutades (Joonis 5.2). Asfaldinaelad löödi tänavakivide vuukidesse. Asukoht markeeriti aerosoolvärvidega. Tahhümeetrilisel mõõdistamisel kasutati mini prismaid ning punktide koordinaadid määrati täisvõttega. Prismale suunamisel kasutati automaatse lukustuse *autolock* funktsiooni.

Alusvõrgu eesmärgiks oli TLS ja UAV mõõdistuse koordineerimine samasse koordinaatsüsteemi. Alusvõrgu punktidele asetati TLS ja UAV tähised. UAV ja TLS mõõdistusel sama alusvõrgu kasutamine elimineeris vajaduse hilisemalt andmestikke omavahel registreerida.



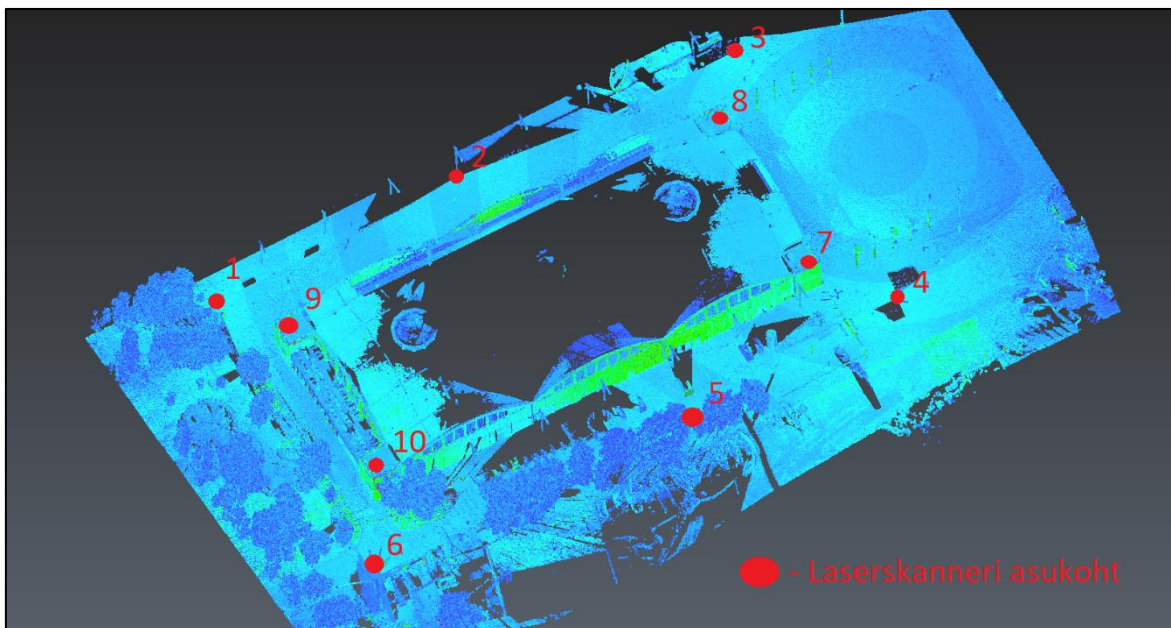
Joonis 5.2 Alusvõrgu punktide asetus Tallinna Lennusadama suhtes. Tähistega A1...A8 on märgitud alusvõrgu punktid

Alusvõrgu punktise asetus valiti nõnda, et igast TLS jaamast oleks nähtaval vähemalt 3 alusvõrgu punkti.

5.3 Laserskaneerimine

Laserskaneerimine koosnes kokku 10 jaamast, millest 6 olid hoone fassaadi mõõdistamiseks ning 4 skaneerimist teostati Lennusadama nurgatornide katusele. Terve katuse laserskaneerimine oleks

nõudnud kompleksete ohutusnõute täitmist. Katuse kuplid olid järsud ja katusekate vetruv, seega instrumendi ohutu ülesseadmine katusel ei olnud võimalik.



Joonis 5.3 Laserskaneerimisel kasutatud TLS jaamade asukohad. Märka, et jaamad 7...10 on nurgatornide katustel

Igas skaneerimisjaamas skaneeriti esmalt kolm tähist, mis paigutati alusvõrgu lähimatele punktidele (vt Joonis 5.2). Hoone fassaadi skaneerides ei skaneeritud aja kokkuhoidmiseks kogu skanneri horisontaalringi, vaid hoone poole suunatud sektor. Nurgatornides mõõdistati igaks-juhaks terve täisring 360°. Laserskaneerimisel valiti skaneerimise resolutsiooniks 3*3 cm 40 meetri peal. Skaneerimistihedus valiti arvestusega, et skaneerimisaeg ei ületaks ühes jaamas 15 min.

Punktipilvede omavahelise registreerimise aluseks olid külgnevate jaamade ühised tiheskaneeeritud tähised. Nende koordinaatide kaudu sai laserskanneriga mõõdistatud punktipilvi omavahel ühendada ja seejärel transformeerida riiklikku koordinaatsüsteemi.

5.4 UAV mõõdistamine

UAV mõõdistamise esimeseks etapiks oli tähiste paigaldamine. Tähised paigaldati kõikidele mõõdistusvõrgu punktidele. Tähistena kasutati 1 m * 1 m paberlehti, mille puhul ilmnes mõõdistuse käigus üks oluline puudus: nimelt paberlehed on kergesti tuulest mõjutatavad ja võivad mõõdistamise ajal nihkuda. Selle vältimiseks asetati paberlehtede äärtesse raskusi, mis aitasid oma kaaluga tuule mõjutusi vältida.

Katseobjektile tehti kokku 3 erinevat lendu (lennurežiimide kirjeldus on välja toodud jaotises 1.2).

- 1) Ristuvate trajektooridega lend, lennukõrgus 40 m. Edaspidi nimetatakse **RT, 40 m**.
Vahemaa katusega oli vahemikus 15–30 m;
- 2) Ristuvate trajektooridega lend, lennukõrgus 50 m. Edaspidi nimetatakse **RT, 50 m**.
Vahemaa katusega vahemikus 25 - 40 m;
- 3) Ümbritsev lend, lennukõrgus 30 m. Edaspidi nimetatakse **Ümbritsev**

Lendude parameetrid on koondatud järgnevasse tabelisse (Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Erinevate lennurežiimide parameetrid

Lennu nimetus	RT, 40 m	RT, 50 m	Ümbritsev
Piltide arv	189	184	37
Lennuala	146 * 68 m	213 * 99 m	100 * 176 m / ringi ümberrõõm 439 m
Lennuaeg	9 min 34 s	16 min 51 s ¹	2 min 27 s
Ülekattuvus	72 %	72 %	-
Kaamera vaatenurk	70 °	70 °	10 °

1. Pikk lennuaeg oli tingitud liiga ulatuslikust lennuala valikust

Kasutataval lennutarkvaral Pix4DCapture (Androidi operatsioonisüsteemi versioon) oli ainsaks seadistatavaks kaamera parameetriks kaamera vaatenurk (vt ka Joonis 1.4) . Lennukiiruseks kõikide lendude puhul oli 10 m/s. Seda kasutati sellepärast, et lennuaeg oli droonil piiratud ja selle lennukiiruse juures oli võimalik kogu objekt mõõdistada ettenähtud lendudega. Tasub mainimist, et madalate välitemperatuuride ja tugevate meretuulte tõttu oli lennuaeg ühe aku puhul 30 min asemel maksimaalselt 20 min. Suhteliselt kiirest lennukiirusest hoolimata oli häguste piltide osakaal väga väike.

6. LÄHTEANDMETE TÖÖTLEMINE

Lähteandmete töötlemise alla kuulub UAV mõõdistusest punktipilve loomine ja terrestrilise laserskaneerimise punktipilvede registreerimine. Aerofotode töötlemisel punktipilveks antakse põhjalik ülevaade tööprotsessist programmiga Pix4DMapper. TLS punktipilvede sidumisel antakse ülevaade kasutatud metoodikast programmiga Leica Cyclone.

6.1 Aerofotode töötlemine punktipilveks

Aerofotode töötlemiseks punktipilveks on saadaval mitmeid erinevaid tarkvaralahendusi, näiteks Agisoft Photoscan ja Metashape, Autodeski Recap Photo, Bentley ContextCapture ja PiX4D. Antud magistritöö raames kasutati tarkvara Pix4D.

Tallinna Lennusadama punktipilv loodi kolme erineva lennu piltide omavahelisel kombineerimisel. Erinevate lendude kombineerimisel tuli teha valik, mille puhul lähtuti põhimõttest, et kvaliteetse punktipilve koostamiseks on vajalik vähemalt kahe lennu andmete kooskasutamine (vt jaotis 1.4.5). Kombinatsioonid olid järgnevad.

- 1) Ainult RT, 50 m fotod
- 2) Ümbritsev ja RT, 50 m fotod
- 3) Ümbritsev ja RT, 40 m fotod

Vähemalt kahe lennu andmete kooskasutamise tingimust täidavad lennud numeratsiooniga 2) ja 3). Ainult ühe lennu fotode kasutamine valiti, et leida kinnitust kahe lennu kasutamise nõudele. Samuti ei pruugi ümbritsev lennurežiim olla vanema generatsiooni droonidel saadaval. Teise ja kolmanda lennu valik andmetöötlusesse annab võimaluse uurida lennukõrguse mõju punktipilve kvaliteedile.

6.1.1 PiX4DMapper

PiX4D Mapper on Šveitsi firma PiX4D loodud tarkvara, mis võimaldab luua 3D mudeleid ja kaarte. PiX4D tarkvaralahendustesse kuuluvad veel Pix4Dfields, Pix4Dmodel, Pix4DBIM ja Pix4Dcapture.

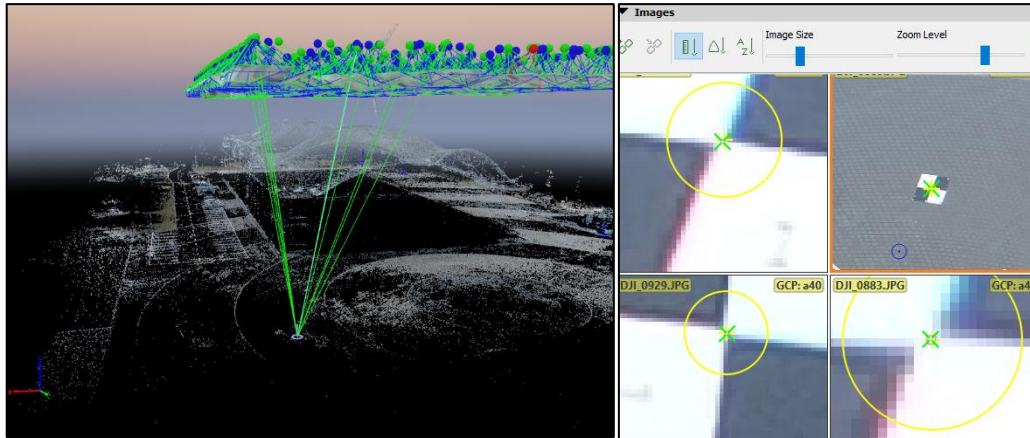
Andmetötluse Pix4DMapperis võib jagada järgmisteks etappideks:

- Fotode importimine tarkvarasse;
- Koordinaatsüsteemide seadistamine;
- Esialgne fotode töötlus;
- Tähiste manuaalne markeerimine fotodel;
- Punktipilve genereerimine.

Fotode importimisel on oluline kontrollida fotodes sisalduva metaandmete olemasolu ja õigsust. Metaandmetes on salvestatud fotode koordinaadid WGS84 süsteemis ja andmed drooni piki- ja pöikikalde ja pöördenurga kohta. WGS84 koordinaadid on salvestatud fotode metaandmetesse drooni sisemise GNSS seadme poolt. Koordinaatide täpsus on hinnanguliselt 1–2 m. Lisaks sellele kaasnevad andmed kasutatud kaamera kohta. Nendeks on näiteks foto suurus pikslites, fookuskaugus ja andmed radiaalsete/tangentsiaalsete moonutuste kohta.

Pix4DMapper genereerib fotogrammeetrilise punktipilve maapealsete kontrollpunktidega samas süsteemis (L-EST 97 ja BK77). Erinevused geoidi ja ellipsoidi kõrguste vahel ei tekita tarkvarale andmetötluses probleeme – programm annab maapealsetele kontrollpunktidele suurema kaalu kui UAV aerofotode koordinaatidele.

Esialgne fototöötlus on fotodelt ühiste punktide (*tie points*) leidmine ja fotode omavahelise asetsemise kindlaks tegemine. Peale seda etappi on võimalik manuaalselt markeerida maapealsed tähised fotode peal (Joonis 6.1).



Joonis 6.1 Maapealsete tähiste manuaalne markeerimine fotogramm-meetria tarkvaras Pix4D. Vasakpoolsel pildil on kujutatud taustana ühised punktid (*tie points*), ülaosas on välja toodud UAV fotode asukohad ning roheliste kiirtena on kujutatud maapealse kontrollpunkti ja aerofotol asuva kontrollpunkti vahelised vektorid. Paremal on kujutatud UAV tähise tsentri määramine tarkvaras erinevatel suurendusastmetel

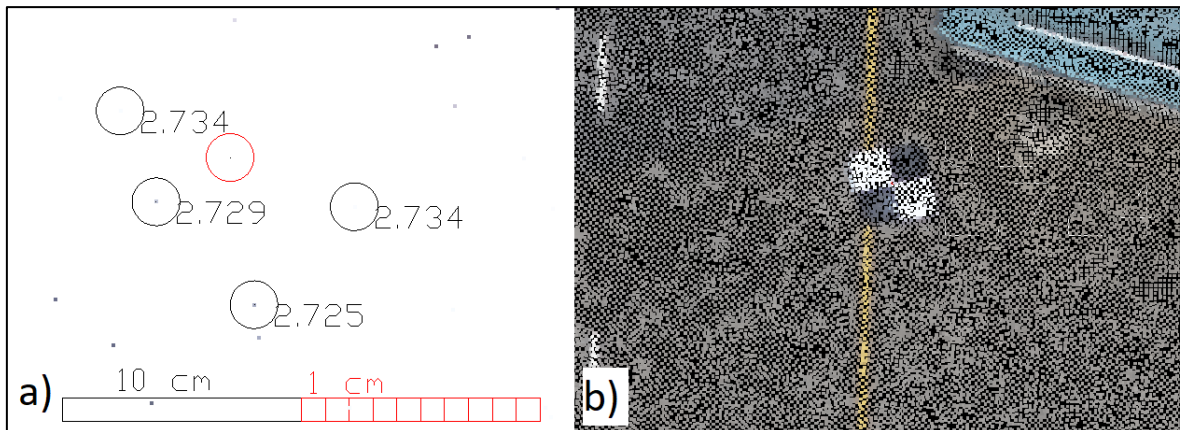
Peale maapealsete tähiste markeerimist aerofotodel tuleb fotode töötlust korrata (*Rematch and Optimize*), sest eelnevad ühised punktid ja aerofotode asetus olid aerofotode koordinaatsüsteemi ehk WGS84 põhjal. Töötluse kordamisel saadakse aerofotode asetus ja ühiste punktide asend maapealsete kontrollpunktide suhtes.

Viimaseks etapiks on punktipilve genereerimine (*Point Cloud Densification*), mis on kõige aeganõudvam protsess. Punktipilve saab genereerida kolmel tihedusastmel: madal, optimaalne ja kõrge. Antud magistritöös on kasutatud optimaalset punktutihedust.

Eelnevalt kirjeldatud protsessi korrati kõigi kolme lennu andmete kombinatsiooniga (vt jaotis 6.1).

6.1.2 UAV punktipilvede esialgne hindamine

UAV punktipilvede puhul oli esmaseks kvaliteedi kontrolliks kõrguste kontrollimine UAV tähiste juures. UAV tähiseid kontrolliti, et veenduda aerofotogramm-meetrilise tarkvara poolt genereeritud punktipilve õigsuses. Tähistel kontrolliti kõrgusi UAV punktipilves ning võrreldi neid alusvõrgu punktide kõrustega. Kõrguste kontrollimiseks toodi punktipilved AutoCAD keskkonda. Lisaks toodi AutoCADi alusvõrgu punktid, mis aitasid suurtel suurendusastmetel tuvastada tähise tsentrit. (Joonis 6.2)



Joonis 6.2 UAV mõõdistamisel kasutatud tähis A2 UAV punktipilves (b) ja suurendatud tähise tseenter (a). Vasakpoolisel pildil on punase ringiga tähistatud tähise tseenter, mustade ringidega on tähistatud välja toodud kõrguste asukohad. Punktide omavahelisest kaugusest annab aimu joonmõõtkava

Punktipilvest kõrguste välja toomiseks on mitu võimalust. Üheks võimaluseks on kasutada AutoCADi käsklust *ID*, mis kuvab 3D *snapi*ga koostöös punkti X-, Y- ja Z- koordinaadid. Antud magistritöö käigus on kasutatud ettevõttes Geodeesia24 OÜ välja töötatud programmi punktide kõrguste visualiseerimiseks.

Iga tähise kohal valiti 4 lähimat punktipilve punkti kontrollpunkti tsentrile. Välja toodud nelja ümbritseva punkti kõrgustest arvutati keskmine ning selle hälve õigest tulemusest. Õigeks tulemuseks võeti alusvõrgu mõõdistamisel saadud punktide koordinaadid. Tähiste kõrguseid kontrolliti seitsmel alusvõrgu punktil. Algselt kokku oli küll kaheksa alusvõrgu punkti, kuid punktil A8 oli UAV tähis ilmselt tuulega nihkunud ja seda enam edaspidistes andmetööstlustes ei kasutatud. Arvutatud KRV-d jäid 15 mm piiresse (Tabel 6.1).

Tabel 6.1 UAV tähiste kõrgusliku kontrolli statistilised näitajad. Ühikud millimeetrites, kontrollpunktide arv $n = 28$, 7 kontrollpunkti igal 4 tulemust

	RT, 50 m ja ümbritsev	RT 40 m ja ümbritsev	RT, 50 m
Min	-4	0	0
Max	13	23	16
keskmine	4.0	12.1	8.7
STD	6.9	7.9	5.7
KRV	7.5	14.2	10.2

Min näitab minimaalset hälvet terves kogumikus max maksimaalset, KRV on keskmine ruuthälve ning STD on standardhälve, mis on arvutatud hälvete keskvaertuse baasil (vt jaotis 7.1). Need tulemused annavad andmetööstlus programmile usaldusväarsuse ja esialgse kvaliteedi hinnangu punktipilvele.

Lisaks tähiste kontrollimisele on otstarbekas ka tekkinud punktipilve vaadelda ja otsida potentsiaalseid murekohti (Joonis 6.3). Punktipilves esinesid mõningad üksikud tühimikud. Katuse osa oli kujutatud terviklikuna. Madalama lennukõrgusega lennu kombinatsiooni (RT, 40 ja ümbritsev) puhul oli märgata ka katusel tühimikke. Fassaadi teravad jooned olid kujutatud punktipilves ümaralt. Tekkinud punktipilvedes jääb silma ka kohati kõrge müratase.



Joonis 6.3 Tallinna Lennusadamast koostatud UAV punktipilv

Tekkinud punktipilvedes oli umbes 6.1 miljonit punkti hoone välisgeomeetria pinnal. Pix4DMapper annab peale punktipilve genereerimist ka keskmised GSD väärtused (Tabel 6.2).

Tabel 6.2 Keskmised GSD väärtused erinevatel lennukombinatsioonidel

	RT, 50 m	RT, 40 m ja ümbritsev	RT, 50 m ja ümbritsev
Keskmine GSD (cm/pix)	1.57	1.03	1.58

RT, 40 m ja ümbritseval on küll parim GSD väärtus, kuid liiga madala lennukõrguse tõttu esinesid punktipilves tühimikud.

6.2 Terrestilise laserskaneerimise punktipilvede registreerimine

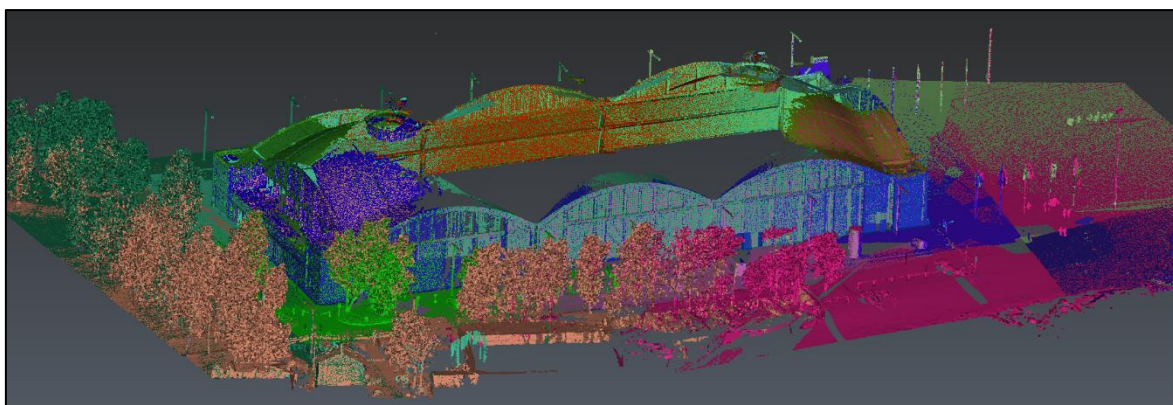
Terrestilise laserskaneerimise punktipilvede omavahelisel registreerimisel kasutati tähistega registreerimismeetodit. Kasutatav tarkvara oli Leica Geosystems'i poolt loodud tarkvara Cyclone. Leica Cyclone'is saab lisaks punktipilvede registreerimisele ka kasutada erinevaid moduleid, mis

võimaldavad näiteks punktipilvest töödelda 3D objekte, eraldada punktipilvest üksikute punktide koordinaate, importida teiste tootjate skaneerimisandmeid jne [22].

Punktipilvede registreerimine programmis Leica Cyclone algab andmete importimisest. Programmi imporditakse eraldi seisvad skaneerimisjaamad ja tähiste koordinaadid. Tähistega registreerimiseks luuakse programmi lisäüksus *Registration*. Selle lisäüksuse alla imporditakse jaamad, mida soovitakse omavahel registreerida. Tähistega registreerimine on automaatne protsess ja selle tegemiseks kasutatakse programmi-sisest käsklust *Auto-Add Constraints (Target ID only)*. Käsklus tuvastab jaamade vahel ühised tähisted ja registreerib skaneerimisjaamad ühtseks punktipilveks (Joonis 6.4) tähiste koordinaatide alusel. TLS tähiste asukohad olid samad, mis UAV mõõdistusel kasutatud tähiste asukohad.

Tarkvara arvutab igas jaamas kasutatud tähistel jääkvead, mis kuvatakse pärast registreerimist. See annab võimaluse tulemust analüüsida ja mittedobilikud tähisted välja lülitada. Jääkvead ei tohiks olla suuremad kui ± 5 mm [22].

Leica Cyclone võimaldab ka punktipilvi puhastada müra ja hõrendada. Neid protsesse on mõistlik teha alles peale punktipilvede registreerimist [22]. Antud magistritöös registreeritud punktipilvi ei hõrendatud ja müra eemaldamiseks kasutati tarkvaras 3DReshaper vastavaid algoritme. TLS punktipilvel oli umbes 16.6 miljonit punkti Tallinna Lennusadama välisgeomeetria pinnal. TLS punktipilv oli referentsandmestikuks UAV ja ALS andmete valideerimisel.



Joonis 6.4 Registreeritud punktipilv. Eri värvidega on tähistatud eri TLS jaamadest skaneeritud punktipilve osad

7. TULEMUSTE EVALVEERIMINE

Enne tulemuste evalveerimist antakse kokkuvõtlik ülevaade kogutud andmestikest. Referentsandmeteks ehk andmed, mis loetakse teiste meetoditega kogutud andmete suhtes veatuks, on võetud laserskanneriga Leica C10 mõõdistatud punktipilv. UAV Phantom 4 pro lendudest on tehtud 3 erinevat andmekombinatsiooni, milleks on (vt jaotis 5.4):

- 1) Ristuvate trajektooriga lend, lennukõrgus 50 m. **(RT, 50 m)**
- 2) Ristuvate trajektooriga lend, lennukõrgus 50 m ja ümbritsev, lennukõrgus 30 m **(RT, 50 m ja ümbritsev)**
- 3) Ristuvate trajektooriga lend, lennukõrgus 40 m ja ümbritsev, lennukõrgus 30 m **(RT, 40 m ja ümbritsev)**

Lisaks neile võrreldakse ka Maa-ameti 2018. aasta kevadlennu ALS andmestikku, et hinnata andmestiku sobivust hoone katuse modelleerimiseks. Järgnevates jaotistes antakse ülevaade, kuidas punktipilve kvaliteeti hinnata ja seejärel esitatakse nende hindamismeetodite tulemused. Lõpuks uuritakse lennukõrguse mõju tulemustele ja uuritakse meetodeid, kuidas hinnata katusekatte deformatsioone UAV mõõdistuse tulemusena saadud punktipilvega. Referentsandmeteks oli TLS punktipilv.

7.1 Punktipilve kvaliteedinäitajad

Punktipilve kvaliteeti referentspinna suhtes saab hinnata kolmel põhilisel meetodil [33]:

- 1) Visuaalne hindamine – subjektiivne kahe andmestiku omavaheline võrdlemine, mis aitab tuvastada suuremaid hälbeid või jämedaid eksimusi. Visuaalne hindamine ei paku kvantitatiivset hinnangut ehk arvulisi väärtusi kui palju üks pind erineb teisest;
- 2) Detailide mõõtmete võrdlemine – referentsandmestikust võetud geomeetrilise mõõdu võrdlemine võrreldava andmestikuga. Kontrollmõõtude tegemiseks kasutatakse ka mõõdulinti või kaugusmõõturit. Geomeetristeks mõõtudeks võivad olla näiteks akna gabariidid, seinte omavaheline kaugus ja lae kõrgus. See meetod võimaldab tuvastada hälbeid, mis võivad jääda muude meetoditega märkamatuks, näiteks punktipilve mõõtkava vead – punktipilv on „välja venitatud“ või „kokku surutud“;

- 3) *Deviation analysis* ehk hälvete analüüs. (Autori soovituslik eestikeelne termin oleks Hälbemudel). Hälbemudel saavutatakse kui ühest terviklikust andmestikust lahutatakse teine. Võrreldavad andmestikud võivad olla punktipilved, *meshid* või juba modelleeritud mudelid. Hälbemudel koosneb tavaliselt koloriseeritud kahe mudeli või punktipilve erinevustest. Enim kasutatud meetod erinevuste arvutamiseks on kauguste hindamine kahel lähimal punktil.

Antud magistritöös kasutatakse punktipilve kvaliteedi hindamiseks kolme eelkirjeldatud meetodit ning ühte magistritöö autori poolt välja pakutud meetodikat. Selleks on punktipilve paksuste võrdlemine hoone fassaadi pinnal.

Järgnevates jaotistest kasutatakse tulemuste evalveerimiseks järgmisi statistilisi näitajaid: minimaalne ehk väikseim tulemus (**Min**), maksimaalne ehk suurim tulemus (**Max**), aritmeetiline keskmine (edaspidi **keskmine**), standardhälve (**STD**) ja keskmine ruutviga (**KRV**).

KRV on standardhälbe punkthinnang, mis leitakse valemiga (7-1) [34]

$$KRV^2 = \frac{\sum_1^n v^2}{n}, \quad (7-1)$$

kus v – tõeline viga, mm;

n – erinevuste arv

Standardhälve on vahemikhinnang, mis kirjeldab mõõtmistäpsust, leitakse valemiga (7-2) [34]

$$STD^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad (7-2)$$

kus x_i – üksik hälve, mm;

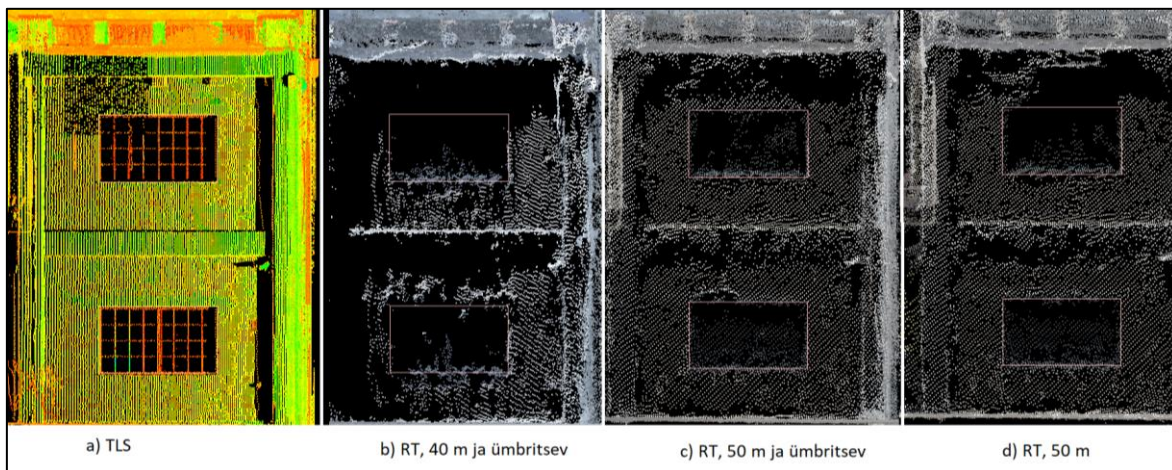
\bar{x} – hälvete aritmeetiline keskmine, mm;

n – hälvete arv.

KRV erinevus STD-st seisneb asjaolus, et KRV arvutamiseks kasutatakse tõelisi vigu ja STD arvutamiseks kasutatakse mõõdetud väärtuse hälvet keskvärtusest. [34] Käesoleva magistritöö raames tähendab see, et KRV arvutatakse referentsandmestiku ehk TLS punktipilve suhtes. STD kirjeldab andmestikke eraldi ja ei sõltu referentsandmestikust.

7.1.1 Punktipilve hindamine visuaalselt

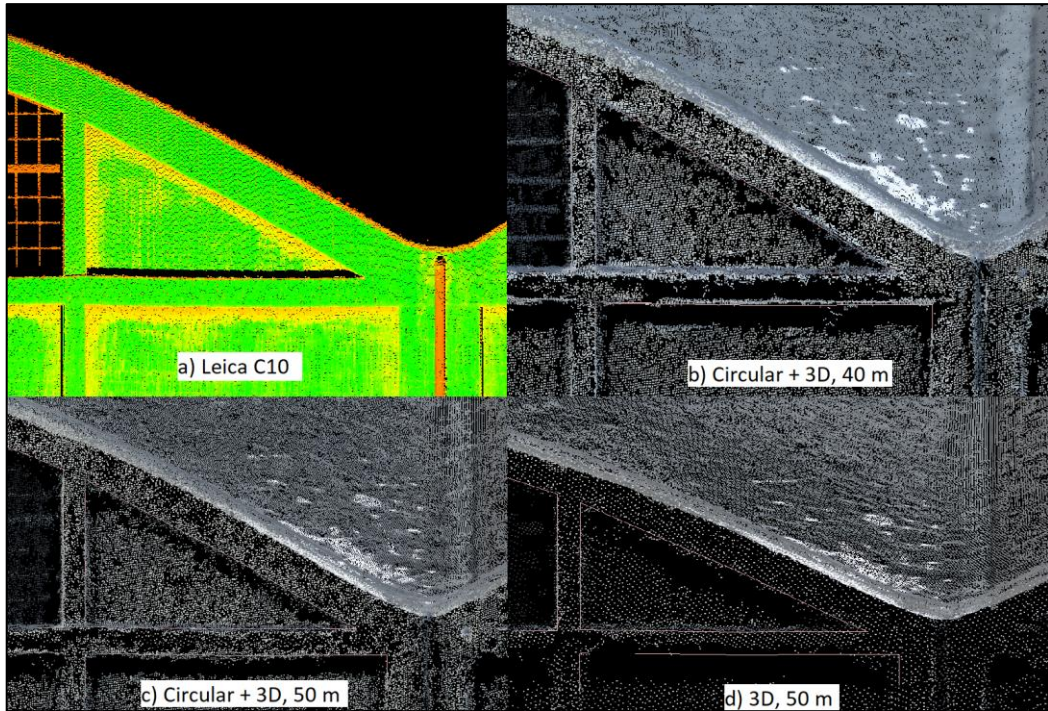
Punktipilvede visuaalseks hindamiseks on valitud 2 võrdluskohta. Esimeseks on Lennusadama nurgatorni fassaad koos kahe aknaga, teiseks on valitud hoone ülasas asuv fassaad ja selle detailid.



Joonis 7.1 Nelja erineva punktipilve visuaalne hindamine hoone akende näitel. a) on laserskanneri Leica C10 mõõdistatud punktipilv ning pildid b), c) ja d) on UAV mõõdistuse punktipilved. Helepunaste ristkülikutena on pildidel b), c) ja d) tähistatud laserskanneri saadud akna asukoht

Lennusadama torni fassaadi hindamisel on koheselt tunnetatav, et UAV mõõdistuse punktipilv ei ole nii „terav“ kui laserskaneerimise punktipilv. Fassaadi detailide modelleerimisel ei oleks võimalik detailide asukohta täpselt määratleda vaid peaks kasutama eelduslikke asukohti. Hoone nurkades on ümbritsev lend kehva kattuvusega ja seega ei paranda märkimisväärselt punktipilve visuaalset väljanägemist. Ümbritseva lennu piltidel on hoone nurkades nähtav ainult fassaadi ülaosa.

Teisel uuritava piirkonnal (Joonis 7.2) on näha, et ümbritsev lennurežiim tõstab punktipilve kvaliteeti ning vähendab punktipilves tühimikke. Samuti poleks teises uurimispiirkonnas keeruline fassaadi detaile UAV mõõdistusest välja modelleerida, kuna detailid on paremini eristuvad. Sellest hoolimata on tegelikkuses sirged jooned ikkagi UAV pilvedes lainelised. Lainelisust võib tekitada punktipilves esinev müra.

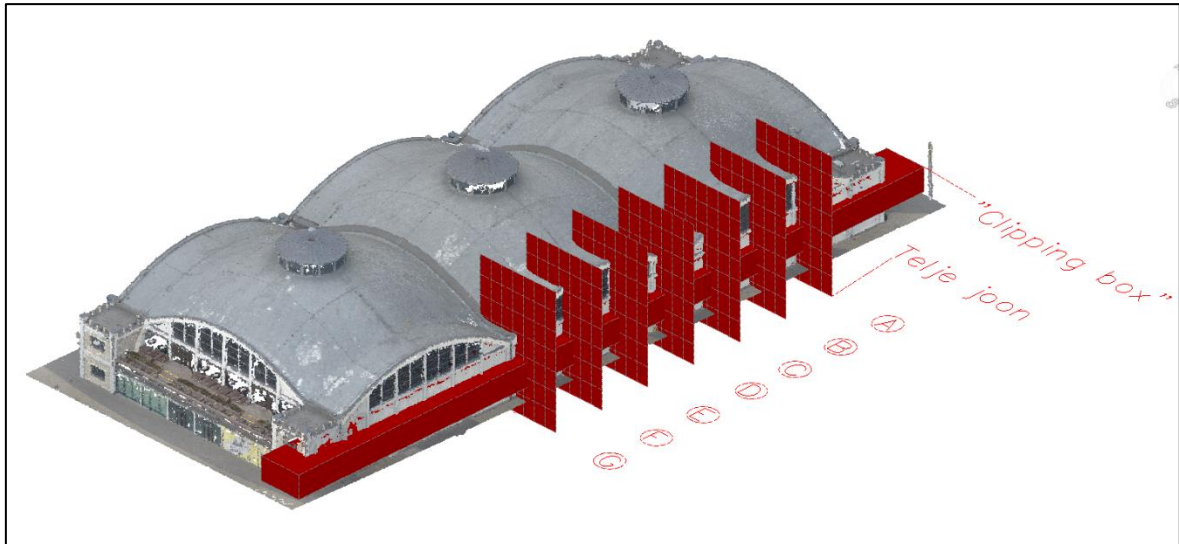


Joonis 7.2 Nelja erineva punktipilve visuaalne hindamine hoone fassaadi elementide näitel. a) on laserskanneriga Leica C10 mõõdistatud punktipilv ning pildid b), c) ja d) on UAV mõõdistuse punktipilved

7.1.2 Punktipilve paksuste võrdlemine hoone fassaadi pinnal

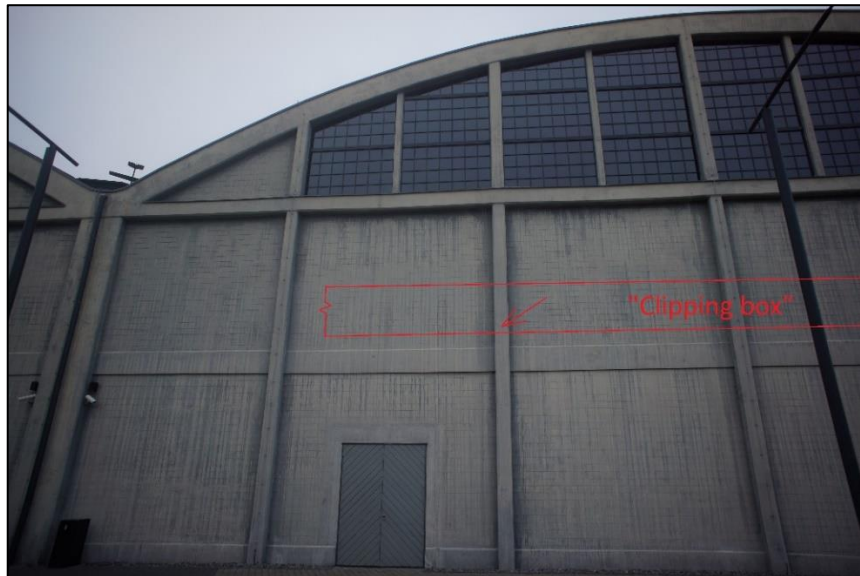
Punktipilve kvaliteeti on võimalik hinnata, kui vaadata punktipilve paksust mõnel siledal pinnal. Punktipilve paksuse all on mõeldud kõige välimise ja sisemise punkti omavahelist vahekaugust. Punktide omavaheline vahekaugus määrab modelleerimisel hoone detailide paiknemise, näiteks seinapaksuse määramine hoone 3D mudel loomisel.

Järgnevalt on vaadeldud UAV punktipilvede paksust hoone fassaadi pinnal. Punktipilves seinapaksuse mõõtmiseks toodi punktipilved AutoCAD Civil 3D keskkonda. Kõik punktipilved on samas koordinaatsüsteemis ja on kasutatud samu alusvõrgu punkte. See võimaldas luua punktipilvede võrdlemiseks võrdsed tingimused. Kõik punktipilved „taandati“ samasse kasti (*clipping box*). Samades kohtades mõõdeti ka punktipilve paksust fassaadi pinnal (Joonis 7.5).



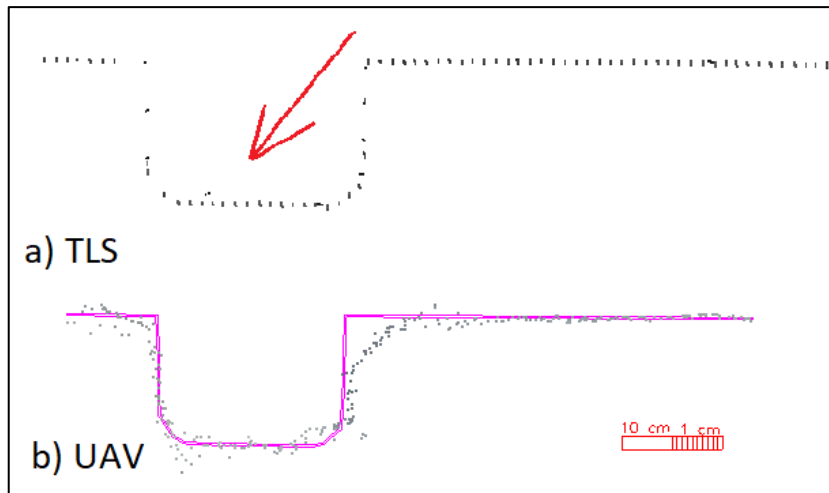
Joonis 7.3 Punkt pilve paksuse mõõtmine fassaadi pinnal. Punaste ringide sees tähistatud tähed A...C on teljed, kus mõõdeti punkt pilve paksust. „Clipping box“ on mõõtpiir, mille sisse kõik punkt pilved taandati, et garanteerida kõikide punkt pilvede puhul samad kõrguse vahemikud paksuse mõõtmiseks

„Clipping boxi“ pikkuseks vertikaalsuunal võeti 0.3 meetrit. See tähendab, et punkt pilve paksus on mõjutatud ka seinale iseloomulikest ebatasasustest. Joonisel (Joonis 7.5) nähtavad teljed A...C on valitud kohtadesse, kus TLS andmestik oli piisav, st et skanneri vaateväli ei olnud piiratud muude objektide poolt. Telgede vahe on 10 meetrit. Uuritav fassaad on välja toodud joonisel (Joonis 7.4).



Joonis 7.4 Tallinna Lennusadama fassaad, mille pinnal mõõdeti punkt pilve paksust. Punase noolega on tähistatud teravate servadega fassaadi element, mida uuritakse lähemalt. „Clipping box“ on lõige fassaadist

Joonisel (Joonis 7.5) on välja toodud TLS ja UAV punkt pilvede pealtvaade. Pealtvaates mõõdeti välimiste punktide omavaheline plaaniline kaugus.



Joonis 7.5 Punktipilve paksuse võrdlemine fassaadi pinnal. Punktipilved on kujutatud pealtvaates. TLS punkt pilves (a) on näha teravate servadega fassaadi element, mis UAV punkt pilves (b) on kujutatud ümaralt. Lilla värviga on kujutatud UAV punkt pilves TLS punkt pilvest määratud seinä asend.

Jooniselt saab välja lugeda 2 iseloomulikku omadust UAV punkt pilve kohta. Esimeseks on punktide korrapärase asetsemise võrreldes TLS punkt pilvega. Teiseks on tunduvalt suurem müra tase. Müra ei ole ainult mitte rohkem vaid see on ka suuremate hälvetega. Samuti on UAV punkt pilves seinale iseloomulikud teravad servad ümarad. Kui võrrelda UAV ja TLS punkt pilvi omavahel pealtvaates, siis ei saa väita, et UAV punkt pilv oleks rohkem hoone poole või hoonest väljapoole – UAV punkt pilv on sirgel seinal õrnalt laineline ja hälbed TLS punkt pilve suhtes ei ole ühesuunalised. UAV punkt pilves ei olnud seinä täpne asetsemine nii hästi määratav kui TLS pilves, seega on UAV mõõtetulemused mõjutatud töö autori subjektiivsest hinnangust.

Tabel 7.1 Punktipilve paksuse mõõtmised fassaadi pinnal, ühikud millimeetrites

Telg	TLS	RT, 50 m ja ümbritsev	RT, 40 m ja ümbritsev	RT,50 m
A	4	21	11	15
B	4	13	35	15
C	4	7	10	15
D	4	1	4	3
E	4	5	7	4
F	4	5	11	56
G	3	15	21	14

UAV punkt pilve paksus erineb TLS andmestikust ning pole terve seinä ulatuses ühtlane. Punktipilve paksus on kõige ühtlaseim lennukombinatsiooni RT, 50 m ja ümbritsev (Tabel 7.2). UAV punkt pilv on, kõikide lennukombinatsioonide puhul, hoone fassaadil paksem kui TLS punkt pilv.

Tabel 7.2 Punktipilve paksuse mõõtmise statistilised näitajad, ühikud millimeetrites

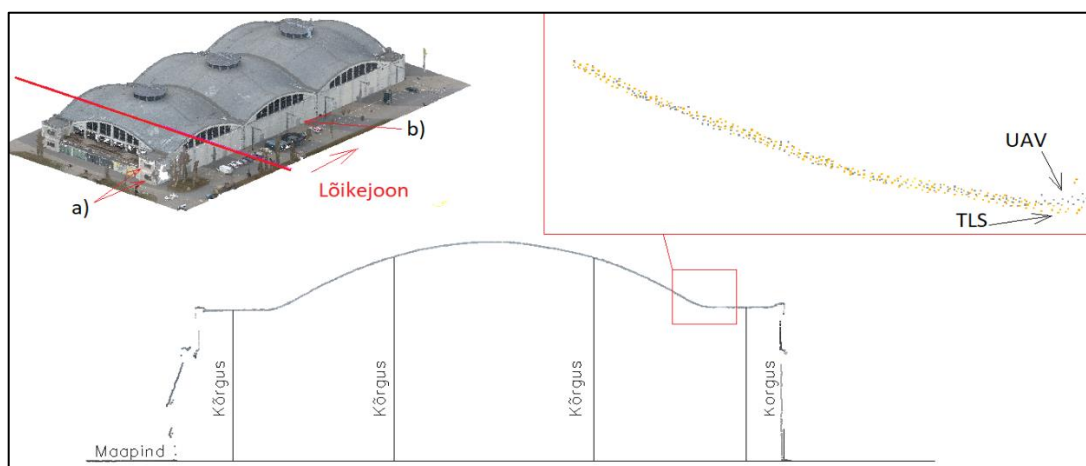
	TLS	RT, 50 m ja ümbritsev	RT, 40 m ja ümbritsev	RT,50 m
Min	3	1	4	3
Max	4	21	35	56
Keskmine	4	10	14	17
STD	0.4	7	10.6	17.8
KRV	-	9.4	15.4	23.1

Ümbritseva lennurežiimi kasutamine võib parandada fassaadil paiknevate punktide kvaliteeti. See tähendab, et punktipilve paksus fassaadi pinnal on ühtlasem, kui lisana on kasutatud ka ümbritsevat lennurežiimi.

7.1.3 Punktipilves detailide gabariitide võrdlemine

Hoone detailide gabariitide võrdlemiseks valiti referentsandmestik (Leica C10 punktipilv) selgelt eristuvad detailid ning mõõdeti nende pikkused. Valitud detailide alla kuulusid: hoone gabariidid, hoone ristlõike kõrgused, 1. ja 2. korruse aken ning üks uks. Mõõtmised viidi läbi AutoCAD keskkonnas.

Hoone gabariidid mõõdeti punktipilve pealtvaates. UAV punktipilvede puhul ei olnud hoone nurgad selgelt eristuvad, seega pikendati kahe lõikuva seina jooned ning joonepikenduste ristumine loeti hoone nurgaks. Hoone ristlõike kõrguste mõõtmise kohta on koostatud seletav skeem (Joonis 7.6)



Joonis 7.6 Hoone ristlõikes kõrguste mõõtmine. Kõikide punktipilvede puhul mõõdeti kõrgused samas kohas. Kõrguste lähtepinnaks võeti maapinna punktide pikendus hoone alla, samuti on näidatud 1. ja 2. korruse akende paiknemine (a) ja uks (b). Välja on toodud ka TLS ja UAV punktipilvede omavaheline asetsemine katuse pinnal

Hälbed arvutati TLS andmestiku suhtes ehk TLS – UAV. Kusjuures lennukombinatsiooni RT, 40 m ja ümbritseva puhul ei saanud kõiki akna gabariite punktipilves mõõta, kuna aknad ei olnud eristuvad.

Tabel 7.3 Punktipilves hoone gabariitide võrdlemise tulemuste statistilised näitajad, ühikud millimeetrites

	RT, 40 m ja ümbritsev*	RT, 50 m ja ümbritsev	RT, 50 m
n	11	14	14
Min	-15	-23	-37
Max	41	24	45
Keskmine	6	8	8
STD	17	13	28
KRV	18	15	28

Ümbritseva lennu kasutamine parandab tunduvalt punktipilve kvaliteeti hoone fassaadil. RT, 50 m puhul esines suurim KRV 28 mm, mis oli tingitud suurtest ebakõladest punktipilves. Mõõdistamise tulemused on detailselt välja toodud lisades (Lisa 3).

7.2 Hälbemudelite koostamine

Hälbemudel on kahe andmestiku omavaheliste hälvete mudel, mil on samad matemaatilised parameetrid kui sisendmudelitel, kuid ruumpunktidele on antud koloriseeritud väärtus vastavalt hälbe suurusele. Andmestikud võivad olla punktipilved, *meshid* või modelleeritud mudelid.

Käesoleva magistritöö raames koostatakse kolme UAV lennukombinatsiooni hälbemudel, mille referentsmudeliks on TLS punktipilvest koostatud *mesh* mudel. UAV punktipilvest koostatakse samuti *mesh* mudelid.

Sisend punktipilvedelt eemaldatakse müra 3DReshaper algoritmide ja tööriista „Clean/seperate“ abil. Punktipilvedest luuakse *meshid*, millelt eemaldatakse alles jäänud müra tõttu tekkinud „piigid“. *Mesh* mudel koosneb kolmnurkadest ja igale UAV mudelile seadistati keskmiseks kolmnurga külje pikkuseks 0.4 m. TLS mudeli puhul oli vastav näitaja 0.3 m.

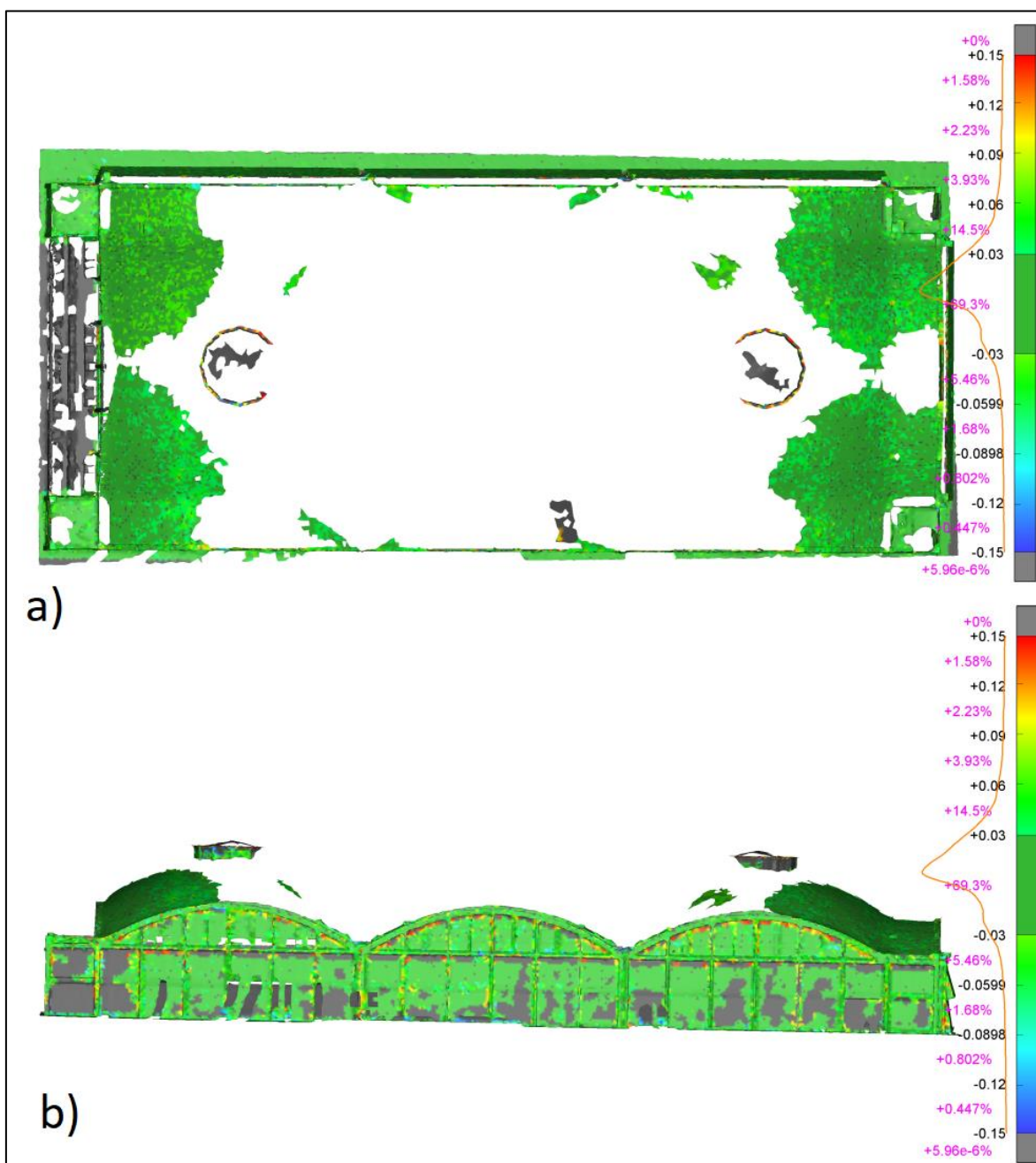
Kõikidele hälbemudelitele antakse samad veatolerantsid. Hälvete histogramm luuakse vahemikus -0.5 m...+0.5 m ja vigadele mis jäävad vahemikusse –3 cm...+3cm luuakse oma vahemik.

3DReshaper ei anna hälbemudelitele statistilisi hinnanguid, seega hälbemudelite omavaheliseks võrdluseks oli vaja statistilised näitajad arvutada tabelarvutusprogrammis Microsoft Excel. Selle tegemiseks valiti igast hälbemudelist 100 punkti katuselt ja 100 punkti fassaadilt kogu hoone

ulatuses ja andmed eksporditi Excelisse. Katuse punktide puhul arvutati statistilised näitajad kõrguslikus komponendis ning fassaadi punktide puhul arvutati erinevus X-, Y- ja Z- (*3D Deviation*) komponendis ehk punkti kaugus pinnast arvutatuna läbi kolme koordinaadi. Punktide valik oli juhuslik.

Järgnevas kolmes jaotises esitatakse hälbemudelite väljavõtted ning antakse statistilised näitajad tabelitena. Hälbemudelite analüüs esitatakse eraldi jaotises pärast hälbemudeleid.

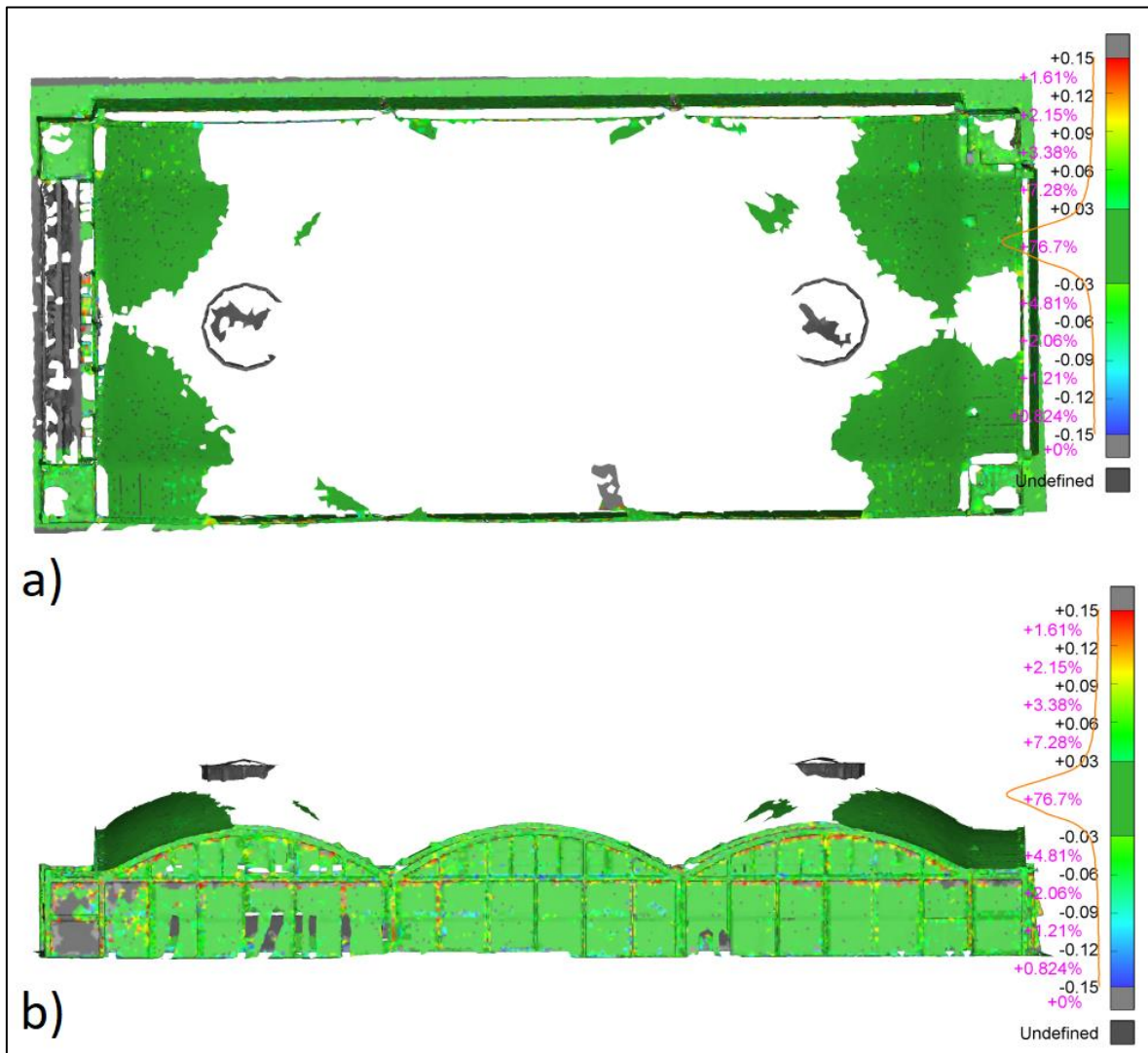
7.2.1 RT, lennukõrgus 50 m



Joonis 7.7 Katuse (a) ja fassaadi (b) väljavõtted „RT, 50 m“ hälbemudelitest etalonmudeli suhtes

RT, 50 m hälbemudelil on märgata katusel kohati suuremaid hälbeid kui ± 3 cm (joonisel helerohelisega). Fassaadil on hoone teravad detailid kujutatud ümaralt ja seetõttu esinevad nende ümbruses suuremad hälbed. Fassaadil esinevad suurimad hälbed ülaosas, kus antud lennukombinatsiooni puhul nähtavus puudus.

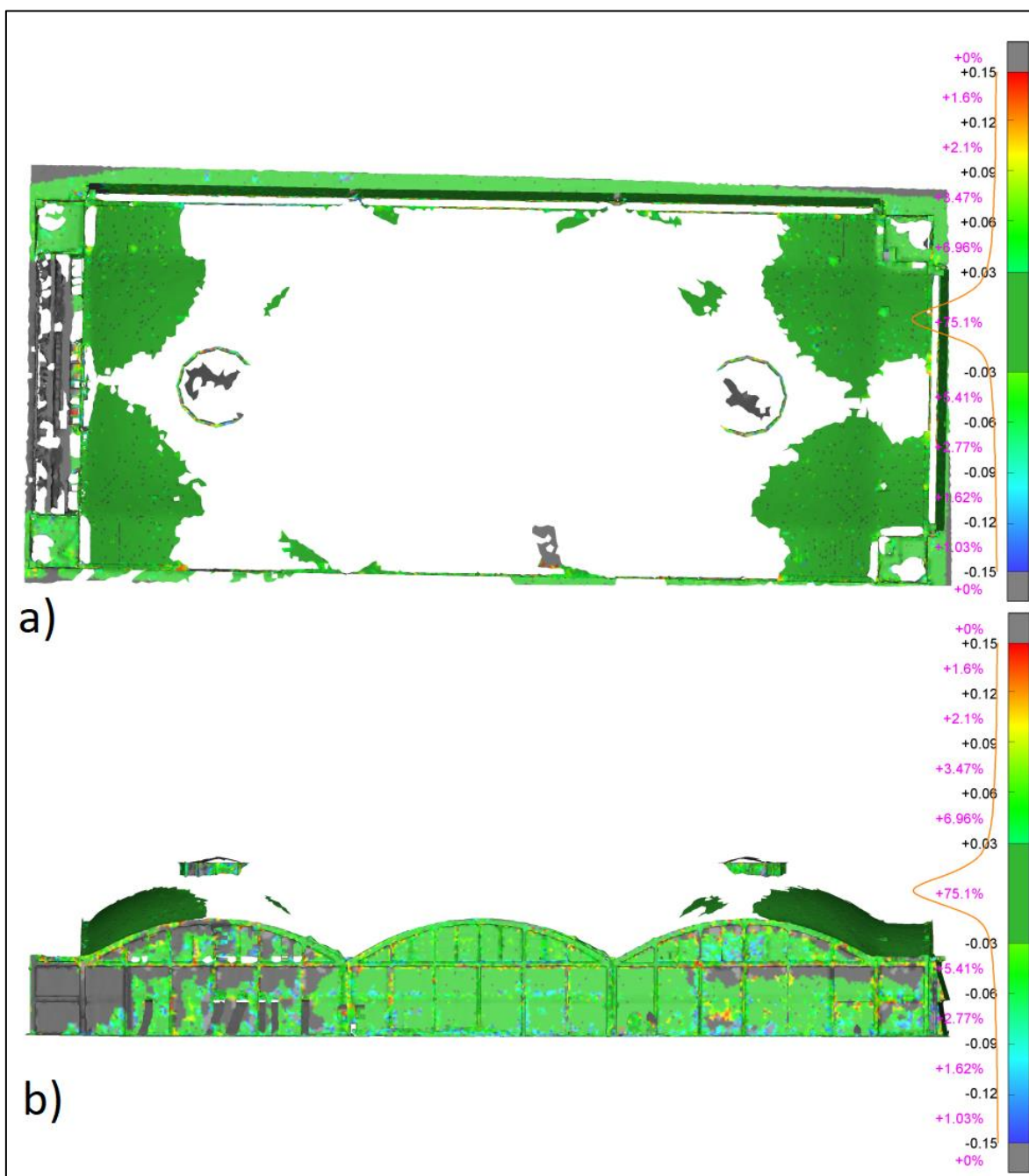
7.2.2 RT, lennukõrgus 50 m ja Ümbritsev, lennukõrgus 30 m



Joonis 7.8 Katuse (a) ja fassaadi (b) väljavõtted „RT, 50 m ja ümbritsev“ hälbemudelid etalonmudeli suhtes

RT, 50 m ja ümbritseval esinevad katusel väiksemad hälbed kui RT, 50 m lennurežiimil. Fassaadil esinevad sarnased seaduspärasused kui RT, 50 m lennurežiimil, kuid hoone keskosas on fassaadi ülaosa kujutatud paremini, kuna oli ka aerofotodel paremini kajastatud. Hoone teravad detailid on kohati suurte hälvetega.

7.2.3 RT, lennukõrgus 40 m ja ümbritsev, lennukõrgus 30 m



Joonis 7.9 Katuse (a) ja fassaadi (b) väljavõtted „RT, 40 m ja ümbritsev“ hälbemudelid etalonmudeli suhtes

RT, 40 m ja ümbritseval lennukombinatsioonil esinevad fassaadi osas palju tühimikke. See oli tingitud liiga väiksest punktihedusest. Madal punktihedus segas *mesh* mudeli loomist. Katusel oli punktihedus piisav *meshi* loomiseks. Hälbed sarnanevad lennukombinatsioonile RT, 50 m ja ümbritsev.

7.2.4 Hälbemudelite analüüs

Eelnevalt koostatud hälbemudelitest on näha, et katuse mõõdistamine UAV fotogramm-meetrilisel meetodil ei valmista probleeme. Küll aga võib ainult ühe lennu kasutamine langetada punktide kvaliteeti ja soovituslik oleks kasutada vähemalt kahte lennu. Suurimad hälbed esinesid RT, 50 m lennu puhul, kus fassaadi punktide KRV oli 66 mm ja katusel 26 mm. Parimad tulemused olid lennul RT, 50 m ja ümbritsev kus KRV hoone katusel oli 15 mm ja fassaadil 45. Sarnased tulemused olid lennukombinatsioonil RT, 50 m ja ümbritsev, kus KRV katusel oli 16 mm ja fassaadil 52 mm. (Tabel 7.4) Kusjuures lennukõrgusega 50 m oli hoone punktipilv väiksemate tühimikega nii fassaadil kui katusel. Madalama lennukõrguse (40 m) puhul esinesid punktipilves väga hõredad kohad, mis valmistasid probleeme *mesh* mudelite loomisel. See tähendab, et antud hoone mõõdistamiseks oli lennukombinatsioon RT, 50 m ja ümbritsev parim lahendus.

Tabel 7.4 Hälbemudelite statistilised näitajad erinevate lennukombinatsioonide korral. $n_{\text{katuse}} = 100$, $n_{\text{fassaad}} = 100$

	RT, 50 m		RT, 40 m ja ümbritsev		RT, 50 m ja ümbritsev	
	Katus	Fassaad	katus	fassaad	katus	fassaad
Min	-59	-125	-66	-260	-74	-210
Max	64	446	37	114	35	292
Keskmine	21	21	-4	-7	-2	10
STD	16	63	15	45	16	51
KRV	26	66	15	46	16	52

Kõigis hälbemudelites esinesid samad seaduspärasused. Fassaadi lamedad kohad on väikeste hälvetega ning teravad detailid ei ole kujutatud nii adekvaatselt kui TLS punktipilves ja esinevad suuremad hälbed. Fassaadi punktipilve kvaliteeti tõstab tunduvalt ümbritseva lennu kasutamine.

7.3 ALS madalkaardistuslendude andmete kasutamine hoone katuse modelleerimisel

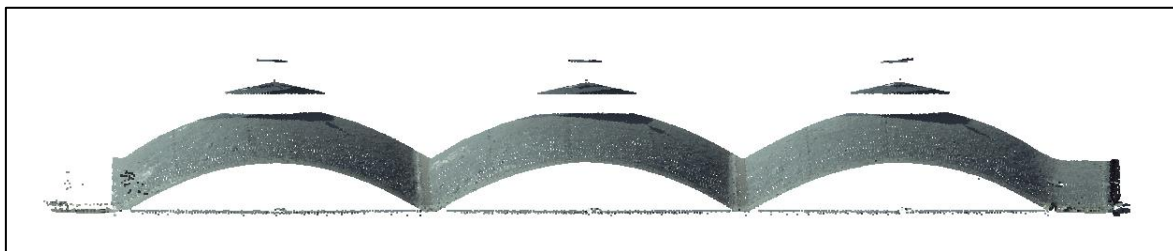
ALS andmeid on võimalik kasutada, et täiendada TLS punktipilve hoonete 3D mudelite loomisel. TLS punktipilvedes võivad esineda tühimikud kui laserskanneriga ei õnnestu mõõdistada raskesti ligipääsetavaid kohti (hoonete katused). Varasemalt on ALS andmeid kasutatud TTÜ veetorni 3D mudeli loomisel [23], kuid uurimistööst on möödas 5 aastat ja saadaval olevad ALS andmestikud on muutunud. Peamine muutus on punktiheduses - TTÜ veetorni 3D mudeli loomisel kasutati ALS andmeid punktihedusega 2.3 p/m^2 , aga nüüd on magistr töö autorile kättesaadaval ALS andmed,

mille punktihedus on 18 p/m^2 (vt jaotisi 2.2.2 ja 3.2.) ALS andmete sobilikkus hoone katuse mõõdistamiseks oli üheks käesoleva magistritöö eesmärkideks. See eesmärk on põhimõtteliselt varasema uurimistöö [23] edasiarendus.

Antud magistritöö raames on kasutatud Maa-ameti 2018. aasta kevadise madallennu andmeid (vt jaotis 2.2.2), kaardilehe number 590541.

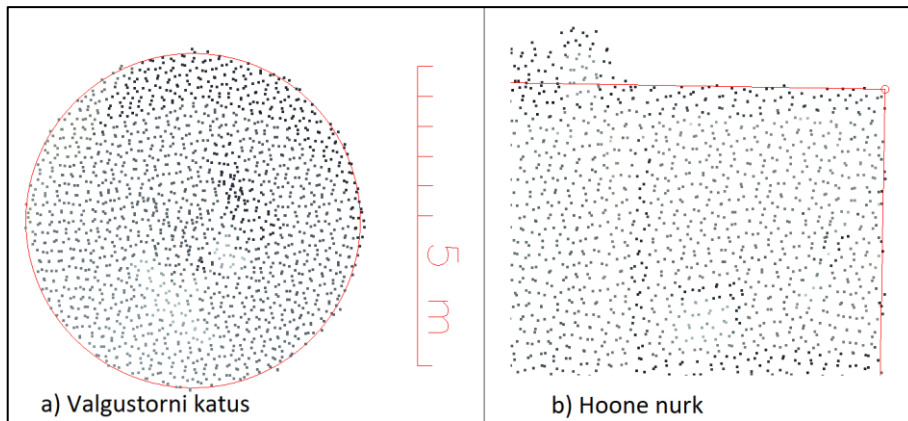
ALS andmetega töötamiseks AutoCADis on vajalik punktipilv eelnevalt töödelda programmis Autodesk Recap. Recap töötleb muudes tarkvarades loodud punktipilve AutoCADile sobivasse andmeformaati – kas siis .rcs või .rcp. Vanemates Recap versioonides ei ole .laz andmeformaadi tuge ja formaadi kasutussoovi korral tuleks tarkvara uuendada. Samuti võib probleeme tekitada .laz formaat, mille saab ümber konverteerida .las formaati näiteks vabavaraga LasTools.

ALS punktipilv imporditi AutoCADi (vt Joonis 7.10), et seal TLS punktipilvega võrreldes tuvastada ALS punktipilve plaanilisi nihkeid. ALS punktipilve teoreetiline punktihedus 18 p/m^2 võimaldab punktipilves määrata hoone detailide koordinaate ning neid seejärel võrrelda TLS punktipilves leitud koordinaatidega.



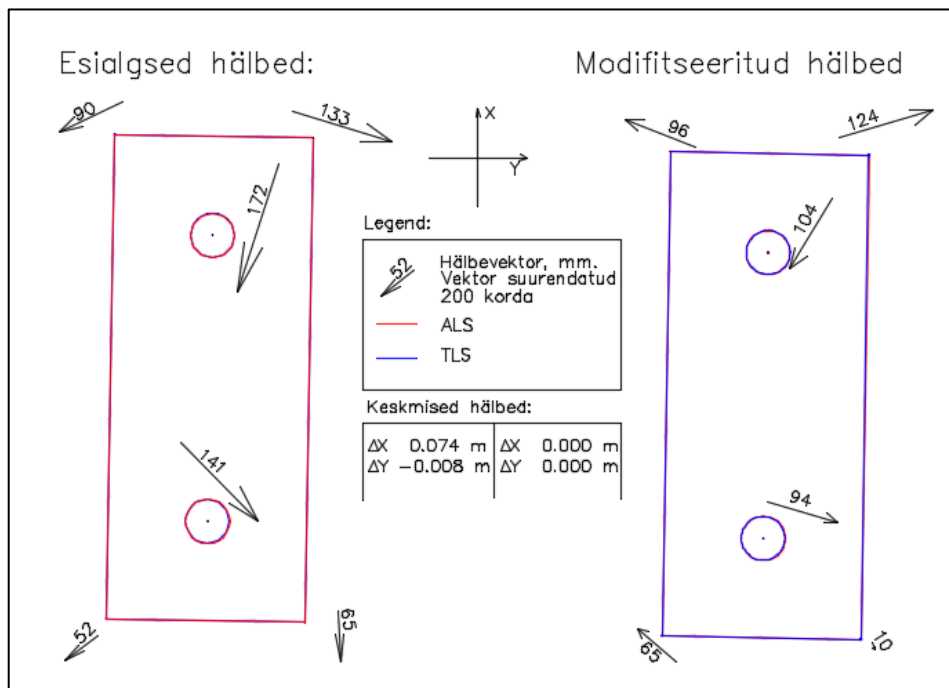
Joonis 7.10 ALS andmed Tallinna Lennusadama katusel. Punktipilvest on katuse osa selgelt eristuv, hoone fassaadil esinevad üksikud punktid

Plaaniliste nihete tuvastamiseks valiti mõlemas punktipilves ühised punktid, millele määrati plaanilised (X-, Y-) koordinaadid. Nendeks ühisteks punktideks valiti Lennusadama 2 valgustorni ning hoone neli nurka. Valgustornide puhul määrati tsentri koordinaadid. Tsentri koordinaadid määrati joonestades valgustorni katusele jäävate punktide välisperimeetri järgi ring. Hoone nurkadele koordinaatide määramisel toimus samuti välisperimeetrile jäävate punktide põhjal sirgete joonestamine, ning seejärel nede sirgete ristumiskoha tuvastamine (vt Joonis 7.11).



Joonis 7.11 Valgustorni katuse (a) tsentri ning hoone nurga (b) koordinaatide määramine ALS punktipilves. Punaste joontega tähistatud valguslaterna tsentri koordinaatide (a) leidmine ja hoone nurga koordinaatide (b) leidmine. Katuse (a) puhul tuli punktipilves katuse osa eraldada ja nurga (b) puhul eemaldati punktid, mis jäid maapinnale

Plaaniliste koordinaatide võrdlemisel ilmnes, et hälbed ei ole ida-lääne ehk Y-teljel samasuunalised. X-teljel olid hälbed samasuunalised, kuid erinesid üksteisest tunduvalt – väikseim erinevus 33 mm ja suurim 163 mm.



Joonis 7.12 Plaaniliste nihete korrigeerimine AutoCAD keskkonnas. Hälbed korrigeeriti nihutades ALS põhjal joonestatud hoonet arvutatud keskmiste hälvete võrra. Hälbevektor näitab ALS plaaniliste punktide kaugust ja suunda TLS joontest.

Hälvete modifitseerimiseks arvutati igas arvutuspunktis X- ja Y-koordinaadis erinevused ning võeti nendest keskmine. Keskmist väärtust kasutati, et ALS punktipilve põhjal joonestatud hoone

perimeetrit nihutada. Sellega saavutati ALS hoone asend TLS hoone suhtes nõnda, et keskmised hälbed oleksid minimaalsed. Saavutatud tulemus on küll optimaalseim ALS asend, kuid sellegipoolest esinevad suured hälbed.

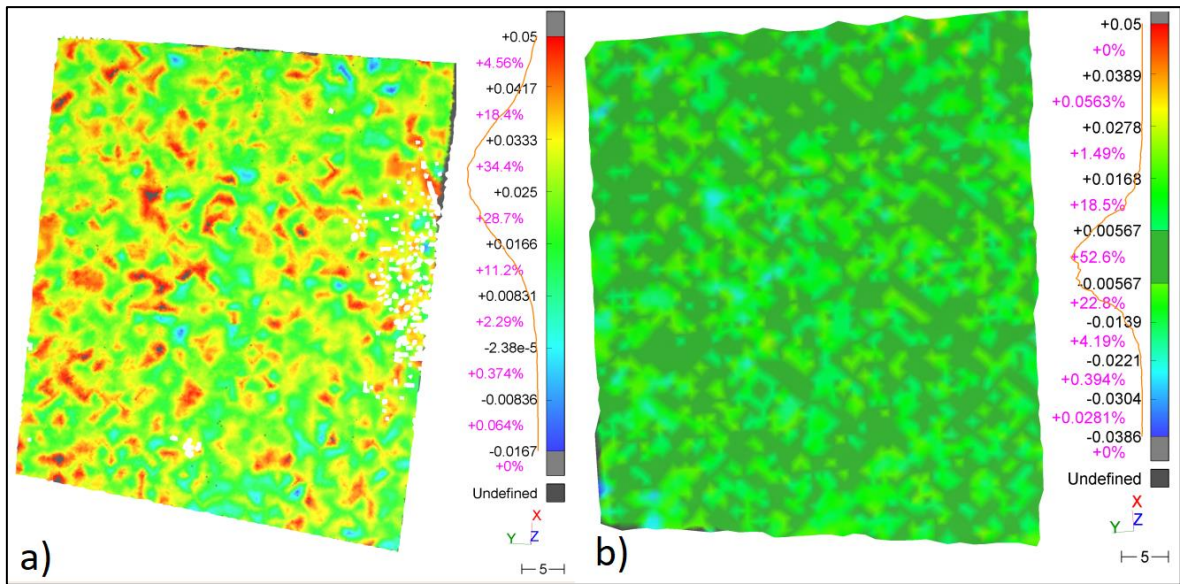
Plaaniliste nihete erisuunalisus annab põhjust arvata, et ALS punktipilv ei kajasta hoonet piisavalt adekvaatselt ehk punktitiheus ei ole piisav plaaniliste koordinaatide rahuldava täpsusega määramiseks. Selle kinnitamiseks võrreldi omavahel ALS ja TLS punktipilve järgi joonestatud seinapikkuseid.

Tabel 7.5 ALS ja TLS punktipilvedest joonestatud seinapikkuste omavaheline võrdlemine, ühikud meetrites

	ALS	TLS	TLS-ALS (mm)
Sein 1	123.640	123.671	31
Sein 2	50.777	50.687	-90
Sein 3	123.667	123.609	-58
Sein 4	50.785	50.741	-44

Seinapikkuse määramise KRV ALS punktipilvest on 60 mm. ALS punktipilves on hoone kujutatud suuremalt, kui ta tegelikult on. Selle põhjuseks on ilmselt lasertäpi liiga suur jälg (*laser footprint*) maapinnal. Nendest tulemustest järeldub, et seinanurga punktide järgi ei tohiks punktipilve registreerida (kasutatakse ka terminit *align*) mõne muu referentsandmestikuga, sest see tooks ALS andmestiku sisse mõõtkava vead. Mõõtkava vigade all mõeldakse punktide omavahelise kauguse õigsust. Mõõtkava vead on ALS andmestikus vahemaa, 120 meetrit, puhul väga ebatõenäolised. Kui mõõtkavaparandi lisamist on registreerimisalgoritm võimalik deaktiveerida, on võimalik kasutada ka registreerimismeetodit.

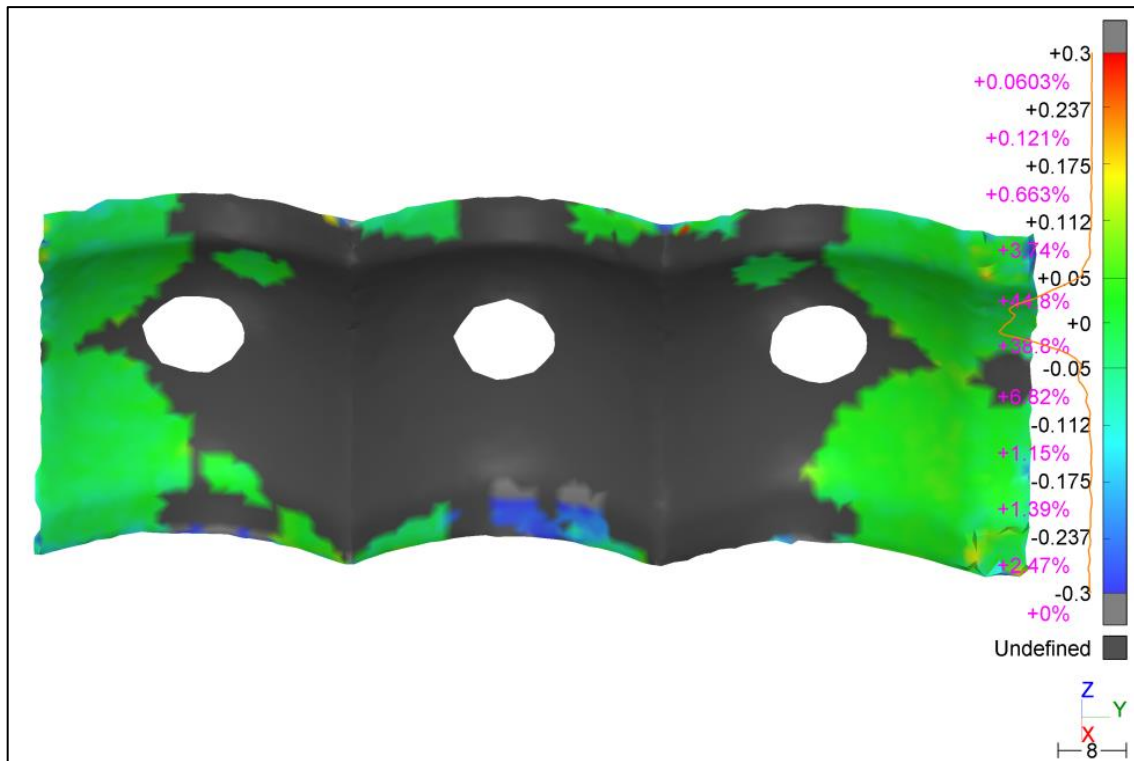
Süsteematiliste vigade leidmine kõrguslikult on märksa lihtsam kui plaaniliste nihete tuvastamine. Selle leidmiseks on vajalik leida mõlemas andmestikus ühine pind, mis ei ole erinevate aja daatumite tõttu muutunud. Antud magistritöös valiti ühiseks pinnaks Lennusadama merepoolne kiviplats. Kiviplatsist eraldati mõlemas andmestikus ühine osa, mille mõõtmed olid umbes 48*50 m. Referentsandmestikus oli kiviplats mõõdistatud laserskanneriga Leica C10. ALS andmestikust eemaldati kõrgussüsteemide vaheline erinevus 23.5 cm, mis arvutati Maa-ameti geodeesia kalkulaatori abil. ALS andmestik oli EH2000 kõrgussüsteemis ja TLS BK77 süsteemis. Süsteematiliste vigade tuvastamiseks kasutati hälbemudeli meetodikat (Joonis 7.13).



Joonis 7.13 Hälbemudeliga süstemaatilise kõrguse vea elimineerimine. Algne (a) hälbemudel ja süstemaatiline viga -0.026 m eemaldatud mudel (b)

Eialgses mudelis hinnati kõige tõenäolisemaks erinevuseks kahe pinna vahel 2.6 cm. See tähendab, et ALS mudel oli 2.6 cm kõrgemal kui TLS mudel. Erinevus kõrvaldati ning koostati kontrolliks uus hälbemudel. Uues hälbemudelis olid erinevused koondunud üsna ühtlase jaotusega nulli ümber. ALS andmestiku KRV leidmiseks võeti hälbemudelitest 98 punkti, mille põhjal arvutati TLS ja ALS omavaheline kõrguste erinevus ja arvutati KRV väärtuses 8 mm.

Peale süstemaatilise kõrgusliku vea elimineerimist koostati hälbemudel. Hälbemudel koostati kahe *mesh* mudeli vahel, millest oli eemaldatud müra ja mudel „silutud“. ALS andmestikku ei kaasatud plaaniliste hälvete elimineerimist, kuna katsetatud meetodikaga ei saavutatud piisavalt usaldusväärseid tulemusi.



Joonis 7.14 ALS ja TLS *mesh* mudelist tehtud hälbemudel, ühikud meetrites

3DReshaper ei paku hälbemudeli koostamisel statistilisi näitajaid. Küll aga on võimalik näha üksikute ruumipunktide hälbeid ja need hälbed hiljem ekspordida Exceli keskkonda. Mudeli hindamiseks valiti juhusliku asetusega 100 punkti ning eksporditi nende kõrguslikud hälbed edasiseks andmetöötluseks Excelisse. Tulemused on toodud järgnevas tabelis.

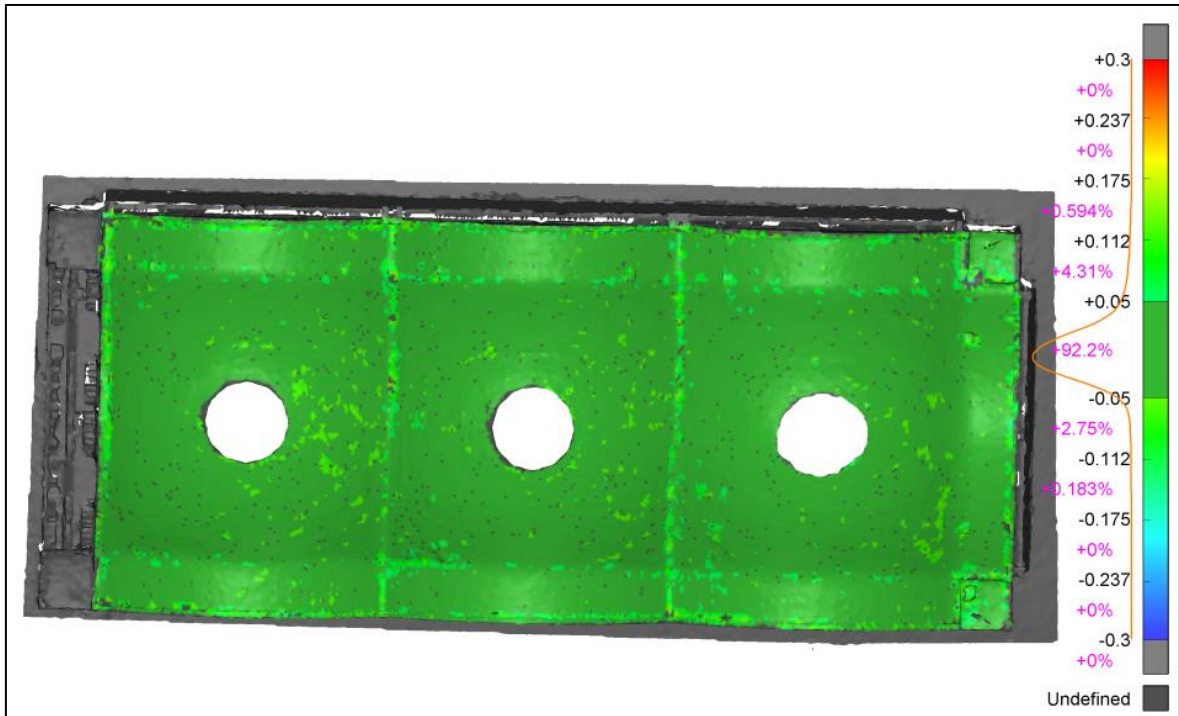
Tabel 7.6 ALS andmete kõrguslike hälvete statistilised näitajad hoone katusel peale süstemaatiliste vigade eemaldamist

Statistik	Väärtus (mm)
min	-285
max	228
keskmine	-7
STD	66
KRV	66

KRV väärtus 66 mm on ligilähedane A. Ellmanni ja K. Julge [23] töös saadud tulemusele 50 mm. Nende töös arvutati ALS punktidele KRV, kasutades hälbeks „*best fit*“ koonuse ja ALS punkti omavahelist kaugust mööda koonuse normaali.

Tallinna Tehnikaülikooli veetorni mudeli loomisel [22] [23] kasutati puuduva katuse osa modelleerimiseks ALS punkte. Kui kasutada puuduva katuse osa modelleerimiseks ALS punkte UAV asemel, siis tasub uurida kahe andmestiku omavahelist erinevust. Erinevuse visualiseerimiseks

loodi hälbemudel (vt Joonis 7.15), kus referentsmudeliks võeti UAV lennukombinatsioon RT, 50 m ja ümbritsev. UAV lennukombinatsiooni valikut on põhjendatud jaotises 7.5.2.



Joonis 7.15 ALS ja UAV lennukombinatsiooni RT, 50 m ja ümbritsev vaheline hälbemudel. Etalonmudel on UAV moodistuse *mesh* mudel

Hälbemudelis leiti eelnevalt kirjeldatud metoodika alusel ALS ja UAV omvahelised hälbed (Tabel 7.7). Mudelid erinevad teineteisest keskmiselt 3 mm ja KRV on 25 mm.

Tabel 7.7 ALS ja UAV vaheliste erinevuste statistilised näitajad. Ühikud millimeetrites, n = 98

Statistiline näitaja	Väärtus
Min	-7.2
Max	122.1
keskmine	-3.0
STD	25
KRV	25

TLS ja ALS kooskasutamise põhiküsimuseks on süstemaatiliste vigade elimineerimine. Käesolevas jaotises kirjeldatud metoodikaga ei õnnestunud plaanilisi vigu eemaldada. Sellest hoolimata on ALS andmestik piisava tihedusega, et keeruka kujuga katust piisavalt adekvaatselt modelleerida. ALS andmete kasutamisel peab arvestama madalama täpsusega (KRV 66 mm) kui TLS või UAV moodistusel saavutatud täpsusega. ALS andmetele on täpsem alternatiiv UAV moodistamine, mida erinevalt ALS andmestikus, saab geodeet ise mõjutada ning ei pea ootama Maa-ameti kaardistuslendude järel või kasutama iganenud andmeid.

7.4 Katusekatte deformatsioonide tuvastamine fotogrammeetrilisel meetodil

Tallinna Lennusadama katusekatte deformatsioonide (vt Joonis 7.16) tuvastamiseks fotogrammeetrilisel meetodil kasutatakse UAV mõõdistusel saadud RT, 50 m ja ümbritsev lennukombinatsiooni punktipilve. Katusekatendi deformatsioonide tuvastamine toimub punktipilve võrdlemisel iseendaga. Esmalt luuakse UAV punktipilvest referentsandmestik, millest on eemaldatud deformatsioonidele omased punktid. Seejärel võrreldakse referentsandmestiku esialgse punktipilvega.



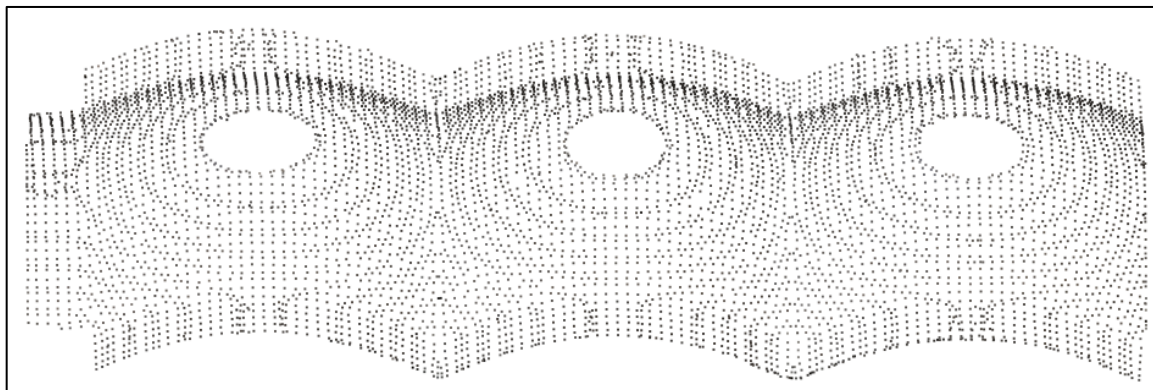
Joonis 7.16 Tallinna Lennusadama katusekatte deformatsioonid

Katusekattel esinevad muhud on varieeruva suurusega, plaanilise läbimõõduga hinnanguliselt 5 cm kuni 1.5 m. Vertikaalsuunaline kummumine on hinnanguliselt alates mõnest sentimeetrist kuni 10 cm.

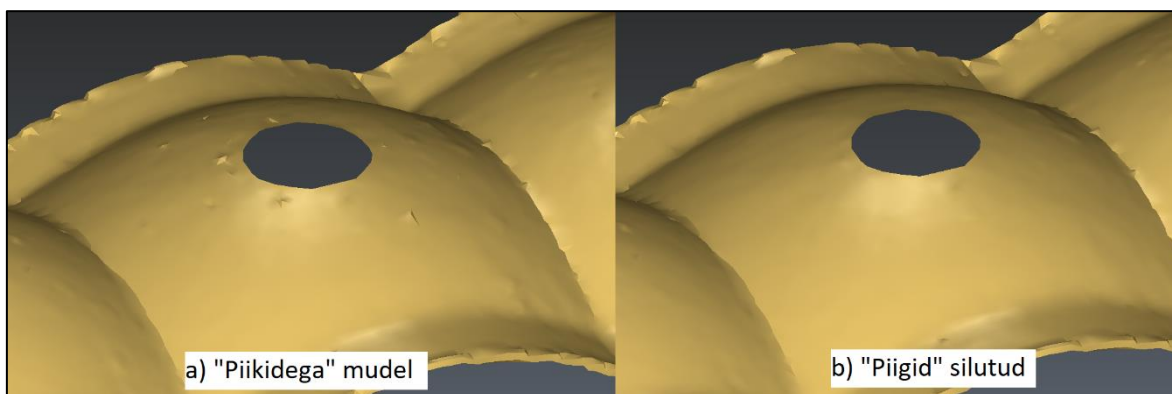
Hälbemudel koostatakse tarkvaras 3DReshaper. Hälbemudeli koostamiseks on vaja kahte andmestikku – referentsandmestikku ja andmestikku, mille hälbeid soovitakse leida.

Referentsandmestiku loomiseks punktipilv puhastati ning eemaldati ebavajalikud hoone detailid. Punktipilve puhastamiseks kasutati manuaalset müra eemaldamist kui ka 3DReshaperi mürafiltreid. Pärast müra eemaldamist loodi punktipilvest hõrendatud versioon, kus punktide omavaheliseks keskmiseks vahekauguseks on 1 meeter (vt Joonis 7.17). Väiksemate punktide vahekauguste

kasutamisega ei õnnestunud deformatsioonidele iseloomulikke punkte elimineerida, kuna valitud punkt võis juhtuda just deformatsiooni peale.

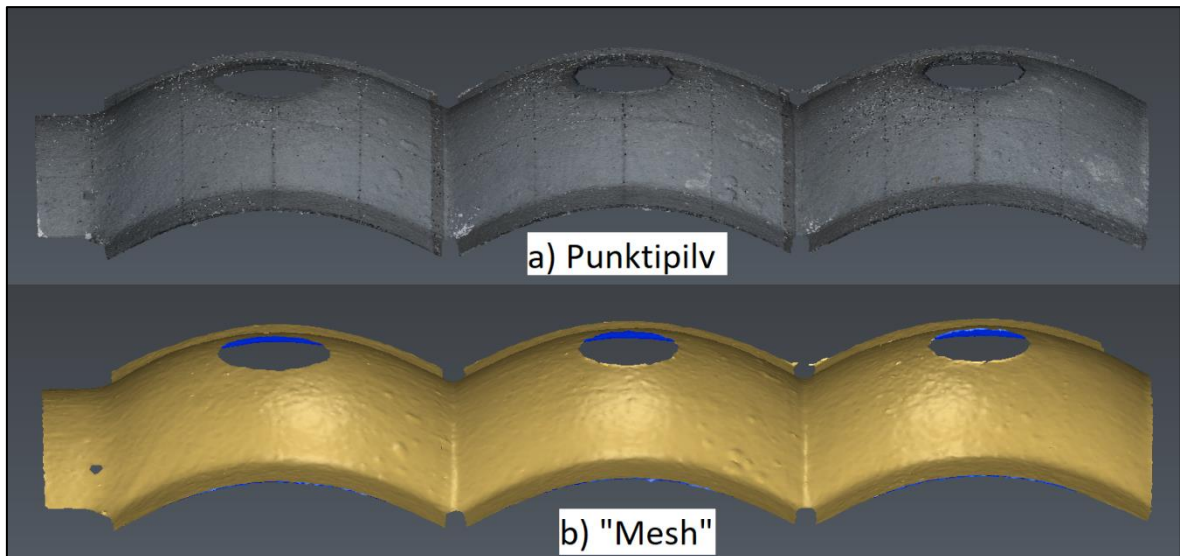


Joonis 7.17 Hõrendatud punktipilv, kus punktide omavaheline keskmine vahekaugus on 1 meeter. Hõrendatud punktipilv ei sisalda endas enam katusekatte deformatsioonide punkte, mis võimaldab luua „siledama“ *mesh* mudeli. Hõrendatud punktipilvest loodud mudel ei olnud täielikult sile pind, vaid mudelis esines „piike“ (Joonis 7.18). Need ebakõlad eemaldati mudelist kasutades „smooth“ (silumis-) tööriista. Tööriista kasutamisega tasub olla ettevaatlik, kuna sellega liialdamine nihutab mudeli lokaalselt paigast ja hälbemudeli loomine ebaõnnestub.



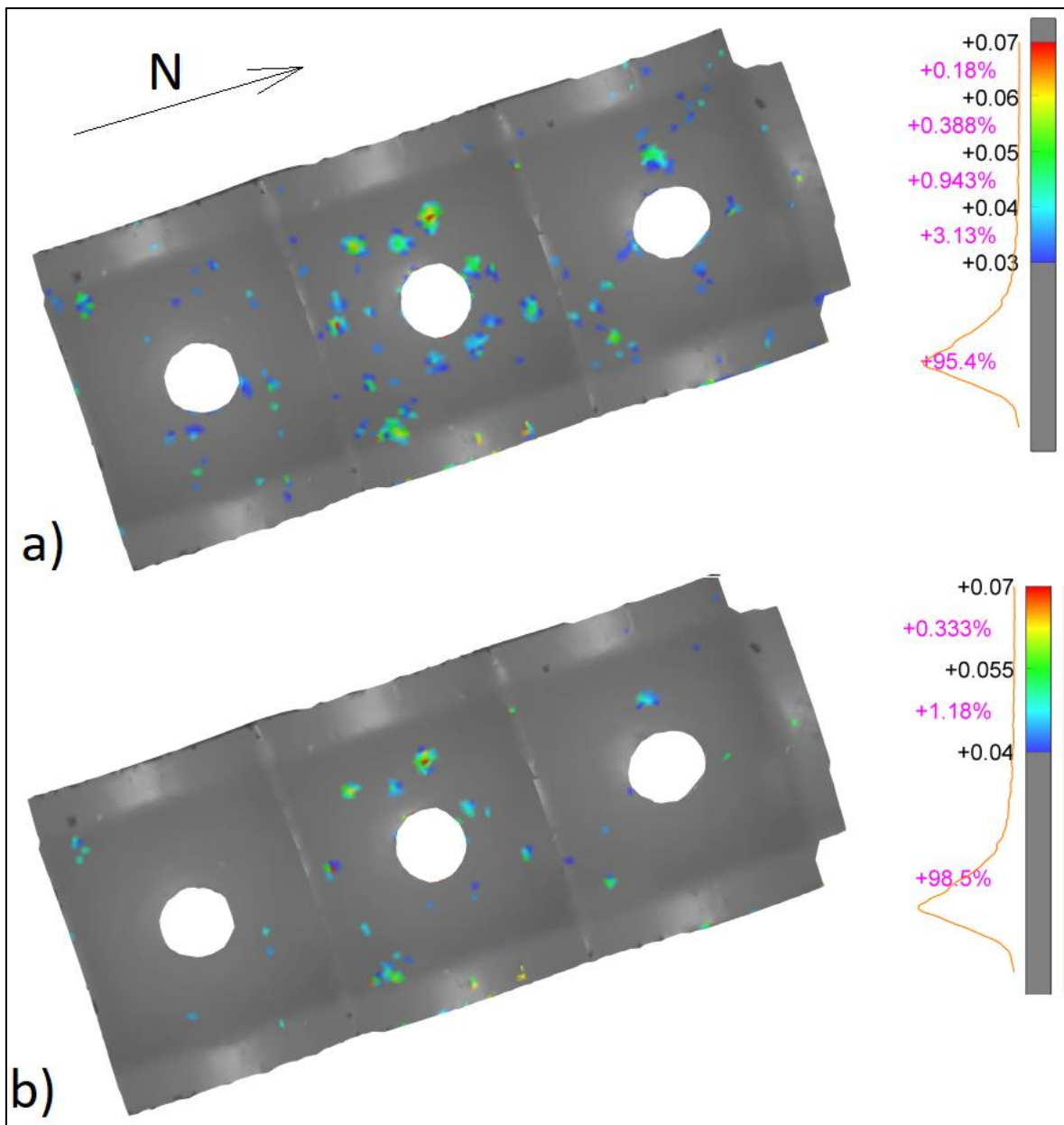
Joonis 7.18 Piikide eemaldamine *mesh* mudelis

Pärast referentsmudeli loomist võeti algne punktipilv, millelt analoogselt referentsmudeligas, eemaldati müra (Joonis 7.19a), loodi *mesh* mudel (vt Joonis 7.19b) ja siluti piigid. Tulemuseks saadi katusekuju idealiseeriv pind. Selle võrdlus UAV algsest punktipilvest loodud *mesh* mudeliga võimaldab tuvastada anomaaliad, mis võivad olla katusekatte deformatsioonid.



Joonis 7.19 Punktipilv (a) ja *mesh* mudel (b) 3DReshaper keskkonnas

Hälbemudelite koostamisel on võimalik määratleda hälvete ülem- ja alampiir. See võimaldab paremini visualiseerida ja tuvastada hälbeid, mida otsitakse. Lennusadama katusekatte deformatsioonide omapära on see, et nad ulatuvad normaalist väljapoole ehk otsitavad hälbed on kõik positiivsed. Katusekatte uurimiseks loodi kaks hälbemudelit: esimene, mille alampiiriks valiti 3 cm (vt Joonis 7.20 a) ja teine alampiiriga 4 cm (vt Joonis 7.20 b). Alampiiride kasutamine on oluline sellepärast, et katusekattele on iseloomulikud mõningad ehituslikud omapärad mis erinevad normaalpinnast. Seades hälvete tolerantsi (alampiiri) kõrgemale, on võimalik kattele iseloomulikke ehituspärasid võrdlusest eemaldada.



Joonis 7.20 Hälbemudelid 3Dreshaper keskkonnas, 3 cm alampiiriga (a) ja 4 cm alampiiriga (b)

Tolerantsi tõstmine 1 cm võrra muudab oluliselt tekkinud pilti (Joonis 7.20). See on tingitud asjaolust, et paljud deformatsioonid erinevad referentspinnast samas suurusjärgus kui ehituslikud omapärad. Samuti võib segavaks faktoriks olla kõrge UAV punktipilve kõrge müra tase, mida ei õnnestunud mürafiltritega täielikult eemaldada.

Kahjuks jäävad seda meetodit kasutades osad deformatsioonid märkamatuks ja kohati võib mõnda ehituslikku omapära pidada deformatsiooniks. Seega jääb antud meetodi suurimaks väljakutseks hälvete tolerantsi seadmine (Joonis 7.20). Sellest hoolimata on hälbemudeli koostamine tõhus meetod katusekatte karakteristikute uurimiseks.

7.5 Järeldused

Käesolevas peatükis antakse ülevaade UAV mõõdistuse teoreetilisest täpsusest ja võrreldakse seda COBIM2012 juhendis välja toodud täpsusnõuetega. Lisaks teoreetilisele täpsushinnangule esitatakse järgnevas jaotises UAV mõõdistuse täpsus TLS mõõdistuse suhtes. UAV mõõdistuse täpsuse hindmisel tuginetakse eelnevalt välja toodud tulemustele (jaotised 7.1 ja 7.2.).

Eestis puudub ametlik juhend, mis määraks ära nõutud täpsuse modelleerimisel. [22] Seetõttu kasutatakse Eesti standardikeskuse poolt (soome keelest) tõlgitud ja kohandatud juhendisarja COBIM2012 käesoleva magistritöö tulemuste valideerimiseks. COBIM2012 koosneb 14. osast, mille 2. osa „Lähteolukorra modelleerimine“ käsitleb mõõdistus- ja modelleerimisnõudeid, mis on võetud tulemuste valideerimise aluseks.

Pärast UAV mõõdistuse täpsuse hindamist käsitletakse ka ALS andmete kasutamist hoone katuse mõõdistamiseks ja Tallinna Lennusadama katusekatte deformatsioonide tuvastamist fotogramm-meetrilisel meetodil.

7.5.1 UAV mõõdistuse teoreetiline täpsus

Aerofotogramm-meetrilise mõõdistuse täpsuseks võib võtta 2-3-kordse GSD väärtuse [9]. Plaaniliselt 2-kordne GSD väärtus ja kõrguslikult 3-kordne GSD. See annab 50 m lennukõrguse täpsuseks DJI Phantom 4 pro puhul 27/41 mm (plaaniline/kõrguslik) ja 40 m lennukõrguse täpsuseks 21/31 mm (vt ka Tabel 4.1). Kuna hoone katus on UAV kaamerale lähemal kui seadistatud lennukõrgus, võib hoone katuse puhul rakendada karmimaid täpsusnõudeid. Keskmise lennukõrgus katuse suhtes 40 m lennu puhul oli umbes 23 m, mis annab täpsuseks 13/19 mm (GSD=0.63 cm/pix). Lennukõrguse 50 m puhul oli keskmiseks lennukõrguseks 35 m, mis annab täpsuseks 19 /28 mm (GSD=0.95 cm/pix).

UAV mõõdistuse evalveerimiseks võib tugineda Soomes ilmunud juhendile COBIM 2012. Juhend on koostatud BIM modelleerimise tarves, kus eristatakse kolme mõõdistusmetoodikast tulenevat taset. Nendeks on 1) lasermõõdistamine, 2) tahhümeetriline mõõdistamine ja 3) mõõdistamine laserskaneerimise teel. UAV fotogramm-meetria kasutamist antud juhendis ei ole käsitletud, kuid

on antud mõõdistusmudeli lubatud mõõdistushälbed. Juhendis on välja toodud järgmised lubatud mõõdistushälbed:

- Ehitise osade nurgapunktides 10 mm;
- Pindade, nt seinte ja põrandate puhul 25 mm;
- Vanade ebakorrapäraste tarindite puhul 50 mm.

Tabel 7.8 DJI Phantom 4 pro teoreetiline täpsus erinevatel lennukõrgustel ja vastavus COBIM 2012 juhendis esitatud nõudele, ühikud mm

Lennukõrgus (m)	Teoreetiline täpsus, plaaniline /kõrguslik	Lubatud hälve (COBIM 2012)	Kas vastab COBIM nõudele (jah/ei)?
40	21/31	25	jah/ei
50	27/41		ei/ei
23	13/19		jah/jah
35	19/28		Jah/ei

Kasutades GSD väärtust UAV mõõdistuse täpsuse hindamiseks näib, et vastava täpsusnõude saavutamiseks ei tohi lennukõrgus ületada 30 m (vt ka jaotis 4.2). Kuid magistritöö autori hinnangul ei ole ainult GSD väärtuse kasutamine täpsuse hindamiseks piisav. GSD väärtus kirjeldab saavutatavat punktitihedust ja sellest tulenevalt objektide dešifreerimisvõimet punktipilvest. Üksiku punkti täpsus punktipilves oleneb eelkõige aerofotode resolutsioonist, tähiste paiknemisest ja nende koordinaatide määramise täpsusest ning aerofotode ülekattuvusest. Suurema ülekattuvuse korral on aerofotol esinevad detailid nähtaval rohkematel aerofotodel ja see suurendab aerotriangulatsiooni usaldusväärsust [35]. Järelikult tuleks UAV täpsuse hindamiseks võrrelda UAV mõõdistust täpsema mõõdistustehnoloogiaga.

TLS mõõdistus ei ole veatu (vt jaotis 4.1), kuid UAV mõõdistuse evalveerimiseks loetakse TLS mõõdistus veatuks. See tähendab, et COBIM2012 lubatud mõõdistushälvete kehtivuse hindamiseks UAV mõõdistuse puhul arvutatakse UAV hälbed TLS mõõdistuse suhtes ilma TLS vigade kaasamiseta.

7.5.2 UAV mõõdistuse täpsuse hindamine

UAV mõõdistuse tulemusena saadud punktipilvede kvaliteeti hinnati kolmel erineval meetodil: 1) punktipilve hindamine visuaalselt, 2) punktipilve paksuste võrdlemine hoone fassaadi pinnal ning 3) konstruktsioonelementide gabariitide võrdlemine punktipilvedes. Lisaks sellele koostati UAV mõõdistuse kombinatsioonidele hälbemudelid.

Punktipilve visuaalsel hindamisel ilmnes, et parima tulemuse saab kasutades kahe lennu kombinatsiooni – ümbritsevat ja ristuvate trajektooridega RT, 50 m. Juhul, kui lennukõrgus katuse suhtes muutub liiga madalaks, näiteks keskmiselt 23 meetrit katusest lennukõrguse 40 m puhul, siis punktipilve tihedus langeb ja detaile on keerulisem punktipilves dešifreerida. Liiga madala lennukõrguse kasutamisel väheneb ühiste punktide osakaal külgnevatel aerofotodel ning aerofotogramm-meetrilised tarkvarad ei suuda piisava tihedusega punktipilve genereerida. See tähendab, et lennukõrguse valikul ei saa lähtuda ainult GSD väärtuse kaudu arvatud teoreetilisest täpsusest (vt ka Tabel 7.8).

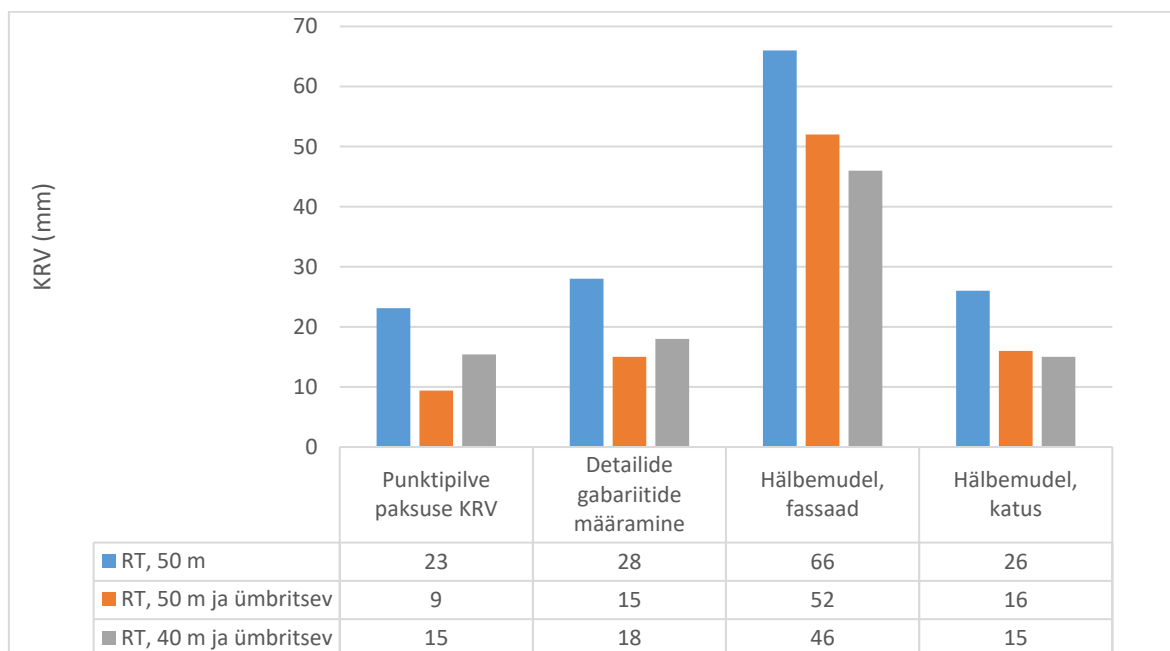
UAV mõõdistuste punktipilvede paksuste mõõtmisest hoone fassaadil ilmnes, et UAV mõõdistuse puhul ei ole punktipilve paksus fassaadi pinnal ühtlane ja esinesid suured erinevused võrreldes TLS mõõdistusega. RT 50 m ja ümbritseva lennu kombinatsioonil esines KRV 9 mm ja ainult RT, 50 m lennu puhul 23 mm. Punktipilve ebaühtlane paksus võib tekitada vigu modelleerimisel, kui on vaja määrata mõne detaili parameetreid. Silver Aule tõi enda magistritöös [22] välja, et tööpraktikas on levinud nõue, et lubatud erinevus mõõdistatud punktipilve ning mudeli vahe on 20 mm. Selle nõude täitmine oleks antud UAV mõõdistuse puhul võimalik, kui kasutada ümbritsevat ja ristuvate trajektooridega lennukombinatsioone.

Detailide gabariitide võrdlemisel võib rakendada COBIM2012 täpsusnõuet, mis näeb ette lubatud hälvet ehitise nurgapunktides 10 mm. Magistritöö raames võrreldi järgnevaid detaile punktipilves: hoone gabariidid, hoone ristlõike kõrgused, 1. ja 2. korruse aken ning üks uks. Kõik detailid ei klassifitseeru kui ehitise nurgapunktid, kuid nende määramise sarnasuses tõttu laiendatakse COBIM2012 nõuet kõikidele detailidele. Parim tulemus saavutati lennukombinatsiooniga RT 50 m ja ümbritsev, kus detailide gabariitide määramise KRV oli 15 mm ning keskmine erinevus oli 8 mm. See tähendab, et antud magistritöö raames läbi viidud uuringu tulemused ei vasta COBIM2012 esitatud täpsusnõudele. Kuid mõne detaili (vt Lisa 2) puhul saavutati täpsus, mis jäi juhendis esitatud väärtuse piiridesse.

Kolme erineva lennukombinatsiooni kohta koostati hälbemudelid, kus etalonmudeliks oli TLS mõõdistusega tehtud *mesh* mudel. Hälbemudelid näevad üsnagi ühetaolised välja, kuid siiski esinevad mõningad erisused. Ümbritseva lennu kasutamine vähendab fassaadil esinevaid hälbeid ning teravad nurgad on paremini eristuvad. Lendudel **RT 50 m** ja ümbritsev ning **RT, 40 m** ja ümbritsev on sarnased hälbed. Lennukõrgusel 40 m esinevad hoone katusel väiksemad hälbed kui lennukõrgusega 50 m, kuid madalamal lennukõrgusel on visuaalselt tunnetatavalt madalam punktitiheus. Kahe hälbemudeli hälbed erinevad teineteisest väga väikses suurusjärgus, mis võib

olla mõjutatud ka KRV määramise metoodikast. RT 40 m ja ümbritseva KRV on fassaadil 46 mm ja katusel 15 mm RT, 50 m ja ümbritseva krv ol fassaadil 52 mm ja katusel 16 mm.

Kokkuvõtteks on koostatud erinevate punktipilve kvaliteedi hindamismetoodikate KRV väärtused (vt Joonis 7.21).



Joonis 7.21 Punktipilve kvaliteedinäitajate KRV väärtuste histogramm

Kasutades antud magistritöös kirjeldatud metoodikat on võimalik saavutada UAV mõõdistuse punktipilv, mis on vastavalt sobilik COBIM2012 nõuetele hoonete katuste mõõdistamiseks. Hoonete fassaadide puhul võib UAV mõõdistusel olla toetav roll ehk fassaadide mõõdistamisel ei tasu ainult UAV mõõdistuse peale toetuda.

Magistritöö autor soovib edasistel uurimistöodel kasutada hoone fassaadi paremaks kujutamiseks mitut ümbritsevat lendu ning lendude vahel muuta kaamera vaatenurka ning lennukõrgust.

7.5.3 ALS andmete sobilikkus mõõdistusmudelisse

Magistritöös kasutatud ALS andmestik on piisava tihedusega, et adekvaatselt modelleerida Tallinna Lennusadama keeruka geomeetriaga katus, kuid ALS punktide puhul tuleb arvestada madalama täpsusega. ALS andmestiku kõrguslik KRV lennusadama katusel TLS andmestiku suhtes oli 66 mm ja

UAV (RT, 50 m ja ümbritsev) mõõdistuse suhtes 25 mm. See tähendab, et ALS andmed ei ole piisava täpsusega, et rahuldada COBIM2012 esitatud täpsusnõuet, mis nägi ette maksimaalset hälvet pindade puhul 25 mm.

7.5.4 Soovitused katusekatte deformatsioonide tuvastamiseks fotogramm-meetrilisel meetodil

Tallinna Lennusadama katusekatte deformatsioonide tuvastamisel katsetati metoodikat, kus UAV mõõdistuse punktipilve võrreldi iseendaga. Selle tegemiseks hõrendati UAV mõõdistuse punktipilve nõnda, et punktide keskmiseks vahekauguseks jäi 1 m. Hõrendatud punktipilvest loodi *mesh* mudel, millelt eemaldati deformatsioonidele omaste punktide mõju. Antud *mesh* mudel võeti referentsmudeliks ja seda võrreldi hõrendamata punktipilvest loodud *mesh* mudeliga.

Hälbemudeli kasutamisega õnnestus tuvastada suuremad deformatsioonid katusekattel, kuid esines probleem hälbemudeli veatolerantside seadmisel – osad katusekatte ehituslikud omapärad erinesid referentsmudelist samas suurusjärgus kui deformatsioonid ning väiksemad deformatsioonid jäid ehituslike omapärade varju.

Magistritöö autor soovib edasistel uurimistöodel katsetada „*best fit*“ meetodit deformatsioonide tuvastamisel. See tähendab referentspinna loomist „*best fit*“ meetodil nagu tegid seda A. Ellmann ja K. Julge TTÜ veetorni modelleerimisel [23]. Magistritöö koostajal polnud võimalik kasutada tarkvaralist lahendust, mis oleks võimaldanud luua kompleksset „*best fit*“ pinda. Magistritöös kasutatud tarkvara, 3DReshaper, ei võimaldanud oma „*best fit*“ pindadega (nendeks oli ring, pind, silinder, sfäär ja koonus) katust adekvaatselt kujutada, kuna Tallinna Lennusadama katus on küllalt keerulise geomeetriaga ja geomeetrilised primitiivid ei sobitu punktipilve piisava täpsusega. Üheks alternatiivseks tarkvaraks võiks olla Siemens NX10, mis on samuti keskendunud hälbemudelite (*deviation analysis*) loomisele.

Lisaks ülal pakutud variandile oleks sobilik katsetada ka näiteks Autodesk Revit keskkonnas modelleeritud sileda katuse võrdlemist deformatsioone sisaldava *mesh* mudeliga. Lihtsam võimalus deformatsioonide tuvastamisel on *mesh* mudeli visuaalne inspekteerimine.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö põhieesmärgiks oli hinnata UAV (*Unmanned Aerial Vehicle* ehk mehitamata õhusõiduk) mõõdistuse täpsust ja sobilikkust hoonete 3D mudeli koostamiseks. UAV mõõdistust kasutati ka katseobjekti katusekatte deformatsioonide tuvastamisel. Lisaks sellele uuriti Maa-ameti 2018. aasta aerolaserskaneeringu (ALS) punktide sobilikkust kaasamiseks hoone katuse modelleerimisse.

Magistritöö eesmärkide täitmiseks viidi läbi UAV mõõdistused Tallinna Lennusadamas drooniga DJI Phantom 4 pro. UAV mõõdistustel teostati kolme erineva lennutrajektooriga UAV lend. Nendeks lendudeks oli 1) Ristuvate trajektooriga lend, lennukõrgus 40 m. Lühendina **RT, 40 m**, 2) Ristuvate trajektooriga lend, lennukõrgus 50 m. Lühendina **RT, 50 m** ja 3) ümbritseva trajektooriga lend ümber hoone, lennukõrgus 30 m. Edaspidi: **ümbritsev**.

UAV mõõdistuste hindamiseks viidi läbi ka terestiline laserskaneerimine (TLS) instrumendiga Leica C10. TLS mõõdistus koosnes 10 jaamast, millest 6 olid hoone fassaadi mõõdistamiseks ja 4 Tallinna Lennusadama külgnevatest nurgatornidest katuse jäädvustamiseks. Kusjuures hoone täielikust mõõdistamisest hoiduti, sest hoone katus oli vetruv ja kohati järsk, mis muutis laserskanneri ohutu ülesseadmise võimatuks. TLS mõõdistus loeti UAV mõõdistuse etalonandmestikuks. See tähendab, et TLS andmestik loeti UAV mõõdistuse suhtes veatuks.

UAV mõõdistusel kogutud aerofotodest genereeriti punktipilved kasutades selleks tarkvara Pix4DMapper. Punktipilved loodi kolme erineva lennu omavahelisel kombineerimisel. Kombinatsioonid olid järgnevad:

- 1) Ainult RT, lennukõrgus 50 m. Lennukõrgus hoone katuse suhtes 25–40 m
- 2) RT, lennukõrgus 50 m ja ümbritsev. Lennukõrgus hoone katuse suhtes 25–40 m
- 3) RT, lennukõrgus 40 m ja ümbritsev. Lennukõrgus hoone katuse suhtes 15–30 m

Tekkinud punktipilvede kvaliteeti hindamiseks kasutati kolme erinevat hindamismetoodikat. Nendeks metoodikateks olid: 1) punktipilvede hindamine visuaalselt; 2) punktipilvede paksuste võrdlemine hoone fassaadi pinnal; ja 3) punktipilves detailide gabariitide võrdlemine. Lisaks sellele koostati igale lennukombinatsioonile hälbemudel (*deviation analysis*).

Hindamismetoodikate tulemusi võrreldi COBIM2012 juhendis esitatud täpsusnõuetega mõõdistusmudelile. COBIM2012 juhend annab lubatud veaks pindadele (seinad, põrandad) 25 mm ja ehitise osade nurgapunktides 10 mm. Katuse mõõdistusel jäädi lubatud vea piiridesse kui kasutati

vähemalt kahe lennu kombinatsiooni. RT 50 m ja ümbritseva puhul saavutati katuse KRV (keskmine ruutviga) TLS mõõdistuse suhtes 16 mm, RT 40 m ja ümbritseva lennu korral 15 mm. Ainult ühe lennu kasutamisel (RT, 50 m) jäi katuse mõõdistamise KRV 26 mm. Hoone fassaadi puhul esinesid märksa suuremad hälbed, kus ühe lennu kasutamisel oli KRV TLS suhtes 67 mm, RT 50 m ja ümbritseva lennu puhul oli vastav näitaja 52 mm ning madalamal paarilennul 46 mm. Ehitise osade nurgapunktide lubatud hälbe 10 mm piiridesse ei jäänud ükski lennukombinatsioon. Detailide gabariitide määramise KRV oli ühe lennu puhul 18 mm, RT 50 ja ümbritsev lennukombinatsioonil 15 mm ning RT, 40 m ja ümbritsev lennukombinatsioonil 15 mm. Tasub mainimist, et kahel lennukombinatsioonil RT, 50 m ja ümbritsev ning RT, 40 m ja ümbritsev olid küll hindamismetoodikate põhjal sarnased tulemused, kuid tegelikult olid madalamal lennukombinatsioonil liiga madala lennukõrguse tõttu punktivilves tühimikud. Seega tuleks eelistada hoone katuse mõõdistamisel kaugust UAV ja katuse vahel vähemalt 25 m.

Hindamismetoodikate tulemustest järeldus, et kasutades magistritöös esitatud meetodikat, on võimalik hoone katust mõõdistada UAV-ga jäädes samal ajal COBIM2012 esitatud lubatud hälvete piiridesse. Hoone fassaadi mõõdistamisel tuleks rakendada alternatiivseid meetodikaid. Magistritöö autor soovib edasistel uurimistöodel katsetada hoone fassaadi mõõdistamiseks mitut ümbritseva trajektooriga lendu ning lendude vahel muuta lennukõrgust ja kaamera vaatenurka.

ALS andmestiku hindamiseks tuli kõigepealt määrata ALS andmestiku kõrguslik ja plaaniline nihe TLS mõõdistuse suhtes. Plaanilise nihke eemaldamiseks kasutati hoone nelja nurga ja kahe valgustorni tsentri koordinaate. Koordinaatidest nihete arvutamisel ilmnis, et nihked ei ole igas ruumpunktis ühesuunalised. Erisuunaliste nihete olemasolu ALS andmestikus peeti ebatõenäoliseks ja järeldati, et ALS andmestikust ei saa antud meetodikaga plaanilisi nihkeid eemaldada. Kõrgusliku nihke eemaldamiseks kasutati ALS ja TLS andmestikus ühist Tallinna Lennusadama merepoolset kiviplatsi, millele koostati hälbemudel. Hälbemudeli põhjal hinnati, et ALS andmestik oli süstemaatiliselt 26 mm kõrgemal kui TLS mõõdistus.

Peale süstemaatilise nihke eemaldamist koostati kaks ALS hälbemudelit. Esimeseks referentsmudeliks oli TLS mudel ja teiseks UAV mõõdistusel saadud RT, 50 m ja ümbritsev mudel. Hälbemudelis hinnati ALS mõõdistuse täpsuseks (KRV) Tallinna Lennusadama katusel 66 mm TLS suhtes ja UAV mudeli suhtes 25 mm. Kaasaegse ALS mõõdistuse punktitihedus oli piisav, et kujutada keeruka kujuga katuse geomeetria. See tähendab, et Tallinna Lennusadamast oleks saanud koostada 3D mudeli kasutades selleks TLS ja ALS andmeid.

Tallinna Lennusadama katusekatte deformatsioonide tuvastamisel kasutati meetodikat, kus UAV mõõdistuse punktipilve võrreldi iseendaga. Esmalt loodi UAV punktipilvest referentsandmestik, millest oli eemaldatud deformatsioonidele omased punktid. Seejärel võrreldakse referentsandmestiku esialgse punktipilvega. Tallinna Lennusadama katusekatte deformatsioonid meenutavad välimuselt muhkusi ja otsitavad deformatsioonid jäid kõik katuse normaalpinnast väljapoole.

Metoodika rakendamiseks hõrendati UAV mõõdistuse punktipilv nõnda, et punktide keskmiseks vahekauguseks punktipilves jäi 1 m. Selle vahekaugusega õnnestus punktipilves minimaliseerida deformatsioonidele omaste punktide mõju, säilitades samal ajal katuse geomeetria. Hõrendatud punktipilvest loodi *mesh* mudel, millelt eemaldati allesjäänud deformatsioonidele omaste punktide mõju. See *mesh* mudel võeti referentsmudeliks ja võrreldi seda hõrendamata punktipilvest loodud *mesh* mudeliga ehk koostati kahe andmestiku vaheline hälbemudel.

Hälbemudeli kasutamisega õnnestus tuvastada suuremad deformatsioonid katusekattel, kuid esines probleem hälbemudeli veatolerantside seadmisel – osad katusekatte ehituslikud omapärad erinesid referentsmudelist samas suurusjärgus kui deformatsioonid ning väiksemad deformatsioonid jäid ehituslike omapärade varju. Sellest hoolimata oli kirjeldatud meetodikaga võimalik tuvastada ja anda arvulisi hinnanguid Tallinna Lennusadama katusel esinevatele deformatsioonidele.

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to evaluate the accuracy of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) photogrammetry in application to 3D building modelling. UAV photogrammetry was also used to assess deformations on a roof covering. In addition, the suitability of airborne laser scanning points on a complex roof structure was evaluated.

In order to achieve the goals of this thesis, a case study was carried out at the Tallinn Seaplane Harbour. A DJI Phantom 4 pro was used to perform a series of different flight missions. Flight missions were as following: 1) perpendicular trajectories with a flight height of 40 m – **RT, 40 m** 2) perpendicular trajectories with a flight height of 50 m – **RT, 50 m** and 3) Circular around the perimeter of the building with a flight height of 30 m.

The evaluation of UAV photogrammetry was in reference to terrestrial laser scanning (TLS). Thus a laser scanning of the outside perimeter and roof was also conducted at the Tallinn Seaplane Harbour. The laser scanning comprised of 10 stations from which 6 were to scan the facade and 4 stations were set on top of the towers of the seaplane harbour. It should also be mentioned that the full coverage of the roof was not achieved due to safety concerns.

The data acquired from the flight missions was used to generate 3 different point clouds. Point clouds were generated with a software called Pix4DMapper. Flight missions were combined in point cloud processing. The combinations were as following:

- 1) Only RT, 50 m with a flight height in reference to the building roof 25–40 m
- 2) RT, 50 m and Circular with a flight height in reference to the building roof 25–40 m
- 3) RT, 40 m and Circular with a flight height in reference to the building roof 15–30 m

The resulting point clouds were assessed with 3 different methodologies: 1) visual inspection of the point clouds 2) parameters of the point cloud on the surface of the building facade and 3) comparison of dimensions in TLS and UAV point clouds. Additionally, deviation analysis for each combination was conducted.

The results were compared to COBIM2012 standards for 3D building modelling. COBIM2012 states that the deviations for surfaces (walls, floors) should not exceed 25 mm and the corner points should be determined with the accuracy of 10 mm. The desired accuracy for the roof surface was achieved if at least 2 flights were used to generate a point cloud. RT, 50 m and Circular combination had a RMSE (Root Mean Square Error) of 16 mm, and the combination of Circular and RT, 40 m

resulted in a RMSE of 15 mm. When only one flight mission (RT, 50 m) was used to generate the point cloud, the RMSE was 26 mm. In case of the building facade, the desired accuracy was not achieved as the RMSE of the singular flight stood at 66 mm. The *Circular* and RT, 40/50 m flights had presumably better results – RMSE of 46 and 52 mm respectively. The accuracy standard for corner points was also not achieved as the best flight combination (*Circular* and RT, 50 m) had RMSE of 15 mm, with a slightly lower flight height the RMSE was 18 mm and with a singular flight the RMSE was 28 mm. It is worth mentioning that the two flights with a *circular* combination had similar results however the *Circular* and RT, 40 m flight combination had visually lower point cloud density on the roof compared to *Circular* and RT, 50 m. Therefore, a flight height of at least 25 m in reference to the roof should be preferred.

In conclusion, using the analogue methodology as described in this thesis, accuracy of 15 mm can be achieved for measuring complex roof structures. In case of measuring a building facade, alternative methodology should be considered. The author suggests that in order to improve point cloud quality on the building facade, several circular flight missions should be conducted. The flight missions should have different camera angles and flight heights.

In order to evaluate airborne laser scanning in reference to TLS and UAV, the data sets needed to be aligned to each other. This means eliminating any systematic differences between data sets. Eliminating systematic errors in planar coordinates was done by determining coordinates of 4 corners of the building and 2 towers in ALS and TLS data sets. The differences in coordinates showed contradictory results – deviations showed a different trend in every point of computation. Rotational errors were assessed as highly unlikely in ALS data i.e systematic errors in planar coordinates were not eliminated. Systematic errors in height were eliminated by using deviation analysis. The deviation analysis showed that the systematic height differences between data sets was 26 mm.

Furthermore, deviation analysis of the Tallinn Seaplane Harbour's roof was carried out between ALS, TLS and UAV. Deviation analysis showed that the RMSE between ALS and TLS data sets was 66 mm and between ALS and UAV 25 mm. ALS had sufficient point cloud density in order to adequately model complex roof structure although UAV should be preferred to measure hard to reach surfaces.

Lastly, the deformations on the Tallinn Seaplane Harbour's roof covering were evaluated using UAV point cloud and deviation analysis. Tallinn Seaplane Harbour roof covering exhibits small scale deformations, which resemble lump like bubbles.

In order to detect deformations from a singular point cloud the point cloud was copied into two separate point clouds. The first point cloud was resampled with an average distance of 1 m between the points. This allowed to eliminate points which were inherit to the deformations, and at the same time to keep the geometrical integrity of the point cloud. Resampled point cloud was used to create a mesh. The generated mesh still exhibited some points which were inherit to deformations. These points were eliminated by using smooth and spike removal mechanics of the software. The second point cloud was kept mainly unchanged. The last step was to compare these two point clouds with each other i.e to conduct a deviation analysis.

Deviation analysis allowed to detect substantial deformations on the roof covering but unfortunately some deformations with a smaller scale went unnoticed. This is due to the fact that some deformations are in the same scale as the roof covering's structural design. By lowering the deviation tolerance some structural design elements may appear as deformations. Thus, the greatest challenge of this method is to set deviation tolerances. In conclusion, despite the challenges, it is convenient to detect and evaluate deformations using this method.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] K. Kokamägi, *Mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal puistangu mahtude arvutamise täpsus*, Tartu: Magistritöö: Eesti Maaülikool, 2018.
- [2] N. Liba, *FOTOGRAMM-MEETRIA ALUSED*, Tartu: Eesti Maaülikool, Metsandus- ja maaehitusinstituut, 2005.
- [3] H. Eisenbeiß, *UAV Photogrammetry*, Zurich: väitekirj: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009.
- [4] U. Nisha, „www.GisResources.com,“ GIS Resources, [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.gisresources.com/basic-of-photogrammetry_2/. [Kasutatud 26 Aprill 2019].
- [5] „[https://support.pix4d.com,](https://support.pix4d.com/)“ Pix4D, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/205675256-How-are-defined-yaw-pitch-roll->. [Kasutatud 15 aprill 2019].
- [6] R. Kõök, *MEHITAMATA LENNUMASINATE (UAV) FOTOGRAMM-MEETRILISTE MÕÕDISTUSTE PÕHJAL KOOSTATAVATE PINNAMUDELITE TÄPSUS TEE-EHITUSLIKE RAKENDUSTE NÄITEL*, Tallinn: Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, 2018.
- [7] J. O'Connor, M. Smith J ja M. R James, „Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: Optimising image data,“ *Progress in Physical Geography*, kd. 41, nr (3), pp. 325-344, 2017.
- [8] M. J. Jedlička, “Correction of radial distortion in Digital images,” ResearchGate, Praha, 2007.
- [9] A. Sula, *UAV MÕÕDISTUSE KÕRGUSLIKE JA PLAANILISE TÄPSUSE EVALVEERIMINE*, Tallinn: Magistritöö: Tallinna Tehnikaülikool, 2015.
- [10] E. M. Mikhail, J. S. Bethel and J. C. McGlone, *Introduction to modern photogrammetry*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [11] „[www.geosoft.ee,](http://www.geosoft.ee/)“ Geosoft OÜ, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.geosoft.ee/tooted/dji-phantom-4-rtk>. [Kasutatud 12 Aprill 2019].

- [12] „www.Geosoft.ee,“ Geosoft OÜ, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.geosoft.ee/tooted/trimble-ux5-multispectral>. [Kasutatud 12 Aprill 2019].
- [13] „www.support.pix4d.com,“ Pix4D, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459?fbclid=IwAR1_fdxRYunN1kbVfD_7RTv6jCAhW1fNFjIqDpmJcCtlakbHG4HZGD8KBNg. [Kasutatud 26 Aprill 2019].
- [14] S. Malihi, M. V. Zoej, M. Hahn, M. Mokhtarzade ja H. Arefi, „3D Building Reconstruction Using Dense Photogrammetric Point Cloud,“ *The International Archives of the Photogrammetry*, Kd-d. %1/%2XLI-B3, pp. 71-74, 2016.
- [15] N. Hallermann, G. Morgenthal ja V. Rodehorst, „Vision-based monitoring of heritage monuments: Unmanned Aerial Systes (UAS) for detailed inspection and high-accuracy survey of structures,“ *WIT Transactions on The Built Environment*, kd. 153, pp. 621-632, 2015.
- [16] N. Hallermann, G. Morgenthal ja V. Rodehorst, „Vision-based deformation of large scale structures using Unmanned Aerial Systems,“ Bauhaus-Universität, Weimar.
- [17] K. Julge, *Laser Scanning of Built Environment and Landforms with Spatial Modelling Applications*, Tallinn: Doktoritöö, TTÜ Kirjastus, 2017.
- [18] M. Sobak, *PINNAVORMIDE LASERSKANEERIMINE JA 3D MODELLEERIMINE*, Tallinn: Magistritöö, Tallinna Tehnikülikool, 2014.
- [19] S. Paatsi, *LASERKIIRE LANGEMISNURGA MÕJU MÕÕDISTUSPUNKTIDE TÄPSUSELE JA 3D PUNKTIILVE USALDATAVUS*, Tallinn: Lõputöö, Tallinna Tehnikakõrgkool, 2018.
- [20] J.-A. Beraldin, F. Blais, C. Brenner, C. Brieese, K. Hanke, R. Klein, H. Kutterer, D. Lichti, R. Lindenbergh, U. Lohr, H.-G. Maas ja G. Vosselman, *Airborne and terrestrial laser scanning*, Dunbeath: Whittles Publishing, 2010.
- [21] A. Gruno, „www.maaamet.ee,“ Maa-amet, mai 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.maaamet.ee/data/Anti_Gruno_Aerolaserskaneerimise_andmed_ja_nende_ka_sutamise_voimalused.pdf?t=20120504142304. [Kasutatud 27 Aprill 2019].

- [22] S. Aule, *Mittestandardse kujuga ehitiste laserskaneerimine ja punktipilve põhjal modelleerimine TTÜ veetorni näitel*, Tallinn: Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, 2014.
- [23] K. Julge ja A. Ellmann, „Combining Airborne and Terrestrial Laser Scanning technologies for measuring complex structures,” %1 *The 9th International Conference "ENVIRONMENTAL ENGINEERING"*, Vilnius, 2014.
- [24] E. Grünthal, „geoportaal.maaamet.ee,” Maa-amet, 15 Märts 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html>. [Kasutatud 27 Aprill 2019].
- [25] C. Kyoungah, J. Hong ja L. Impyeong, „Precise Geometric Registration of Aerial Imagery and LIDAR Data,” *ETRI*, kd. 33, nr 4, pp. 506-516, 2011.
- [26] N. Maiellaro, M. Zonno ja P. Lavallo, „LASER SCANNER AND CAMERA-EQUIPPED UAV ARCHITECTURAL SURVEYS,” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Kd-d. %1/%2XL-5/W4, pp. 381-386, 2015.
- [27] D. Roca, J. Armesto, S. Lagüela ja L. Diaz-Vilarino, „LIDAR-EQUIPPED UAV FOR BUILDING INFORMATION MODELLING,” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Kd-d. %1/%2XL-5, pp. 523-527, 2014.
- [28] „www.LeicaEstonia.ee,” Geosystems, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.leicaestonia.ee/leica-scanstation-c10>. [Kasutatud 20 Aprill 2019].
- [29] „www.DJI.com,” DJI, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.dji.com/ee/phantom-4-pro>. [Kasutatud 17 aprill 2019].
- [30] „Trimble.com,” Trimble inc, [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-208580/022543-098L_TrimbleS6_DS_0613_LR.pdf. [Kasutatud 27 Aprill 2019].
- [31] V. Kulbach, „Ehituslikud tehnikamälestised Eestis,” %1 *Insenerikultuur Eestis 1*, Tallinn, Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus, 1992, pp. 53-55.

- [32] M. Karu, „Raudbetoonkuurist muuseumihooneks. Lennusadam 2009 - 2012,“ *Vesilennukite Angaar. Lennukuurist muuseumiks*, Tallinn, Eesti Meremuuseum, 2014.
- [33] A. Engin Burak, T. Pingbo, A. Burcu ja H. Daniel, „Deviation analysis method for the assessment of the quality of the as-is Building Information Model generated from point cloud data,“ *Automation in Construction*, kd. 35, pp. 507-516, 2013.
- [34] V. Kala, *GEODEETILISTE MÕÕTMISTE ANDMETÖÖTLUSE TEOORIA ALUSED*, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2009.
- [35] „www.support.pix4d.com,“ Pix4D, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459>. [Kasutatud 24 Aprill 2019].

LISAD

Lisa 1 UAV fotode põhjal koostatud punktipilvede kõrguslik kontrollimine tähiste kohal

Ühikud meetrites, erinevused millimeetrites

Tähised	Tegelik	Leica C10		RT, 50 m ja ümbritsev		
		Mõõdetud	Erinevus	Mõõdetud	Keskmine	Erinevus
A1	3.130	3.129	-1	3.144	3.143	13
				3.145		
				3.137		
				3.145		
A2	2.724	2.725	1	2.736	2.734	9
				2.727		
				2.733		
				2.738		
A3	2.296	2.297	1	2.299	2.298	2
				2.296		
				2.284		
				2.313		
A4	2.245	2.245	0	2.240	2.241	-4
				2.244		
				2.242		
				2.238		
A5	2.258	2.257	-1	2.256	2.256	-2
				2.253		
				2.257		
				2.258		
A6	2.626	2.627	1	2.624	2.625	-1
				2.629		
				2.621		
				2.626		
A7	2.818	2.83	12	2.833	2.829	11
				2.835		
				2.821		
				2.827		

Lisa 1 Jätk

Ühikud meetrites, erinevused millimeetrites

Tähised	Tegelik	RT, 40 m ja ümbritsev			RT, 50 m		
		Mõõdetud	kKeskmine	Erinevus	Mõõdetud	Keskmine	Erinevus
A1	3.130	3.132	3.130	0	3.146	3.141	11
		3.120			3.147		
		3.128			3.134		
		3.139			3.135		
A2	2.724	2.734	2.736	11	2.729	2.731	6
		2.719			2.734		
		2.741			2.725		
		2.748			2.734		
A3	2.296	2.322	2.311	15	2.314	2.310	14
		2.315			2.307		
		2.298			2.308		
		2.309			2.312		
A4	2.245	2.260	2.264	19	2.243	2.246	0
		2.266			2.248		
		2.256			2.250		
		2.273			2.241		
A5	2.258	2.287	2.281	23	2.261	2.261	3
		2.288			2.259		
		2.274			2.259		
		2.275			2.264		
A6	2.626	2.626	2.631	5	2.639	2.637	11
		2.630			2.639		
		2.632			2.635		
		2.635			2.635		
A7	2.818	2.832	2.830	12	2.829	2.834	16
		2.829			2.835		
		2.825			2.837		
		2.834			2.831		

Lisa 2 Hoone detailide gabariitide mõõtmistulemused punktivilves

Ühikud meetrites

	Leica C10	RT, 40 m ja ümbritsev		RT, 50 m ja ümbritsev		RT, 50 m	
		Mõõdetud	Hälve (mm)	Mõõdetud	Hälve (mm)	Mõõdetud	Hälve (mm)
Hoone gabariidid	123.674	123.671	3	123.655	19	123.662	12
	50.703	50.687	16	50.708	-5	50.669	34
	123.650	123.609	41	123.629	21	123.628	22
	50.752	50.741	11	50.738	14	50.735	17
Hoone ristlõike kõrgused	13.777	13.781	-4	13.782	-5	13.793	-16
	18.674	18.689	-15	18.667	7	18.707	-33
	18.593	18.596	-3	18.577	16	18.604	-11
	14.047	14.059	-12	14.023	24	14.065	-18
1. korruse aken	1.823	1.834	-11	1.804	19	1.834	-11
	3.192	Ei eristunud	-	3.215	-23	3.155	37
2. korruse aken	1.823	Ei eristunud	-	1.824	-1	1.778	45
	3.182	Ei eristunud	-	3.167	15	3.147	35
Uks	2.928	2.902	26	2.922	6	2.892	36
	2.179	2.165	14	2.179	0	2.216	-37

Lisa 3 ALS ja TLS andmetes plaanilise nihke arvutamine

Ühikud meetrites

	Valgustorn 1		Valgustorn 2	
	X	Y	X	Y
ALS	6590631.914	541884.838	6590704.844	541886.010
TLS	6590632.015	541884.740	6590705.007	541886.064
$\Delta X, \Delta Y$	0.101	-0.098	0.163	0.054

	Hoone nurk 1		Hoone nurk 2	
	X	Y	X	Y
ALS	6590730.679	541861.069	6590729.802	541911.838
TLS	6590730.718	541861.150	6590729.842	541911.711
$\Delta X, \Delta Y$	0.039	0.081	0.040	-0.127

	Hoone nurk 3		Hoone nurk 4	
	X	Y	X	Y
ALS	6590607.058	541858.921	6590606.154	541909.698
TLS	6590607.091	541858.963	6590606.219	541909.695
$\Delta X, \Delta Y$	0.033	0.042	0.065	-0.003

Keskmine viga:

ΔX 0.074

ΔY – 0.008