



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INSENERITEADUSKOND

GNSS-RTK VÕIMEKUSEGA MEHITAMATA LENNUMASINATEGA
SAAVUTATAVA MÕÕDISTUSTÄPSUSE EVALVEERIMINE

VALIDATING THE SURVEYING ACCURACY OF GNSS-RTK FEATURED
UNMANNED AERIAL VEHICLES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kevin Reimann

Üliõpilaskood: 176410

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

„.....“201...

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

„.....“201...

Juhendaja:

/ allkiri /

„.....“201...

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

„.....“201...

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kevin Reimann, 176410 (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:

GNSS-RTK VÕIMEKUSEGA MEHITAMATA LENNUMASINATEGA SAAVUTATAVA MÕÕDISTUSTÄPSUSE EVALVEERIMINE

VALIDATING THE SURVEYING ACCURACY OF GNSS-RTK FEATURED UNMANNED AERIAL VEHICLES

Lõputöö põhieesmärgid:

1. GNSS-RTK UAV mõõdistustehnoloogia täpsuse valideerimine
2. GNSS-RTK UAV täpsuse vastavus topo-geodeetilise uuringu situatsioonimõõdistamise nõuetele
3. GNSS-RTK UAV aerofotode sobivus mahtude määramiseks

Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr. | Ülesande kirjeldus | Tähtaeg |
|-----|---|------------|
| 1. | Andmete kogumine ja esmane andmetöötlus | 01.03.2019 |
| 2. | Tulemuste analüüs ja esmased järeldused | 01.04.2019 |
| 3. | Tervikmustandi esitamine | 01.05.2019 |

Töö keel: eesti keel Lõputöö esitamise „.....“201...
tähtaeg:

Üliõpilane: Kevin Reimann „.....“201...
/ allkiri /

Juhendaja: Artu Ellmann „.....“201...
/allkiri /

Juhendaja: Kalev Julge „.....“201...
/allkiri /

SISUKORD

| | |
|--|----|
| Jooniste loetelu | 7 |
| Tabelite loetelu | 9 |
| Enimkasutatud mõistete seletused | 10 |
| SISSEJUHATUS | 11 |
| 1. UAV MÕÕDISTAMINE JA LENNUPARAMEETRID | 13 |
| 1.1 UAV fotogramm-meetrilise mõõdistamise põhimõtted | 13 |
| 1.1.1 UAV klassifikatsioon | 14 |
| 1.1.2 UAV kasutusvaldkonnad | 15 |
| 1.2 Lennuparameetrid | 16 |
| 1.2.1 Lennukõrgus ja kiirus | 16 |
| 1.2.2 Aerofotode omavaheline ülekattumine | 17 |
| 1.2.3 UAV kaamera parameetrid | 18 |
| 1.2.4 Lennutrajektoorid | 19 |
| 1.3 Ilmastikutingimuste mõju UAV mõõdistusele | 20 |
| 2. AEROFOTODE GEOREFEREERIMINE | 21 |
| 2.1 Aerofotode georeferentseerimise võimalused | 21 |
| 2.1.1 GNSS ja IMU seadmete põhimõte | 21 |
| 2.1.2 UAV GNSS-RTK tehnoloogia | 22 |
| 2.2 Varasemate uurimistöde ülevaade | 23 |
| 3. RUUMIANDMETE HÕIVAMISE NÕUDED | 26 |
| 3.1 Aeromõõdistamise nõuded | 26 |
| 3.2 Topo-geodeetilise uuringu nõuded | 26 |
| 3.3 Markšneidermõõdistuse nõuded | 27 |
| 3.4 Lennuregulatsioon | 28 |
| 4. MAGISTRITÖÖS KASUTATUD SEADMED | 29 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | DJI Phantom 4 RTK | 29 |
| 4.2 | Elektrontahhümeeter Trimble S5..... | 30 |
| 4.3 | GNSS seade Trimble R8 | 30 |
| 4.3.1 | Trimble VRS Now püsijaamade võrk | 30 |
| 5. | VÄLITÖÖ KIRJELDUS | 32 |
| 5.1 | Möödistusala..... | 32 |
| 5.2 | Alusvõrgu rajamine | 33 |
| 5.3 | Tahhümeetiline möödistamine..... | 34 |
| 5.4 | GNSS-RTK UAV möödistamine | 36 |
| 6. | MÖÖDISTUSANDMETE TÖÖTLEMINE | 37 |
| 6.1 | Pix4DMapper..... | 37 |
| 6.2 | Autodesk ReCap | 39 |
| 6.3 | 3DReshaper | 40 |
| 6.4 | Microsoft Office Excel | 41 |
| 7. | GNSS-RTK UAV TULEMUSTE EVALVEERIMINE | 42 |
| 7.1 | Punktipilvede kõrgusliku vea hindamine | 42 |
| 7.1.1 | Lennukõrguse mõju GNSS-RTK UAV möödistuse täpsusele..... | 42 |
| 7.1.2 | Võrdlusmudelite rakendamine kõrguslikul evalveerimisel | 43 |
| 7.2 | GNSS-RTK UAV plaanilise täpsuse evalveerimine tähiste kohal..... | 48 |
| 7.3 | Mahuarvutused | 50 |
| 8. | GNSS-RTK UAV MÖÖDISTUSTEHNOLGOOGIA TULEMUSTE JÄRELDUSED..... | 52 |
| 8.1 | Kõrguslik täpsushinnang fotogramm-meetrilise möödistamise täpsusele..... | 52 |
| 8.2 | Plaaniline täpsushinnang fotogramm-meetrilise möödistamise täpsusele..... | 55 |
| | KOKKUVÕTE | 57 |
| | SUMMARY | 60 |
| | KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU | 64 |
| | LISAD/APPENDICES..... | 68 |
| | LISA 1. RTK meetodi põhimõtteline skeem | 69 |

| | |
|---|----|
| LISA 2. VRS meetodi põhimõtteline skeem..... | 70 |
| LISA 3 Osade tähistega (P3,P6,P8) võrdlusmudel tahhümeetrilise mõõdistusega | 71 |
| LISA 4 Kõikide tähistega võrdlusmudel tahhümeetrilise mõõdistusega | 72 |
| LISA 5. Visuaalne plaanilise asendi täpsuse kontroll püsikatendi näitel | 73 |
| LISA 5 jätk | 74 |
| LISA 6 Suurendatud väljavõte punktis 1..... | 75 |
| LISA 7. Suurendatud väljavõte punktis 2..... | 76 |
| LISA 8. Varjudest tingitud punktipilve mürapunktid | 77 |

Jooniste loetelu

| | |
|---|----|
| Joonis 1.1 Triangulatsiooni põhimõte, kus on kujutatud iseloomulike punktide leidmist kahel erineval aerofotol [4] | 14 |
| Joonis 1.2 Delair UX11 fikseeritud tiivaga droon (vasakul) ja DJI Phantom 4 RTK rootormootoriga droon (paremal) [6]..... | 15 |
| Joonis 1.3 Fotogramm-meetrilise tulemuse fotodele antav visuaalne hinnang. Vasakult esimene foto on väga hea kvaliteediga, teine foto on udune ning kolmas foto vähese valgusega [12]..... | 17 |
| Joonis 1.4 UAV fotode põiki ja piki ülekattuvus [13]..... | 17 |
| Joonis 1.5 Kaamera läätsest moonutused fotodel. Variant (a) on moonutusega foto ja paremal (b) on moonutuseta foto [16]..... | 18 |
| Joonis 1.6 Erinevad lennutrajektorid: a) paralleelsete trajektoridega, b) ristuvate trajektoridega ning c) ümbritsev..... | 19 |
| Joonis 2.1 UAV orientatsiooni parameetrid [21]..... | 22 |
| Joonis 2.2 UAV GNSS-RTK tööpõhimõte. [23] | 23 |
| Joonis 3.1 Rohelise värviga märgistatud ala on TSOON9 ning sinine tähis on märgistatud objekti asukoht [30] | 28 |
| Joonis 4.1 DJI UAV platvormid Phantom 4 RTK (vasakul) ja Phantom 4 Pro (paremal) [8]..... | 29 |
| Joonis 4.2 Trimble VRS Now püsivõrku kuuluvate baasjaamade asukohad [6] | 31 |
| Joonis 5.1 Katseobjekti kaardivaade (Kaardipilt on tehtud Maa-ameti geoportaalil 27.05.2019).. | 32 |
| Joonis 5.2 Trimble R8 GNSS seadmega mõõdistatud alusvõrgu punktide asukohaskeem. Punased märgid näitavad tähiste asukohta ning sinisega on punktide nimetus. Punktide nimetamisel (S, K, P) ei lähtutud loogikast. (Tehtud tarkvaras AutoCAD) | 33 |
| Joonis 5.3 Alusvõrgu punktide koordineerimine ja tähiste tähistamine looduses (Foto tehtud mõõdistustööde käigus)..... | 34 |
| Joonis 5.4 Tahhümeetrilise mõõdistuspunktide (punasega) jaotus. Punane joon kirjeldab piirkonda 1, must joon kirjeldab piirkonda 2 | 35 |
| Joonis 5.5 Mõõtpunktide asukoht ristlõikes kontaktmõõdistamise teel. Rohelise värviga kujutatud pinnad on maapind (Koostatud tarkvaras AutoCAD)..... | 35 |
| Joonis 6.1 Aerofotode omadusi kirjeldav aken (Kuvatõmmis tehtud programmis Pix4DMapper) . | 38 |

| | |
|---|----|
| Joonis 6.2 Andmetöötlusprogrammi tulemid. a) ühised leitud tunnuspunktid b) tihendatud punktipilv (Kuvatõmmised tehtud programmis Pix4DMapper)..... | 39 |
| Joonis 6.3 Võrdlusmudel 3DReshaper keskkonnas. Musta värvusega kujutatud punktobjektid on tahhümeetrilise mõõdistuse punktid. Ühikud meetrites..... | 40 |
| Joonis 7.1 RTK tähisteta pinnamudeli võrdlemine referentspinnaga. Märgistel on välja toodud kõrguslik erinevus (Dev) määratud punktides. Musta värvusega punktid on tahhümeetrilise mõõdistatud punktid. Joonmõõtkava on meetrites (Koostatud programmis 3DReshaper) | 45 |
| Joonis 7.2 RTK tähisteta ja kõikide tähistega pinnamudelite võrdlus. Punase värvusega on kujutatud tahhümeetrilise mõõtmisviisiga hõivatud punktide asukohad. Joonmõõtkava on meetrites (Koostatud programmis 3DReshaper)..... | 47 |
| Joonis 7.3 Tähisteta keskpunkti määramine punktipilvel programmis AutoCAD..... | 48 |
| Joonis 7.4 Katseala keskmes paikneva künka määratud piir (sinine joon) ning tulemus peale punktipilve puhastamist (Koostatud tarkvaras 3DReshaper) | 50 |
| Joonis 0.1 Osade tähistega (3 tk) pinnamudeli võrdlemine referentspinnaga. Märgistel on välja toodud kõrguslik erinevus (Dev) määratud punktides. Punase värvusega punktid on tahhümeetrilise mõõtmisviisiga hõivatud punktid. Joonmõõtkava on meetrites (Koostatud programmis 3DReshaper)..... | 71 |
| Joonis 0.2 Kõikide tähistega pinnamudeli võrdlemine referentspinnaga. Märgistel on välja toodud kõrguslik erinevus (Dev) määratud punktides. Punase värvusega punktid on tahhümeetrilise mõõtmisviisiga hõivatud punktid. Joonmõõtkava on meetrites (Koostatud programmis 3DReshaper)..... | 72 |

Tabelite loetelu

| | |
|---|----|
| Tabel 1.1 Tehnilised spetsifikatsioonid kaht tüüpi UAV-del [7], [8]..... | 15 |
| Tabel 2.1 RTK, VRS ja Aerotriangulatsiooni meetodil koostatud punktipilvede KRV võrdlus tähistega [22] | 24 |
| Tabel 2.2 Horisontaalne ja vertikaalne keskmine ruutviga 15 või 20 tähise kasutamise puhul andmetöötleses | 24 |
| Tabel 2.3 Barto ja Karla katsealade kõrguslike erinevustest arvatud KRV | 25 |
| Tabel 3.1 Situatsioonimöödistamise kõrguslikud täpsusnõuded lähimate möödistamisvõrgu punktide suhtes [27] | 27 |
| Tabel 3.2 Markseiderimöödistuse lubatud mõõtesuuruse väärtuste erinevus kordusmöödistusel [28] | 28 |
| Tabel 4.1 DJI Phantom 4 RTK ja DJI Phantom 4 Pro tehniliste näitajate võrdlus [8] [31] | 29 |
| Tabel 4.2 Trimble S5 tehnilised spetsifikatsioonid [6] | 30 |
| Tabel 5.1 UAV fotogramm-meetrilise möödistamisel kasutatud lennuparameetrid. | 36 |
| Tabel 7.1 Punktipilvede kõrguste erinevused GNSS seadmega mõõdetud tähistes..... | 43 |
| Tabel 7.2. Pinnamudelite kõrguslike erinevuste statistilised näitajad kahe piirkonna näitel. Ühikud millimeetrites | 46 |
| Tabel 7.3 Kõikide tähistega ja RTK tähisteta pinnamudelite kõrguslike erinevuste statistilised näitajad. Ühikud millimeetrites..... | 47 |
| Tabel 7.4 Plaanilise täpsuse hindamiseks arvatud statistilised näitajad. Ühikud millimeetrites . | 49 |
| Tabel 7.5 Nurme 27 katseala tahhümeetrilise meetodiga mõõdetud mahuandmete võrdlus erinevate UAV pinnamudelite andmetega | 51 |
| Tabel 8.1. Punktipilvede kõrguslike erinevuste statistilised näitajad referentspinna suhtes. | 53 |

Enimkasutatud mõistete seletused

Järgmiselt on esitatud käesolevas magistritöös kasutatud lühendid tähestikulises järjekorras:

3D – (*3-dimensional*) ehk kolmemõõtmeline;

DJI – (Da-Jiang Innovations), droone tootva ettevõtte nimi;

Dev – (*Deviation*) näitab erinevust tõelise ja mõõdetud väärtuse vahel;

FoV – (*Field of View*) kaamera vaateväli;

GNSS – (*Global Navigation Satellite System*) ehk globaalne navigatsioonisatelliitide süsteem;

GSD – (*Ground Sample Distance*) statistiline näitaja, mis näitab kahe kõrvuti oleva piksli tsentrite vahekaugust;

IMU – (*Inertial Measurement Unit*) – seade, mis salvestab andmeid UAV orientatsiooni ja kiirenduse kohta;

ISO – Kaamera parameeter, mis määrab foto heleduse. Mida suurem ISO, seda heledam foto;

KRV – (Keskmise ruutviga) statistiline näitaja, mis iseloomustab mõõtmiste täpsust;

Mesh – maapinna mudel;

MIN,MAX – minimaalne, maksimaalne;

RTK – (*Real-Time Kinematics*) reaalajas positsioneerimise süsteem;

STD – (*Standard Deviation*) standardhälve, statistiline näitaja, mis iseloomustab hälvete hajuvust;

UAV – (*Unmanned Aerial Vehicle*) ehk mehitamata õhusõiduk, droon;

VRS – (*Virtual Reference Station*) virtuaal referentsjaam, mis tekitatakse liikuvjaama lähedusse asukoha parandite edastamiseks.

SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö koostamise ajendiks oli DJI drooni Phantom 4 RTK hiljutine ilmumine müüki, seega on vajadus selle drooni täpsuse valideerimiseks enne kasutamist tootmisolukorras. DJI Phantom 4 RTK (*Real time kinematic*) eelis teiste UAV-de ees on oluliselt suurem asukoha määramise täpsus kasutades selleks RTK moodulit. RTK moodul võimaldab otsest aerofotode georefereerimist. Aerofotode otsese georefereerimise eelis traditsiooniliste meetodite ees on madalam ajakulu välitöödel ja andmetöötlusel.

Aerofotode otseseks georefereerimiseks nimetatakse aerofotode asendi ja suuna määramist ruumis ilma maapealsete kontrollpunktideta. Aerofotode traditsiooniline georefereerimiks on aerofotode asendi ja suuna määramine tähiste abil. Tähiste paigaldamine ja koordineerimine võib olla aeganõudev protseduur. Samuti ei pruugi tähiste paigaldamine olla võimalik raskesti ligipääsetavates kohtades.

Magistritöö peamiseks eesmärgiks oli GNSS-RTK võimekusega mehitamata lennumasinatega saavutatava mõõdistustäpsuse evalueerimine. Magistritöös kasutati tulemuste saavutamiseks UAV-d Phantom 4 RTK. UAV mõõdistuse referentsandmeteks oli tahhümeetriliselt mõõdistatud punktid. Traditsiooniliseks georefereerimiseks paigaldati katseobjektile 13 tähist, milledele määrati koordinaadid GNSS (*Global navigation satellite systems*) seadmega. Need tähised olid ka otsese georefereerimise valideerimise aluseks.

Magistritöö katseobjekt asub Harju maakonnas, Saku vallas, Saku alevikus, Nurme tn 27. Katseobjekt valiti sellepärast, et seal on umbes 15 m kõrgune tehisküngas ning vahetus läheduses asus asfalttee. Need tingimused võimaldasid GNSS-RTK UAV mõõdistust testida kahe kontrastselt erineva pinnavormi näitel.

Aerofotodest koostati punktipilved otsese georefereerimise ja traditsioonilise georefereerimise põhimõttel. Punktipilvede vahel koostati võrdlusmodelid ja arvutati statistilised näitajad, millega anti GNSS-RTK mõõdistustehnoloogiale täpsushinnang.

Käesolev magistritöö koosneb kaheksast peatükist.

Esimeses peatükis kirjeldatakse UAV fotogramm-meetrilisi põhimõtteid andmete hõivamisel ning mis tulemusi on võimalik nendest saada. Samuti tehakse ülevaade UAV-de klassifitseerimistingimustest ja millistel sihtotstarvetel neid kasutatakse. Samuti kirjeldatakse lennuparameetrite olemust ja nende mõju fotogramm-meetrilise mõõdistamise täpsusele. Lisaks tuuakse ka välja ilmastikutingimuste mõju UAV mõõdistamisele. Teises peatükis tuuakse välja

põhitõed aerofotodest punktipilve koostamisel. Samuti võrreldakse otsest- ja traditsioonilist georefereerimist ja esitatakse vastavate protsesside üldkirjeldus. Antakse ka ülevaade GNSS-RTK UAV tehnoloogia tööpõhimõtetest ning esitatakse ülevaade sarnastel teemadel koostatud uurimistöödest ja artiklitest. Kolmandas peatükis kirjeldatakse Eestis kehtivaid aeromõõdistamise nõudeid. Samuti antakse ülevaade erinevatest täpsusnõuetest ruumiaandmete kogumisel. Neljandas peatükis kirjeldatakse lähteandmete hõivamiseks kasutatud seadmeid. Samuti mainitakse, millist GNSS püsijaama võrgu teenust kasutati. Viiendas peatükis esitatakse välitöödel andmehõive meetodika. Samuti kirjeldatakse üldiselt magistritöös mõõdistatavat ala. Kuues peatükk annab ülevaate magistritöös kasutatavatest andmetöötlustarkvarades. Kirjeldatakse milliseid tulemusi saadi ühes või teises programmis. Seitsmes peatükk kirjeldab GNSS-RTK UAV mõõdistustulemusi statistiliste näitajate arvutustulemuste ja pinnamudelite võrdluse näitel. Kaheksandas peatükis antakse järeldused GNSS-RTK mõõdistustehnoloogiaga UAV saavutatud tulemustest nii plaanilise kui ka kõrgusliku täpsuse suhtes.

Autor soovib avaldada tänu kursusekaaslasele Jürgen Resevile, kas aitas läbi viia tahhümeetrilist mõõdistamist katseobjektil. Samuti avaldatakse tänu Raxoest OÜ projektijuhile Roland Laula'le, kes juhendas UAV mõõdistamist. Lisaks avaldab autor tänu ettevõttele Geodeesia24 OÜ, kelle abil leiti sobiv katseobjekt UAV mõõdistamiseks.

1. UAV MÕÕDISTAMINE JA LENNUPARAMEETRID

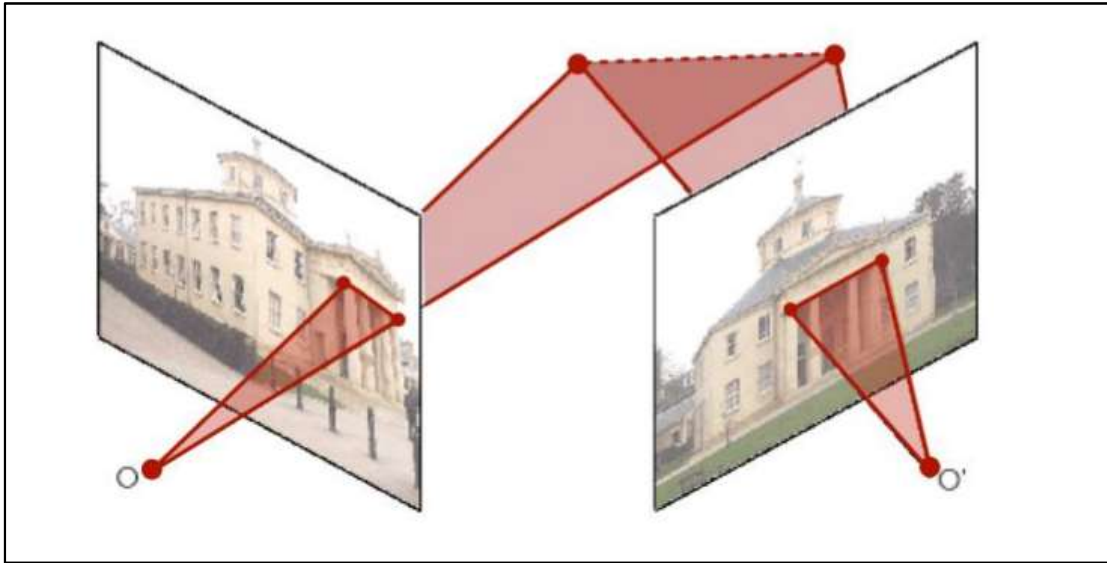
UAV-de (*Unmanned Aerial Vehicle*) kasutamine levib, sest võrreldes traditsiooniliste kontaktmõõtmismeetoditega saavutatakse ruumiandmete hõives ajavõit. Aerofotogramm-meetrilise mõõdistamise tulemiks on aerofotode kogum. [1]

1.1 UAV fotogramm-meetrilise mõõdistamise põhimõtted

UAV on mehitamata õhusõiduk, mida nimetatakse ka drooniks. Drooni on võimalik kontrollida kaugjuhtimispuldiga manuaalselt või autonoomsel meetodil. Autonoomne meetod tähendab, et õhusõidukile määratakse lennujuhtimistarkvara abil lennutrajektoor, mida droon iseseisvalt järgib. [2]

Fotogramm-meetria on teadus, mis tegeleb objekti kuju, mõõtmete ja asendi määramisega fotode järgi [3]. UAV mõõdistamine on ruumiandmete hõivamise meetod, kus aerofotod jäädvustatakse UAV pardal asuva fotokaameraga. Omavahel kattuvatest aerofotodest saab koostada andmetöötlusprogrammide abil punktipilvi, ortofoto mosaiike, pinnamudeleid jne.

Rasterandmeid sisaldavate aerofotode pealt saab tuletada vektorandmeid kui kahel külgneval fotol esineb ülekattuvus. Fotode ülekattuvast osast on võimalik tuvastada fotodel ühiseid punkte (Joonis 1.1). Ühiste punktide abil saab kindlaks teha külgnevate fotode asendi üksteise suhtes. Ühiste punktidele arvutatakse koordinaadid triangulatsiooni põhimõttel.



Joonis 1.1 Triangulatsiooni põhimõte, kus on kujutatud iseloomulike punktide leidmist kahel erineval aerofotol [4]

Fotode põhjal määratud punktidele saab määrata koordinaate kas teatud või suvalises koordinaatsüsteemis. Teatud koordinaatsüsteemis saab määrata koordinaate, kui fotodel on vähemalt kahe ühise punkti koordinaadid määratud. Teatud koordinaatsüsteemi saab saavutada ka kui on määratud fotode enda tsentrite koordinaadid ning pildistamise suund.

1.1.1 UAV klassifikatsioon

UAV-sid saab klassifitseerida mitme omaduse järgi. Neid liigitatakse sihtotstarbe, kaalu ja tiiva tüübi järgi. [5]

Kaalu järgi jaotatakse UAV-d järgmiselt: [5]

- Väga rasked, üle 2000 kg kaaluvad;
- Rasked, mille kaal jääb vahemiku 200–2000 kg;
- Keskmise kaaluga UAVd, mis kaaluvad vahemikus 50–200 kg;
- Väiksema kaaluga UAVd, kaaluga 5–50 kg;
- Mikro UAVd, mille kaal jääb alla 5 kg.

Mehitamata õhusõidukeid jaotatakse veel ka tiiva ehituse põhjal (vt Joonis 1.2) [6].



Joonis 1.2 Delair UX11 fikseeritud tiivaga droon (vasakul) ja DJI Phantom 4 RTK rootormootoriga droon (paremal) [6]

Tabelis 1.1 on välja toodud Delair UX11 ja DJI Phantom 4 RTK tehniliste näitajate võrdlus.

Tabel 1.1 Tehnilised spetsifikatsioonid kaht tüüpi UAV-del [7], [8]

| UAV mudeli nimetus | Delair UX11 | DJI Phantom 4 RTK |
|-----------------------------------|-------------|-------------------|
| Lennuaeg | 52 minutit | 30 minutit |
| Lennukiirus mõõdistamisel | 54 km/h | 18–36 km/h |
| Mass | 1600 g | 1391 g |
| Pikslisuurus 100 m lennukõrgusega | 5 cm | 2,7 cm |
| Kaamera | 21,4 MP | 1" CMOS, 20 MP |

Delair UX11 UAV platvormil on soovitatav lennukiirus mõõdistamisel suurem võrreldes DJI Phantom 4 RTK-ga. Fikseeritud tiivaga UAV-dele on omane kiirem ruumiandmete hõive, kuid võrreldes multirootor tüüpi UAV-ga on andmed vähem täpsed (Tabel 1.1).

1.1.2 UAV kasutusvaldkonnad

UAV mõõdistamise väljund on aerofoto. Aerofotodest on võimalik luua andmetöötlusprogrammidega punktipilvi, ortofoto mosaiike ja 3D mudeleid. Neid andmeid saab kasutada topo-geodeetiliste plaanide koostamisel, maapinnamudelite loomisel või mõnes muus sobivas rakenduses. [1]

UAV-l on mitmeid kasutusvaldkondi, näiteks militaareesmärgid, maa-alade kaardistamine, fotograafia, väiksemõõduliste ja kergekaaluliste esemete transport, keskkonnaseire jne. Esimesi mehitamata õhusõidukid kasutati militaarotstarvetel, kuid tänapäeval on UAV-d laialdaselt kasutusel tsiviilkasutuses. UAV-sid kasutatakse järgmistes valdkondades [9]: fotograafia, põllumajandus, filmitööstus, ehitismõõdistamine ja järelvalve, kaardistamine ja sisejulgeoleku rakendused nagu tuletõrje, politsei jne.

1.2 Lennuparameetrid

1.2.1 Lennukõrgus ja kiirus

UAV mõõdistuse tähtsaimad lennuparameetrid on lennukõrgus ja kiirus. Lennukõrgusel ja kiirusel on otsene mõju aerofotode kvaliteedile. Samuti mõjutavad need parameetrid ka võimalikku mõõdistatava ala suurust ja aeromõõdistamisele kuluvat aega.

Lennukõrguse valikust sõltub üks olulisemaid UAV täpsuse näitajaid GSD. See näitab kahe kõrvuti oleva piksli tsentrite vahekaugust, mida arvutatakse valemiga (3.1) [10]:

$$GSD = \frac{H \cdot S_w \cdot 100}{F_r \cdot I_w}, \text{ kus} \quad (3.1)$$

H – lennukõrgus õhusõiduki ja maapinna vahel (m);

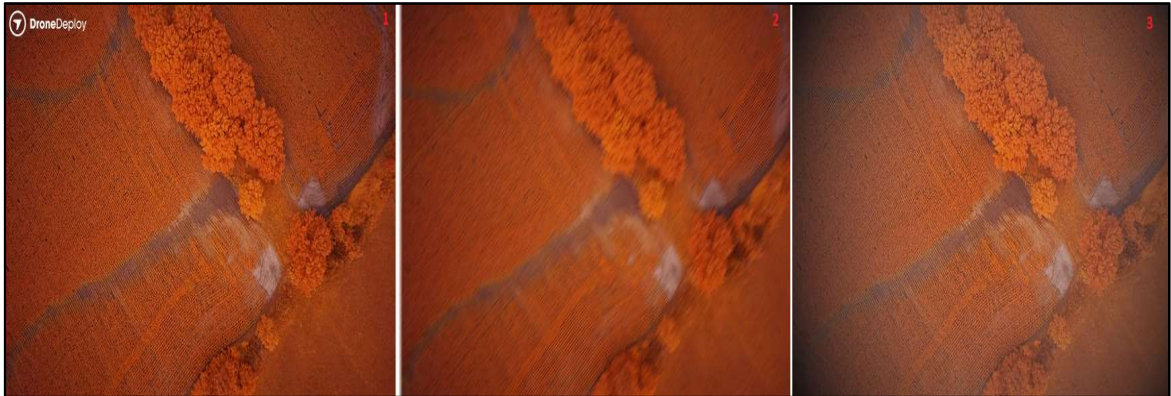
S_w – kaamera sensori laius (mm);

F_r – kaamera fookuskaugus (mm);

I_w - pikslite arv.

GSD väärtust mõjutab lennukõrgus ja kaamera fookuskaugus. Lennukõrguse vähenedes väheneb ka GSD väärtus. Mida suurem on GSD, seda väiksem on foto ruumiline eraldusvõime ja aerofotol kujutatud objektide detailsus [11].

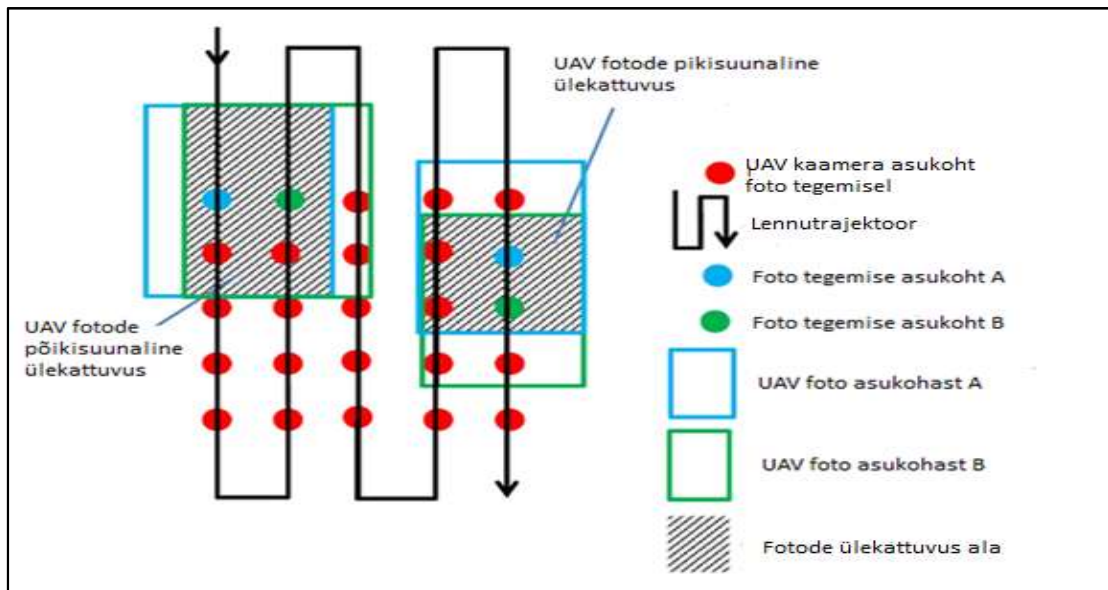
Lennukiirusel on oluline roll aerofotode teravuses. Suure kiirusega lendamisel ei suuda kaamera foto tegemise hetkel fokuseerida, mistõttu tulemuseks võivad olla udused aerofotod (vt Joonis 1.3). Selle vältimiseks tuleb valida sobiv lennukiirus, mis võib varieeruda vastavalt kasutatavale kaamerale. Soovituslik lennukiirus multirootor tüüpi UAV-del jääb vahemikku 18–36 km/h [7].



Joonis 1.3 Fotogramm-meetrilise tulemuse fotodele antav visuaalne hinnang. Vasakult esimene foto on väga hea kvaliteediga, teine foto on udune ning kolmas foto vähese valgusega [12]

1.2.2 Aerofotode omavaheline ülekattumine

Aerofotode omavaheliseks ülekattumiseks nimetatakse külgnevate aerofotode ühisosa. Ülekattumine jaguneb piki- ja põikikattumiseks (Joonis 1.4). Piki kattuvus tähendab kahe foto omavahelist kattuvust, mis esineb kahe järjestikusel lennutrajektorisuunalisel aerofotol. Põikikattuvus on parallelsetel lennutrajektoridel tehtud kahe külgneva aerofoto kattuvus. Ülekattuvusi väljendatakse protsentuaalselt. [13]



Joonis 1.4 UAV fotode põiki ja piki ülekattuvus [13]

Soovituslik pikikattumine on vähemalt 75% ja põikikattumine vähemalt 60%. Suurema kattuvusega on võimalik aerofotodelt tuvastada rohkem iseloomulikke punkte, mille tõttu punktide koordinaatide määramise usaldusväarsus suureneb. [14]

1.2.3 UAV kaamera parameetrid

UAV mõõdistamise oluliseim komponent on fotokaamera. Fotokaamera valikust oleneb aerofotode kvaliteet ja sellest tulenevalt ka mõõdistuse kvaliteet. Põhilised kaamera parameetrid on: [10]

- **ISO.** Määrab fotode heledust. Mida suuremaks määrata ISO, seda suurem on foto heledus. Tavaline ISO väärtus aeromõõdistamisel on 100–800. Suuremate väärtuste kasutamisel tekib rohkem müra.
- **Säriaeg.** Näitab kui kaua kaamera avaus on avatud valgusele. Kui suurendada säriaega, siis võib ISO väheneda ning esineda fotode udusust.
- **Kaamera avaus.** Selle väärtuse suurendamine muudab fotod heledamaks. Suurema avausega võivad fotod muutuda uduseks. Avaust tähistatakse f/D , kus D on avause diameeter.

Fotode kvaliteeti mõjutab omakorda fookuskaugus f . Mida suurem on fookuskaugus, seda väiksem on vaateväli (FoV) ja GSD. UAV-ga mõõdistamisel soovitatakse kasutada kaameraid, mille fookuskaugus on vahemikus 18–24 mm. [10]

Fotokaameratel on omane fotokujutist moonutada (Joonis 1.5), see tähendab objekti tegeliku asukoha nihet fotol. Esineb kahte tüüpi moonutusi – radiaalsed ja tangentsiaalsed. Radiaalne moonutus esineb, kui sirged jooned kõverduvad – seda saab nimetada ka kalasilma efektiks. [15]



Joonis 1.5 Kaamera läätsest moonutused fotodel. Variant (a) on moonutusega foto ja paremal (b) on moonutuseta foto [16]

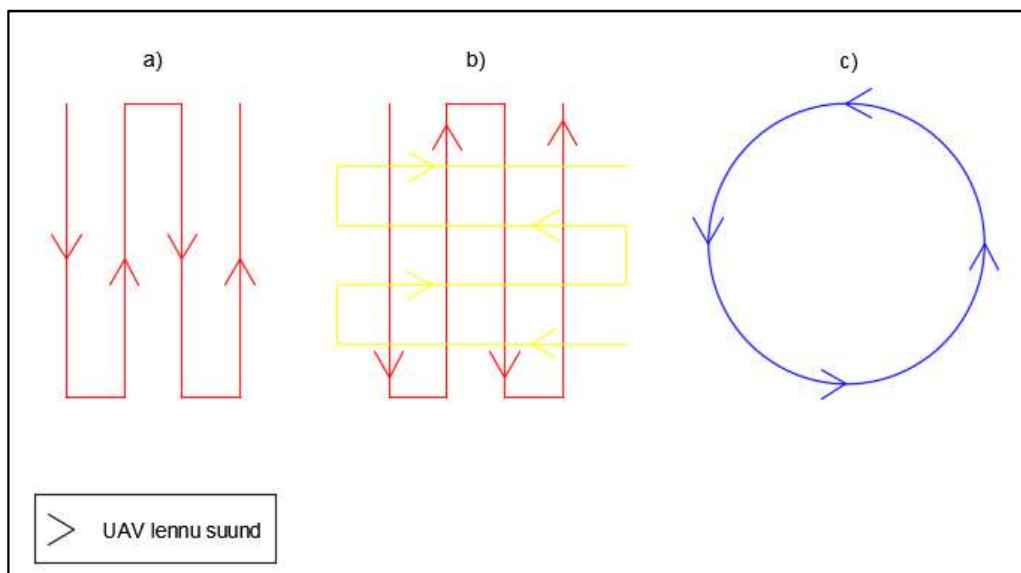
Radiaalne moonutus jaguneb kaheks – positiivne ja negatiivne. Negatiivset moonutust nimetatakse *barrel distortion*, st punktid on viidud foto keskpunktile lähemale. Positiivset moonutust nimetatakse *pincushion distortion*, st punktid on nihutatud keskpunktist kaugemale. [15] Fotodelt

on võimalik moonutused eemaldada fototöötlusprogrammidega. Seda meetodit kasutas Romet Kõök oma uurimistöös [17]. Samuti saab eeldada, et UAV kaamerate puhul on tootjad määranud radiaalsed ja tangetsiaalsed moonutused kaamera metaandmetes (Joonis 6.1), et arvesse võtta ja elimineerida nendest tekkinud vead andmetöötlusel.

1.2.4 Lennutrajektorid

Olenevalt mõõdistavast situatsioonist on võimalik määrata erinevaid lennutrajektore (vt Joonis 1.6). Lennutrajektorid on järgmised [4]:

- *Regular grid* ehk paralleelsete trajektoridega;
- *Double grid* ehk ristuvate trajektoridega;
- *Circular* ehk ümbritsev.



Joonis 1.6 Erinevad lennutrajektorid: a) paralleelsete trajektoridega, b) ristuvate trajektoridega ning c) ümbritsev

Fotogramm-meetrilise mõõdistamise käigus on soovituslik kasutada korrapäraseid trajektore, mis kindlustab piki- ja pöikikattumise nõude aerofotode vahel. Paralleelseid lennutrajektore on otstarbekas kasutada maa-ala kaardistamisel hajaasustusaladel. Tiheasustusaladel on otstarbekam kasutada ristuvaid lennutrajektore. Üksikute ehitiste mõõdistamiseks kasutatakse ümbritsevat lennutrajektorit [18].

1.3 Ilmastikutingimuste mõju UAV mõõdistusele

Ilmastikutingimused mõjutavad oluliselt fotode kvaliteeti. Parim aeg fotogramm-meetrilisteks mõõdistusteks on pilves ja tuulevaikne ilm, ilma udu ja sajuta. UAV mõõdistamist ei ole soovituslik läbi viia kui päike on madalal. Madala päikese tõttu võivad tekkida fotodele varjud, mis võivad tekitada edasisel andmetöötlusel komplikatsioone. Romet Kõök on välja toonud enda uurimistöös, et pinnamudelite koostamisel olid suurimad hälbed kohtades, kus fotodel esinesid varjud [17].

2. AEROFOTODE GEOREFEREERIMINE

Aerofotodest georefereeritud punktipilve saamiseks on põhiliselt 2 võimalust. Nendeks on 1) maapealsete kontrollpunktide ehk tähiste kasutamine või 2) UAV-le paigaldatud GNSS ja IMU seadmete kasutamine UAV mõõdistamisel. Tasub märkimist, et on võimalik kasutada ka kahe võimaluse kombinatsiooni.

Käesolevas peatükis antakse ülevaade aerofotode georefereerimise võimalustest. Lisaks käsitletakse varasemaid uurimistöid antud teemal.

2.1 Aerofotode georefereerimise võimalused

Aerofotode georefereerimine UAV tähiste abil eeldab mõõdistatavale objektile tähiste paigaldamist ja nende koordineerimist. Koordineeritud tähiste abil saab mõõdistusele määrata mõõtkava ja transformeerida see tuntud koordinaatsüsteemi. Aerofotode georefereerimist nimetatakse ka aerofototriangulatsiooniks e fototriangulatsiooniks. [3]

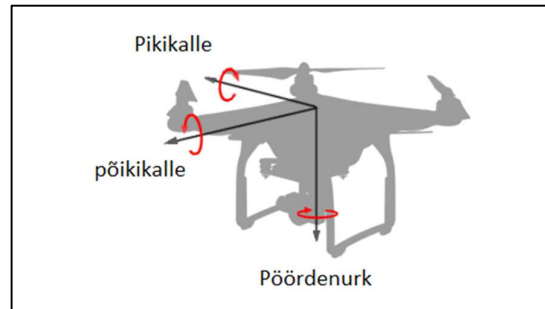
Aerofotode otseseks georefereerimiseks nimetatakse aerofotode asendi ja suuna määramist teatud koordinaatsüsteemis UAV pardale paigaldatud GNSS ja IMU seadmete abil. Otsese georefereerimise eesmärk on elimineerida vajadus maapealsete tähiste kasutamiseks. GNSS ja IMU seadmed salvestavad aerofotode metaandmetesse informatsiooni aerofoto asukoha ja suuna kohta. [19]

Mitmed UAV-d on varustatud GNSS ja IMU seadmetega, kuid kasutusel olevad vastuvõtjad on väga madala täpsusastmega (2–3 m) ja toetuvad georefereerimisel täpsete tulemuste saamiseks tähistele. [19] Täpsemad GNSS ja IMU süsteemid võimaldaksid UAV mõõdistusega kaardistada kohti, kuhu maapealsete tähiste paigaldamine ei oleks võimalik. Samuti kiirendab meetod andmete hõive kiirust ja võimaldab rahalist kokkuhoidu. [20]

2.1.1 GNSS ja IMU seadmete põhimõte

GNSS ja IMU süsteemide kasutamine võimaldab määrata UAV absoluutse asukoha ruumis. Absoluutse asukoha teadmine võimaldab georefereerida aerofotosid ja rakendada autonoomset lendamist.

IMU süsteeme kasutatakse, et saada andmeid UAV orientatsiooni ja kiirenduse kohta. UAV orientatsiooni kirjeldatakse läbi kolme parameetri: piki- ja põikikalle ning pöördenurk (Joonis 2.1). Orientatsiooni parameetrid salvestatakse ka aerofotode metaandmetesse. [21]



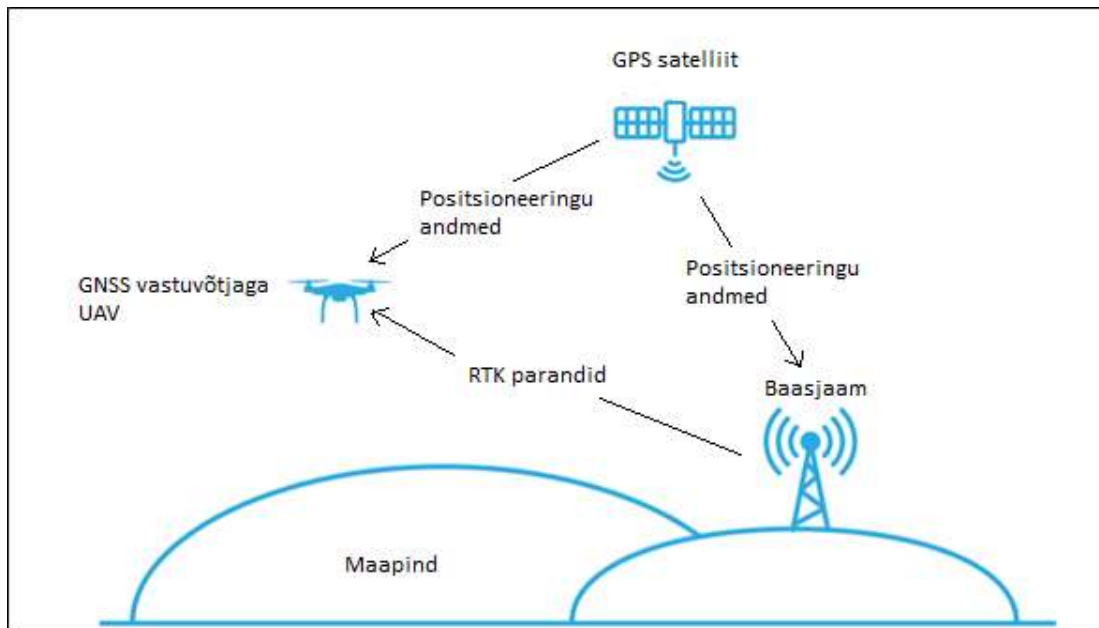
Joonis 2.1 UAV orientatsiooni parameetrid [21]

UAV rakendustes kasutatavad GNSS ja IMU seadmed on tavaliselt madala täpsusklassiga. Seda põhjusel, et täpsemad moodulid kaaluvad palju, mistõttu ei saa neid UAV-dele paigaldada. Teisalt, kerged ja täpsed IMU seadmed on kallid, mille tõttu ei ole otstarbekas neid paljudele UAV-dele paigaldada.

Käesoleva magistritöö koostamise ajendiks oli DJI poolt loodud drooni Phantom 4 RTK ilmumine Eesti turule. Phantom 4 RTK eelis teiste UAV-de ees on just asukoha määramise täpsuses. UAV kasutab lisaks GNSS moodulile ka RTK moodulit, mis tõstab asukohamääramise täpsust paarilt meetrilt mõnele sentimeetrile.

2.1.2 UAV GNSS-RTK tehnoloogia

UAV RTK tehnoloogia on uus meetod fotogramm-meetria valdkonnas. See põhineb otsesel ja täpsel georefereerimisel [22]. Erinevus teiste GNSS vastuvõtjatega varustatud UAV-dega on asjaolu, et GNSS-RTK tehnoloogia kasutab asukoha määramisel RTK parandeid (vt Joonis 2.2).



Joonis 2.2 UAV GNSS-RTK tööpõhimõte. [23]

UAV GNSS-RTK tehnoloogia põhiline erinevus teiste GNSS vastuvõtjatega varustatud UAV-dega on see, et RTK droonil on pardal ka baasjaamaga suhtlust korraldav RTK moodul. Baasjaam edastab UAV-le parandeid, mis võimaldab Phantom 4 RTK näitel, suhtelisi täpsusi suurusjärgus 2 cm. Suhteline täpsus on antud tähistega mõõdistuse suhtes [23].

2.2 Varasemate uurimistööde ülevaade

Austraalias tehti 2013. aastal uurimistöö [19], kus autorid arendasid endale baasjaamaga suhtleva UAV. Selle tegemiseks eemaldati olemasolevalt UAV-lt madala täpsusega GNSS vastuvõtja ja asendati see DGPS (*Differential Global Positioning Systems*) vastuvõtjaga. Lisaks sellele lisati UAV pardale arvuti, mis kontrollis suhtlust baasjaamaga ja tagasi, et täpsemad andmed salvestuksid aerofotode metaandmetesse.

DGPS süsteemi põhimõte seisneb kahe vastuvõtja kasutamises. Üks vastuvõtja asetatakse teatud koordinaatidega kindelpunktile, mis arvutab ja edastab parandeid ja teine vastuvõtja on nn liikuvjaam. DGPSil on teoreetiline täpsus umbes 3 cm. Uurimistöö autorid saavutasid DGPS süsteemi kasutamisel absoluutse täpsuse umbes 11 cm. Autorid järeldasid, et täpsuse tõstmiseks oleks vaja suurendada UAV pardale paigutatud vastuvõtja täpsust [19].

RTK (vt LISA 1) ja VRS (*Virtual Reference Station*, vt LISA 2) süsteemide täpsust UAV mõõdistusel on uuritud artiklis [22]. Uurimistöö viidi läbi Šveitsis. UAV lennukõrgus uurimistöö raames oli 85 m ning täpsust evalveeriti 18 tähise suhtes. Tähistele määrati koordinaadid staatiliste GNSS mõõtmistega.

Uurimistöö raames genereeriti kolm punktipilve:

- 1) tuginedes tähistele;
- 2) tuginedes RTK mõõdistusele;
- 3) tuginedes VRS mõõdistusele.

Tulemustes järelitati, et tähistega punktipilv on täpsem, kui otsese georefereerimisega (variandid 1 ja 2) saavutatud punktipilved. Tähistega punktipilve KRV jäi suurusjärku 1,3 cm ja RTK ning VRS meetodil loodud punktipilved olid KRV-d suurusjärgus 3 cm (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 RTK, VRS ja Aerotriangulatsiooni meetodil koostatud punktipilvede KRV võrdlus tähistega [22]

| Punktipilve nimetus | Horisontaalne KRV (m) | Vertikaalne KRV (m) |
|---------------------|-----------------------|---------------------|
| Tähistega | 0,014 | 0,013 |
| RTK | 0,034 | 0,029 |
| VRS | 0,029 | 0,026 |

Artiklis [24] uuriti, kuidas maapinna kontrollpunktide arv mõjutab UAV fotogramm-meetrilist andmetöötluse tulemust. Andmetöötluse tulemusena genereeriti digitaalne maapinna mudel (*Digital Surface Model*). Tööde järelduses selgub, et mida rohkem kontrollpunkte paigaldada aeromõõdistuse jaoks, seda täpsemad on tulemused. Parim tulemus tuli kui kasutati 15 ja 20 tähist (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Horisontaalne ja vertikaalne keskmine ruutviga 15 või 20 tähise kasutamise puhul andmetöötluses

| Tähiste arv | KRV _x (cm) | KRV _y (cm) | KRV _z (cm) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 15 | 3,3 ± 0,346 | 3,2 ± 0,441 | 5,8 ± 1,21 |
| 20 | 3,2 ± 0,346 | 3,1 ± 0,218 | 4,7 ± 0,86 |

Tabeli tulemustes on arvulisi väärtuseid kirjeldatud kui keskmine ± standardhälve. Tallinna Tehnikaülikooli tudengid Romet Kook ja Aidi Sula uurisid oma magistritöös UAV täpsust plaaniliselt ja kõrguslikult erinevate droonide puhul.

Aidi Sula on oma lõputöös uurinud UAV kõrguslikku ja plaanilist täpsust erinevate objektide näitel. Kasutatud on kahte *Fixed wing* klassifikatsiooni drooni. Magistritöö raames tehti UAV fotogramm-meetrilist mõõdistamist kolmes alas. Testalasid nimedega Barto ja Karla kasutati kõrgusliku täpsuse hindamiseks. Kõrguslike täpsushinnangute tegemiseks võrreldi UAV pinnamudeleid Maa-ameti ALS mõõdistusandmetega. Barto katsealas olid lennukõrgused 100 ja 500 meetrit, Karlas keskmiselt 640 meetrit. Barto ja Karla mõõdetavate alade tulemused on toodud tabelis 2.3. [25]

Tabel 2.3 Barto ja Karla katsealade kõrguslike erinevustest arvatud KRV

| Mõõdetava testala nimetus | UAV nimetus | Lennukõrgus (m) | KRV (m) |
|----------------------------------|--------------------|------------------------|----------------|
| Barto | Trimble UX5 | 100 | 0,167 |
| Barto | Trimble UX5 | 500 | 0,269 |
| Karla | Must Q | 500 | 0,294 |

Autor on tulemustes põhjal (Tabel 2.3) järeldanud, et lennukõrgus mõjutab kõrguslikku täpsust [25]. Paremate tulemuste saamiseks tuleks lennata madalamalt. Samuti järeldab Romet Kõök enda magistritöös, et madalam lend suurendab fotode eraldusvõimet, mis suurendab andmetöötlusel pinnamudeli täpsust [17].

Romet Kõök esitas enda magistritöös [17] asjaolusid, mis mõjutavad fotogramm-meetrilist mõõdistust. Järeldustes on autor välja toonud markeeringute vähesuse tõttu tekkinud moonutused mudeli genereerimisel. Tihedam tähiste paigaldamine ning nende täpne mõõdistamine teeb UAV mõõdistamise täpsemaks, kuid ka ajakulukamaks. [17]

3. RUUMIANDMETE HÕIVAMISE NÕUDED

Käesolev peatükk kirjeldab Eestis kehtestatud aeromöödistamise täpsusnõudeid. Käsitletakse topo-geodeetilise uuringule kehtestatud situatsioonimöödistamise nõudeid. Samuti antakse ülevaade markšneidermöödistuse nõuetest.

3.1 Aeromöödistamise nõuded

Magistritöö autorile teadaolevalt ei ole Eesti riigis kehtestatud kehtivaid UAV möödistamispõhiseid nõudeid. Küll aga on olemas määrus, mis reguleerib aeropildistamist - ja skaneerimist Maa-ameti kaardistamislendude kontekstis - „Topograafiliste andmete hõive kord ja üldist tähtsust omavad topograafilised nähtused“ [26].

Eelnimetatud määrus ei ole mõeldud UAV möödistuse tarbeks vaid Eesti riigi kaardistamislendude reguleerimiseks. Sellest hoolimata saab kahe möödistusmeetodi (UAV ja lennuk) vahel leida mõningaid analooge ja neid nõudeid arvestada UAV möödistamise kontekstis.

Määruse paragrahv 3 käsitleb aeropildistamise nõudeid. Aeropildistamiseks kasutatakse kesk- või suureformaadilist digitaalset kalibreeritud aerofoto kaamerat, mille piksli suurus ei tohi maapinnal olla üle 50 cm. Määruses kirjeldatud aeropildistamise parameetrid on järgmised [26]:

- pikikattuvus vähemalt 60 %, põikkattuvus 30 %;
- päikese kõrgusnurk vähemalt 25 kraadi;
- fotodel ei tohi olla lund, pilvi, udu;
- uuritav ala ei tohi olla üle 3 % kaetud pilvedest tingitud varjudega.

Peale aerotriangulatsiooni ei tohi aeropildistamise asukoha täpsuse keskmine ruutviga ületada plaaniliselt 1 maapinna pikslit ja kõrguslikult 1,5 maapinna pikslit. [26]

3.2 Topo-geodeetilise uuringu nõuded

Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmöödistamisele kehtestatud nõuded on välja antud majandus- ja taristuministri poolt 19.04.2016, ning on hetkel kehtivad [27]. Topo-geodeetilise uuringu eesmärk on saada lähteandmeid ehitusprojekti koostamiseks ja ehitamiseks.

Mõõdistamisvõrgu rajamisel on määrukses kehtestatud kindlad nõuded. Võrgu rajamine RTK-tehnoloogiaga tuleb teha vähemalt kahekordse initialsiseerimisega. Samuti tuleb enne mõõdistusvõrgu punktide koordineerimist kontrollida RTK toimivust geodeetilise võrgu punktile. [27]

Enamasti kasutatakse mõõtkava 1:500 geodeetilise alusplaani või teostusjooniste vormistamiseks, kui lähteülesandes pole teisiti määratud. Sellest tulenevalt tuleb järgida kõrguslikke täpsusnõudeid situatsioonimõõdistamisel, mis on toodud välja Tabel 3.1 [27].

Tabel 3.1 Situatsioonimõõdistamise kõrguslikud täpsusnõuded lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes [27]

| Mõõdistatav situatsioon | Mõõtkava | Suurim lubatav kõrguslik viga (cm) |
|--|----------|------------------------------------|
| Püsiikatendid, kaevukaas, vundamendi sokkel, muu sarnane rajatis | 1:500 | 3 |
| | 1:1000 | 3 |
| | 1:2000 | 5 |
| Muude maapinna punktide puhul | 1:500 | 10 |
| | 1:1000 | 15 |
| | 1:2000 | 20 |

Suurim lubatav plaaniline viga võib olla 8 cm lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes. See nõue kehtib näiteks tee ja platsi servade, tehnovõrgu kaevude ja aedade mõõdistamisel.

3.3 Markšeidermõõdistuse nõuded

Ehitusel teenindav geodeet kohtab üha sagedamini ülesandeid, kus peab määrama väljakaeve või juurde toodud materjali mahu. Traditsioonilisteks mõõdistusviisideks on ajakulukad kontaktmõõtmised. Lihtsam ja kiirem variant on fotogramm-meetriline mõõtmisviis. See meetod lihtsustaks ja kiirendaks markšeiderimõõdistamist.

Markšeiderimõõdistuse täpsusnõudeid reguleerib määrus „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“. Selle on välja andnud majandus- ja taristuminister 07.05.2019.

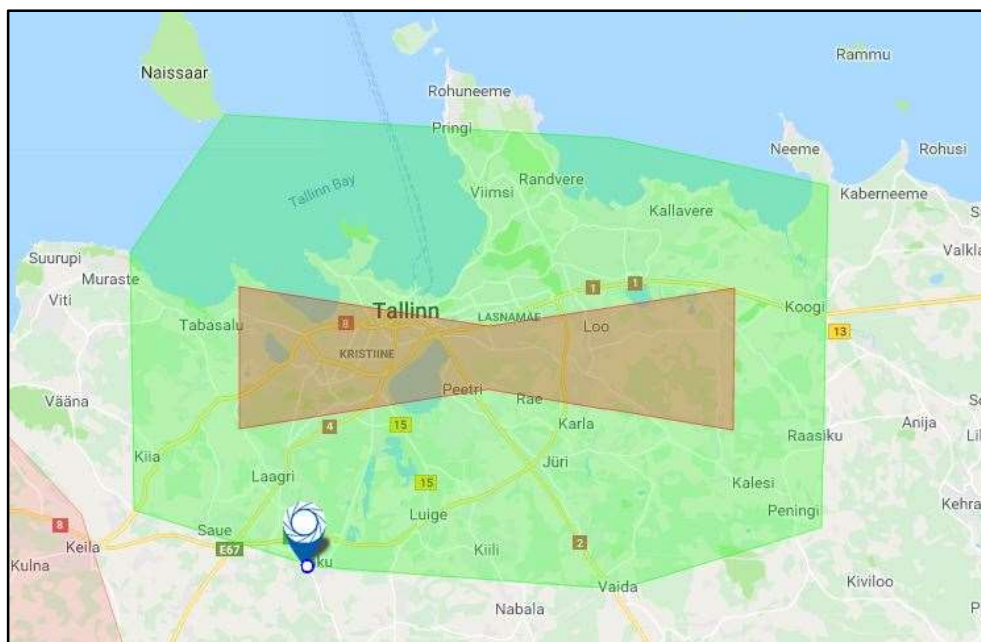
Markšeiderimõõdistust kasutatakse maavarade kaevandustes. Määruse paragrahv 1 kirjeldab, et markšeideri tööde puhul tuleb tagada mõõtmise täpsus, kontrollitavus ja tulemuste kasutatavus. Kontrollitavuse all peetakse silmas, et oleks võimalik teha kordusmõõtmisi. Tabelis 3.2 on kirjeldatud nõuet, kui palju võib mõõtesuuruse väärtus erineda kordusmõõtmisel. [28]

Tabel 3.2 Markšeiderimõõdistuse lubatud mõõtesuuruse väärtuste erinevus kordusmõõdistusel [28]

| Maht (ühik 1000 m ³) | Kuni 20 | 20-50 | 50-200 | 200-1000 | Üle 1000 |
|--|---------|-------|--------|----------|----------|
| Kahe erineva määranu lubatud suhteline erinevus väikseima mõõdetulemuse suhtes (%) | 10 | 6 | 4 | 3 | 2 |

3.4 Lennuregulatsioon

Aeromõõdistamise eel tuleb tutvuda Lennuameti poolt sätestatud eeskirjaga. Sellega reguleeritakse mehitamata õhusõidukite lendamist Eesti riigi piirides. Vastavalt seadusele võib UAV lendamist teostada kuni 150 meetri kõrgusel maapinnast kellelegi ette teatamata. See kehtib juhul, kui ei ole tegemist kontrollitava õhuruumiga (Joonis 3.1) [29]



Joonis 3.1 Rohelise värviga märgistatud ala on TSOON9 ning sinine tähis on märgistatud objekti asukoht [30]

Tallinna piiridesse on alates 6. juulist 2016 loodud ala nimega TSOON9. Eelmainitud piirkonnas on kehtestatud järgmised tingimused:

- lubatud lennukõrgus kuni 60 meetrit;
- lubatud lennukaugus kuni 250 meetrit ja drooniga peab olema otsenähtavus.

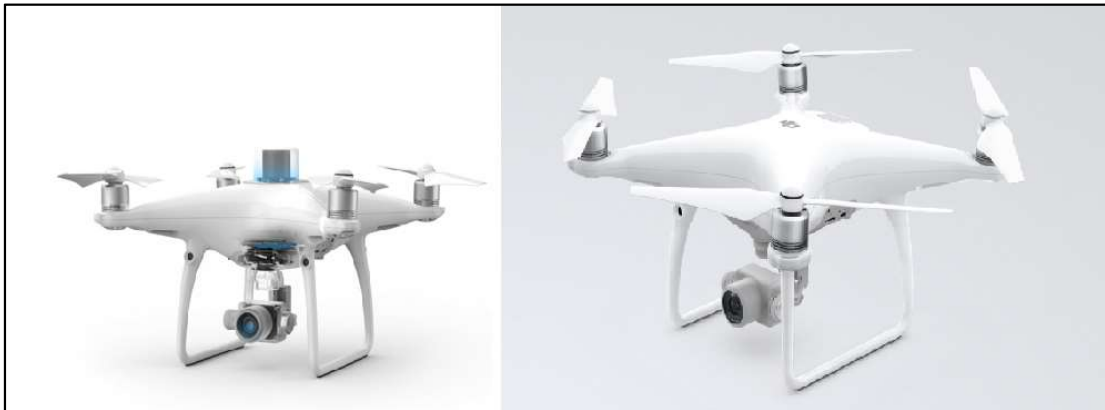
UAV kasutamine ei nõua kooskõlastust Lennuameti ja lennuliiklusteenindusüksuselt, kuid peab omama ühekordset luba [29]. Magistritöö katseobjekt jäi lennupiirangu tsoonist välja.

4. MAGISTRITÖÖS KASUTATUD SEADMED

Käesolevas peatükis antakse ülevaade magistritöö raames kasutatud geodeetilistest instrumentidest. Magistritöö keskmeks oleva UAV DJI Phantom 4 RTK puhul esitatakse ka võrdlus vanema mudeli DJI UAV-ga.

4.1 DJI Phantom 4 RTK

Fotogramm-meetrilisel mõõdistamisel kasutati UAV-d DJI Phantom 4 RTK. Phantom 4 RTK-d esitleti esmakordselt 2018. aasta oktoobris. [23] DJI Phantom 4 RTK eelkäijaks võib pidada Phantom 4 pro-d. UAV-de põhiline erinevus on asukoha määramise täpsus. (Joonis 4.1).



Joonis 4.1 DJI UAV platvormid Phantom 4 RTK (vasakul) ja Phantom 4 Pro (paremal) [8]

Kahe DJI droonide erinevus seisneb lisamoodulis, mida DJI nimetab RTK mooduliks. RTK moodul võimaldab luua andmeühenduse kohaliku püsijaama võrguga. Mooduli ülesandeks on reaajas positsioneerimine ja asukoha parandite saamine (vt ka Joonis 2.2), mis salvestatakse fotode metaandmetesse [8]. RTK mooduli all on lisa vastuvõtja, mis halvema ühendusega kohtades säilitab UAV lennutäpsuse ja püsivuse. Kahe mudeli erinevused piirduvad suuresti RTK mooduli ja sellega kaasneva tarkvaraga (vt Tabel 4.1). Phantom 4 RTK uued tarkvaralahendused on TimeSync ja lennuplaneerimissüsteem GS RTK. [6]

Tabel 4.1 DJI Phantom 4 RTK ja DJI Phantom 4 Pro tehniliste näitajate võrdlus [8] [31]

| UAV mudeli nimetus | DJI Phantom 4 RTK | DJI Phantom 4 Pro |
|------------------------------|-------------------|-------------------|
| Kaal | 1391 g | 1388 g |
| Lennuaeg | 30 minutit | 30 minutit |
| Kaamera | 1" CMOS, 20MP | 1" CMOS, 20MP |
| GSD 100 m lennukõrgusel (cm) | 2,74 | 2,95 |

Magistritöös kasutatud UAV sai RTK parandeid Trimble VRS Now võrgust (vt jaotis 4.3.1)

4.2 Elektrontahhümeeter Trimble S5

Magistritöös kasutati ruumiliste andmete hõivamiseks kahte elektrontahhümeetrit Trimble S5. Kahte tahhümeetrit kasutati kiirema andmehõive saavutamiseks. Tahhümeetriliselt mõõdistatud punktid olid GNSS-RTK UAV mõõdistuse referentsandmeteks.

Tabel 4.2 Trimble S5 tehnilised spetsifikatsioonid [6]

| | |
|---|--------------|
| Kaal | 5,5 kg |
| Nurga määramise täpsus | 2" |
| Kauguse mõõtmise täpsus sihtmärgi jälgimisel | 4 mm + 2 ppm |
| Mõõtmiskaugus prisma režiimis | 2500 m |

Elektrontahhümeetritel olid identsed täpsusnäitajad (Tabel 4.2) ning instrumendid olid korrapäraselt taadeldud. Kahe tahhümeetri kasutamine tingis vajaduse kasutada välitöödel aktiivprismasid. Aktiivprismade kasutamine vältis võimalust, kus tahhümeeter oleks lukustunud valele prismale.

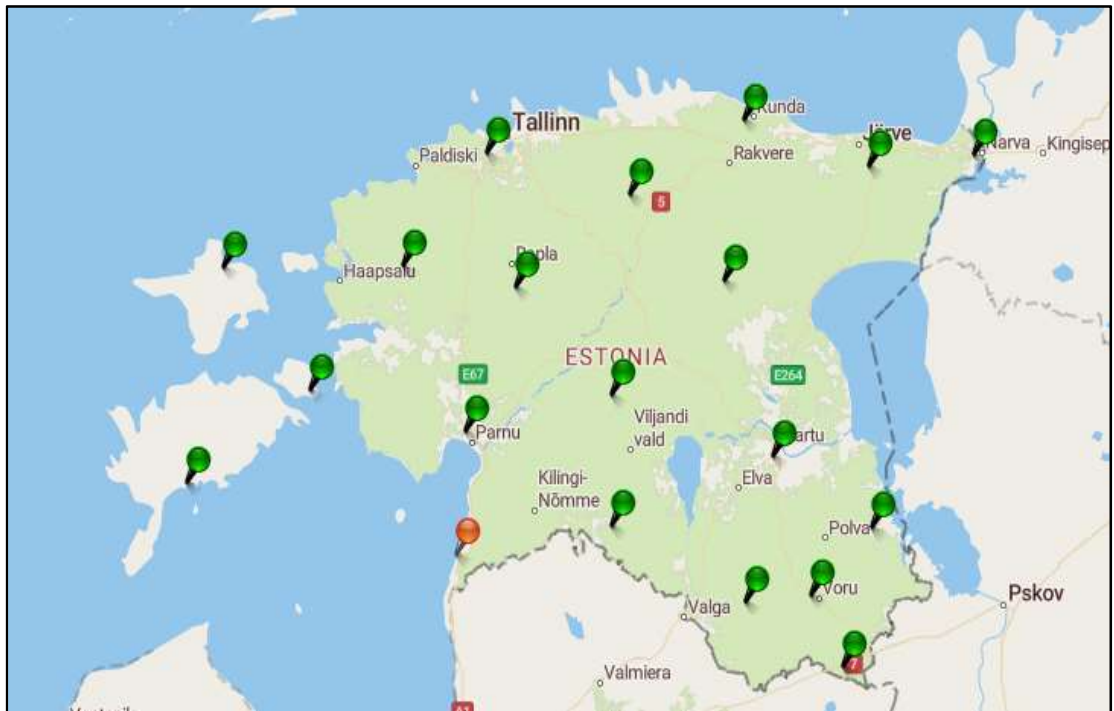
4.3 GNSS seade Trimble R8

Magistritöös kasutati alusvõrgu punktide koordineerimiseks GNSS seadet Trimble R8. Mõõdistati RTK VRS meetodil, kasutades selleks Trimble VRS Now püsijaamade võrku.

Püsivõrgu kasutamine seisneb selles, et liikuvjaamad saavad pidevalt andmeid oma asukoha kohta koos atmosfäärilist tingitud parandustega püsivõrgu baasjaamadest [32].

4.3.1 Trimble VRS Now püsijaamade võrk

Trimble VRS Now püsivõrk katab kogu Eesti (Joonis 4.2), kindlustamaks parandite saamist üle kogu Eesti [6].



Joonis 4.2 Trimble VRS Now püsivõrku kuuluvate baasjaamade asukohad [6]

Teenusepakkuja lubab asukohamäärangul kuni 3 sentimeetrist horisontaalset ning 5 sentimeetrist vertikaalset täpsust [6].

Eesti Maaülikooli bakalaureusetöös autori Even Kirs poolt uuriti Eesti GNSS võrkude täpsust. Selleks testiti kolme Eestis pakutavat GNSS RTN võrku – Trimble VRS Now, HadNet ja Maa-ameti poolt hallatavat ESTPOS. Autor järeldas, et Trimble VRS Now võrk andis parima plaanilise kui ka kõrgusliku täpsuse [33].

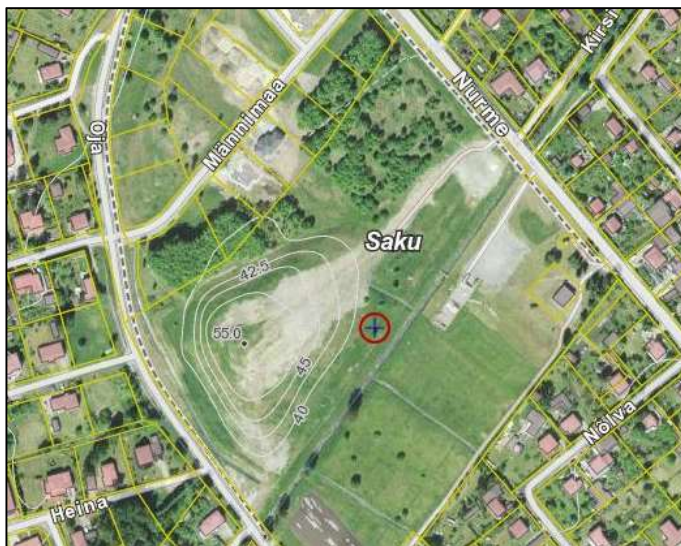
5. VÄLITÖÖ KIRJELDUS

Käesolevas peatükis kirjeldatakse magistritöö eesmärkide täitmiseks läbi viidud välitöid. Antakse ülevaade katseobjektist, lennuregulatsioonidest ja alusvõrgu rajamiseks tehtud töödest. Lisaks kirjeldatakse kahte lähteandmete hõivamismeetodit. Nendeks oli UAV ja tahhümeetriline mõõdistamine.

UAV mõõdistamine viidi läbi katsealal 5. aprill 2019 ajavahemikus 11.00–15.00. Välitööl osalesid magistritöö autor Kevin Reimann, autori kursusekaaslane Jürgen Resev ja varasema UAV mõõdistuse kogemusega Raxoest OÜ projektijuht Roland Laula.

5.1 Mõõdistusala

Magistritöö katseobjekt asub Harju maakonnas, Saku vallas, Saku alevikus, Nurme tn 27. Katseobjekt valiti sellepärast, et seal on umbes 15 m kõrgune tehislük kungas ning vahetus läheduses asus asfalttee. Need tingimused võimaldasid GNSS-RTK mõõdistustehnoloogiaga UAV-d testida kahe kontrastse pinnavormi näitel.

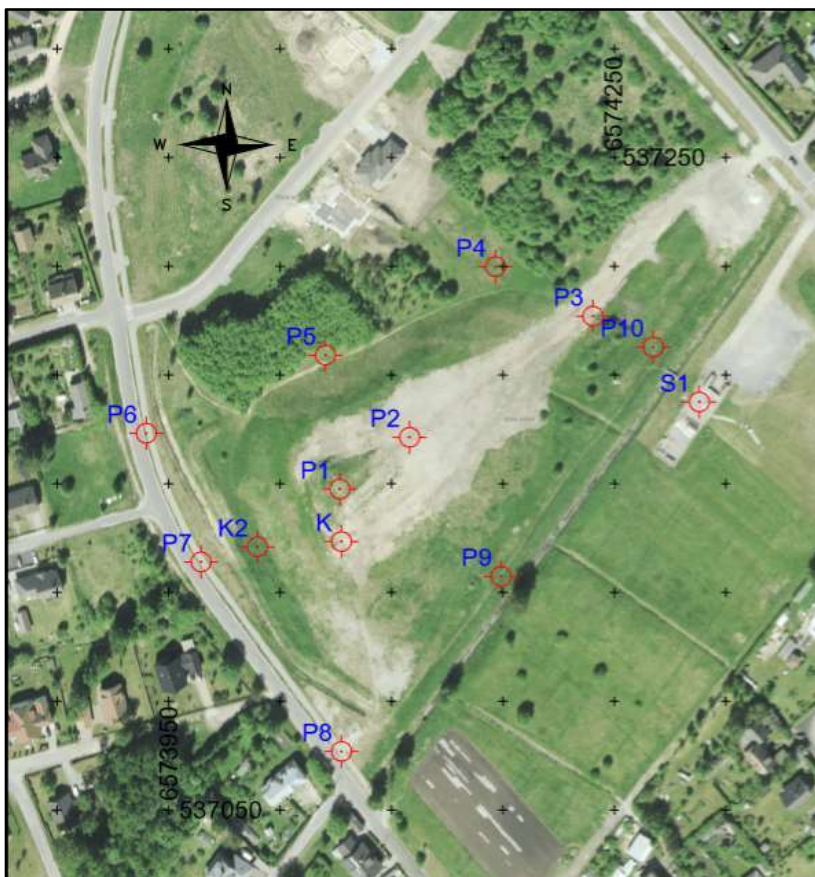


Joonis 5.1 Katseobjekti kaardivaade (Kaardipilt on tehtud Maa-ameti geoportaalil 27.05.2019)

Mõõdistusala keskmises paiknevas tehislük kungas (Joonis 5.1) oli osaliselt kaetud madala taimestikuga ning ehitusjätmetega (killustik, betoon). Asfalttee seisukord oli hea ning teel ei esinenud defekte (auke, roopaid).

5.2 Alusvõrgu rajamine

Alusvõrgu punktide koordineerimisel kasutati seadet Trimble R8 GNSS. Punktide koordineerimine sooritati kolmekordse initialsiseerimisega, mõõteaeg määrati 20 sekundit ühele mõõtmisessioonile.



Joonis 5.2 Trimble R8 GNSS seadmega mõõdistatud alusvõrgu punktide asukohaskeem. Punased märgid näitavad tähiste asukohta ning sinisega on punktide nimetus. Punktide nimetamisel (S, K, P) ei lähtunud loogikast. (Tehtud tarkvaras AutoCAD)

Alusvõrgu punktid kindlustati püsikatenditel asfaldinaeladega ning pinnasel metallist armatuurvaiadega. Kokku paigaldati katsealale 13 alusvõrgu punkti (Joonis 5.2). UAV ja tahhümeetrilisel mõõdistamisel kasutati samasid alusvõrgu punkte. Alusvõrgu punktid tähistati looduses eristatava aerosoolvärviga joonistatud ristiga (Joonis 5.3), mille lähedusse märgistati tähise nimetus. Seega fotogramm-meetrilisel mõõdistamisel ei kasutatud spetsiaalseid tähiseid testimaks aerosoolvärviga tähiste eelseid ja puuduseid.



Joonis 5.3 Alusvõrgu punktide koordineerimine ja tähiste tähistamine looduses (Foto tehtud mõõdistustööde käigus)

Punktid paigutati nii, et need sobiksid nii tahhümeetriliseks kui ka UAV mõõdistamiseks. Punktide paigutamisel lähtuti tingimusest, et neil oleks hea omavaheline nähtavus ning poleks häirivaid looduslikke elemente (kõrghaljastust), mis varjaks fotogramm-meetrilisel mõõdistamisel tähiste tuvastamist fotodel.

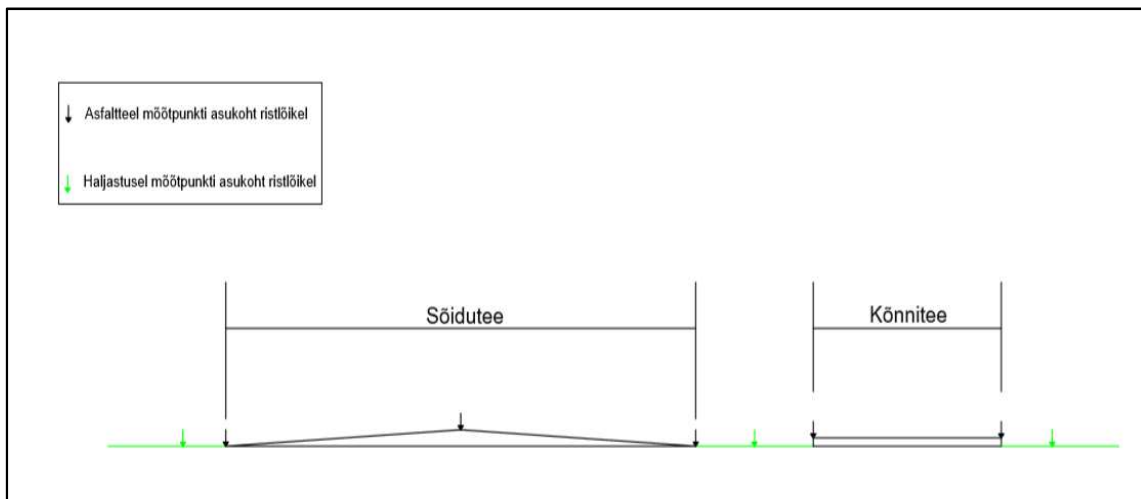
5.3 Tahhümeetriline mõõdistamine

Tahhümeetrilise mõõdistuse võib tinglikult jagada kaheks piirkonnaks. Esimene piirkond oli katseobjekti lääne ja edela küljel asuv kergliiklus - ja sõidutee. Teiseks piirkonnaks oli mõõdistusala keskmes asuv tehisküngas (vt Joonis 5.4). Tahhümeetrilisel mõõdistamisel orienteeriti instrument vastulõike meetodil kasutades vähemalt 3 alusvõrgu punkti.



Joonis 5.4 Tahhümeetrilise mõõdistuspunktide (punasega) jaotus. Punane joon kirjeldab piirkonda 1, must joon kirjeldab piirkonda 2

Esimeses piirkonnas (punasega) mõõdistati 135 punkti asfaltteel ja 67 ümbritseva maapinna punkti (Joonis 5.4). Asfalttee mõõdistati iga 10 sammu (ca 10 m) tagant, kus mõõdistati tee ristlõige 8 punktiga.



Joonis 5.5 Mõõtpunktide asukoht ristlõikes kontaktmõõdistamise teel. Rohelise värviga kujutatud pinnad on maapind (Koostatud tarkvaras AutoCAD)

Teises piirkonnas mõõdistati kokku 607 punkti. Maapinna punkte mõõdistati umbes iga 10 m tagant ning reljeefi murdepunktide läheduses tihedamalt. Seda sellepärast, et kungas oleks pinnamudeli koostamisel adekvaatsemalt kujutatud.

5.4 GNSS-RTK UAV mõõdistamine

Fotogramm-meetriline mõõdistamine viidi läbi kahe erineva lennukõrgusega – lennukõrguselt 50 ja 75 m. UAV mõõdistamiseks kasutati vaikimisi määratud lennuparameetreid (Tabel 5.1)

Tabel 5.1 UAV fotogramm-meetrilise mõõdistamisel kasutatud lennuparameetrid.

| Lend | Lennukõrgus 50 m | Lennukõrgus 75 m |
|--|--------------------------|--------------------------|
| Lennutrajektor | Paralleelsed trajektorid | Paralleelsed trajektorid |
| Fotode arv | 344 | 187 |
| Fotode põiki/pikkikattumine (%) | 70/80 | 70/80 |
| Kaamera nurk | Nadiiris | Nadiiris |
| Kogu kaetud ala suurus | 10,8 ha | 10,8 ha |

Enne GNSS-RTK UAV mõõdistuse alustamist oli vaja valida RTK ühenduse tüüp. Selleks on kas püsijaamade võrgus mõõtmine või ajutise baasjaamaga. Käesolevas magistritöös kasutati püsijaamade võrgus mõõdistamist (vt jaotis 4.3.1).

6. MÕÕDISTUSANDMETE TÖÖTLEMINE

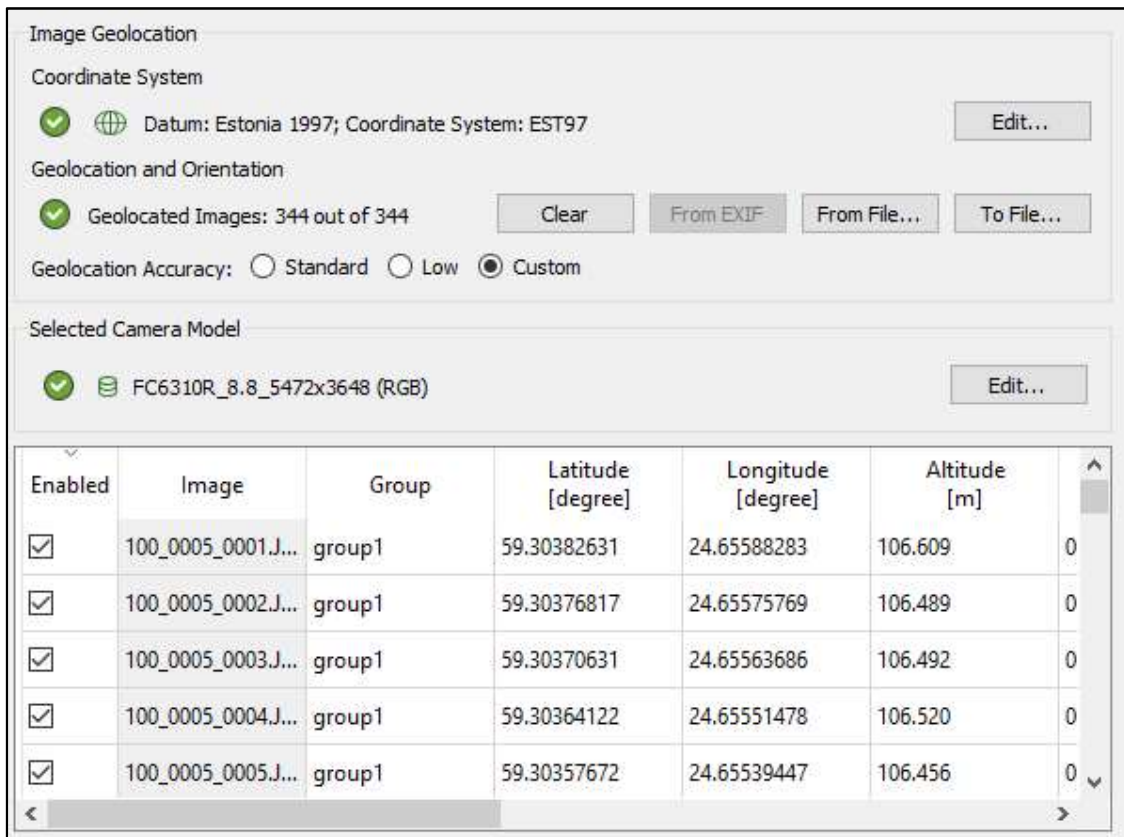
Käesolevas peatükis käsitletakse mõõdistusandmete töötlemist erinevate programmide näitel. Aerofotodest genereeriti tarkvaraga Pix4DMapper punktipilved. Punktipilvedest eraldati üksikute punktide koordinaate tarkvaraga Autodesk Recap. Punktipilvede võrdlused viidi läbi keskkonnas 3DReshaper ning statistilised näitajad arvutati tabelarvutustarkvaras Microsoft Office Excel.

6.1 Pix4DMapper

Aerofotodest loodi tarkvara Pix4DMapper kasutades punktipilved. Pix4DMapper tarkvara eesmärk on fotogramm-meetriline andmetöötlus. Tarkvaras on võimalik koostada näiteks ortofoto mosaiike, punktipilvi ja erinevaid maapinna mudeleid. Käesolevas magistritöös keskendutakse punktipilve loomisele. Punktipilve loomise võib jaotada järgmistesse etappidesse:

1. Aerofotode importimine, vajadusel tähiste importimine;
2. Esialgne andmetöötlus;
3. Punktipilve tihendamine;
4. Saadud tulemite eksportimine.

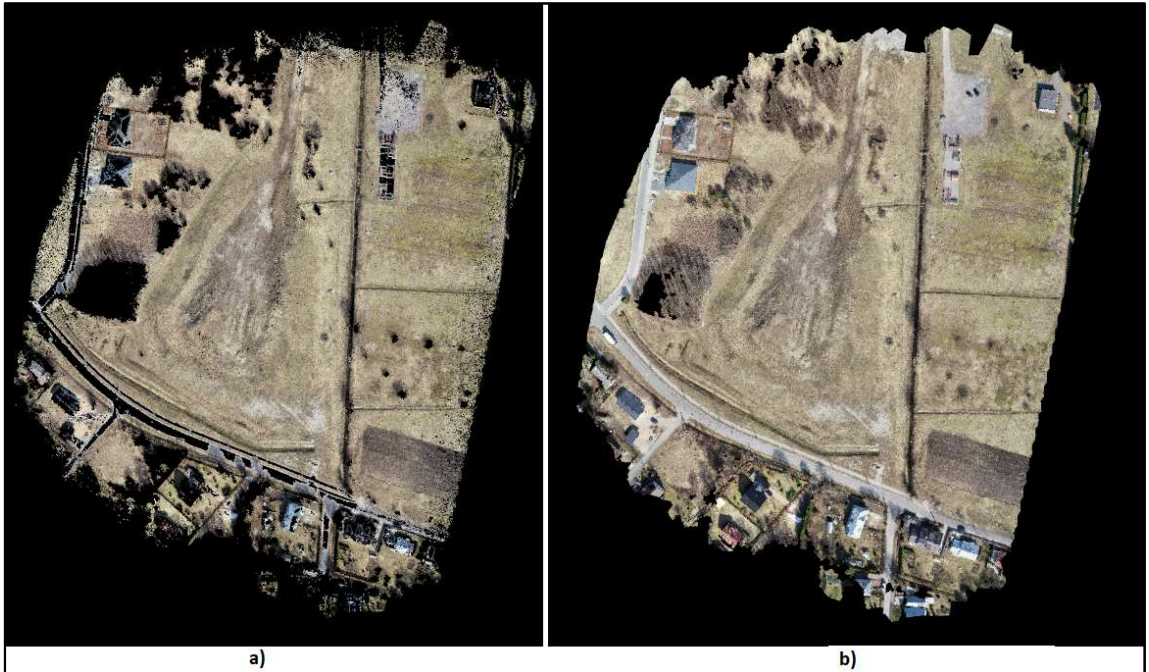
Esimene etapp on aerofotode importimine andmetöötlusprogrammi. Pix4DMapper võimaldab uurida aerofotode metaandmeid ja teha vajadusel korrekture (Joonis 6.1). Metaandmeteks on näiteks kaamera parameetrid ja aerofotode koordinaadid.



Joonis 6.1 Aerofotode omadusi kirjeldav aken (Kuvatõmmis tehtud programmis Pix4DMapper)

Teine etapp on esialgne andmetöötlus. Esialgse andmetötluse käigus otsitakse aerofotodelt ühised tunnuspunkte. Kui kahe või enama foto pealt leitakse ühine tunnuspunkt, siis genereerib andmetöötlusprogramm sinna 3D punkti. Mida rohkematel aerofotodel tunnuspunkt esineb, seda usaldusväärsem on genereeritava 3D punkti tulemus. Esialgse andmetötluse käigus saadakse hõre punktipilv, mis on edasise punktipilve genereerimise aluseks. (Joonis 6.2)

Kolmas etapp on tihendatud punktipilve koostamine (Joonis 6.2). Tihendatud punktipilved olid käesoleva magistritöö tulemuste evalveerimise aluseks.



Joonis 6.2 Andmetöötlusprogrammi tulemid. a) ühised leitud tunnuspunktid b) tihendatud punktipilv (Kuvatõmmised tehtud programmis Pix4DMapper)

Tulemuste evalveerimiseks koostati neli erinevat punktipilve:

- 1) RTK tähisteta punktipilv, lennukõrgusega 50 m;
- 2) RTK tähisteta punktipilv, lennukõrgusega 75 m;
- 3) Kolme tähisega punktipilv, lennukõrgusega 50 m;
- 4) Kõikide tähistega punktipilv, lennukõrgusega 50 m.

Eelnimetatud punktipilvede eksportimisel kasutati .las faililaiendit. Seda sellepärast, et tegemist on levinud faililaiendiga, mida paljud andmetööstustarkvarad toetavad.

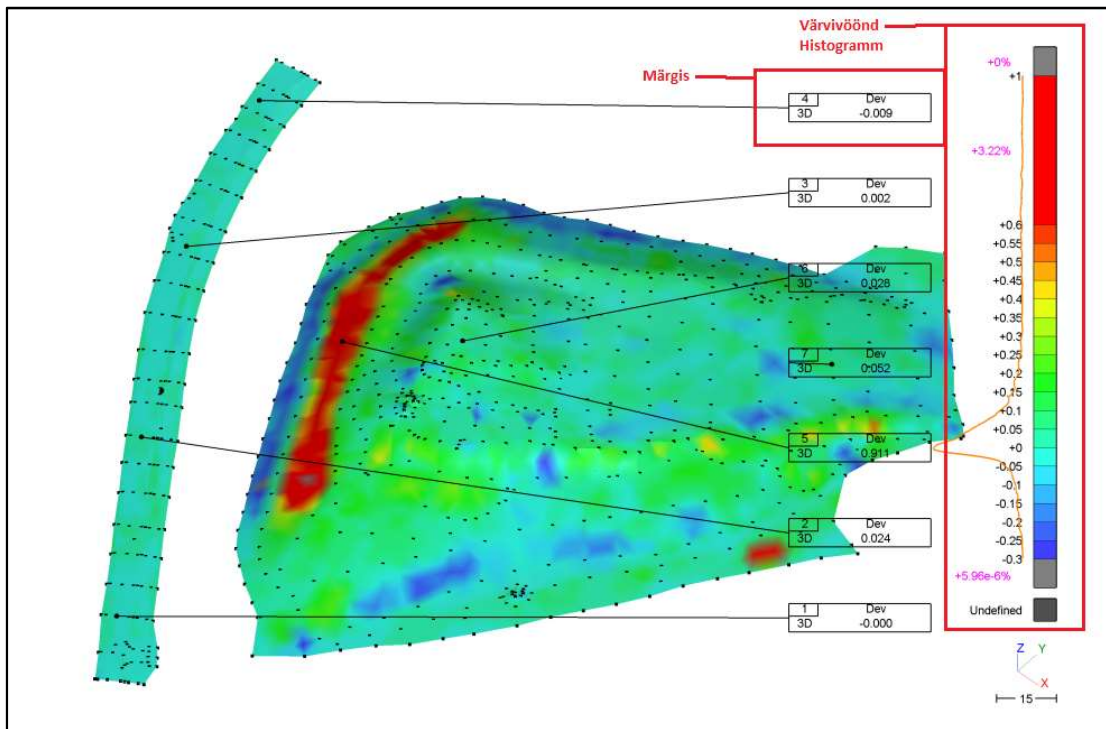
6.2 Autodesk ReCap

Autodesk ReCapi kasutatakse punktipilvede konverteerimiseks Autodeski programmidele sobivasse formaati. Samuti on võimalik tarkvaras punktipilvesid analüüsida ja teha geomeetrilisi analüüse. See tähendab, et on võimalik kuvada üksikute punkte koordinaate ja mõõtmisi teha. Käesolevas magistritöös kasutati Autodesk ReCapi, et tähiste kohal eraldada punktipilvest kõrguseid.

6.3 3DReshaper

3DReshaper on punktipilvede töötlemise programm, mis võimaldab omavahel võrrelda erinevaid punktipilvi ja teostada hälvete analüüsi. Käesoleva uurimistöo raames kasutati tarkvara pinnamudelite koostamiseks ja nende vaheliste hälvete võrdlemiseks. Samuti kasutati tarkvara mahuarvutuste (*Volume*) tegemiseks.

3DReshaperis koostati tulemuste evalveerimiseks võrdlusmudeleid. Võrdlusmudel (Joonis 6.3) kirjeldab kahe andmestiku erinevusi kasutades selleks histogrammi ja sellega kaasnevat värvivööndit. Samuti on võimalik välja tuua kahe andmestiku arvilised erinevused soovitud asukohas (märgised). Võrdlusmudel kasutab hälvete visualiseerimiseks erinevaid värve, mis annab võimaluse tulemusi analüüsida.



Joonis 6.3 Võrdlusmudel 3DReshaper keskkonnas. Musta värvusega kujutatud punktobjektid on tahhümeetrilise mõõdistuse punktid. Joonis on illustratiivsel eesmärgil. Ühikud meetrites

Värvivöönd (*Number of levels*) on hälvete vahemik, mida saab jagada maksimaalselt 19 klassiks. Igale klassile saab määrata eraldi vahemiku, millega saab soovitud veavahemikke välja tuua, näiteks uurida mitu protsenti hälvetest jäävad teatud vahemikku.

Histogramm on joonisel 6.3 kujutatud värvivööndi kõrval (oranž joon). Selle kuju on tundlik enim esinevate kõrguslike erinevuste suhtes. Võrdlusmudel annab kiire ülevaate kahe pinna vahelistest erinevustest.

Võrdlusmudeli all peab autor silmas, kui kasutatakse *mesh to mesh* meetodit. 3DReshaper programmis saab kasutada funktsiooni *Compare*, valides esimesena aktiivseks referentspinna ja teisena võrreldava pinnamudeli. Selle tulemusena saadakse võrdlusmudel.

6.4 Microsoft Office Excel

Käesolevas magistritöös kasutati statistiliste näitajate arvutamiseks tarkvara Microsoft Office Excel. Tulemusi hinnatakse järgmiste statistiliste näitajatega miinimumhälve, maksimumhälve, hälvete keskmine, standardhälve ja keskmine ruutviga (KRV). Standardhälve iseloomustab keskväärtuse hajuvust, keskmine ruutviga hindab mõõtmiste täpsust referentsandmete suhtes. Standardhälbe arvutamiseks kasutati järgmist valemit [34]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \text{ kus} \quad (6.1)$$

x_i – üks hälve, mm;

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

n – mõõtmiste arv.

Keskmine ruutviga arvutati Besseli valemiga [34]:

$$KRV = \pm \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}}, \text{ kus} \quad (6.2)$$

v – hälvete ruutude summa, mm;

n – mõõtmiste arv.

7. GNSS-RTK UAV TULEMUSTE EVALVEERIMINE

Käesolevas peatükis kirjeldatakse punktipilvede kõrguslikku ja plaanilist täpsust. Kõrguslikku täpsust hinnatakse tähiste kohal ja võrdlusmudelite abil. Plaanilist täpsust evalveeritakse ainult tähiste abil. Samuti tuuakse välja mahuarvutused mõõdistusala keskel paikneva künka näitel.

GNSS-RTK mõõdistustehnoloogiaga UAV mõõdistustest koostati 4 erinevat punktipilve. Nendeks olid:

1. RTK tähisteta, lennukõrgus 50 m;
2. RTK tähisteta, lennukõrgus 75 m;
3. Osade tähistega, lennukõrgus 50 m;
4. Kõikide tähistega, lennukõrgus 50 m.

Aerofotodest koostatud punktipilvede kõrguslikud väärtused on ellipsoidi suhtes. Kuna referentsandmestik mõõdeti Eestis kehtivas kõrgussüsteemis (lühendiga EH2000), siis kasutati Maa-ameti geoidikalkulaatorit viimaks punktipilved samasse kõrgussüsteemi.

7.1 Punktipilvede kõrgusliku vea hindamine

Punktipilvede kõrgusliku vea hindamine jaguneb kaheks. Esmalt hinnatakse punktipilve täpsust tähiste kohal. Teiseks meetodiks oli võrdlusmudelite koostamine.

Tähiste kohal kõrguste võrdlemise referentsandmeteks oli GNSS seadmega määratud kõrgus. Võrdlusmudelitel olid referentsandmeteks tahhümeetriliselt mõõdistatud punktid. Lisaks võrreldakse omavahel RTK tähisteta (lennukõrgus 50 m) ja kõikide tähistega genereeritud punktipilvi.

7.1.1 Lennukõrguse mõju GNSS-RTK UAV mõõdistuse täpsusele

UAV mõõdistamine viidi läbi lennukõrgustel 50 ja 75 m. See võimaldas uurida lennukõrguse mõju GNSS-RTK UAV mõõdistuse täpsusele. Lennukõrguse mõju hindamiseks võeti mõlema lennukõrgusega genereeritud punktipilvest tähiste kohal kõrguslik väärtus ning võrreldi seda GNSS seadmega määratud kõrgusega (Tabel 7.1).

Tabel 7.1 Punktipilvede kõrguste erinevused GNSS seadmega mõõdetud tähiste suhtes

| Tähise nimetus | H1 = Tähised (m) | H2 = Lennukõrgus 50 m (m) | H3 = Lennukõrgus 75 m (m) | $\Delta H = H1 - H2$ (mm) | $\Delta H = H1 - H3$ (mm) | |
|--------------------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------|
| S1 | 38,313 | 38,274 | 38,419 | 39 | -106 | |
| P10 | 37,876 | 37,889 | 38,036 | -13 | -160 | |
| P3 | 37,756 | 37,731 | 37,873 | 25 | -117 | |
| P4 | 38,186 | 38,195 | 38,300 | -9 | -114 | |
| P5 | 40,566 | 40,554 | 40,681 | 12 | -115 | |
| P6 | 38,807 | 38,804 | 38,931 | 3 | -124 | |
| P7 | 38,289 | 38,258 | 38,367 | 31 | -78 | |
| P8 | 38,174 | 38,142 | 38,290 | 32 | -116 | |
| P9 | 37,827 | 37,807 | 37,967 | 20 | -140 | |
| K2 | 39,287 | 39,256 | 39,416 | 31 | -129 | |
| K | 51,365 | 51,337 | 51,455 | 28 | -90 | |
| P1 | 54,989 | 54,969 | 55,075 | 20 | -86 | |
| P2 | 48,417 | 48,386 | 48,497 | 31 | -80 | |
| Statistilised näitajad: | | | | | | |
| | | | | MIN | -13 | -160 |
| | | | | MAX | 39 | -78 |
| | | | | Keskmine | 19 | -112 |
| | | | | STD | 16 | 24 |
| | | | | KRV | 26 | 119 |

Madalama lennukõrguse minimaalne kõrgushälve on -13 mm ja suurim 39 mm. Suurema lennukõrguse minimaalne kõrgushälve on -160 mm ja suurim -78 mm. Madalama lennukõrgusega kõrguserinevuste KRV on 26 mm ja suuremal 119 mm. Madalama lennukõrguse arvatud kõrgushälvete keskmine on 19 mm ja suuremal -112 mm (Tabel 7.1).

Tulemused näitavad, et lennukõrgusega 75 m ei suutnud DJI Phantom 4 RTK saavutada rahuldavat kõrguslikku täpsust. Seetõttu pole edasisel andmetöötlusel neid andmeid kasutatud.

7.1.2 Võrdlusmudelite rakendamine kõrguslikul evalveerimisel

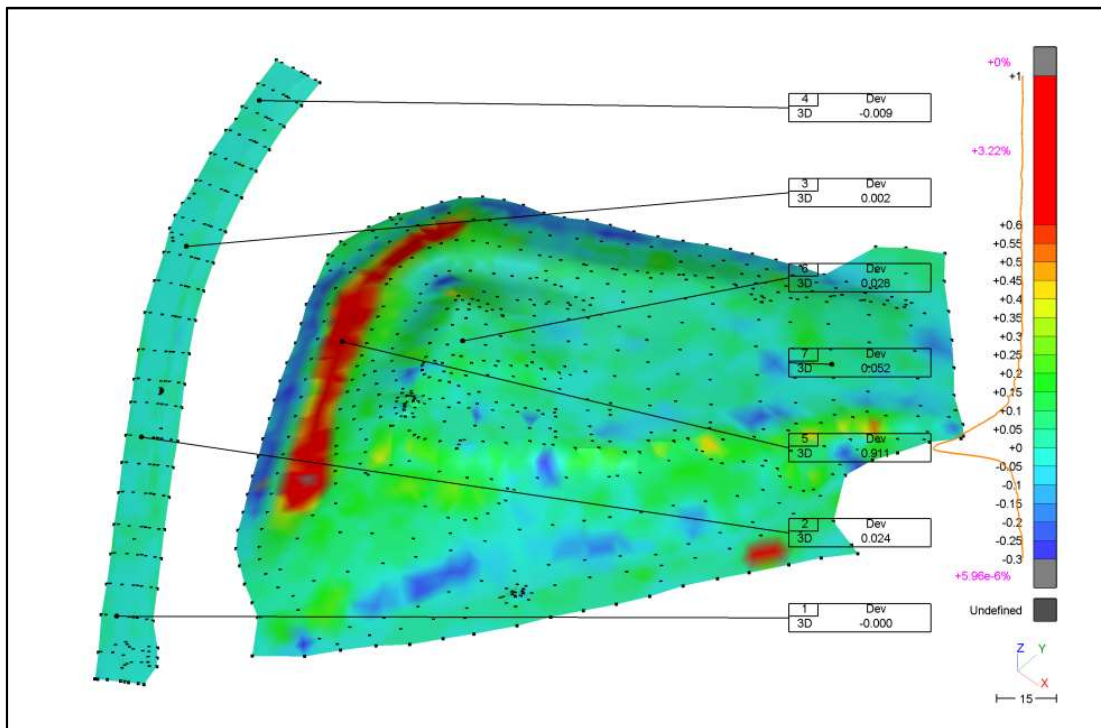
Käesolevas peatükis rakendatakse võrdlusmudeli meetodikat GNSS-RTK UAV mõõdistuse kõrguslikul evalveerimisel. Võrdlusmudeleid, mille referentsandmeteks oli tahhümeetriline mõõdistamine, koostati kokku 3. Nendeks olid:

1. RTK tähisteta, lennukõrgus 50 m;
2. RTK osade (3 tk) tähistega, lennukõrgus 50 m;
3. Kõikide tähistega, lennukõrgus 50 m.

Lisaks nendele koostati ka võrdlusmudel RTK tähisteta ja kõikide tähistega punktipilvede vahel.

RTK tähisteta ja referentsandmete arvatud KRV võrdlusmudelist oli asfaldil 13 mm. Asfaldil oli väikseim kõrguslik erinevus -40 mm ja maksimaalne 54 mm. Miinimumi ja maksimumi suure erinevuse põhjuseks on asfalttee kõrval asuvad kõrgemad puud, mis tekitasid asfaldile varjusid (vt LISA 8). Kõrguserinevuste arvatud keskmine oli 5 mm. See tulemus näitab, et kõrguslikud erinevused koonduvad pigem 0 lähedale. Seega on saavutatud hea tulemus põhinedes ainult RTK tehnoloogiast punktipilve koostamiseks.

RTK tähisteta ja referentspinna võrdlusel künka puhul esinesid suuremad kõrguslikud erinevused. Arvatud KRV oli 75 mm ja miinimum kõrguslik erinevus -320 mm, maksimaalne erinevus 68 mm ning kõrguslike erinevuste keskmine -36 mm. Suuremad hälbed esinevad nõlvade osas, mille suurusjärg ulatub kuni 1 m. See oli tingitud tahhümeetrilisest mõõtmisviisist, mis ei kujutanud reljeefi piisavalt adekvaatselt. Samuti mõjutab punktipilve täpsust madal taimestik, mille tõttu pole fotogramm-meetrilisel mõõdistamisel võimalik tõelist maapinda eristada.



Joonis 7.1 RTK tähisteta pinnamudeli võrdlemine referentspinnaga. Märgetel on välja toodud kõrguslik erinevus (Dev) määratud punktides. Musta värvusega punktid on tahhümeetriliselt mõõdistatud punktid. Joonmõõtkava on meetrites (Koostatud programmis 3DReshaper)

Osade tähistega ja referentsandmetest arvatatud KRV oli asfaldil 25 mm ja keskmine kõrguslik erinevus -21 mm. Asfaldil on maksimaalne kõrguslik erinevus 24 mm ja minimaalne -75 mm. Miinimumi ja maksimumi kõrgusliku erinevuse põhjustajaks on päikese nurgast tekkinud varjud asfaldi pinnale. Selle tõttu tekivad punktipilvele suurema hälbe punktid.

Osade tähistega ja referentsandmetest arvatatud KRV oli künka puhul 88 mm ja keskmine kõrguslik erinevus -57 mm. Maksimaalne kõrguslik erinevus on 160 mm ja minimaalne -381 mm. Selle põhjustajaks on madal vegetatsioon. Autor märkas tahhümeetrilise mõõdistamise käigus kõrgemat taimestikku, mille tõttu tekkisid suuremad kõrguslikud erinevused.

Kõik tähised võrdlusmodelis asfalttee arvatatud KRV oli 16 mm ja keskmine kõrguslik erinevus -13 mm. KRV oli 3 mm suurem kui RTK tähisteta pinnamudeli võrdlusel, kuid 9 mm väiksem osade tähistega pinnamudeli võrdlusest. Seega suuri erinevusi ei ilmne pinnamudelite võrdlemisel referentspinnaga asfalttee näitel.

Kõik tähised võrdlusmodelis olid künka puhul suuremad hälbed sarnaselt eelmistele võrdlusmeetoditele samuti nõlvade osas. Seal on märgata kuni 1 meetriseid kõrguslikke erinevusi.

Arvutatud KRV on künka näitel 81 mm ning keskmine kõrguslik erinevus -49 mm. Võrdlusmodelite tulemustes künka näitel ei ole märgata suuri omavahelisi erinevusi.

Võrdlusmodelite täpsuse hindamiseks arvutati statistilised näitajad tahhümeetriliselt mõõdetud punktide asukohtades. See tähendab, et tahhümeetrilise punkti asukohas võeti võrdlusmodelist kahe pinna vaheline hälve. Võrdlusmodeli statistilised hinnangud jagati kaheks: asfalttee ja tehislük kungas (vt Joonis 5.4).

Autori arvates on põhjustanud erinevused KRV ja erinevuste keskmise arvutamisel tahhümeetriliste punktide asukohtades kõrguslike väärtuste manuaalsest hõivamisest. Selle tõttu eraldati pinnamudelid erinev arv võrdluspunkte statistiliste näitajate arvutamisel (Tabel 7.2).

Tabel 7.2. Pinnamudelite kõrguslike erinevuste statistilised näitajad kahe piirkonna näitel. Ühikud millimeetrites

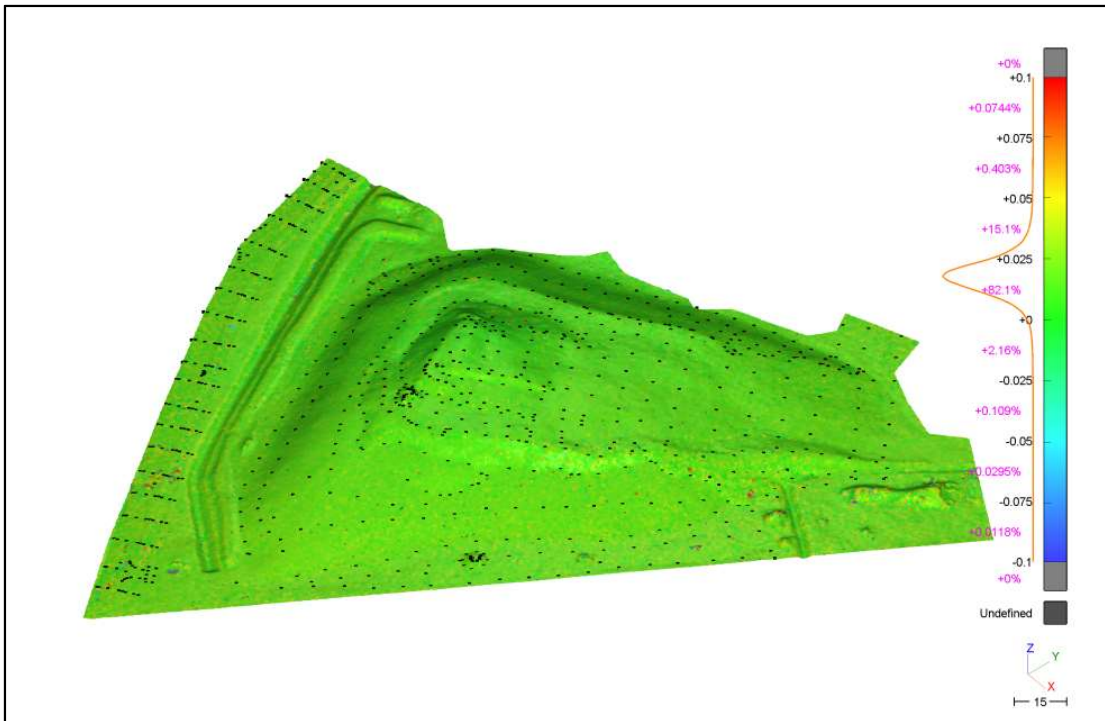
| Referentsandmestik | Tahhümeetriline mõõdistus | | | | | |
|----------------------------|---------------------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|
| | RTK tähisteta | | Osad tähised | | Kõik tähised | |
| Võrdlusandmestik | Asfalt | Kungas | Asfalt | Kungas | Asfalt | Kungas |
| Piirkond | | | | | | |
| Võrdluspunktide arv | 129 | 591 | 132 | 593 | 134 | 586 |
| MIN | -40 | -320 | -75 | -381 | -42 | -253 |
| MAX | 54 | 168 | 24 | 160 | 30 | 164 |
| Keskmine | 5 | -36 | -21 | -57 | -13 | -49 |
| STD | 12 | 66 | 14 | 67 | 9 | 64 |
| KRV | 13 | 75 | 25 | 88 | 16 | 81 |

Arvutatud statistika ei kirjelda suuri erinevusi erinevate võrdlusmodelitel. Kui vaadata kõrguslike erinevuste arvutatud keskmist, siis on märgata, et parem täpsus on saavutatud RTK tähisteta võrdlemisel tahhümeetrilise mõõdistusega. Kuid samas võrreldes RTK tähisteta keskmist teiste mudelitega, siis need ei kirjelda märgatavaid erinevusi nii asfalttee kui ka künka näitel. Seetõttu arvab autor, et vead on pigem juhuslikud, mis on tekkinud mõõdistusandmetest (alusvõrk, mõõtmismeetod), andmetöötlus.

Viimases võrdlusmodelis võrreldi RTK tähisteta pinnamudelit kõikide tähistega pinnamudeliga. Referentspinnaks oli kõikide tähistega pinnamudel. Võrdlused teostati sarnaselt eelmiste võrdlusmodelitega tahhümeetriliste punkte asukohas. See tagas võrdsed võrdlustingimused.

Asfalttee arvutatud KRV oli 22 mm ja künka näitel 17 mm. Asfalttee puhul on minimaalne kõrguslik erinevus -8 mm ja maksimaalne 48 mm. Arvutatud asfalttee kõrguslike erinevuste keskmine oli 20 mm ja künkal 17 mm. Nendest tulemustest ei ilmne, et pinnamudelite kõrguslikud vahed oleksid märkimisväärselt suured. Autori arvates põhjustab selle andmetöötlusprogrammis erinevate

meetoditega (otsene ja traditsiooniline georefereerimine) punktipilve koostamine, mis põhjustab väikeseid erinevusi.



Joonis 7.2 RTK tähisteta ja kõikide tähistega pinnamudelite võrdlus. Punase värvusega on kujutatud tahhümeetrilise mõõtmisviisiga hõivatud punktide asukohad. Joonmõõtkava on meetrites (Koostatud programmis 3DReshaper)

Joonisel 7.2 on esitatud RTK tähisteta ja kõikide tähistega pinnamudelite võrdlus. Samuti ei esine ka joonisel suuremaid kõrguslike erinevusi. Histogrammi põhjal jääb enamus kõrguserinevusi vahemikku 0...2,5 cm.

Tabel 7.3 Kõikide tähistega ja RTK tähisteta pinnamudelite kõrguslike erinevuste statistilised näitajad. Ühikud millimeetrites

| Võrdlusmudeli nimetus | Kõik tähised – RTK tähisteta | |
|---------------------------|------------------------------|--------|
| | Asfalt | Küngas |
| Võrdluspunktid arv | 122 | 577 |
| MIN | -8 | -3 |
| MAX | 48 | 32 |
| Keskmine | 20 | 16 |
| STD | 8 | 5 |
| KRV | 22 | 17 |

7.2 GNSS-RTK UAV plaanilise täpsuse evalveerimine tähiste kohal

GNSS-RTK mõõdistustehnoloogiaga UAV plaanilise täpsuse evalveerimiseks võrreldi GNSS seadmega mõõdistatud tähiseid. Tähiste koordinaadid määrati punktipilves ning võrreldi GNSS seadmega mõõdetud koordinaatidega. Plaaniliste koordinaatide KRV (KRV_{xy}) arvutamisel kasutati valemit 7.1 [22]:

$$KRV_{XY} = \sqrt{KRV_X^2 + KRV_Y^2}, \text{ kus} \quad (7.1)$$

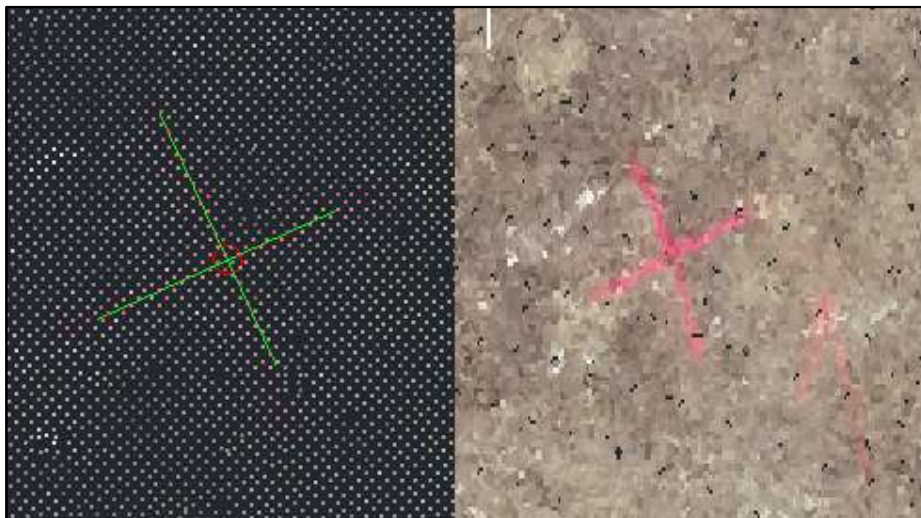
KRV_X^2 – X koordinaadi erinevustest arvatud keskmine ruutviga

KRV_Y^2 – Y koordinaadi erinevustest arvatud keskmine ruutviga

Plaanilise täpsuse statistiliste näitajate arvutamiseks kasutati järgmised punktipilvi:

1. RTK tähisteta, lennukõrgus 50 m;
2. RTK tähisteta, lennukõrgus 75 m;
3. Osad tähised, lennukõrgus 50 m.

Punktipilvedest eraldati koordinaadid programmiga Autodesk AutoCAD. Punktipilve koostamisel ei genereerita tähise tsesse punkti, selle tõttu kasutati tähise keskpunkti määramisel kahte ristuvat sirget.



Joonis 7.3 Tähise keskpunkti määramine punktipilvel programmis AutoCAD

Kahe joone ristumispunkt kirjeldas tähise tsesse (Joonis 7.3). Kuna punktipilves oli tähise tsesse raskesti eristuv siis korraldi ristuvate joonte joonestamist kolm korda ning keskmistati tulemus. Seda meetodit kasutati kõikide punktipilvede puhul. Keskmistatud tulemusi võrreldi GNSS seadmega mõõdetud andmetega ja arutati statistilised näitajad (Tabel 7.4).

RTK tähisteta, 50 m ja GNSS mõõtandaandmetest arvatud KRV oli 23 mm. X koordinaadi suurim erinevus oli -1 mm ja väikseim -30 mm, Y koordinaadi suurim erinevus oli 28 mm ja väikseim -13 mm. Need tulemused on head arvestades, et punktipilve koostamiseks ei kasutatud tähiseid.

RTK tähisteta, 75 m ja GNSS mõõtandaandmetest arvatud KRV oli 30 mm. X koordinaadi suurim erinevus oli 30 mm ja väikseim -43 mm, Y koordinaadi suurim erinevus oli 20 mm ja väikseim -39 mm. Tulemused kirjeldavad suuremaid erinevusi madalama lennu (lennukõrgus 50 m) tulemustega võrreldes. Selle põhjustab punktipilve tihedus. Kuna suurema lennukõrgusega punktipilve tihedus on väiksem, siis on keerulisem määrata tähise tsentri koordinaate. Kuna tulemused ei erine märkimisväärselt, siis saab järeldada, et lennukõrgus ei mõjuta punktipilve plaanilist täpsust.

Osade tähistega, 50 m ja GNSS mõõtandaandmetest arvatud KRV oli 18 mm. Suurim erinevus oli X koordinaadil 14 mm ja väikseim -18 mm, Y koordinaadil suurim erinevus oli 27 mm ja väikseim -14 mm. Võrreldes arvatud tulemusi teiste punktipilve statistiliste näitajatega, siis ei esine punktipilvedel omavahelisi märgatavaid erinevusi.

Tabel 7.4 Plaanilise täpsuse hindamiseks arvatud statistilised näitajad. Ühikud millimeetrites

| Referentsandmestik | GNSS seadmega mõõdistatud tähised | | | | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------|---------------------|------------|--------------------|------------|
| | 13 | | | | | |
| Tähiste arv | 13 | | | | | |
| Võrdlusandmestik | RTK tähisteta, 50m | | RTK tähisteta, 75 m | | Osad tähised, 50 m | |
| | ΔX | ΔY | ΔX | ΔY | ΔX | ΔY |
| MIN | -30 | -13 | -43 | -39 | -18 | -14 |
| MAX | -1 | 28 | 30 | 20 | 14 | 27 |
| Keskmine | -16 | 5 | -5 | -7 | -6 | 0 |
| STD | 10 | 11 | 21 | 20 | 11 | 12 |
| KRV (XY) | 23 | | 30 | | 18 | |

Magistritöö autori hinnangul ei ole ainult tähiste kohal plaanilise täpsuse hindamine piisav. Kahjuks ei esinenud katseobjektidel selgelt eristuvaid elemente, mille puhul oleks saanud rakendada alternatiivseid võrdlusmeetodeid.

Plaanilise täpsushinnangu andmisel on suureks puuduseks meetoodika. Autori arvates on plaanilised erinevused tekkinud tähise keskpunkti koordinaatide määramisest manuaalselt. Seetõttu tekivad meetoodilised vead, mis võivad suurendada/vähendada tegelikke erinevusi. Samuti mõjutab erinevuste tekkimist tähise keskpunkti mõõtmed, st keskpunkti suurus on aerosoolvärviga märgitud tähisel liiga suur, mis raskendab selle määramist.

Seega autor soovib edasistes uurimistöodes plaanilise täpsuse hindamiseks kasutada spetsiaalseid märgiseid või tehislikke elemente, mille plaaniline asend oleks looduses hästi tunnetatav. Seda sellepärast, et aerosoolvärviga tähise märkimisel (ristina) on kahe ristuva joone

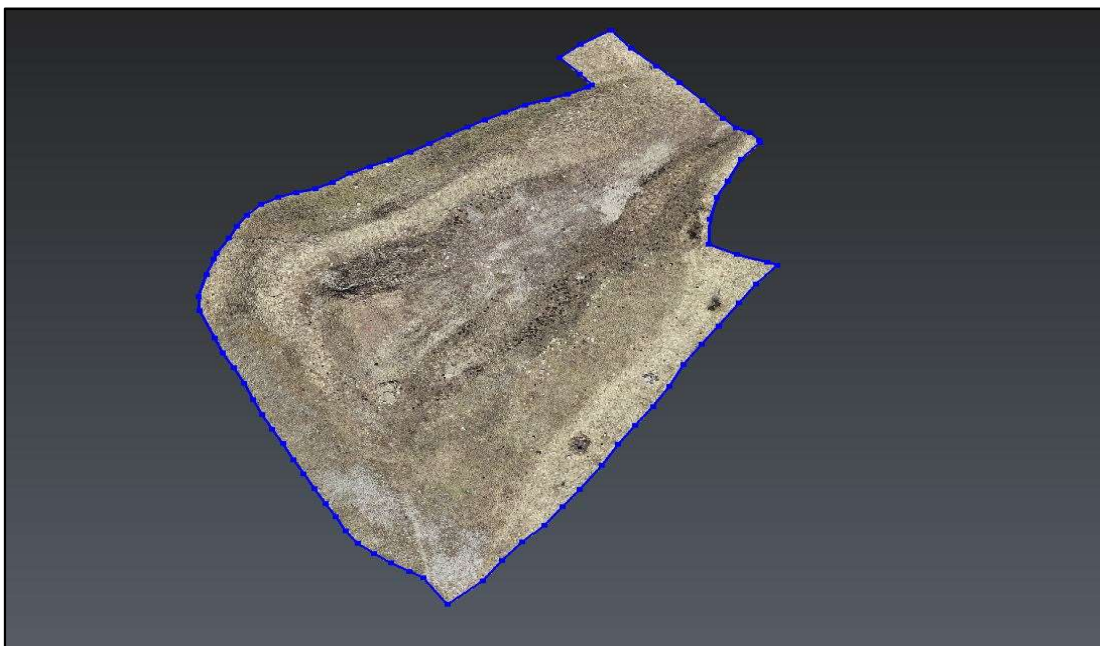
ristumispunkti paksus liiga suur, mille tõttu on raskem määrata andmetöötles kindlalt tähise keskpunkti.

7.3 Mahuarvutused

Ehitusobjektidel on mahtude mõõtmine sagedane nähtus. Selleks mõõdetakse esmalt aluspind ning pärast materjal, mis on juurde toodud või eemaldatud. Tavaliselt kasutatakse selleks tahhümeetrilist või GNSS seadmega mõõtmisviisi, kuid tänapäeva tehnika arenguga on UAV mõõdistus selle hõlpsamaks teinud.

UAV-ga on võimalik pääseda raskesti ligipääsetavatesse või ohtlikesse kohtadesse lihtsamini kui tavaliste mõõtmisviisidega. Käesoleva uurimistöõ põhiline eesmärk ei ole mahuarvutuste tegemine. Sellegipoolest kontrolliti, millised mahumõõtmise tulemused saab GNSS-RTK UAV mõõtmistehnoloogiaga.

Selleks koguti andmeid katseala keskmes paikneva künka kohta kahel erineval meetodil – tahhümeetriline ja UAV. Nendest moodustati punktipilved, millest omakorda pinnamudelid.



Joonis 7.4 Katseala keskmes paikneva künka määratud piir (sinine joon) ning tulemus peale punktipilve puhastamist (Koostatud tarkvaras 3DReshaper)

Täpsemate tulemuste saamiseks määrati tahhümeetrilise mõõtmisviisiga mõõdetud madalaimate kõrgustega maapinna punktide järgi piir (Joonis 7.4). Sellest tulenevalt puhastati punktipilved, et pinnamudelite koostamisel tekiks identsed pindalad mahuarvutuste tegemiseks. Seda põhjusega, et vältida erinevusi mahuarvutuste tulemustes eelmainitud põhjusel.

Tabel 7.5 Nurme 27 katseala tahhümeetrilise meetodiga mõõdetud mahuandmete võrdlus erinevate UAV pinnamudelite andmetega

| Pinnamudeli nimetus | Maht (m³) | Mahu erinevus võrreldes tahhümeetrilise pinnamudeliga (m³) | Mahu erinevus võrreldes tahhümeetrilise pinnamudeliga (%) |
|------------------------------|-----------------------------|--|--|
| Tahhümeetriline | 62568,192 | - | - |
| UAV RTK tähisteta | 62886,342 | 318,150 | 0,5 |
| UAV kolme tähisega | 62881,796 | 313,604 | 0,5 |
| UAV kõikide tähistega | 62872,838 | 304,646 | 0,5 |

Mahuarvutuste tegemiseks määrati tahhümeetrilistest andmetest koostatud pinnamudel õigeks pinnaks. Seda võrreldi erinevatest punktipilvedest koostatud pinnamudelitega. Tabelis 7.5 on kirjeldatud mahtude tulemusi erinevate pinnamudelite näitel.

Tabel kirjeldab mahuerinevusi protsentuaalselt tahhümeetrilise mahuväärtuse suhtes. Kõikide võrdluste puhul jääb mahuerinevus 0,5 % piiresse. Lähtudes markšeideritöö nõuetele (tabel 2.2), siis need tulemused sobivad mahumääramise töödeks. Fotogramm-meetrilise mõõdistuse tulemused varasemates uurimistöodes on kinnitanud UAV mõõdistuse kasutamist mahumääramis töödeks [35].

8. GNSS-RTK UAV MÕÕDISTUSTEHNOLOOGIA TULEMUSTE JÄRELDUSED

Käesolevas peatükis antakse kõrguslik ja plaaniline täpsushinnang põhinedes GNSS-RTK mõõdistustehnoloogiaga UAV tulemustele.

8.1 Kõrguslik täpsushinnang fotogramm-meetrilise mõõdistamise täpsusele

Kõrgusliku täpsuse valideerimiseks kasutati kahte erinevat võrdlusmeetodit. Nendeks oli kõrguste võrdlemine tähiste kohal ja võrdlusmodelite koostamine. Referentsandmeteks oli tähiste puhul GNSS seadmega määratud kõrgus ning võrdlusmodelite puhul oli referentsandmeteks tahhümeetriliselt mõõdistatud punktid.

Tähiste kohal võrreldi punktivilvest eraldatud kõrgust ja GNSS seadmega määratud kõrgust. Võrdluse tulemusena sai anda esialgse kõrgusliku täpsushinnangu lennukõrguse mõjust punktivilve kvaliteedile. Kõrgema lennu (lennukõrgus 75 m) puhul esinesid suuremad kõrguslikud erinevused, KRV 119 mm. Madalama lennu (lennukõrgus 50 m) erinevused tähiste asukohtades olid märgatavalt väiksemad, KRV 26 mm. Arvutatud keskmised erinevused olid madalama lennul 19 mm ja kõrgemal -112 mm.

Tähiste kohal võrreldud kõrgustest sai järeldada, et UAV madalamal lennul saab kõrguslikult täpsemad tulemused kui kõrgemal lennul. See tähendab, et GNSS-RTK UAV kõrguslik täpsus võib liiga kõrge lennu korral märkimisväärselt väheneda.

Teine võrdlusmeetod oli võrdlusmodelite koostamine, kus referentsandmestikuks oli tahhümeetriliselt mõõdistatud punktid. See meetod annab põhjalikuma kõrgusliku täpsushinnangu. Võrdlusmodel koostati madalama lennu (lennukõrgus 50 m) ja referentsandmestiku vahel. Andmestikest koostati pinnamodelid, mis olid võrdlusmodelite loomise aluseks (vt PTK 7.1.2). Võrdlusmodel kirjeldab kõrguslikke erinevusi kahe pinna vahel.

Võrdlusmudeleid koostati neli:

1. RTK tähisteta pinnamodeli võrdlemine referentspinnamodeliga;
2. Osade tähistega pinnamodeli võrdlemine referentspinnamodeliga;
3. Kõikide tähistega pinnamodeli võrdlemine referentspinnamodeliga;
4. RTK tähistega pinnamodeli võrdlemine kõikide tähistega pinnamodeliga.

Adekvaatsemate täpsushinnangute andmiseks arvutati ka statistilised näitajad toetamaks võrdlusmodelite tulemusi. Tahhümeetriliste mõõtpunktide asukohas võeti võrdlusmodelis kahe pinna vaheline kõrguslik erinevus. Nendest tulemustest arvutati statistilised näitajad, mida kirjeldab tabel 8.1

Tabel 8.1. Punktivilvede kõrguslike erinevuste statistilised näitajad referentspinna suhtes.

| Võrdlusmodeli nimetus | Tahhümeeter – RTK tähisteta | | Tahhümeeter – osade tähistega | | Tahhümeeter – kõik tähised | | RTK tähisteta – kõik tähised | |
|-----------------------------|-----------------------------|--------|-------------------------------|--------|----------------------------|--------|------------------------------|--------|
| | Asfalt | Küngas | Asfalt | Küngas | Asfalt | Küngas | Asfalt | Küngas |
| Võrdluspinna nimetus | | | | | | | | |
| Võrdluspunktide arv | 129 | 591 | 132 | 593 | 134 | 586 | 122 | 577 |
| MIN | -40 | -320 | -75 | -381 | -42 | -253 | -8 | -28 |
| MAX | 54 | 168 | 24 | 160 | 30 | 164 | 48 | 10 |
| Keskmine | 5 | -36 | -21 | -57 | -13 | -49 | 20 | -1 |
| STD | 12 | 66 | 14 | 67 | 9 | 64 | 8 | 5 |
| KRV | 13 | 75 | 25 | 88 | 16 | 81 | 22 | 17 |

Tabeli kirjeldatud tulemustest on märgata väikeseid erinevusi statistiliste näitajate näitel. Parema tulemuse on asfalttee näitel saavutanud RTK tähisteta punktivilvest koostatud pinnamudel. Selle arvutatud KRV on 13 mm ja kõrguslike erinevuste keskmine 5 mm. Sarnane tulemus esineb ka kõikide tähistega punktivilvest koostatud pinnamudelil, mille arvutatud KRV on 16 mm ja erinevuste keskmine -13 mm. Selle arvutamisel on kasutatud 134 võrdluspunkti võrreldes RTK tähisteta võrdlusel, kus kasutati 129 punkti. Võrdluspunktide erinev arv võib põhjustada KRV ja keskmiste arvutamisel väikest erinevust. Suurem arvutatud KRV ja keskmine esineb asfalttee näitel osade tähistega punktivilvest koostatud pinnamudeli võrdlusel. Selle KRV tulemuseks on 25 mm ja erinevuste keskmine -21 mm. Kuna asfalttee näitel ei esine tulemustes suuri erinevusi, siis vead on pigem juhuslikud. Need on põhjustatud autori arvates mõõtmismeetoditest (alusvõrgu rajamine, mõõtandaemete hõivamine) ja seadmetest, andmetöötlusprogrammidest jms.

Künka näitel tehti sarnased võrdlused. Tabel 8.1 kirjeldab statistilistes näitajates suuremaid väärtusi, st kõrguslikud erinevused on suuremad. Seda kirjeldavad ka erinevate kombinatsioonidega koostatud võrdlusmodeli joonised (vt PTK 7.1.2). RTK tähisteta pinnamudeli võrdlusel referentspinnaga on arvutatud KRV 75 mm ja erinevuste keskmine -36 mm. Kõikide tähistega pinnamudeli võrdlusel referentspinnaga on arvutatud KRV 81 mm ja erinevuste keskmine -49 mm. Kahel erineval võrdlusel ei esine märgatavaid erinevusi vaid need jäävad põhimõtteliselt sarnasesse suurusjärku. Seda kirjeldab ka osade tähistega pinnamudeli võrdlemine

referentspinnaga, kus arvatud KRV on 88 mm ja erinevuste keskmine -57 mm. Siinkohal on märgata, et arvatud KRV ja kõrguslike erinevuste keskmine on erinevatel meetoditel suurem kui asfalttee näitel. See on põhjustatud tahhümeetrilise mõõdistamise eelistest. Kontaktmõõdistamisel on võimalik reaalsel maapinda taimestikust eristada, aga aerofotodelt mitte. Selle tõttu genereeritakse punktipilve koostamisel punktid enamjaolt taimestiku peale, mis põhjustab suuremaid kõrguslikke erinevusi aerofotodest koostatud punktipilvede ja referentsandmete vahel.

Viimasena võrreldi kõrguslikult RTK tähisteta pinnamudelit kõikide tähistega. Nende pindade võrdlusel kasutati sarnast meetodit nagu eelmistel, kus võrreldi pindu ja toodi välja statistilised näitajad. Arvatud KRV väärtuseks saadi asfalttee näitel 22 mm ja kõrguslike erinevuste keskmine 20 mm. KRV arvutamisel kasutati samuti kontaktmõõdistamisel hõivatud mõõtpunktide asukohti, kuid ei kaasatud arvutustesse neid andmeid vaid võrreldi kahel erineval meetodil koostatud punktipilvi, millest moodustati omakorda pinnamudelid. Pinnamudelite võrdlusmudelil (Joonis 7.2) on märgata üksikuid punkte, mis eristuvad ülejäänud (rohekast) värvist. Need on autori arvates põhjustatud mürapunktidest, mis tekivad näiteks varjudest asfalttee pinnal (LISA 6). Samuti mõjutab autori arvates erinevusi andmetöötlusprogramm, kus on koostatud kaks erinevat punktipilve, mis ei ole lõpptulemusena identsed. Selle tõttu võisid statistiliste näitajate arvutustesse kaasatud olla mürapunktid, mis muudavad statistiliste näitajate suurusjärku suuremaks.

Seega on saavutatud tulemustest raske määrata, milline meetod on aerofotodest punktipilve koostamiseks parim. Seda sellepärast, et statistiliste näitajate ja pinnamudelite võrdlusel ei väljendu omavahelisi suuri erinevusi. Seega saab järeldada, et RTK UAV tehnoloogia saavutab sarnase kõrgusliku täpsuse võrreldes traditsiooniliste georefereerimis meetoditega.

Kuigi käesoleva magistritöö tulemustest saaks järeldada, et DJI Phantom 4 RTK UAV mudeliga mõõdistamisel ei peaks paigaldama katsealal tähiseid, mis säästaks välitööle kuluvat aega. Kuid samas ei saa eirata lennukõrguse mõju suuremate kõrguslike erinevuste tekkimisel. Seega peaks paigaldama maapealseid kontrollpunkte kõrgusliku täpsuse kontrolliks.

Kokkuvõtlikult võib öelda, et käesoleva uurimistöo katsealal saavutatud kõrguslik täpsus DJI Phantom 4 RTK drooniga vastab topo-geodeetilise uuringu nõuetele maapinna punktide mõõdistamisel, kuid mitte püsiakatendite, kaevude jms mõõdistamisel (vt Tabel 3.1).

8.2 Plaaniline täpsushinnang fotogramm-meetrilise mõõdistamise täpsusele

Plaanilise täpsushinnangu andmiseks kasutati referentsandmestikuna GNSS seadmega mõõdetud tähiseid. Neid võrreldi otsese georefereerimise ja traditsioonilise georefereerimise meetodil koostatud punktipilvedega.

Punktipilve ja GNSS seadmega hõivatud koordinaatide erinevused ei ole märgatavalt suured. Seda kirjeldab ka arvatud KRV. RTK tähisteta (lennukõrgus 50 m) arvatud KRV oli 23 mm ja osade tähistega oli 18 mm. Samuti RTK tähisteta (lennukõrgus 75 m) arvatud KRV oli 30 mm, mis pole märkimisväärselt erinev teiste võrdluste tulemustest.

Magistritöö autori arvates põhjustab suuremaid plaanilisi erinevusi meetoodika ja puudulik referentsandmestik, mis oleks sobilik plaanilise täpsuse valideerimiseks. Varasemates peatükkides on mainitud, et referentsandmete kogumisel kasutati GNSS seadmega mõõdetud tähiseid ja tahhümeetrilise mõõtmisviisiga mõõdetud erinevate karakteristikutega pindasi (asfalttee, kungas).

Magistritöö autori arvates ei olnud mõistlik kasutada asfalttee näitel tahhümeetrilisel viisil mõõdetud punkte plaanilise täpsuse hindamisel mitmel põhjusel. Üheks põhjuseks arvas autor, et see oleks näidanud ainult punktipilve plaanilist nihet (vt LISA 5, 6). Teist põhjust täheldas autor asfaldi mõõdistamisel, et asfaldi serva kattis kohati vana teepeenar, mis oleks põhjustanud suuremaid plaanilisi erinevusi andmestike võrdlusel. Seda sellepärast, et punktipilvel ei saa määrata selgelt asfaldi serva. Seega tuleks kasutada plaanilise täpsuse kontrollimisel selgesti eristatavaid objekte.

Magistritöö katsealal oli selgesti eristavate objektide puudulikkus, mille tõttu ei saa autor anda kindlaid järeldusi. Kuigi tähiste kohal arvatud plaanilise täpsuse statistilised näitajad ei ole märgatavalt suured, ei saa anda autori poolset kindlat järeldust plaanilise täpsuse kohta väheste GNSS tähiste põhjal erinevatel põhjustel.

Aerosoolvärviga tähiste märkimise eelis spetsiaalsete markeerimislehtede ees on ajaline sääst ning kindel asukoht fotogramm-meetrilisel mõõdistamisel. Spetsiaalseid markeerimislehti tuleb kindlustada selleks, et nende asukoht ei muutuks, mida aerosoolvärviga tähistamisel tegema ei pea. Ajalise säästlikkuse all peab autor silmas seda, et markeerimislehed tuleb enne mõõdistamist paigaldada ja kindlustada nende asukoht ning peale mõõtmiste lõpetamist kokku korjata, mistõttu kulub suurem välitööde aeg. Aerosoolvärviga tähistamise puudus on mitte eristuv keskpunkt. See on põhjustatud värvitava joone paksust, mida kasutatakse tähiste märkimisel tavaliselt ristina.

Seetõttu on raske määrata hilisemas andmetöötluses täpset tähise keskpunkti, mida on võimalik teha spetsiaalsete markeerimislehtedega.

Seega käesoleva magistritöö autori arvates peaks tulevastes uurimistöodes põhjalikumalt uurima RTK tehnoloogia plaanilist täpsust. Kuna mõõdistustingimused olenevad mõõdistatava ala asukohast, siis tuleks leida sobilikke alternatiive plaanilise täpsuse kontrolliks. Magistritöö autor soovib aerosoolvärviga tähiste märkimist vältida, vaid kasutada spetsiaalseid markeerimislehti.

KOKKUVÕTE

Magistritöö katseobjektile viidi läbi fotogramm-meetriline mõõdistamine drooniga Phantom 4 RTK. Selle eelis teisetüübiliste UAV-de ees on suurem asukoha määramise täpsus kasutades selleks RTK moodulit. RTK moodul võimaldab otsest aerofotode georefereerimist. Selle eelis traditsiooniliste meetodite ees on väiksem ajakulu väli- ja sisetööl.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks seati GNSS-RTK võimekusega mehitamata lennumasinatega saavutatava mõõdistustäpsuse evalueerimine. Samuti võrreldakse saadud tulemusi erinevate Eestis kehtivate nõuetega hindamaks GNSS-RTK UAV täpsust geodeetiliste tööde tegemiseks. Magistritöö raames kontrolliti ka GNSS-RTK UAV aerofotode sobivust mahtude määramiseks.

Täpsuse hindamiseks kasutati referentsandmetena tahhümeetriliselt mõõdistatud andmeid ja GNSS seadmega mõõdetud maapealseid kontrollpunkte ehk tähiseid. Tähiseid kasutati ka alusvõrgu punktidenä. Maapealseid kontrollpunkte paigaldati katsealale 13.

GNSS-RTK UAV mõõdistamine toimus kahe erineva lennukõrgusega. Selle tulemusena hinnati üldiselt lennukõrguse mõju RTK tehnoloogia täpsusele. Selleks koostati mõlema lennu aerofotodest punktipilved tähiseid kasutamata. Punktipilvedel eraldati kõrguslik väärtus tähise kohal ning võrreldi GNSS seadmega mõõdetud andmetega. Kõrgema lennu (lennukõrgus 75 m) kõrguslikud vead olid palju suuremad, KRV 119 mm. Madalama lennu (lennukõrgus 50 m) arvatud KRV oli 26 mm ja. Madalama lennu arvatud erinevuste keskmine oli 19 mm ja kõrgemal -112 mm. Nendest tulemustest on samuti näha, et tähiste asukohtades esinevad suured hälbed kahe punktipilve vahel. Seega järeltas autor, et lennukõrgus mängib suurt rolli punktipilve kvaliteedinäitajates, st lennukõrguse suurenemisel väheneb täpsus. Seega kasutati edaspidises andmetöötluses ainult madalama lennu andmeid.

Madalama lennu aerofotodest koostati kolm erinevate tingimustega punktipilve. Punktipilved koostati järgmised: RTK tähisteta, osade tähistega (kasutati 3 tähist), kõikide tähistega. RTK tähisteta punktipilve koostamisel ei kasutatud tähiseid vaid ainult aerofotode metaandmeid. Täpsema täpsushinnangu andmisel koostati võrdlusmodelid referentsandmetega ja arvutati statistilised näitajad. Võrreldi kahte erinevat piirkonda (asfalttee ja kungas).

Statistiliste näitajate arvutamisel eraldati väärtused tahhümeetriliste punktide asukohas. Asfalttee näitel RTK tähisteta arvatud KRV oli 13 mm, osade tähistega KRV oli 25 mm ja kõikide tähistega arvatud KRV on 16 mm. Kõrguslike erinevuste keskmised olid RTK tähisteta 5 mm, osade tähistega -21 mm ja kõikide tähistega -13 mm. Tulemustest ei ole märgata, et asfalttee näitel esineks suured

kõrguslikud erinevused. Kõrguslike erinevuste arvutamisel esinevad suuremad hälbed. Seda põhjustab asfalttee pinnale genereeritud mürapunktid varjude kohtades, sest sõidutee ääres paiknesid kõrgemad puud. Samuti mõjutab tulemusi meetoodika, kuna kasutati erinev koguarv võrdluspunkte statistika arvutamisel, mis tulenes manuaalsest andmete hõivamisest punktipilvel.

Katseala keskmises paikneva künka puhul tehti sarnased võrdlused. Künka näitel RTK tähisteta arvutatud KRV oli 75 mm, osade tähistega arvutatud KRV oli 88 mm ja kõikide tähistega KRV oli 81 mm. Kõrguslike erinevuste keskmised olid RTK tähisteta -36 mm, osade tähistega -57 mm ja kõikide tähistega -49 mm. Tulemused ei kirjelda samuti suuri omavahelisi erinevusi, kuid kirjeldavad suuremaid kõrguslikke erinevusi referentspinna suhtes. See on tingitud kontaktmöödistamise eelisest maapinna kujutamisel, st saab kontaktmöödistamise teel eristada taimestikust maapinda. Aerofotodelt on vegetatsioonist eristada maapinda pigem võimatu. Samuti esinevad võrdlusmudelitel nõlvade osas kuni ühe meetrised hälbed. Selle põhjustab reljeefi kujutamisel möödistavate punktide arv. Kui möödistada liiga hõredalt, siis ei eristu künka iseloomulikud jooned.

Viimase kõrgusliku võrdlusena võrreldi RTK tähisteta pinnamudelit kõikide tähistega koostatud pinnamudeliga. Seda tehti samades ruumpunktides (tahhümeetriliselt möödistatud punktide asukohtades), et saavutada sarnaseid võrdlustingimusi. Asfalttee näitel arvutatud KRV oli 22 mm ja künka näitel 17 mm. Samuti arvutati kõrguslikest erinevustest keskmine, mis olid asfalttee näitel 20 mm ja künka näitel 16 mm. Kuna tulemustes ei esine suuri erinevusi, siis vead on pigem juhuslikud. Need on põhjustatud autori arvates mõõtmismeetoditest (alusvõrgu rajamine, mõõteandmete hõivamine), seadmetest, möödistajatest või andmetöötlusprogrammidest.

Plaaniline täpsushinnang anti GNSS seadmega mõõdetud tähiste asukohtades. Võrdluste tegemiseks kasutati kolme punktipilve: RTK tähisteta (lennukõrgus 50 m), RTK tähisteta (lennukõrgus 75 m), osade tähistega (lennukõrgus 50 m). Punktipilve kohalt eraldati tähise keskpunkti koordinaat kahe joone ristumise meetodil. Kuna andmetöötlusprogramm ei genereeri täpselt tähise keskpunkti koordinaati, siis programmis AutoCAD on seda lihtne määrata punktipilvest. Seda tehti iga tähise juures kolm korda ning keskmistati koordinaadid, mida võrreldi GNSS seadmega määratud koordinaatidega. Seda meetodit kasutati igal punktipilvel. Nendest arvutati statistilised näitajad. RTK tähisteta (lennukõrgus 50 m) arvutatud KRV oli 23 mm, RTK tähisteta (lennukõrgus 75 m) KRV oli 30 mm ja osade tähistega (lennukõrgus 50 m) KRV oli 18 mm.

Need tulemused ei kirjelda märgatavaid omavahelisi erinevusi. Autori arvates on tekkinud erinevused pigem meetoodilised, mille tõttu ei saa anda kindlat hinnangut plaanilisele täpsusele. Katseala puuduseks plaanilisel hindamisel oli ka puudulik selgelt eristuvate tehnilike objektide

olemasolu, mille järgi oleks võimalik adekvaatset täpsushinnangut anda. Seega autori arvates tuleks tulevastel uurimistöodes uurida GNSS-RTK mõõdistustehnoloogiaga UAV plaanilist mõõdistustäpsust põhjalikumalt. Selleks saaks kasutada spetsiaalseid markeerimislehti, mille tsentreid on lihtsam tuvastada looduses võrreldes aerosoolvärviga tähistega.

Katsealal tehti veel mahuarvutused künka näitel. Selleks kasutati arvutusteks kolme punktipilve (RTK tähisteta, osade tähistega, kõikide tähistega) ja tahhümeetrilise mõõdistamise andmeid. Viimaseid kasutati referentsandmetena ehk õige pinnana. 3DReshaperis funktsiooni *Volume* abil on võimalik kiiresti arvutada künka mahtu. Selleks moodustati kõikidest andmetest eraldi mahud. Mahtude erinevused arvutati nõ õige pinna mahu suhtes. Punktipilvedest arvatud mahtude erinevused tahhümeetrilise mahu suhtes olid kõikidel sama (0,5 %). Tulemust hinnati vastavalt markšeideritööde nõuetest. Käesoleva magistr töö tulemused vastavad nendele nõuetele.

Seega käesoleva magistr töö tulemustest saab järeldada, et UAV RTK-ga hõivatud aerofotodest saab koostada otsesel georefereerimisel sarnase täpsusega tulemeid võrreldes traditsioonilise georefereerimisega.

Magistr töö autori arvates ei tohiks olla kindel alati RTK tehnoloogia täpsusele. Käesoleva uurimistöo katsealal suurema lennukõrgusega tekkisid ligi 13 sentimeetrilised kõrguslikud erinevused GNSS seadmega mõõdetud tähiste suhtes. Seega tuleks arvestada sellega, et peaks kasutama kontrollpunkte, millega kontrollida fotogramm-meetrilise tulemuse täpsust.

Samuti saab öelda, et käesoleva magistr töö kõrguslikud tulemused otsesel georefereerimisel vastavad topo-geodeetilise uuringu nõuetele muude maapinna punktide mõõdistamise puhul. Kõrguslik täpsus ei vasta aga situatsioonimõõdistamise nõuetele püsikatendite, kaevukaante ja muu sarnaste rajatiste näitel.

Kuna plaanilise täpsuse hindamiseks on puudulikud referentsandmed, ei saa kindlalt väita, et plaaniline täpsus vastab samuti topo-geodeetilise uuringu nõuetele. Kui lähtuda saadud tulemustest 13 GNSS tähise suhtes, siis vastab otsesel georefereerimisel saadud tulemused nõuetele, kus suurim lubatav viga võib olla 8 cm lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes.

SUMMARY

The Masters degree test subject was conducted the photogrammetric measuring. The test object is located in Harju county, Saku parish, in the small town of Saku, on the Nurme street nr.27. For this purpose, we used drone Phantom 4 RTK, which is specially created by a company named DJI. Advantage of this specific model over previous versions is that it uses RTK module, which enables greater accuracy to positioning. Also RTK module enables direct aerial photo geo-referencing.

For this reasons it was set goal for the Master's degree final project to validate the surveying accuracy of GNSS-RTK featured aerial vehicles. As well we are comparing the results with different requirements set in Estonia to ensure UAV RTK is accurate for different geodetic works.

To validate accuracy, reference data, measured and measurements from GNSS devices were used throughout different ground control points (GCP). GCPs were used also as defined point on the measuring grid. 13 control points were set on the test area to evaluate RTK UAV accuracy, for this different comparisons were compiled.

RTK UAV measuring was done on 2 different flight height. With the results, it was evaluated of generic effect of the flight height impact on the accuracy of RTK technology. For this aerial photos were assembled to point cloud, without use of control points. Point clouds were deducted from height value in relation to GCP, and later were compared with measured data from GNSS devices. So from the results we made statistical calculations. The statistic calculations are showing that the higher flight height (flight height of 50 m). The height differences are lot larger, the calculated RMSE was 119 mm and height difference mean 19 mm. The lower flight height (flight height of 50 m) calculated RMSE was 26mm and height difference mean -112 mm. Thanks to the statistic calculation, the author made a conclusion, that the height of flight has great impact of quality in point cloud, that means the greater the flight height, the less accurate it is. Due to this, for future data processing was done with data from UAV flight height of 50 m.

For more accurate evaluation of height measurement was done with 3 different conditioned point clouds. Point clouds were assembled as described: Only RTK metadata, with some GCPs (3 GCPs) and with all the GCPs. Comparison models were assembled with reference data and calculated statistic measurements to provide more accurate evaluation. With the provided comparing methods, two different areas were compared (asphalt and a hill).

The values from point cloud were taken where measured robotic total station. These values were used for calculating statistical data. Asphalt road measured RMSE was without GCPs 13mm, with

some GCPs the KRV was 25 mm and with all the GCPs the RMSE was 16 mm. Height difference mean was without GCPs 5 mm, with some GCPs -21 mm and with all the GCPs -13 mm. From the results there are no large height differences based on calculated KRV results using Asphalt road as an example. Much larger problems occur while calculating minimal and maximal height difference. This is caused due to the fact that asphalt has generated different noise points, because of growing trees next to the road itself.

For the hill located in centre of the test area, similar calculations were conducted. Using the hill as an example, without RTK GCPs calculated RMSE was 75mm, with some GCPs the RMSE was 88mm and with all the GCPs the RMSE was 81mm. Calculated height difference mean was without GCPs -36 mm, with some GCPs -57 mm and with all the GCPs -49 mm. The results do not describe big differences, however they describe bigger height differences with the reference ground. This is due to advantage of contact measuring in visualizing the land, this means using contact measuring, we can separate the vegetative ground. Using the aerial photos to separate vegetative ground is rather impossible, which is why we are getting height differences from the plants. As well there are up to 1 meter differences on comparison models. This is caused by the count of measuring points when forming the surface. If to measure too thin, we wouldn't be getting hill specific indications.

Last height comparison was between without RTK GCPs and with all the GCPs. This was done with similar method as with previous one, with the aim of achieving similar comparison conditions. Using Asphalt road as an example, the KRV was 22 mm and the hill was 17 mm. Calculated height difference mean was for asphalt road 20 mm and for the hill it was 16 mm. Since the results don't have great differences, the mistakes are rather coincidental. Author thinks this is caused by measuring methods (measuring grid, measuring data), devices, surveyors and different data processing softwares.

Plan measurement accuracy was given with measurements from GCP locations, which was compared with GNSS data. For comparisons there were 3 point clouds used: RTK without GCPs (flight height of 50 m), RTK without GCPs (flight height of 75 m), with some GCPs (flight height of 50 m). The centre point coordinate was separated from cloud point using 2 line crossing method. Since data processing software is not able to calculate exact coordinate for the centre point, it is easy to mark it on point cloud using software AutoCAD to get centre point coordinates. This was done 3 times with each marking, then coordinates were averaged, which were compared with GNSS data. This method was used on each cloud point. Statistic calculations were done from them. RTK without GCPs (flight height 50 m) calculated RMSE was 23mm, RTK without GCPs (flight height of

75 m) calculated RMSE was 30mm and with some GCPs (flight height of 50 m) calculated RMSE was 18mm.

These results do not describe any noticeable differences. Author thinks with occurred differences are rather methodical, in which case unable to give definite evaluation on accuracy of the plan. Disadvantage of the test area planned evaluation was lack of different man-made objects, which would have helped to give adequate evaluation on subject. As a result, Author thinks, Phantom 4 RTK planned accuracy should be investigate more in future research works. You can use special marking sheets, which enables more easier way to identify centre points in nature, compared to canned paint markings.

Also there were done more volume calculations based on hill example. For this 3 point clouds were used (RTK without GCPS, with some GCPs, with all GCPS) and robotic total station measured data. Last ones were used as reference data as correct land. In the software 3DReshaper you have a function called "volume" which enables you to easily calculate hill volume. For this purpose, different volumes were created from the data. The volume differences were calculated in relation to "correct" land volume. Calculations from the cloud points, volume differences in relation to tachymetric volume were all the same (0.5%). The result was evaluated with requirements from "markšneideritööd". This Master's degree research results are compliant with those requirements.

So with this Master's research results can conclude that with the use of DJI Phantom 4 RTK to capture aerial photos, it is possible to get as accurate results using direct geo-referencing in comparison to traditional geo-referencing.

The author of this Master's degree research however doesn't think one should rely on the accuracy of the RTK technology all the time. In the test area of the research there were height differences close to 13 cm compared to GNSS device because of the higher flight height. For this reason, you should take into consideration, that control points should be use to ensure result of the photogram-metric measuring accuracy.

We can say for this Master's degree research height results with direct geo-referencing are compliant with "topo-geodeediline uuring" research requirements used to measure other onsite land markings. Height accuracy however is not with situational measuring requirements set to asphalt roads, well covers and etc.

Since lack of reference data for plan evaluation, we cannot say for sure, that the planned accuracy is also meeting "topo-geodeetilise" research requirements. To take results gathered from 13 GNSS

marking, then it is compliant with „topo-geodeetilise“ research requirements, where the maximum room for error is 8 cm in relation to closest points on measuring grid.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] J. Aluoja, „Droonid maastikul: kiiremini, detailsemalt ja turvalisemalt mõõdistamas,“ *Inseneeria*, p. 36, 2013.
- [2] R. Austin, *Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment*, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2010 .
- [3] N. Liba, *Fotogramm-meetria alused*, Tartu: OÜ Halo kirjastus, 2005.
- [4] S. Madawalagama, „Introduction to Photogrammetry,“ Asian Institute of Technology, Thailand.
- [5] M. Arjomandi, *Classification of Unmanned Aerial Vehicles*, Australia: The University of Adelaide, 2006.
- [6] „Geosoft,“ [Võrgumaterjal]. Available: www.geosoft.ee. [Kasutatud 16 04 2019].
- [7] „Delair,“ [Võrgumaterjal]. Available: www.delair.aero. [Kasutatud 17 04 2019].
- [8] „DJI,“ [Võrgumaterjal]. Available: www.dji.com. [Kasutatud 16 04 2019].
- [9] O. McClintock, MyDearDrone, [Võrgumaterjal]. Available: <https://mydeardrone.com/uses/>. [Kasutatud 2019 04 17].
- [10] J. O'Connor, M. J. Smith ja M. R. James, „Cameras and settings for aerial surveyys in the geosciences: Optimising image data,“ *Progress in Physical Geography*, kd. 41, nr 3, pp. 325-344, 2017.
- [11] „Pix4D Support,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD->. [Kasutatud 29 04 2019].
- [12] „Drone Deploy,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://support.dronedeploy.com/docs/making-successful-maps#section-photos-taken-at-low-altitude>. [Kasutatud 25 04 2019].
- [13] K. Ji, „What is the ‘overlapping’? And why is it so critical in 3D reconstruction?,“ Altizure blog, 2017.

- [14] „Pix4D,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459#label3>. [Kasutatud 24 04 2019].
- [15] J. Jedlicka ja M. Putockova, CORRECTION OF RADIAL DISTORTION IN DIGITAL IMAGES, Prague: Charles University, 2007.
- [16] J. Dulay, „iDigital Darwin,“ 11 06 2011. [Võrgumaterjal]. Available: https://idigitaldarwin.wordpress.com/2011/06/11/7_fisheye_tips/. [Kasutatud 30 04 2019].
- [17] R. Köök, *Mehitamata lennumasinat (UAV) fotogramm-meetrite mõõdistuste põhjal koostatavate pinnamudelite täpsus tee-ehituslike rakenduste näitel*, Tallinn: Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, 2018.
- [18] „DroneDeploy,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://blog.dronedeploy.com/4-ways-to-improve-the-accuracy-of-your-drone-models-with-3d-mapping-software-adbd8023abe9>. [Kasutatud 30 04 2019].
- [19] D. Turner, A. Lucieer ja L. Wallace, „Direct Georeferencing of Ultrahigh-resolution UAV imagery,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013.
- [20] M. Rabah, M. Basiouny, E. Ghanem ja A. Elhadary, „Using RTK and VRS in direct georeferencing of the UAV imagery,“ *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, kd. 7, nr 2, pp. 220-226, 2018.
- [21] „<https://developer.dji.com>,“ DJI, 13 12 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://developer.dji.com/mobile-sdk/documentation/introduction/flightController_concepts.html. [Kasutatud 26 Mai 2019].
- [22] M. Rabah, M. Basiouny, E. Ghanem ja A. Elhadry, „Using RTK and VRS in direct georeferencing of the UAV imagery,“ *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, kd. 7, nr 2, pp. 220-226, 2018.
- [23] J. Mulakala, „Measurement Accuracy of the DJI Phantom 4 RTK & Photogrammetry,“ *DroneDeploy*, pp. 1-15, 2019.
- [24] F. A. Vega, F. C. Ramirez ja P. M. Carricondo, „Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle,“ *Measurement*, kd. 98, pp. 221-227, 2017.

- [25] A. Sula, *UAV Mõõdistuse kõrgusliku ja plaanilise täpsuse evalveerimine*, Tallinn: Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, 2015.
- [26] Keskkonnaminister, „Riigi Teataja,“ 29 12 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/129122013013>. [Kasutatud 23 04 2019].
- [27] „Riigi Teataja,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/119042016003>. [Kasutatud 24 04 2019].
- [28] „Riigi Teataja,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/107052019005>. [Kasutatud 2019 04 29].
- [29] „Puhkus Eestis,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.puhkuseestis.ee/artiklid?news_id=1607. [Kasutatud 01 04 2019].
- [30] „Droonimaailm,“ [Võrgumaterjal]. Available: www.droonimaailm.ee. [Kasutatud 21 04 2019].
- [31] „Coptorz,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.coptorz.com/dji-phantom-4-vs-dji-phantom-4-rtk/>. [Kasutatud 29 04 2019].
- [32] A. Toompark, „Taevased abimehed,“ 2008.
- [33] E. Kirs, *Eesti RTK GNSS võrkude täpsuse hindamine*, Tartu: Bakalaureusetöö: Eesti Maaülikool, 2017.
- [34] R. Ruus, „Mõõtmistulemuste matemaatiline töötlemine,“ Tallinna Tehnikakõrgkool, 2012.
- [35] K. Kokamägi, *Mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal puistangu mahtude arvutamise täpsus*, Tartu: Magistritöö: Eesti Maaülikool, 2018.
- [36] R. Andres ja J. Sander, *Globaalne Asukohamääramine*, Tallinn: SA Innove, 2013.
- [37] „Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4,“ Agisoft, 2018.
- [38] „3DReshaper,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.3dreshaper.com/en/>. [Kasutatud 2019 04 29].
- [39] „Pix4D Support,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557419-Step-1-Before-Starting-a-Project-2-Configuring-the-Camera-Settings>. [Kasutatud 2019 04 30].

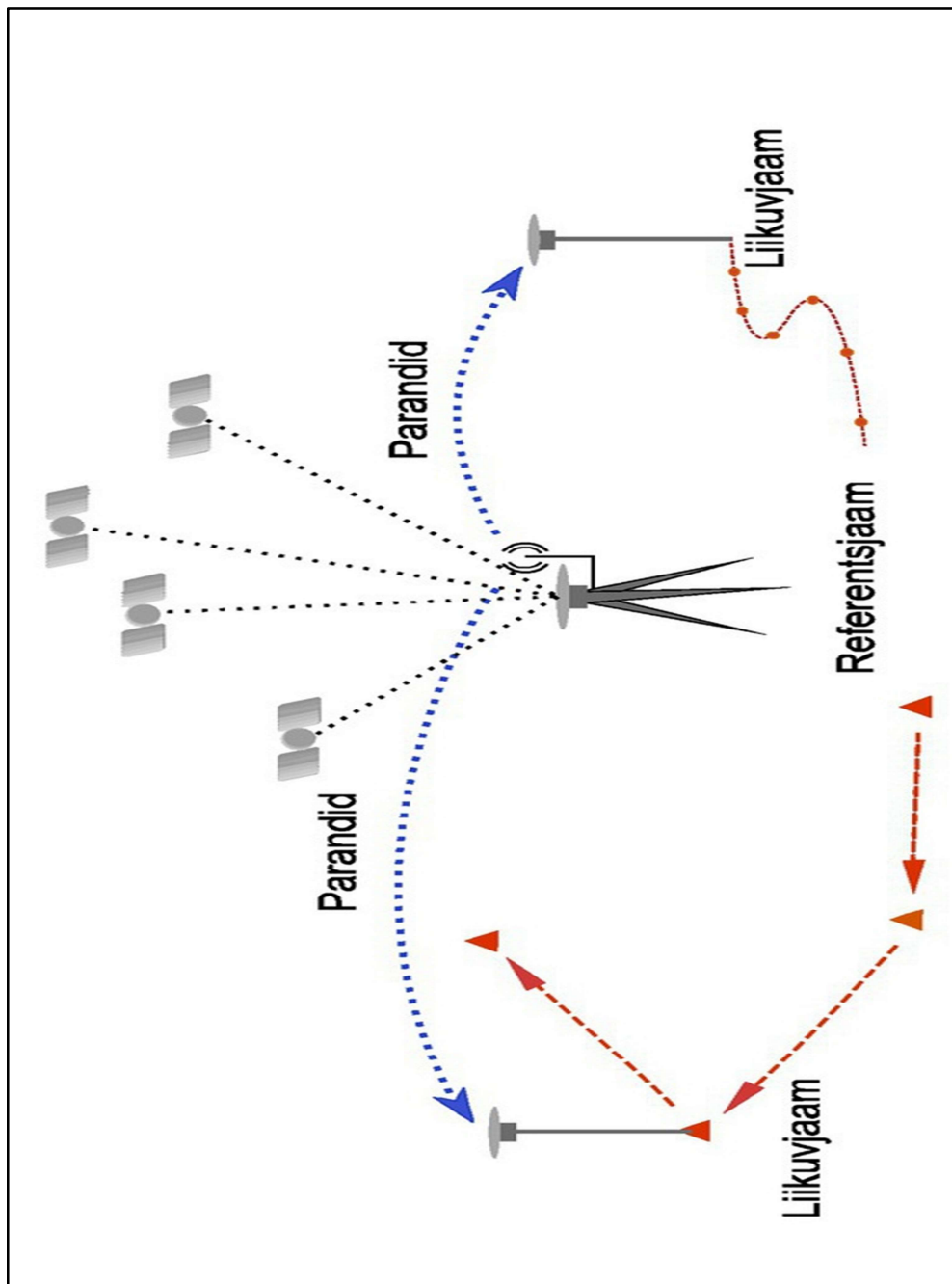
[40] „Maa-ameti geoportaal,“ [Võrgumaterjal]. Available:
<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Teenused/Geodeesia-kalkulaatorid-p142.html>.
[Kasutatud 2019 04 27].

[41] „Pix4D Support,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://support.pix4d.com>. [Kasutatud 22 04 2019].

LISAD/APPENDICES

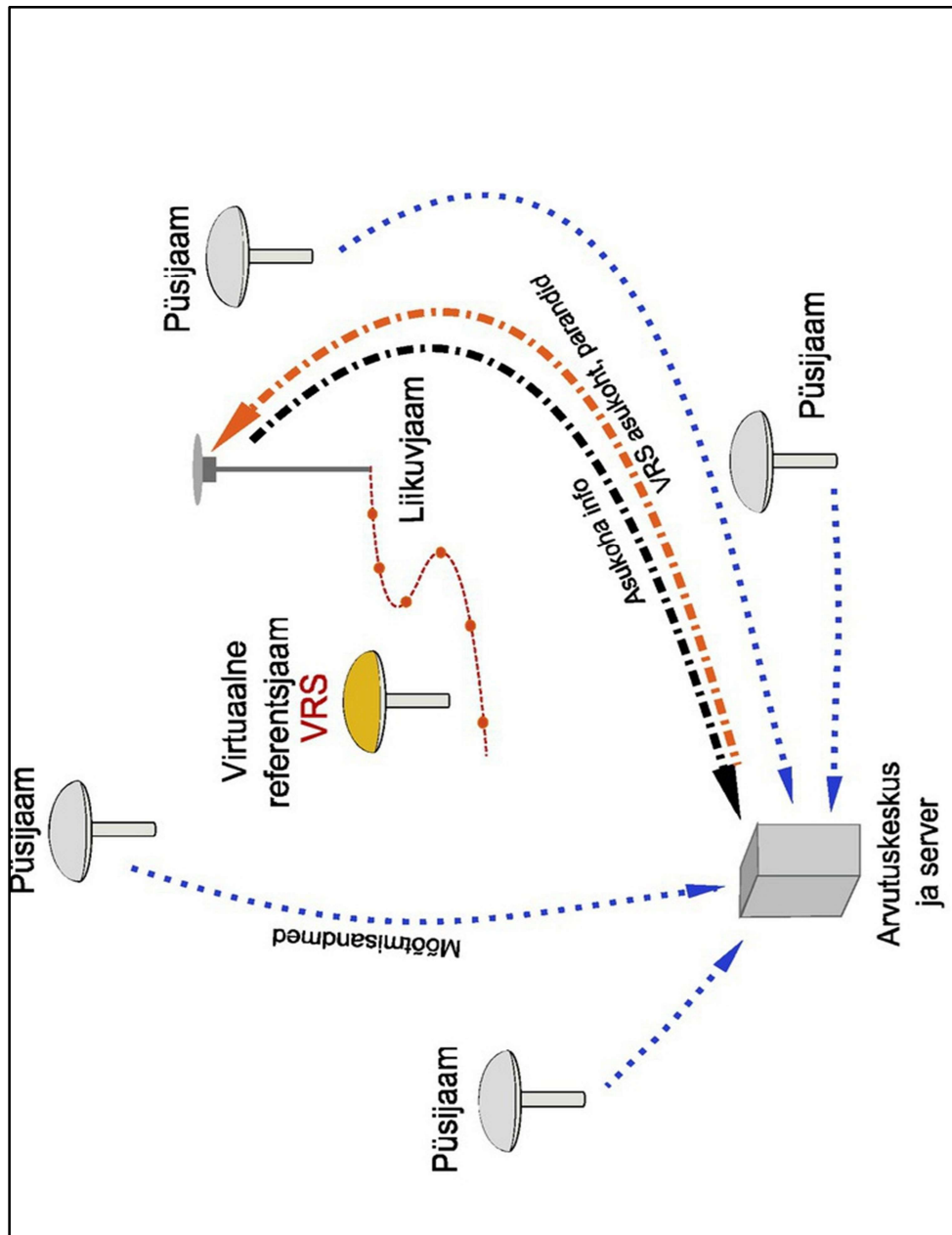
LISA 1. RTK meetodi põhimõtteline skeem

Joonis on võetud raamatust pealkirjaga Globaalne asukohamääramine [36]

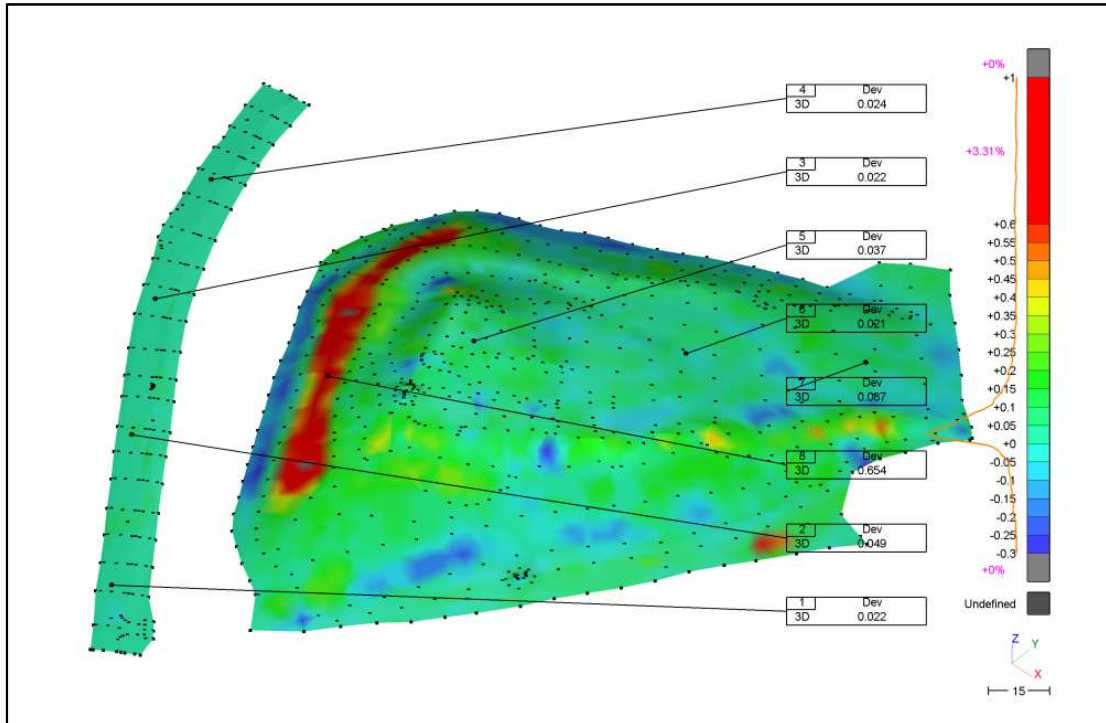


LISA 2. VRS meetodi põhimõtteline skeem

Joonis on võetud raamatust pealkirjaga Globaalne asukohamääramine [36]

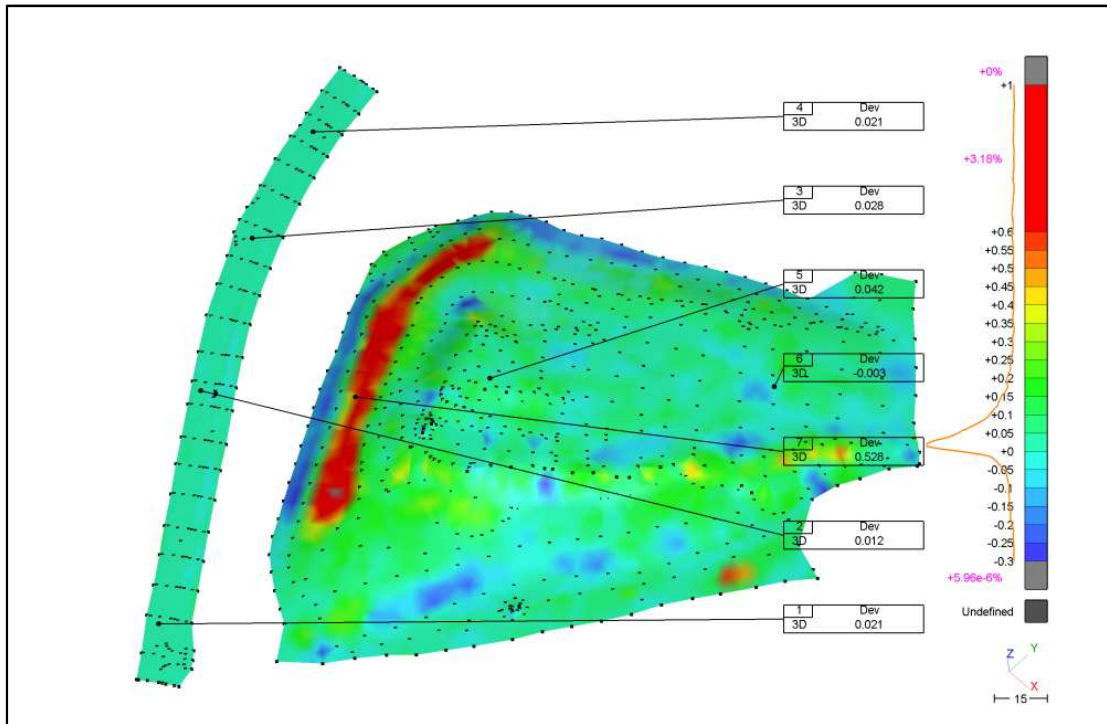


LISA 3 Osade tähistega (P3,P6,P8) võrdlusmudel tahhümeetrilise mõõdistusega



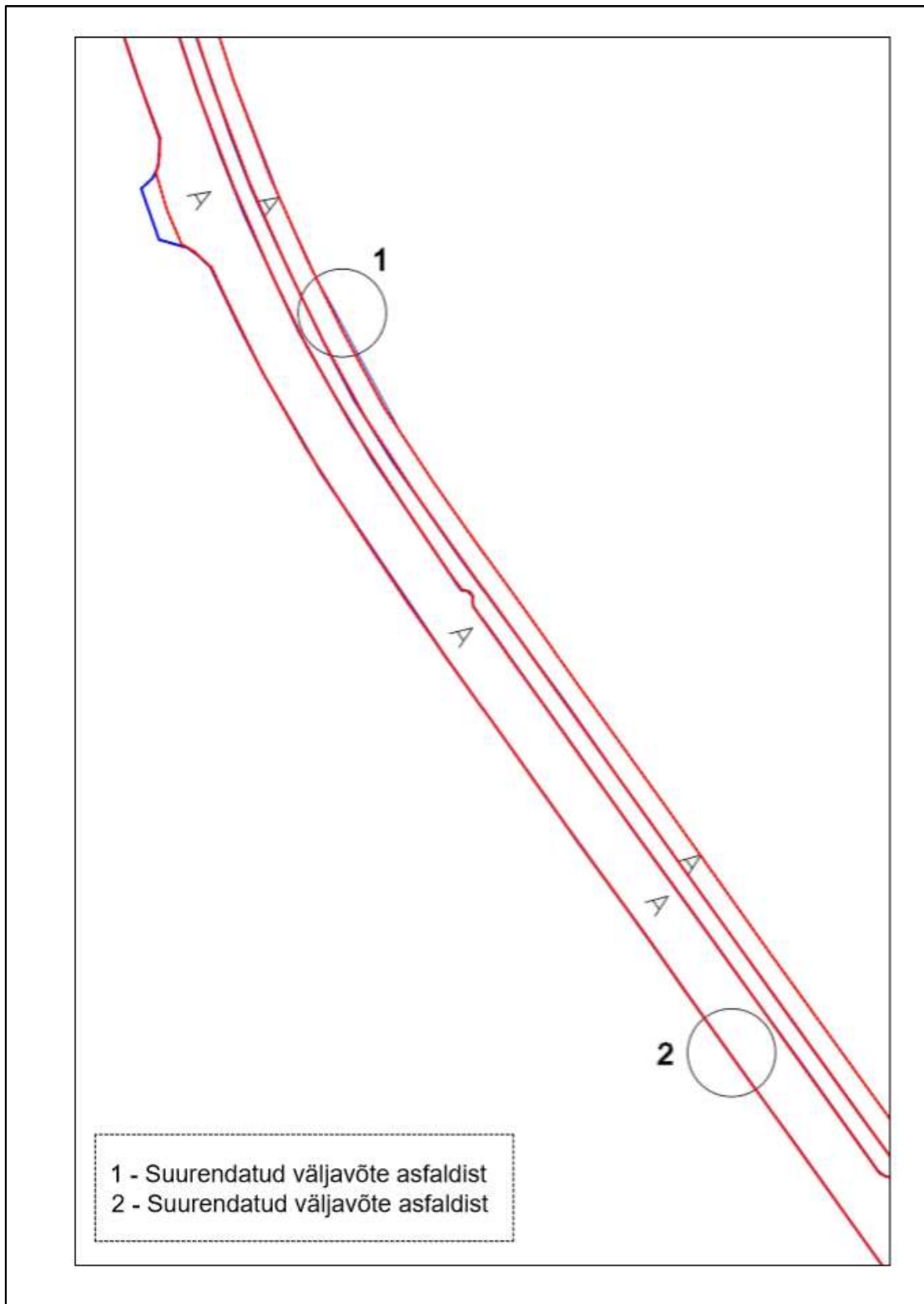
Joonis 0.1 Osade tähistega (3 tk) pinnamudeli võrdlemine referentspinnaga. Märgetel on välja toodud kõrguslik erinevus (Dev) määratud punktides. Punase värvusega punktid on tahhümeetrilise mõõtmisviisiga hõivatud punktid. Joonmõõtka on meetrites (Koostatud programmis 3DReshaper)

LISA 4 Kõikide tähistega võrdlusmudel tahhümeetrilise mõõdistusega



Joonis 0.2 Kõikide tähistega pinnamudeli võrdlemine referentspinnaga. Märgetel on välja toodud kõrguslik erinevus (Dev) määratud punktides. Punase värvusega punktid on tahhümeetrilise mõõtmisviisiga hõivatud punktid. Joonmõõtkava on meetrites (Koostatud programmis 3DReshaper)

LISA 5. Visuaalne plaanilise asendi täpsuse kontroll püsikatendi näitel



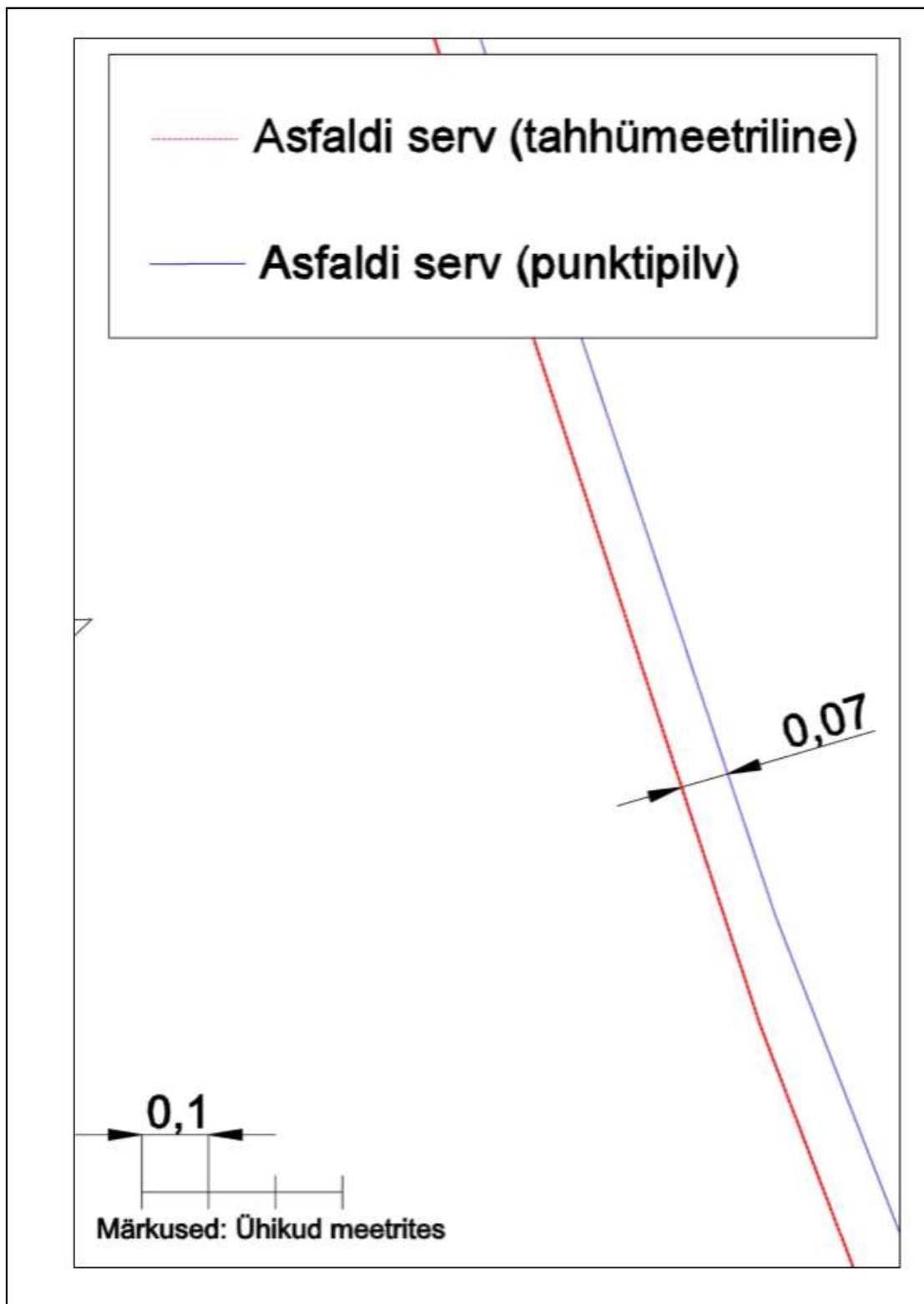
LISA 5 jätk

Joonised koostati programmiga Autodesk AutoCAD. Selleks kasutati kahe erineva mõõtmismeetodi andmeid – tahhümeetriline ja GNSS-RTK UAV. Sellest tulenevalt kujutatakse joonisel kahe erineva värviga jooni. Punane joon kujutab tahhümeetrilise mõõtmisviisiga mõõdetud asfaldi serva. Sinine joon kujutab GNSS-RTK UAV punktipilve asfaldi serva.

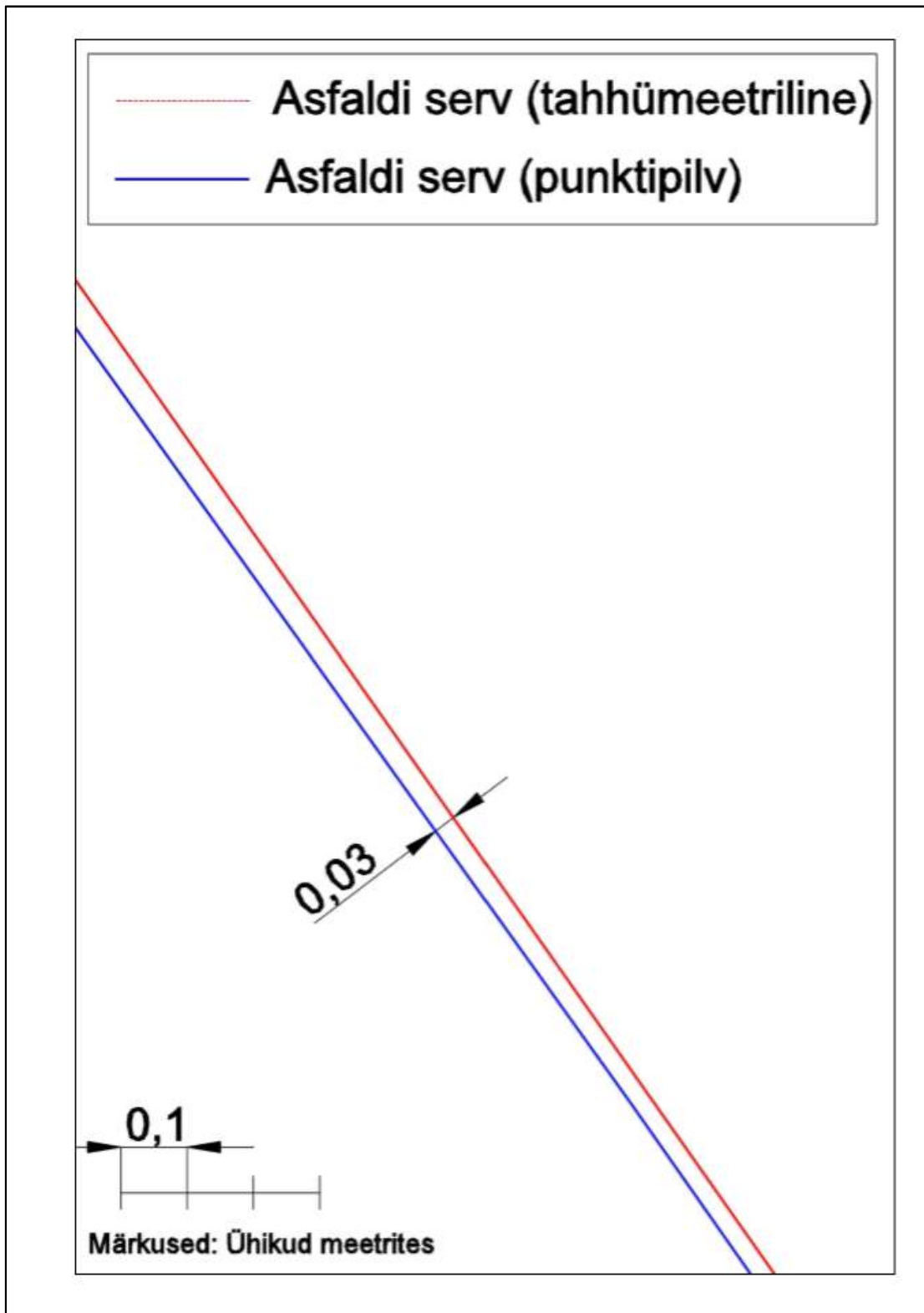
Joonisel esines suuremad plaanilised erinevused kahes asukohas. Selle tõttu autor tegi suurendatud väljavõtte, mis on joonisel tähistatud asukohtades 1 ja 2. LISA 4 joonisel on kahe erineva andmestiku asfaldi servade plaaniline erinevus 7 cm, LISA 5 joonisel 3 cm.

Erinevused on põhjustanud visuaalne joone joonestamine punktipilvel seetõttu, et see koosneb väga paljudest punktidest, mis on tihedalt kõrvuti. Kui suurendada andmetöötlusprogrammis lähedamale punktipilves, siis punktide tihedus muutub hõredamaks, mille tõttu on raske määrata püsikatendi serva. Nendest tulemustest ei saa anda vettpidavat väidet GNSS-RTK UAV plaanilise täpsuse kohta.

LISA 6 Suurendatud väljavõte punktis 1



LISA 7. Suurendatud väljavõte punktis 2



LISA 8. Varjudest tingitud punktipilve mürapunktid

Varjudest põhjustatud mürapunktid tekitavad suuremaid hälbeid punktipilvedel. Selle vältimiseks tuleb valida sobilik aeg lendamiseks, kus päike ei oleks liiga madalal. Järgmisel joonisel on näha põhjust, miks kõrguslikud hälbed asfalttee puhul on osades kohtades suuremad. Variant a) joonisel esitleb kõrgematest puudest tekkinud varje asfaldile ning variant b) kirjeldab selle asukohas varjudest tekkinud mürapunkte asfalttee pinnale. Kuna mürapunktid on väga lähedal asfalttee pinnale, seetõttu on raskendatud nende eemaldamine programmis 3DReshaper.



Joonis on koostatud programmis 3DReshaper.