



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**JOONOBJEKTI DROON-FOTOGRAMMEETRILISE
MÕÕDISTUSE TÄPSUSE SÕLTUVUS
KONTROLLPUNKTIDE ARVUST KASUTADES
INTEGREERITUD GEOREFEREERIMIST**

**DRONE-BASED PHOTOGRAMMETRIC CORRIDOR
SURVEY ACCURACY DEPENDENCE ON THE NUMBER OF
CONTROL POINTS BY USING INTEGRATED
GEOREFERENCING**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Serafima Goman

Üliõpilaskood: 153859 EATI

Juhendaja: MSc Sander Varbla

Tallinn 2021

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.

"....." 2021

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2021

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2021 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Serafima Goman, üliõpilaskood 153859 EATI

Õppekava, peeriala: EATI02/15 – Teedehitus ja geodeesia

Juhendaja(d): MSc Sander Varbla

Lõputöö teema:

Joonobjekti droon-fotogrammeetrilise mõõdistuse täpsuse sõltuvus kontrollpunktide arvust kasutades integreeritud georefereerimist.

Drone-based photogrammetric corridor survey accuracy dependence on the number of control points by using integrated georeferencing.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida, kuidas sõltub integreeritud georefereerimise täpsus fotogrammeetrilisse andmetöötlusesse kaasatavate kontrollpunktide arvust.
2. Uurida, kas kaamera kalibreerimiskoeffitsientide põhjal on võimalik hinnata optimaalset kontrollpunktide arvu.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lähteandmete kogumine ja andmetöötlus.	01.03.2021
2.	Tulemuste esialgne analüüs ja arutelu koostamine.	01.04.2021
3.	Tervikmustandi esitamine.	01.05.2021

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....201....a

Üliõpilane: Serafima Goman ".....".....201....a
/allkiri/

Juhendaja: Sander Varbla ".....".....201....a
/allkiri/

Programmijuht: Sander Sein ".....".....201....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	5
Lühendite ja tähiste loetelu.....	6
Jooniste loetelu	8
Tabelite loetelu	12
SISSEJUHATUS	13
1. TEOREETILINE ÜLEVAADE	15
1.1 Drooninduse arengutrendid.....	15
1.2 Kaudne ja otsene georefereerimine	18
1.3 Integreeritud georefereerimine.....	21
2 UURIMISOBJEKTI KIRJELDUS	23
3 MÕÕDISTUSTE KIRJELDUS.....	25
3.1 Mõõdistustöö digitaalnivelliiriga Trimble DiNi 0.3	25
3.2 Mõõdistustöö laserskanneriga Leica ScanStation C10	27
3.3 Mõõdistustöö drooniga DJI Phantom 4 RTK	30
4 MÕÕDISTUSANDMETE TÖÖTLEMINE	35
4.1 Kolmnurkmudelite arvutamine drooni tehtud fotodest	35
4.2 Droonipõhiste kolmnurkmudelite täpsushinnangute arvutamine	39
4.3 Droonipõhiste kolmnurkmudelite vigade visualiseerimine	40
5 TULEMUSTE ANALÜÜS	41
5.1 Droonimõõdistuse põhiste mudelite valideerimine.....	41
5.2 Kaamera kalibreerimiskoeffitsientide hindamine	47
KOKKUVÕTE	52
SUMMARY	55
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	58
LISAD	64
Lisa 1 Drooni ja laserskanneri andmete põhjal arvutatud kolmnurkmudelite võrdlus	64
Lisa 2 Kaamera kalibreerimiskoeffitsientide sõltuvus kontrollpunktide arvust	75
Geodeesia lõputööd Tallinna Tehnikaülikoolis alates 1993.....	79

EESSÕNA

Autor soovib avaldada tänu juhendaja Sander Varblale abi, kiire reageerimise ja üksikasjaliku analüüsi eest kõigis magistritöö kirjutamisega seotud küsimustes. Samuti avaldab autor professor Artu Ellmannile, professor Raido Puustale ja Sander Varblale sügavat tänu võimaluse eest osaleda Võõbu tee-ehitusliku katselõigu mõõdistamisel ja ka kõigi vajalike andmete jagamise eest.

Magistritöö teema „Joonobjekti droon-fotogrammeetrilise mõõdistuse täpsuse sõltuvus kontrollpunktide arvust kasutades integreeritud georefereerimist,“ sõnastas autori juhendaja Sander Varbla.

Märksõnad: georefereerimine, kontrollpunkt, valideerimine, RTK-GNSS, droon

Lühendite ja tähiste loetelu

Lühendid:

2D, 3D (*Two, Three Dimensional*) – Kahe-, kolmemõõtmeline

GLONASS (*Глобальная навигационная спутниковая система*) – Ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) – Ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem

GPS (*Global Positioning System*) – Globaalne positsioneerimissüsteem

KRV – Keskmise ruutviga

LiDAR (*Light Detection and Ranging*) – Laserlokaator

RAM (*Random Access Memory*) – Muutmälu

RTK (*Real-Time Kinematic*) – Reaalaja kinemaatika

Sümbolid:

G – Maapinna lahutusvõime

H – Lennukõrgus

imW – Pildi laius

Fr – Fookuskaugus (mm)

Sw – Sensori laius

x, y – Moonutatud pikslite koordinaadid

\hat{x}, \hat{y} – Moonutamata pikslite koordinaadid

F – Fookuskaugus (pikslites)

K_i – Radiaalse moonutuse koefitsiendid

P_i – Tangentsiaalse moonutuse koefitsiendid

B_1, B_2 – Afiinsuse ja mitteortogonaalsuse koefitsiendid

C_x, C_y – Peapunkti nihe pildi keskpunkti suhtes

n – Osahulkade koguarv

Δ – Hausdorffi kaugus

Jooniste loetelu

Joonis 1. Eesti õhuruumi kontrollitud alad (punase ja halli tooniga). Tsoon 9 on tähistatud siniselt (Drooniäpp, 2021).	15
Joonis 2. Kaamera navigeerimisraamistiku teljed.....	18
Joonis 3. Piltide otsene georefereerimine drooni pardal olevate andurite integreerimise teel (Pfeifer et al., 2012). Kaamera navigeerimisraamistiku teljed on esitatud Joonisel 2.	19
Joonis 4. Kaudse, otsese ja integreeritud georefereerimismetoodika võrdlus (Eugster, 2011). .	21
Joonis 5. Teelõigu (tähistatud punase riskülikuga) asukohaskeem mõõtkavas 1:60000. Ortofoto tegemise aeg 07.04.2020. Allikas: Maa-ameti geoportaal.	23
Joonis 6. Uuritav teelõik mõõtkavas 1:4000. Ortofoto tegemise aeg 07.04.2020 (ehk enne ehitustööde lõppu). Numbrid näitavad seksioonide ligikaudseid asukohti. Ortofoto allikas: Maa-ameti geoportaal.	24
Joonis 7. Kolm turbakihti ja turba looduslik veesisaldus katseseksioonides 1 kuni 5 (vt Joonis 6; Forsman et al., 2016).	24
Joonis 8. Kasutatud Trimble Dini 0.3 digitaalnivelliir (Trimble, 2013).....	25
Joonis 9. Mõõdistustöödel kasutatud ribakoodlatt.	26
Joonis 10. Aluskivimini ulatuv reeper (Rp1 Joonisel 11) objekti vahetus läheduses.	26
Joonis 11. Ortofotomosaiik drooni lennu trajektooriga (valge joon, millel olevad punktid näitavad fotode tegemise asukohtasid). Punased kolmnurgad tähistavad maapealsete kontrollpunktide asukohtasid (uuritav teelõik algab punktide 4 ja 3 juures ning lõppeb punktidega 2 ja 5) ning sinised ruudud lähtereepereid.	27
Joonis 12. Kasutatud laserskanner Leica ScanStation C10.	28
Joonis 13. Terrestriilise laserskaneerimismõõdistuse skeem. Tähiste asukohad (punased kolmnurgad) ühtivad drooni maapealsete kontrollpunktidega (Joonis 11). Sinisega on tähistatud skanneri mõõtmisjaamad ning sinised jooned näitavad millised tähised igast jaamast mõõdistati.	29
Joonis 14. Kasutatud skaneerimistähis paigaldatuna kontrollpunktile (asfaldinael).....	29
Joonis 15. Laserskanneriga mõõdetud punktipilvest arvatud kolmnurkmudel. Skanneri mõõtmisjaamade asukohad on tuvastatavad sõõrikujuliste tühikutena loodud mudelis.....	30
Joonis 16. Kasutatud droon DJI Phantom 4 RTK (vasakul) ja drooni maapealne juhtimissüsteem (paremal).....	31
Joonis 17. Fotode ülekatted mõõdistusobjektile ning selle vahetus ümbruses. Mustad punktid tähistavad fotode tegemise asukohtasid.....	33
Joonis 18. Tähis paigaldatuna maapealsele kontrollpunktile.....	34
Joonis 19. Uuritava teelõigu mudel esitatuna hõreda punktipilvena (pealtvaade). Töö projekti on lisatud 12 kontrollpunkti.	37
Joonis 20. Maapealsete kontrollpunktide koordinaadid, veahinnangud ning arvutustesse kaasatud projektsioonide arvud (st fotode hulk, millel kontrollpunkt sai täpselt määratud).	37
Joonis 21. Uuritava teelõigu kolmnurkmudel, mille arvutusse kaasati kolm maapealset kontrollpunkti.....	38
Joonis 22. Droonimõõdistuse põhiste kolmnurkmudelite veahinnangute graafik Tabeli 4 põhjal.	42

Joonis 23. Otsese georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (st ilma maapealseid kontrollpunkte kaasamata) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 10,3 cm). Droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	44
Joonis 24. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse kolm maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,6 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	45
Joonis 25. Võrdlus ortofotomosaigi (Joonis 11) ning võrdlusmudeli (vt Joonis 24) vahel.....	46
Joonis 26. Fookuskauguse F (pikslites) sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.....	49
Joonis 27. Radiaalse moonutuse koefitsiendi $K1$ sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.	50
Joonis 28. Radiaalse moonutuse koefitsiendi $K2$ sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.	50
Joonis L1. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse üks maapealne kontrollpunkt, mille ligikaudne asukoht on tähistatud musta punktiga) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 3,7 cm). Droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	64
Joonis L2. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse kaks maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 2,0 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	65
Joonis L3. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 4 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,7 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	66
Joonis L4. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 5 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,7 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	67
Joonis L5. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 6 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,8 cm).	

Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	68
Joonis L6. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 7 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,9 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	69
Joonis L7. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 8 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,9 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	70
Joonis L8. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 9 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,9 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	71
Joonis L9. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 10 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,9 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	72
Joonis L10. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 11 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 2,0 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	73
Joonis L11. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 12 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 2,0 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.	74
Joonis L12. Radiaalse moonutuse koefitsiendi K_3 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.	75

Joonis L13. Radiaalse moonutuse koefitsiendi K_4 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.	75
Joonis L14. Peapunkti nihke C_x sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.	76
Joonis L15. Peapunkti nihke C_y sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.	76
Joonis L16. Tangensiaalse moonutuse koefitsiendi P_1 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.	77
Joonis L17. Tangensiaalse moonutuse koefitsiendi P_2 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.	77
Joonis L18. Afiinsuse koefitsiendi B_1 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.	78
Joonis L19. Mitteortogonaalsuse koefitsiendi B_2 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.	78

Tabelite loetelu

Tabel 1. Laserskanneri Leica ScanStation C10 olulisemad tehnilised parameetrid (Leica ScanStation C10, 2011).	28
Tabel 2. DJI Phantom 4 RTK olulisemad tehnilised parameetrid (PHANTOM 4 RTK, 2018).	31
Tabel 3. Mõõdistusteks kasutatud lennuparameetrid. Maapinna lahutusvõime on arvatud valemi 4 järgi.	32
Tabel 4. Droonimõõdistuse põhiste mudelite veahinnangud (leitud võrdlustest skaneerimispõhise kolmnurkmudeliga) ning mudelite arvutamisesse kaasatud kontrollpunktid (vt Joonis 11 või 19).	42
Tabel 5. Kaamera kalibreerimiskoeffitsiendid. Numbrid esimeses veerus näitavad maapealsete kontrollpunktide arvu igas mudelis.	47
Tabel 6. Kaamera kalibreerimiskoeffitsiendid. Numbrid esimeses veerus näitavad maapealsete kontrollpunktide arvu igas mudelis.	48

SISSEJUHATUS

Tänapäeval räägitakse droonmöödistamisest palju. Droonid arenevad kiiresti ning neid on rakendatud juba paljudes valdkondades, näiteks kaevanduste möödistamisel, kartograafias, arhitektuuris, sõjanduses ja põllumajanduses (Losè et al., 2020). Droonide kasutust toetab ka fotogrammeetriliste meetodite areng (Tonkin & Midgley, 2016; Westoby et al., 2012). Nii on tänapäeval üheks laiemalt levinud modelleerimismeetodiks *structure from motion* (rakendatud ka käesolevas töös), kus erinevalt klassikalisest fotogrammeetriast ei ole vaja mudeli loomisel teada kaamera asukohti ega ka orientatsioone, kuna need määratakse andmetötluse käigus (Vasuki et al., 2014). Meetodi rakendamisel analüüsib tarkvara lähteandmetena kasutatavaid pilte ning otsib neilt iseloomulikke punkte (näiteks saab iseloomulikke punkte tuvastada järskude värvigradiendi muutuste põhjal). Seejärel võrdleb tarkvara leitud iseloomulikke punkte piltide vahel ning proovib neid kokku sobitada. Kuna pildid on tehtud erinevatest asukohtades ning erinevate nurkade alt, siis saab niimoodi määrata punktide asukohad kolmemõõtmelises (3D) ruumis. Selliselt luuakse möödistatava objekti geomeetria kasutades lähteandmetena ainult pilte.

Viimaste aastate teadustöö on keskendunud rohkem droonide kogutud andmete (fotode) otsele georefereerimisele kasutades reaalaja kinemaatilist satelliitmöödistamise (RTK-GNSS) tehnoloogiat (vt nt Peppas et al., 2019). See tähendab et andmeid on võimalik georefereerida võrdlemisi täpselt (ideaalis täpsusega kuni 1–2 cm) ilma maapealseid kontrollpunkte kasutamata (RTK-GNSS-ga määratud kaamera asukohtade koordinaadid salvestatakse fotode tegemise hetkel, mida hiljem rakendatakse andmetötluses) (vt nt Przybilla et al., 2020). Paljud droonmöödistuse rakendused, näiteks loodusõnnetuste kaardistamine, otsingu- ja päästetööd, kaasaegne täppispõllumajandus, aga ka veekvaliteedi ja metsanduse seire, saavad kasu säärasest kiirest ning usaldusväärsest teabe kogumisest (Nex & Remodino, 2014).

Vaatamata sellele, et RTK-GNSS-ga varustatud droonid võimaldavad otsest georefereerimist lubades seega tunduvalt kiiremat andmete kogumist ning töötlust kui klassikaliselt kasutatav kaudne georefereerimine (kuna kõik kontrollpunktidega seotud tegevused saab ära jätta) mis vajab maapealsete kontrollpunktide olemasolu, on antud meetodil omad puudused. Olukorras, kus möödistustel kasutatud kaamera ei ole kalibreeritud ning kaamera kalibreerimiskoeffitsiendid määratakse hoopis andmetötluse käigus (toimub n-ö kaamera isekalibreerimine), võivad arvutatud mudelis esineda moonutused kaamera kalibreerimiskoeffitsientide ebatäpsuste tõttu (Forlani et al., 2018). Seevastu kaudset georefereerimist rakendades mudelites suuri

moonutusi reeglina ei ilmu, kuna maapealsed kontrollpunktid aitavad isekalibreerimisel täpsustada kaamera kalibreerimiskoeffitsiente (Przybilla et al., 2020).

Integreeritud georefereerimine on meetod, mis kombineerib otsese ning kaudse georefereerimise. Andmetöötluses kasutatakse samaaegselt nii drooni RTK-GNSS-ga määratud kaamera asukohtasid kui ka maapealseid kontrollpunkte. Seega on võimalik vaid mõnda üksikut kontrollpunkti kasutades saavutada täpseid mõõdistustulemusi (Varbla et al., 2020).

Käesoleva magistritöö praktiline osa viidi läbi Tallinn-Tartu maantee Võõbu tee-ehituslikul katselõigul, kuhu on paigaldatud teelõigu stabiilsuse uurimiseks 75 asfaldinaela. Neist 12 kasutati antud töös maapealsete kontrollpunktidenä. Lisaks droonmõõdistusele mõõdistati teelõigu geomeetria ka laserskanneriga (terrestrilise laserskaneerimise meetodikal), et hiljem droonmõõdistuse põhiseid kolmnurkmudeleid (*triangle mesh models*) valideerida. Integreeritud georefereerimise täpsuse sõltuvuse uurimiseks maapealsetest kontrollpunktidest varieeriti kolmnurkmudelite arvutamisel kontrollpunktide arvu ning paigutust. Samuti hinnati kaamera kalibreerimiskoeffitsiente, et välja selgitada kas nende põhjal saab teha sarnaseid järeldusi nagu skaneerimise põhisel valideerimisel.

Seega seadis autor töö teostamiseks järgmised eesmärgid:

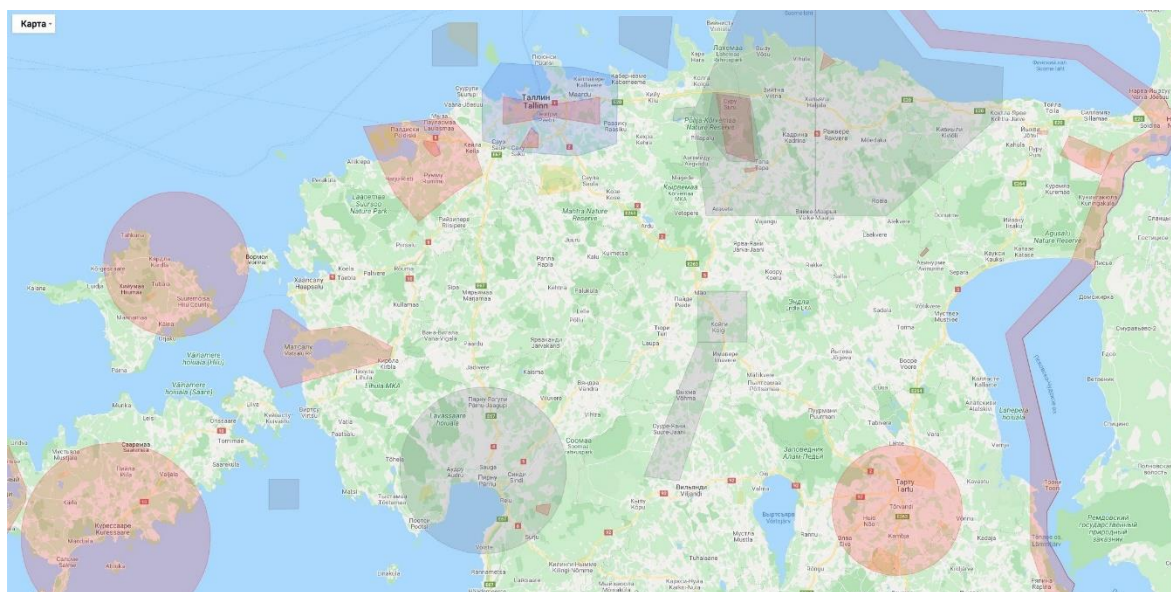
1. Uurida, kuidas sõltub integreeritud georefereerimise täpsus fotogrammeetrilisse andmetöötlusesse kaasatavate kontrollpunktide arvust, kusjuures fookus on vertikaalsuunalisel täpsusel (kaamera kalibreerimiskoeffitsientide ebatäpsustest tingitud suuremad moonutused on reeglina just vertikaalsuunalised).
2. Uurida, kas kaamera kalibreerimiskoeffitsientide põhjal on võimalik hinnata optimaalset kontrollpunktide arvu.

Töö sisu on jagatud viieks peatükiks. Esimene peatükk annab teoreetilise ülevaate ja hõlmab järgmiseid teemasid: drooninduse arengutrendid; kaudne ja otsene georefereerimine; integreeritud georefereerimine. Teises peatükis tutvustatakse uuritud objekti. Kolmandas peatükis kirjeldatakse mõõdistustöid objektil ning antakse kasutatud instrumentide kirjeldus. Neljas peatükk käsitleb mõõdistusandmete töötlemist ning kirjeldab kasutatud tarkvara. Viies peatükk on pühendatud tulemuste analüüsile. Magistritöö lõppeb kokkuvõttega.

1. TEOREETILINE ÜLEVAADE

1.1 Drooninduse arengutrendid

Traditsiooniliste aerofoto meetodite kõrval on järjest nõutumaks muutunud droonide põhised mõõdistusmeetodid. Viimastel aastatel on see protsess eriti avaldunud ultrakergete (kaaluga kuni 5 kg; Hassanalian & Abdelkefi, 2017) kopteritüüpi droonide populaarsuse kasvuna. Sellel trendil on oma positiivsed ja negatiivsed küljed. Positiivne on see, et ühiskond on droonide rolli üle ruumiandmete hankimisel läbimõeldumaks muutunud ja see on andnud tõuke droonitööstuse kiirele arengule. Negatiivne külg väljendub droonide osas kehtivate õigusaktide ebatäiuslikkuses paljudes riikides ja vajaduses lennutegevust kontrollida, kuna opereerivate seadmete arv on suurenenud ning eksisteerib kokkupõrkeoht näiteks tsiviillennukitega. Selles suunas on juba käimas droonide automaatse jälgimissüsteemi loomine (Mitin & Nikolsky, 2013).



Joonis 1. Eesti õhuruumi kontrollitud alad (punase ja halli tooniga). Tsoon 9 on tähistatud siniselt (Drooniäpp, 2021).

Üldiselt jagatakse õhuruum kaheks: kontrollitav ning kontrollimata õhuruum (Joonis 1). Kontrollimata õhuruumis, mis hõlmab endast suuremat osa Eestist, on reeglid lihtsad – madalamal kui 150 meetrit võib igäüks drooniga lennata, sõltumata ilmast, aastaajast ning muudest teguritest. Kontrollitav õhuruum on seevastu ala, mis allub lennujuhtide kontrolli alla. See aga ei tähenda seda, et seal oleks tavakodanikel droonidega lendamine keelatud. Kuni 150 meetri kõrgusel lendamine on lubatud Lennuameti loal.

Erandid on Tsoon 9 (Tallinna lähiala kontrollitav õhuruum, vt Joonis 1), kus lennukõrgus on piiratud 60 m peale. Küll aga ei ole tsooni kasutusõigust omaval piloodil tarvis iga lennu jaoks eraldi lennuluba, vaid piisab Lennuameti ühekordsest aastasest loast ning Tsoon 9 kasutusõigusest (Transpordiamet, 2016). Lennuameti loa saamiseks peab drooni piloot vastava taotluse Lennuametile esitama võimalikult täpse informatsiooniga, kuna lennujuhid peavad lennuohutuse tagamiseks olema igal ajahetkel teadlikud kõikidest lennumasinatelt. Keelualad on jällegi alad, kus on igasugune tsiviillennundus (nagu alati, teatud väikeste eranditega) keelatud. Selleks on näiteks Ämari Lennubaas, osad looduskaitsealad ning ka Euroopa Liidu piiriala (Pik, 2015).

Praegu on kõige enam kasutatavad droonid lennuki- ja kopteritüüpi. Mõlemat tüüpi droonid sobivad kindlate ülesannete lahendamiseks:

- Lennukitüüpi droone kasutatakse peamiselt suurte territooriumide ortofotomosaiikide ja digitaalsete maastiku mudelite loomiseks ning laiaulatuslike objektide mõõdistamiseks. Peamised eelised: suur reisikiirus ning lennuulatus ja autonoomia.
- Kopteritüüpi droone kasutatakse peamiselt väikeste alade mõõdistamiseks või keeruliste struktuuride (näiteks sillatoed) monitooringuks. Lisaks kaameratele paigutatakse kopteritüüpi droonide külge tihti ka LiDAR seadmeid laserskaneerimiseks. Peamised eelised: kompaktsus, vertikaalne õhkutõusmine ning maandumine, võimalus hõljuda uuringuobjekti kohal, manööverdamisvõime. Ka antud töös kasutati kopteritüüpi drooni.
- Dronid klassifitseeritakse tavaliselt nelja parameetri järgi: mass ning lennuaeg, -kõrgus ja -ulatus.

Enamiku droonitüüpide õhku tõusuks ning maandumiseks pole vaja lennuvälju ega spetsiaalselt ettevalmistatud kohti. Droone saab varustada mitmesuguste stabiliseerimiseseadmetega, kaamerate ning keskkonnaseire anduritega. Operatiivseks pildistamiseks on eelistatumad ultrakergete (kaaluga kuni 5 kg) ja kergete (kaaluga kuni 30 kg) klasside droonid, hoolimata kasuliku koormuse piirangutest, mis mõnevõrra kitsendavad droonidele paigaldatavate seadmete valikut. Lisaks on droonid ilmastikutingimustele väga vastuvõtlikud (kuni 2 kg kaaluvate droonide puhul on rakenduse piirangud seotud tuulekiirusele kuni 10 m/s).

Droonidele paigaldatavate kaameratega on võimalik saada ülikõrge ruumilise lahutusvõimega digitaalseid fotosid erinevates spektrivahemikes (näiteks infrapuna

spektris). Fotografeeritud maapinna lahutusvõime (G) cm/piksli kohta (st kui suur ala looduses vastab ühele pikslile fotol) sõltub lennukõrgusest ning kaamera parameetritest:

$$G = \frac{H \cdot S_w \cdot 100}{imW \cdot Fr} \quad (1)$$

kus H on lennukõrgus (m), imW pildi laius (piksel), Fr fookuskaugus (mm) ja S_w sensori laius (mm) (Julge et al., 2019). Fotografeeritud maapinna lahutusvõime on üks olulisimaid parameetreid, kuna sellest sõltub otseselt modelleerimise täpsus. Seega tuleks vastavalt täpsusnõuetele valida sobiv lennukõrgus või kaamera.

Droonidega kogutud andmed võimaldavad seega lahendada näiteks järgmisi ülesandeid (Mitin & Nikolsky, 2013):

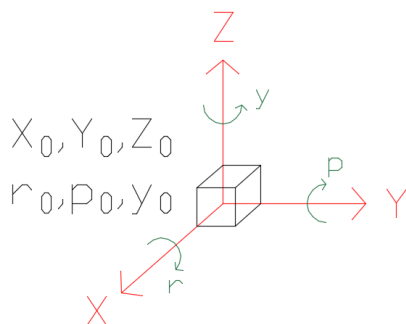
- suureresolutsiooniliste ortofotomosaiikide loomine;
- fotorealistlike digitaalsete 3D mudelite loomine;
- hädaolukordade ja nende tagajärgede jälgimine, taastamistöde edenemise kontroll ning ohvrite otsimine;
- maastiku muutuste dünaamika analüüs ja hindamine;
- tootmis-ökoloogiline seire;
- nafta- ja gaasijuhtmete, elektriülekanaliinide, raudteede ja maanteede, metsade ja põllumaade kaugseire.

Droone kasutatav aerofotograafia on maapealse visuaalse vaatluse ja logimisega võrreldes palju ülevaatlikum ning kulutõhusam. Kaasaegsed seadmed on võimelised täitma märkimisväärset arvu ülesandeid, läbima pikki vahemaid ja monitoorima suuri alasid. Droonide pildistatud fotode töötlemiseks mõeldud modernsed tarkvarad võimaldavad automaatrežiimis juba ühe tunni jooksul pärast drooni maandumist saada valmis ortofotomosaiike ja digitaalseid maastiku mudeleid (Mitin & Nikolsky, 2013).

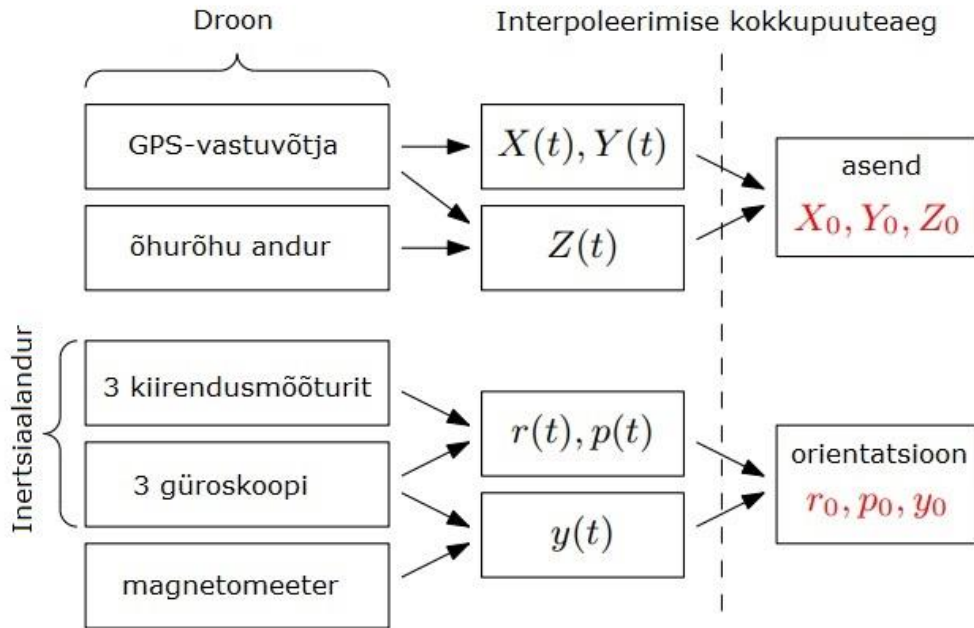
1.2 Kaudne ja otsene georefereerimine

Georefereerimine on mõõdistusandmete sidumine koordinaatsüsteemi. Fotogrammeetrias eristatakse reeglina kahte meetodit – kaudne ja otsene georefereerimine. Kaudse georefereerimise puhul kasutatakse maapinnal eelnevalt mõõdistatud punkte (maapealsed kontrollpunktid), mis seatakse vastavusse loodavas mudelis (näiteks fotodel) olevate punktidega (Pentjärv, 2019). Selle jaoks kasutatakse mõõdistusete ajal vastavaid tähiseid, mida on hiljem lihtne tehtud piltidelt tuvastada. Mitme pildi georefereerimisel võetakse kasutusele piltide ühised punktid ehk sõlmepunktid (iseloomulikud punktid, mille kasutatav tarkvara automaatselt tuvastab; Pentjärv, 2019). Selle lähenemisviisi kõige olulisem puudus on see, et maapealseid kontrollpunkte tuleb mõõta kohapeal (kasutades näiteks GNSS-seadmeid või tahhümeetreid). See välitöö etapp on kindlasti üks aeganõudvamaid ja olenevalt piirkonna ligipääsetavusest võib see olla ka teostamatu. Lisaks on kontrollpunktide kasutamine andmetöötamise etapis samuti aeganõudev, kuna need tuleb reeglina manuaalselt tuvastada (Tonkin & Midgley, 2016). Tasub mainimist, et maapealsete kontrollpunktide automaatsel või poolautomaatsel tuvastamisel põhinevad lahendused on juba olemas, kuid need vajavad spetsiaalseid tähiseid. Sellegipoolest on sihtmärgi positioneerimise ja mõõtmise välitööde etapp endiselt aeganõudev tegevus (Losè et al., 2020).

Otsene georefereerimine on kaamera asukoha ja suuna hindamine drooni pardal olevate anduritega (st ilma maapealseid kontrollpunkte kasutamata). Asukoht on määratletud projektsioonikeskme kolme koordinaadi (X_0, Y_0, Z_0) ning suund pöördenurkadega (r_0, p_0, y_0) navigeerimisraamis (Joonis 2) (Pfeifer et al., 2012). Joonis 3 annab ülevaate anduritest ning nende andmete omavahelisest integreerimisest. Interpoleerimine sãriaegadel annab iga pildi asukoha ja suuna. See informatsioon salvestatakse fotode tegemise hetkel piltide metaandmetesse ning võetakse kasutusele andmetöötamise käigus.



Joonis 2. Kaamera navigeerimisraamistiku teljed.



Joonis 3. Piltide otsene georefereerimine drooni pardal olevate andurite integreerimise teel (Pfeifer et al., 2012). Kaamera navigeerimisraamistiku teljed on esitatud Joonisel 2.

Klassikaliselt kasutati otsese georefereerimise jaoks madala täpsusega GNSS-vastuvõtjat ning määratud kõrguste täpsustamiseks rakendati õhurõhuandurit. Tänapäeva RTK-GNSS droonid võimaldavad saavutada aga piltide asukohtadele mõne sentimeetri täpsust (Przybilla et al., 2020). Otsesel georefereerimisel on kaks peamist lähenemisviisi: reaalaaja kinemaatiline ning andmete järeltötluse lähenemisviisid. Reaalaaja kinemaatilises lähenemisviisis korrigeeritakse pardal asuva GNSS-vastuvõtja mõõdetud koordinaate tugijaama saadetud teabega ja kaamera asukohti hinnatakse reaalaajas. GNSS-tugijaam võib olla ajutine füüsiline tugijaam objektile või virtuaalne jaam, mis on loodud GNSS-püsijaamade baasil (Losè et al., 2020). Seevastu järeltötluse meetodil viiakse läbi GNSS-vastuvõtja poolt lennu ajal salvestatud positsioonide korrigeerimine ja kaamera asukohtade hindamine pärast andmete kogumise etappi. See lahendus võimaldab arvutustes kasutada täpseid efemeriidide andmeid, saavutades teoreetiliselt täpsemad tulemused.

Seega on otsese georefereerimise eelis kaude ees see, et maapealseid kontrollpunkte ei ole enam vaja. Küll aga on meetodi puuduseks andmetötluse käigus tekkivad ebatäpsused kaamera kalibreerimiskoeffitsientide puudulikus hindamises, mis avalduvad loodava mudeli moonutustena (Carbonneau & Dietrich, 2016). Seega tuleks otsese georefereerimise korral suurt rõhku pöörata just kaamera kalibreerimisele, mida reeglina aga ei tehta.

Üldiselt on kaamera kalibreerimine (st kalibreerimiskoeffitsientide määramine, mis kirjeldavad kaamera mudelit) üks fotogrammeetrilise andmetöötluse põhiülesannetest. Üheks laialt kasutatavaks kalibreerimismeetodiks on n-ö malelaua meetod, mis võimaldab kaamera täpset kalibreerimist (Douterloigne et al., 2009). Selleks pildistatakse malelaua mustrit, mis jääb fotodele moonutatuna. Seejärel sobitatakse tehtud fotodele kaamera mudel (määratakse mudeli kalibreerimiskoeffitsiendid) selliselt, et kaoksid fotodel olevad moonutused. Üheks selliseks tuntud mudeliks on näiteks Brown–Conrady mudel (Carbonneau & Dietrich, 2016):

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = (1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) * \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2P_1 xy + P_2(r^2 + 2x^2) \\ P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_2 xy \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$r = \sqrt{(x - C_x)^2 + (y - C_y)^2} \quad (3)$$

kus x ja y on moonutatud pikslite koordinaadid ning \hat{x} ja \hat{y} moonutamata pikslite koordinaadid (pildi koordinaatsüsteemis). K_1 , K_2 ja K_3 on radiaalse moonutuse koeffitsiendid, P_1 ja P_2 tangensiaalse moonutuse koeffitsiendid ning C_x ja C_y tähistavad peapunkti nihet pildi keskpunkti suhtes (pikslites). Nii on kaamera mudel defineeritud ning edaspidises andmetöötles võib kasutada juba määratud koeffitsiente.

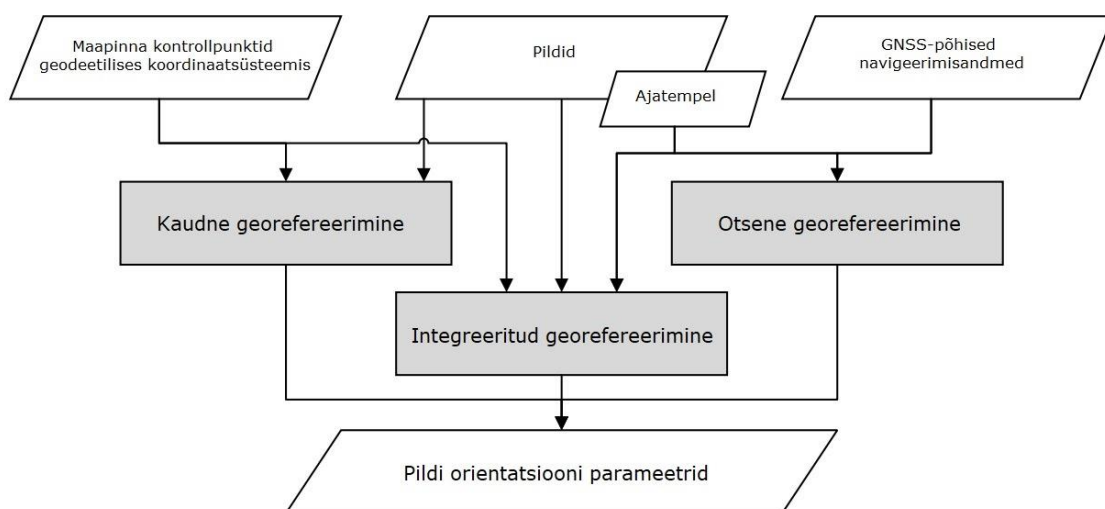
Tänapäeva fotogrammeetriatarkvarad (näiteks Agisoft Metashape, mida on kasutatud ka käesolevas töös) teostavad kaamera kalibreerimise andmetöötluse käigus aga automaatselt (juhul kui ei anta ette juba eelnevalt määratud kaamera kalibreerimiskoeffitsiente) olenemata kasutatavast kaamerast (Börlin & Grussenmeyer, 2014). See on kaamera isekalibreerimise protseduur, kusjuures tarkvara Agisoft Metashape isekalibreerimine põhineb eelmainitud Brown–Conrady mudelil (lisaks valemite 2 ja 3 näidatud koeffitsientidele võetakse arvesse veel täiendavaid koeffitsiente). Praktilises kasutuses rakendatakse reeglina just isekalibreerimist, mis on võrreldes eelmainitud malelaua meetodiga kiire ning mugav.

Kaudse georefereerimise korral arvutatakse isekalibreerimist kasutades kalibreerimiskoeffitsiendid fotode põhjal ning seejärel täpsustatakse saadud tulemused maapealsete kontrollpunktide abil (koeffitsientide määramine toimub ruumiliselt, st 3D) (Gerke & Przybilla, 2016). Kui andmetöötlesse on kaasatud piisav hulk kontrollpunkte (seda on uurinud näiteks Przybilla et al., 2020), siis ei ole isekalibreerimise kasutamine suureks probleemiks, kuna maapealsete kontrollpunktide kaasamine võimaldab kalibreerimiskoeffitsientide määramise üsna täpselt (maapealsed kontrollpunktid kirjeldavad täpselt maapinna/objektid pildidel). Seevastu otsese georefereerimise korral

arvutatakse koefitsiendid fotode ning RTK-GNSS-ga määratud kaamera asukohtade põhjal. Maapinnal tehtud mõõtmistulemusi andmetöötlusesse siin ei kaasata, mistõttu ei pruugi määratud koefitsiendid kasutatud kaamerat täpselt kirjeldada ning tekkinud ebatäpsused moonutavad loodavat mudelit. Probleemi olemus seisneb selles, et RTK-GNSS-ga määratud koordinaadid ei iseloomusta antud olukorras maapinda/objekte pildidel. Näiteks on üheks enamuuritud moonutuseks radiaalmoonutus, mis ilmneb radiaalse moonutuse koefitsientide K_i ebatäpsuste tõttu (James & Robson, 2014). Antud moonutuse tõttu võtab loodud mudel kas kausi või kupli kuju. Sellisel juhul võivad abiks olla täiendavad meetmed (käsitletud järgmises jaotises), mis tagavad tugevama mõõdistusgeomeetria aidates seega täpsustada isekalibreerimise käigus määratavaid kalibreerimiskoefitsiente (Hastedt & Luhmann, 2015).

1.3 Integreeritud georefereerimine

Integreeritud georefereerimine kombineerib otsese ja kaudse georefereerimise, mis tähendab, et koos kasutatakse nii drooni RTK-GNSS-ga määratud kaamera asukohtasid kui ka maapealseid kontrollpunkte. On näidatud, et ainult ühe maapealse kontrollpunkti andmetöötlusesse kaasamine võimaldab saavutada sarnase täpsuse kui kaudne georefereerimine mitme kontrollpunktiga (Heipke et al., 2002). Võrdlus kõigi kolme georefereerimismetoodika vahel on esitatud Joonisel 4.



Joonis 4. Kaudse, otsese ja integreeritud georefereerimismetoodika võrdlus (Eugster, 2011).

Eeltoodust järeldeb, et integreeritud georefereerimisel kaasatakse isekalibreerimisse lisaks fotodele nii maapealsed kontrollpunktid kui ka drooni RTK-GNSS-ga määratud kaamera asukohad. Seega võimaldab integreeritud georefereerimine võrdlemisi täpset kaamera kalibreerimiskoeffitsientide määramist. Selleks, et kaasatavate kontrollpunktide arvu vähendada (või saavutada veel täpsemad tulemusi) saab võtta lisaks veel täiendavaid meetmeid, mis tagavad tugevama mõõdistusgeomeetria (see tähendab, et isekalibreerimine võimaldab täpsemat kalibreerimiskoeffitsientide määramist).

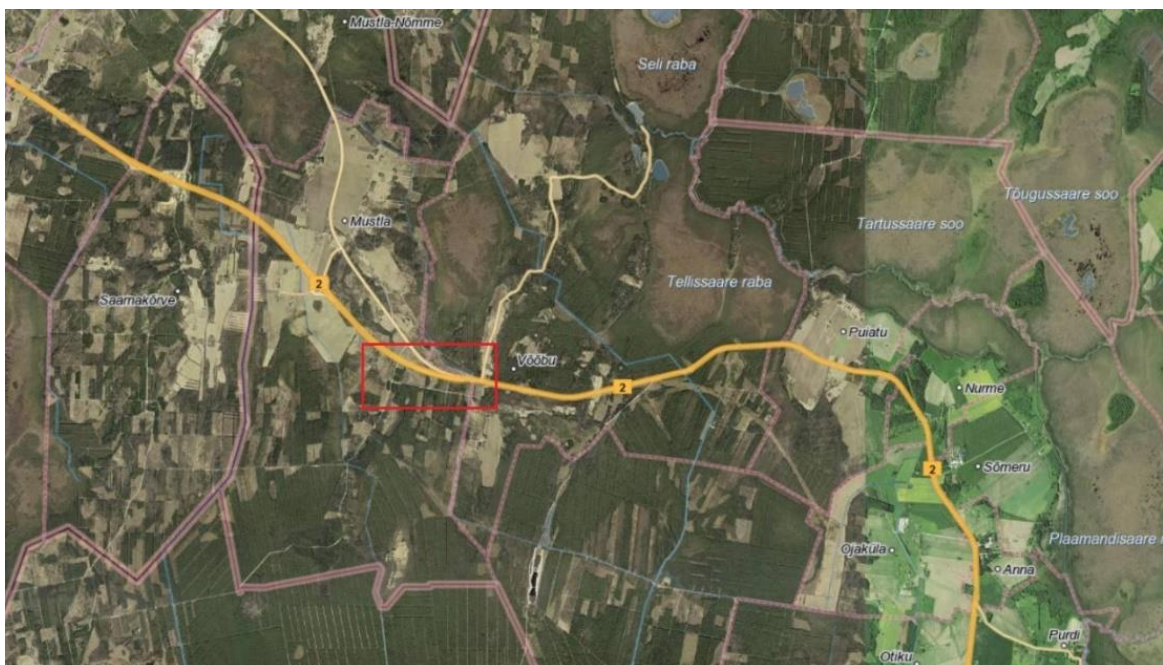
Üheks selliseks meetmeks on piltide tegemine kaldnurga all nadiiri suunatud piltide asemel (Jaud et al., 2018; Nocerino et al., 2013). Nimelt aitavad kaldnurga all tehtud pildid kaasa vaatenurkade mitmekesistamisele, mistõttu on üks ja sama objekt näha mitme erineva vaatenurgaga alt. Selline lähenemine aitab tuvastada andmetötluse käigus täiendavaid sõlmepunkte ning seetõttu luuakse mõõdistusobjektist tugevam geomeetria (Jaud et al., 2018). Tugevam geomeetria võimaldab omakorda isekalibreerimisel määrata kaamera kalibreerimiskoeffitsiente täpsemalt. Nadiiri vaatavate piltide korral ei ole see võimalik, kuna terve mõõdistustöö vältel tehakse pilte ainult ühe vaatenurga alt. Lisaks võimaldavad kaldnurga all tehtud pildid visualiseerida nadiirvaate eest varjatud detaile. Seeläbi saab vältida vajadust kasutada maapeal tehtud täiendavaid fotosid (Martínez-Carricondo et al., 2019). Kuigi üldiselt on kaldnurga all olevate piltide kasutamine parem kui nadiiri vaatavate piltide rakendamine, siis nende mõlema kombinatsioon võib anda parima tulemuse (Nesbit & Hugenholtz, 2019).

Antud magistritöö raames lennati joonobjekt piki- ja ristisuunaliselt (vt Joonis 11), mis tähendab, et mõõdistusala kaeti kahekordse edasi-tagasi lendamisega. Kuigi selline lennutrajektor on ühekordsest pikisuunalisest edasi-tagasi lendamisest aeganõudvam (või lihtsalt ühes suunas lineaarsest lendamisest, mis kaamera isekalibreerimist arvesse võttes annab kõige halvemaid tulemusi, kuna loodav mõõdistusgeomeetria on nõrk), siis saab sellise lähenemisega tugevdada mõõdistusgeomeetriat veelgi (Gerke & Przybilla, 2016). Seda nimelt fotode suurenenud ülekatte tõttu. Kombineerides piki- ja ristisuunalise lendamise kaldnurga all oleva kaameraga kogutakse andmeid erinevatest vaatenurkadest. Need kirjeldatud meetmed on abiks kõigi georefereerimismeetodite kasutamisel.

2 UURIMISOBJEKTI KIRJELDUS

Uuritavaks objektiks on teelõik, mis asub Järvemaal Võõbu külas Tallinn–Tartu–Võru–Luhamaa maantee (E263) kilomeetrite 67,076 kuni 67,256 vahel (piketaaž kehtib esialgselt ehitatud katselõigu kohta). Katselõigu asukohaskeemid on toodud Joonistel 5 ja 6. Tegemist on 2015. aasta suvel ning sügisel ehitatud tee-ehitusliku katselõiguga, mis jääb Kõrvemaa soostiku aladele. Sondeerimise ja radarmõõtmiste tulemuste põhjal on turbakihi paksuseks katsealal hinnatud umbes 1,8–3,4 m (Joonis 7). Maapinna kõrgused objekti vahetus läheduses varieeruvad vahemikus 74,2 kuni 74,3 m üle merepinna (Forsman et al., 2016).

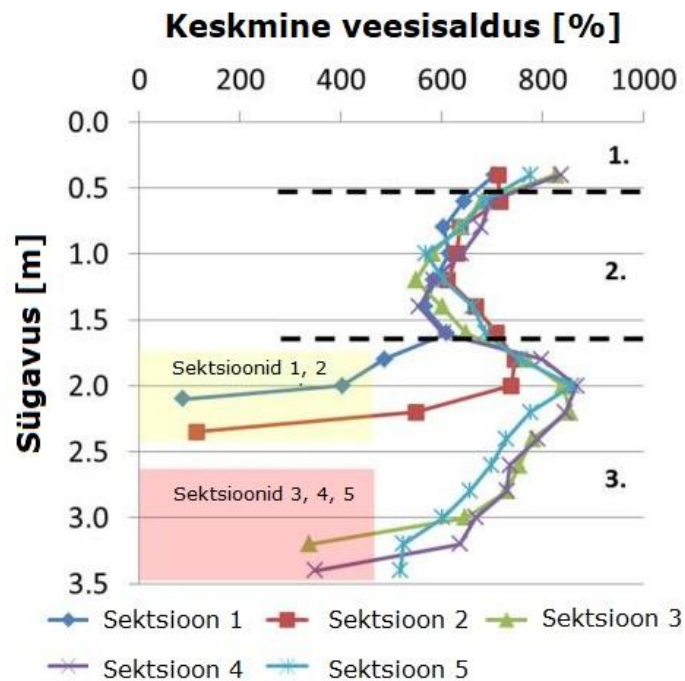
2015. aastal ehitati katselõigule kuus erinevat teetammi konstruktsiooni, millest iga sektsiooni pikkus oli umbes 30 m (ligikaudsed asukohad on märgitud Joonisele 6). Peale maantee valmimist (2020. aasta 14. augustil) säilis neist viis kogupikkusega 150 m (massivahetusega sektsioon 0 on sarnane valdavale osale koguteelõigust). Teetammi laius on umbes 30 m (Forsman et al., 2016). Kasutatud teelõik ehitati selleks, et leida parim potentsiaalne tehniline lahendus Tallinn-Tartu maantee Kose-Mäo teelõigu ehitamiseks. Tasub mainimist, et antud objekt on ka varem (enne teelõigu valmimist) olnud Tallinna Tehnikaülikooli poolt tehtud fotogrammeetriliste uuringute huviobjektiks (vt Julge et al., 2019).



Joonis 5. Teelõigu (tähistatud punase ristkülikuga) asukohaskeem mõõtkavas 1:60000. Ortofoto tegemise aeg 07.04.2020. Allikas: Maa-ameti geoportaal.



Joonis 6. Uuritav teelõik mõõtkavas 1:4000. Ortofoto tegemise aeg 07.04.2020 (ehk enne ehitustööde lõppu). Numbrid näitavad seksioonide ligikaudseid asukohti. Ortofoto allikas: Maaameti geoportaal.



Joonis 7. Kolm turbakihti ja turba looduslik veesisaldus katseseksioonides 1 kuni 5 (vt Joonis 6; Forsman et al., 2016).

3 MÕÖDISTUSTE KIRJELDUS

2020. aasta 7. augustil korraldati uuritaval objektil mõõdistustööd, mille käigus paigaldati äsja valminud teelõigule 75 asfaldinaela 210 meetri ulatuses (katselõigu 150 m pikkusele osale ning 30 m mõlemale poole otsa katselõigust). Asfaldinaelad, mille abil jälgitakse katselõigu stabiilsust, koordineeriti Trimble S6 robottahhümeetriga, kusjuures mõõtmiste baas määrati RTK-GNSS mõõtmistega kasutades Trimble R8-t. Asfaldinaelte kõrgused määrati kõrgtäpse nivelleerimisega kasutades Trimble DiNi 0.3 digitaalnivelliiri. Antud töös on neist asfaldinaeltest kasutusele võetud 12. Lisaks skaneeriti uuritav teelõik kasutades Leica ScanStation C10 laserskannerit. Nädal hiljem (14. augustil, vahetult enne teelõigu avamist liiklusele) mõõdistati teelõik ka drooniga DJI Phantom 4 RTK. Kõik kasutatud instrumendid kuuluvad Tallinna Tehnikaülikoolile. Tehtud mõõdistustöödest on lähemalt räägitud järgmistes alajaotistes.

3.1 Mõõdistustöö digitaalnivelliiriga Trimble DiNi 0.3

Trimble DiNi 0.3 (Joonis 8) on digitaalnivelliir kõrguskasvude määramiseks. Instrument töötab elektroonilises režiimis kaugusel 1,5 kuni 100 meetrit ja on võimeline mõõtma kõrguskasvusi täpsusega $\pm 0,3$ mm kasutades ribakoodlatti (Joonis 9; Trimble DiNi, 2013). Tänu sisseehitatud arvutile on nivelliir võimeline tegema täiendavaid arvutusi (näiteks vahepunktide kõrguste määramine), mis salvestatakse koos mõõdistusandmetega instrumendi sisemällu. Töötulemused saab laadida personaalarvutisse USB-kaabli kaudu või USB-mälupulgale.



Joonis 8. Kasutatud Trimble Dini 0.3 digitaalnivelliir (Trimble, 2013).



Joonis 9. Mõõdistustöödel kasutatud ribakoodlatti.

Selleks, et tagada nivelleerimisel kõrguste täpsus ning stabiilsus, on objekti vahetusse lähedusse paigaldatud kolm aluskivimini ulatuvat reeperit (Joonised 10 ja 11). Reeperite stabiilsuse kontrolliks tehti enne asfaldinaelte kõrguste määramist kontrollmõõtmised reeperite vahel kasutades invarlatte. Kontrollmõõtmised näitasid, et paigaldatud reeperite vahel ei olnud kõrguslike nihkumisi toimunud. Seejärel sooritati kõrguskasvude määramine asfaldinaeltele kasutades ribakoodlatti. Mõõtmised tehti kahest seisust nii, et maksimaalne kaugus nivelliirist ei ületaks 60 m. Kontrolliks mõõdeti keskmised asfaldinaelad mõlemast seisust. Lähterepeeritelt määratud sulgemisvigade ning kontrollmõõtmiste põhjal viidi teise seisu mõõtmistele sisse +2 mm parand.



Joonis 10. Aluskivimini ulatuv reeper (Rp1 Joonisel 11) objekti vahetus läheduses.



Joonis 11. Ortofotomosaik drooni lennu trajektooriga (valge joon, millel olevad punktid näitavad fotode tegemise asukohtasid). Punased kolmnurgad tähistavad maapealsete kontrollpunktide asukohtasid (uuritav teelõik algab punktide 4 ja 3 juures ning lõppeb punktidega 2 ja 5) ning sinised ruudud lähtereepereid.

3.2 Mõõdistustöö laserskanneriga Leica ScanStation C10

Laserskaneerimine on tänapäeva insenerirakendustes laialt levinud mõõdistusmeetod, mis võimaldab saavutada vähemalt sentimeetri suurusjärku modelleerimistäpsust (Li et al., 2020; Pesci et al., 2013; Pejić, 2013). Seega on laserskaneerimine sobiv meetod, millega valideerida uusi ning arenevaid meetodeid nagu seda on dron-fotogrammeetria.

Laserskanner Leica ScanStation C10 (Joonis 12) maksimaalne mõõteulatus on 300 meetrit ja minimaalne 0,1 meetrit (Leica ScanStation C10, 2011). Skanneri ülejäänud olulisemad tehnilised parameetrid on toodud Tabelis 1. Laserskanneri tööpõhimõte põhineb laserkiire läbimisaja mõõtmisel LiDAR sensorist mõõdetavale pinnale ja tagasi sensorini. Nii määratakse mõõdistatava punkti kaugus sensorist. Võttes arvesse ka mõõdistushetkel määratud kalde- ja horisontaalnurki saab leida mõõdistatava punkti koordinaadid.

Tabel 1. Laserskanneri Leica ScanStation C10 olulisemad tehnilised parameetrid (Leica ScanStation C10, 2011).

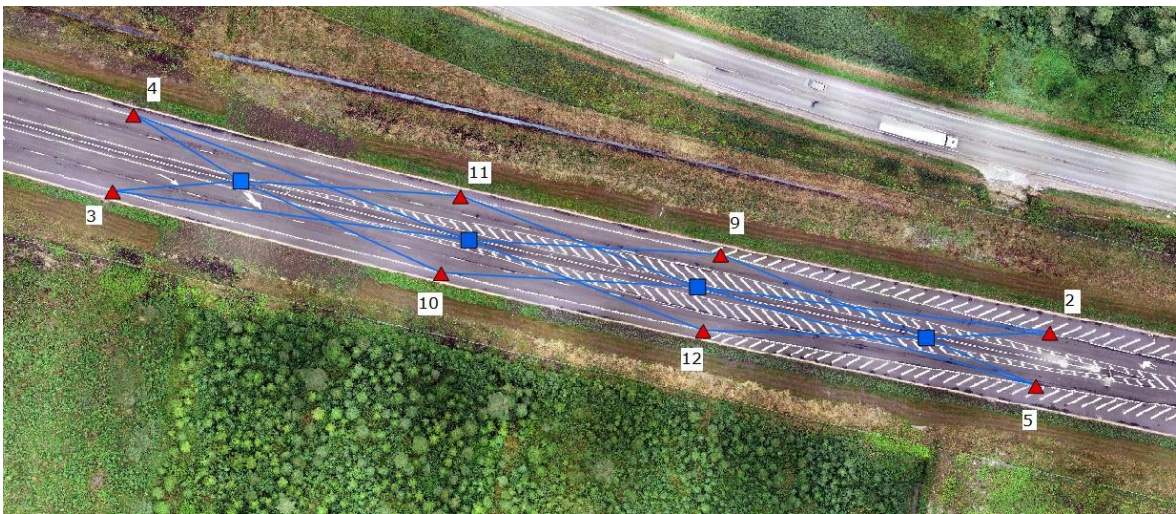
Juhtimine	Integreeritud juhtpaneel või sülearvuti
Kaamera	Üks 17° x 17° pilt: 1920 x 1920 pikslit (4 megapikslit). Pildistamisulatus 360° x 270°: 260 pilti
Ühekordse mõõtmise täpsus	6 mm (asukoht)
	4 mm (vahemaa)
Nurga mõõtmise täpsus (horisontaalne / vertikaalne)	12" / 12" (60 µrad / 60 µrad)
Laseri klass	3R (IEC 60825-1)
Laseri lainepikkus	Nähtav 532 nm
Skaneerimise kiirus	Kuni 50 000 punkti sekundis
Vaateväli	360° (horisontaalselt)
	270° (vertikaalselt)



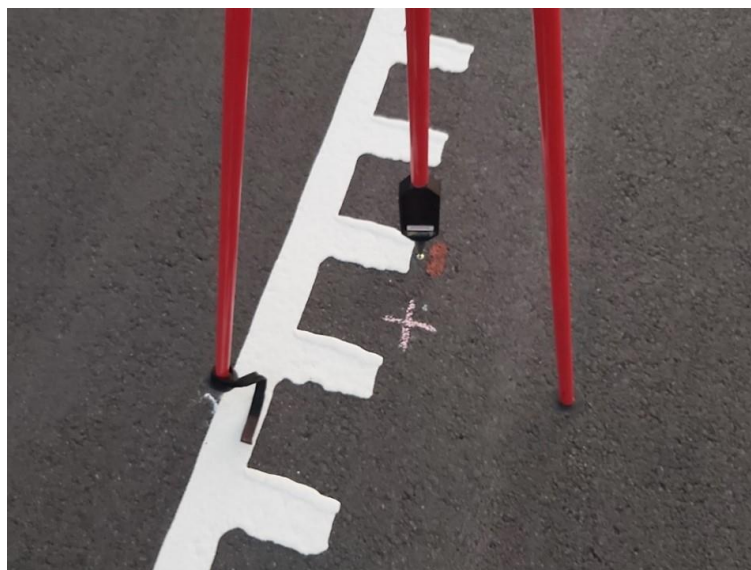
Joonis 12. Kasutatud laserskanner Leica ScanStation C10.

Skaneerimisjaamade valik peaks tagama selle, et igast skaneerimisjaamast jäädvustatakse maksimaalselt uuritava ala pind. Samuti tuleks tagada mõõdetud punktipilvede osaline ülekate selleks, et skaneerimisjaamade vahelisel alal oleks saavutatud optimaalne punktipilve tihedus (terrestrilise laserskaneerimise punktipilve

tiheus väheneb radiaalselt instrumendist kaugenedes). Antud töös asuvad skaneerimisjaamad teineteisest umbes 50 m kaugusel (Joonis 13). Selleks, et täpselt georefereerida ning registreerida skanneri mõõdetud punktipilved valiti välja 8 sõlmepunkti tee servades, mis ühtivad drooni maapealsete kontrollpunktidega (vt Jooniseid 11 ja 13). Mõõdistuste ajal paigaldati nendele punktidele skaneerimistähised (Joonis 14). Igast mõõdistusjaamast mõõdeti 4 tähist (Joonis 13). Georefereerimise ning registreerimise formaalne keskmine ruutviga (KRV) oli 3,1 mm (põhineb 24 tähiste vahelisel sõlmel, sh tähistele määratud koordinaatidel), mis näitab punktipilvede täpset kokkusobivust.

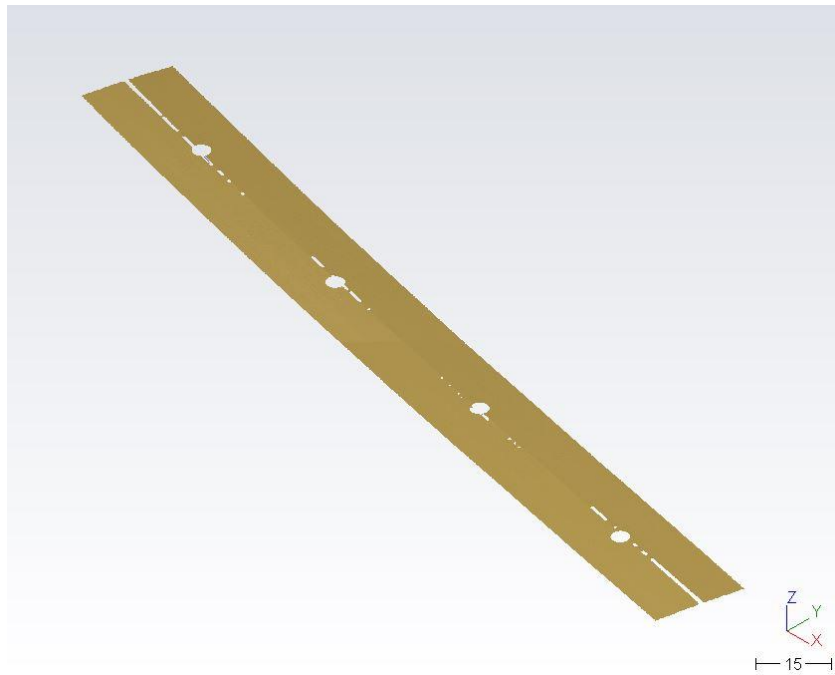


Joonis 13. Terrestriilise laserskaneerimismõõdistuse skeem. Tähiste asukohad (punased kolmnurgad) ühtivad drooni maapealsete kontrollpunktidega (Joonis 11). Sinisega on tähistatud skanneri mõõtmisjaamad ning sinised jooned näitavad millised tähised igast jaamast mõõdistati.



Joonis 14. Kasutatud skaneerimistähis paigaldatuna kontrollpunktile (asfaldinael).

Punktipilvede tarkvaraga Leica Cyclone georefereerimise ja registreerimise järgselt puhastati need üleliigsest müra (samuti tarkvaraga Leica Cyclone). Näiteks kustutati punktipilvest mööda sõitvad autod ning liikvad inimesed. Samuti eemaldati kõik pinnad, mis ei kirjeldanud mõõdistatavat teelõiku (teepiirded, kraavid jmt). Kõige lõpuks arvutati puhastatud punktipilvest tarkvaraga 3DReshaper kolmnurkmudel (Joonis 15), millega valideeriti droonmõõdistuse põhised mudelid. Kuna skaneerimisandmete töötlust ei tehtud antud töö raames, siis ei ole seda lähemalt ka rohkem käsitletud.



Joonis 15. Laserskanneriga mõõdetud punktipilvest arvutatud kolmnurkmudel. Skanneri mõõtmisjaamade asukohad on tuvastatavad sõõrikujuliste tühikutena loodud mudelis.

3.3 Mõõdistustöö drooniga DJI Phantom 4 RTK

DJI Phantom 4 RTK (Joonis 16) on varustatud kaasaegsete mõõtesensoritega nagu infrapunaandurid takistuste tuvastamiseks ja täpset positsioneerimist võimaldav GNSS seade. Kokkuvõtte kasutatud drooni olulisematest tehnilistest parameetritest on esitatud Tabelis 2.



Joonis 16. Kasutatud droon DJI Phantom 4 RTK (vasakul) ja drooni maapealne juhtimissüsteem (paremal).

Tabel 2. DJI Phantom 4 RTK olulisemad tehnilised parameetrid (PHANTOM 4 RTK, 2018).

Kaal	1391 g
Maksimaalne lennukõrgus (merepinnast)	6000 m
Maksimaalne lennukiirus	58 km/h
Lennuaja piirang	30 min
Keskmine aku laadimisaeg	60 min
Maksimaalne lennudistants	7000 m
GNSS seadme positioneerimise täpsus	1.5 cm + 1 ppm (vertikaal)
	1 cm + 1 ppm (horisontaal)
Kaasatavad satelliitsüsteemid	GPS (L1/L2), GLONASS (L1/L2), Galileo (E1, E5a)
Kaamera parameetrid:	
Sensor	20 megapikslit
Fookuskaugus	8,8 mm
Sensori kõrgus ja laius	8,0×13,2 mm
Vaatevälja ulatus	84°
Fotode resolutsioon	5472×3648 pikslit

Enne lendamist on väga oluline veenduda, et ala, kus droon tõuseb ja maandub, on ohutu. Kuigi droonil on andurid, mis tuvastavad takistusi, on lisaks oluline veenduda, et lennukõrgusel ei oleks näiteks puid (infrapunaandurid ei pruugi märgata näiteks kaableid, peenemaid oksid jmt). Drooni juhtimine käib maapinnal n-ö maapealse juhtimissüsteemiga (Joonis 16). Lennuplaan (Joonis 11) ja muud lennuparameetrid (Tabel 3) sisestatakse juhtimissüsteemi, kusjuures lennuplaani saab ka varasemalt valmis joonestada ning siis selle instrumenti laadida (Huul, 2016). Lennuplaani koostades on oluline tagada mõõdistatava objekti piisav kaetus fotodega. Joonis 17 näitab, et antud juhul on mõõdistatud ala ühtlaselt kaetud, ning et maapind on igalt poolt kirjeldatud enam kui 9 fotoga. DJI Phantom 4 RTK korral saab maapinna lahutusvõime arvutada lihtsustatud valemiga (tuletatud valemist 1 kasutades Tabelis 2 esitatud parameetreid):

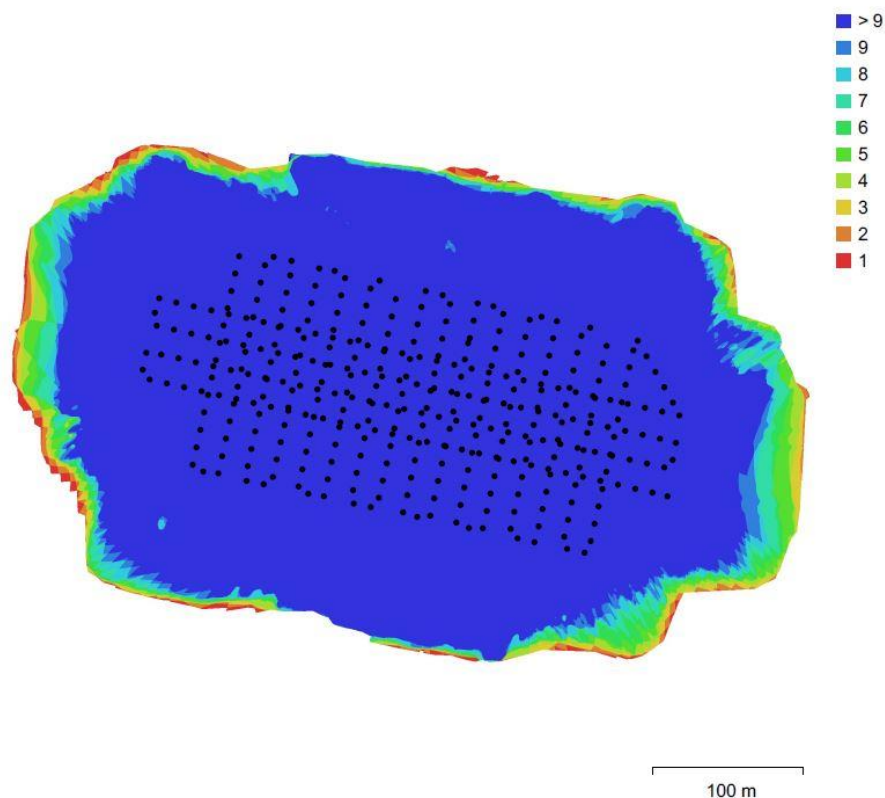
$$G = \frac{H}{36,48} \quad (4)$$

kus H on lennukõrgus meetrites ja G maapinna lahutusvõime cm/piksli kohta.

Tabel 3. Mõõdistusteks kasutatud lennuparameetrid. Maapinna lahutusvõime on arvatud valemi 4 järgi.

Lennukõrgus	60 m
Fotode tegemise kaldenurk nadiiri suhtes	30°
Fotode risti- ning pikisuunaline ülekate	80 %
Maapinna lahutusvõime	1,64 cm/piksli kohta

Kui lennuplaan ning -parameetrid on juhtimissüsteemi sisestatud saab lendu alustada. Seejärel lendab droon ettemääratud plaani järgi automaatselt, ilma et piloodilt oleks täiendavat abi vaja. Võrreldes droonmõõdistust näiteks terrestrilise laserskaneerimisega saab öelda, et droonmõõdistus on palju automatiseeritum ning lihtsam.



Joonis 17. Fotode ülekatted mõõdistusobjektil ning selle vahetus ümbruses. Mustad punktid tähistavad fotode tegemise asukohtasid.

Enne lennu alustamist paigaldati mõõdistataval objektil olevatele maapealsetele kontrollpunktidele tekstiilist must-valged tähised suurusega 50×50 cm (Joonis 18). On oluline, et tähised oleksid tehtud fotodelt lihtsasti leitavad (näiteks kõrgemal lennates tuleks kasutada suuremaid tähiseid). Oluline on kontrollpunktide arv ja ruumiline jaotus, mis tuleb korralikult planeerida. Suurema täpsuse saab saavutada, kui kontrollpunktid jaotatakse ühtlaselt ja asetatakse ka uurimisala servadele (Martínez-Carricondo et al., 2018). Andmetöötluse käigus kasutatakse neid kontrollpunkte, et parandada mudeli täpsust. Kokku kasutati 12 kontrollpunkti ja nende asukohad on näidatud Joonistel 11 ning 19.



Joonis 18. Tähis paigaldatuna maapealsele kontrollpunktile.

4 MÕÖDISTUSANDMETE TÖÖTLEMINE

Selles jaotises kirjeldatakse droonimõõdistustel saadud andmete töötlemist ning saadud tulemuste valideerimist kasutades laserskaneerimise tulemusena saadud kolmnurkmudelit (vt Joonis 15). Trimble S6 robottahhümeetriga koordineeritud ning seejärel nivelleeritud asfaldinaelte andmeid on kasutatud mõõdistuste georefereerimise täpsustamiseks. Andmete töötlemiseks kasutati järgmiseid tarkvarasid: Agisoft Metashape Professional kolmnurkmudelite arvutamiseks, MeshLab valideerimise täpsushinnangute määramiseks ja 3DReshaper valideerimise visualiseerimiseks. Edasi kirjeldatakse täpsemalt, kuidas loetletud programme andmetöötluks kasutati.

4.1 Kolmnurkmudelite arvutamine drooni tehtud fotodest

Agisoft Metashape rakendab kaasaegset tehnoloogiat digitaalsete fotode põhjal kvaliteetsete 3D-mudelite loomiseks. Objekti 3D-mudeli konstrueerimiseks võimaldab Agisoft Metashape kasutada mis tahes digitaalkaameraga tehtud fotosid (Jaud et al., 2018). 3D-mudeli loomise protsess on intuitiivne ning suuresti automatiseeritud. Reeglina piisab sobivate eeldefineeritud parameetrite valimisest ning tarkvara arvutab seejärel mudeli. Küll aga on vajalik varasem kogemus ning põhjalik arusaamine tarkvara tööst kui eesmärk on saavutada maksimaalset täpsust.

Saavutatavale täpsusele seab piirangu ka kasutatav riistvara, kuna tavapärase fotogrammeetriline andmetöötlus nõuab reeglina keskmisest võimsamat arvutit. Lisaks protsessorile ning graafikakaardile, mis määravad suuresti andmetöötluks kiiruse, sõltub andmetöötlus ka vaba muutmälu (RAM) olemasolust. Nii näiteks on keskeltläbi vaja 4 GB RAM-i, et töödelda 30-50 fotot suurusega 10 megapiksli või juba 16 GB 300–400 samas mõõdus foto töötluks tarbeks (Agisoft System Requirements, 2021). RAM-i vajaduse määravad ka valitud parameetrid. Näiteks saab modelleerimisel valida 5 kvaliteedi parameetri vahel: „madalaim (*lowest*)”, „madal (*low*)”, „keskmine (*medium*)”, „kõrge (*high*)” ja „väga kõrge (*ultra high*)”. Parameetri valik määrab selle, kui palju on fotode resolutsiooni andmetöötluks käigus vähendatud. Kui valida parameeter „väga kõrge”, siis kasutatakse fotosid originaalresolutsiooniga. Seevastu näiteks vähendab parameeter „keskmine” esialgset fotode resolutsiooni 16 korda (4^2) ja „madalaim” juba 256 korda (4^4) (Agisoft System Requirements, 2021).

Möödistuste järgselt eksporditi drooni tehtud fotod JPG-formaadis, kusjuures RTK-GNSS määratud kaamera koordinaadid ning inertsiaalanduri määratud kaamera orientatsioon fotode tegemise hetkel salvestati automaatselt fotode metaandmetesse. Andmetöötles kasutati kokku 368 fotot, mis esimese andmetöötlemise sammuna tuli loodud projekti importida. Seejärel joondati fotod, kusjuures joondamisel saab samuti valida 5 täpsusparameetri vahel: „madalaim (*lowest*)“, „madal (*low*)“, „keskmine (*medium*)“, „kõrge (*high*)“ ja „väga kõrge (*ultra high*)“. Küll aga erinevad parameetrite tähendused modelleerimise omadest sisu poolest. Antud juhul jääb parameetriga „kõrge“ fotode resolutsioon samaks ning parameeter „väga kõrge“ suurendab fotode resolutsiooni 4 korda. Parameeter „väga kõrge“ on sobilik, kui uuritav objekt on detailiderohke, kuna see võimaldab tarkvaral lihtsamini leida fotode vahelisi sõlmepunkte. Madalama astme parameetrid aga vähendavad resolutsiooni. Näiteks parameeter „keskmine“ vähendab resolutsiooni 4 korda ning „madalaim“ 64 korda.

Antud töös valiti joondamise täpsusparameetiks „kõrge“ (ehk fotosid joondati kasutades nende originaalresolutsiooni), kuna uuritavaks objektiks on üsnagi ühetaoline tasapind. Joondamise käigus analüüsib tarkvara fotosid ning otsib neilt iseloomulikke punkte (näiteks tee serv, kus toimub järsk värvigradiendi muutus). Järgmise sammuna proovib tarkvara leitud iseloomulikke punkte erinevate fotode vahel kokku sobitada ning leida niimoodi fotode vahelised sõlmepunktid. Selliselt saab määratud uuritava objekti geomeetria, kuna ühte ja sama punkti iseloomustab mitu fotot, mis on tehtud erinevate nurkade alt. Joondamise tulemusena valmib seega hõre punktipilv, mis järgib täpselt (nii täpselt kui modelleerimine võimaldab) objekti geomeetriat (Joonis 19). Kuna koos fotodega imporditi projekti ka kõik metaandmed, siis olid joondamisel abiks nii RTK-GNSS määratud kaamera koordinaadid kui ka inertsiaalanduri määratud orientatsioonid. Tänu neile andmetele toimus joondamise käigus ka loodava hõreda punktipilve georefereerimine otsese georefereerimise meetodikal. Samuti toimus automaatselt kaamera kalibreerimine isekalibreerimise meetodikal.

Järgmise sammuna lisati projekti 12 kontrollpunkti (Joonis 20) ning täpsustati nende asukohad mudelis (Joonis 19), kuna mudel ei ole otsese georefereerimise järgselt ideaalselt täpne (importimise järgselt ilmusid kontrollpunktid mudeli suhtes väikese nihkega). Kokku valiti iga maapealse kontrollpunkti kohta 10 fotot, millel täpsustati kontrollpunkti asukoht. Seejärel tehti projektist kokku 13 koopiat, misjärel kustutati projekti koopiatest mittevajalikud kontrollpunktid. Esimesest koopias kustutati ära kõik kontrollpunktid, teises projektis jäeti alles vaid üks kontrollpunkt, kolmandas kaks kontrollpunkti, jne, kusjuures viimases 13. koopias jäeti alles kõik maapealsed kontrollpunktid. Selline lähenemine tagas, et igas projektis oleksid kõik allesjäänud

maapealsete kontrollpunktide asukohad määratud täpselt samamoodi. Lõpuks optimeeriti loodud hõredate punktipilvede mudelid kaasates projektides olevaid kontrollpunkte. Eelnevalt kirjeldatud töö etapis olid olulised järgmised momendid:

1. Maapealsete kontrollpunktide valikul peaksid need olema jaotatud üle moodsustuala ühtlaselt. Need ei tohiks olla koondatud ühte piirkonda kui kaasatakse väike arv kontrollpunkte.
2. Mudelis, millesse kontrollpunkte ei kaasata, kaamerate asukohtasid optimeerima ei pea, sest uut täiendavat informatsiooni mudelisse ei toodud. Optimeerimise tulemus oleks täpselt sama, mis oli esialgne tulemus.



Joonis 19. Uuritava teelõigu mudel esitatuna hõreda punktipilvena (pealtvaade). Töö projekti on lisatud 12 kontrollpunkti.

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 1	583669.481000	6544784.903000	94.982000	0.005000	0.043447	10	1.766
<input checked="" type="checkbox"/> 2	583766.122000	6544770.839000	94.766000	0.005000	0.053764	10	1.909
<input checked="" type="checkbox"/> 3	583558.097000	6544802.179000	94.840000	0.005000	0.058019	10	1.993
<input checked="" type="checkbox"/> 4	583562.740000	6544819.151000	94.842000	0.005000	0.057218	10	2.011
<input checked="" type="checkbox"/> 5	583763.045000	6544759.035000	94.785000	0.005000	0.051258	10	1.838
<input checked="" type="checkbox"/> 6	583655.177000	6544788.048000	94.989000	0.005000	0.043392	10	1.785
<input checked="" type="checkbox"/> 7	583596.732000	6544801.773000	95.019000	0.005000	0.048039	10	1.864
<input checked="" type="checkbox"/> 8	583727.866000	6544772.668000	94.947000	0.005000	0.040731	10	1.800
<input checked="" type="checkbox"/> 9	583693.062000	6544788.116000	94.776000	0.005000	0.045750	10	1.924
<input checked="" type="checkbox"/> 10	583631.025000	6544784.039000	94.791000	0.005000	0.048474	10	1.811
<input checked="" type="checkbox"/> 11	583635.319000	6544801.084000	94.790000	0.005000	0.050521	10	1.846
<input checked="" type="checkbox"/> 12	583689.169000	6544771.275000	94.779000	0.005000	0.048726	10	1.873
Total Error							
Control points					0.049383		1.870

Joonis 20. Maapealsete kontrollpunktide koordinaadid, veahinnangud ning arvutustesse kaasatud projektsioonide arvud (st fotode hulk, millel kontrollpunkt sai täpselt määratud).

Tehtud töö tulemusena saadi kokku 13 hõreda punktipilve mudelit, millest üks oli arvutatud otsese georefereerimise meetodikal (ilma kontrollpunkte arvutustesse kaasamata) ning 12 integreeritud georefereerimise meetodikal (arvutustesse kaasati erinev hulk kontrollpunkte). Viimase sammuna tuli loodud hõredate punktipilvede baasil arvutada lõplikud kolmnurkmudelid. Mudelid arvutati sügavuskaartide (sügavuskaardid on defineeritud kui pildid, mille iga piksel kujutab värvi asemel piksli kaugust kaamerast; Ulyanov, 2017) meetodikat kasutades valides modelleerimise kvaliteedi parameetriks „keskmine“ (ehk modelleerimisel vähendati fotode originaalresolutsiooni 16 korda). Sarnaselt seati loodavate kolmnurkmudelite polügoonide hulga parameetriks „keskmine“, kusjuures eeldefineeritud valikud on: „madal (*low*)“, „keskmine (*medium*)“ ja „kõrge (*high*)“ (tarkvara hindab polügoonide arvu automaatselt; parameetri arvulise väärtuse saab kasutaja ka ise soovi korral defineerida). Antud parameeter defineerib loodava mudeli detailsuse. Sellised valikud tehti parameetrite jaoks, kuna käesoleva töö tarbeks ei olnud otstarbekas seada kõrgemaid parameetreid. See on tingitud detailse geomeetria puudumisest uuritava alal. Samuti ei ole antud töö esmane eesmärk leida maksimaalne saavutatav täpsus, vaid hinnata täpsuse sõltuvust kontrollpunktidest (st relatiivne täpsuse muutus on olulisem kui absoluutne täpsus).

Ülalkirjeldatud arvutuste tulemusena saadi kokku 13 erinevat kolmnurkmudelit (ühe mudeli näide on toodud Joonisel 21). Kõige lõpuks eksporditi arvutatud mudelid *.obj formaadis, mis säilitab mudelite välisesse tarkvarasse importimisel nende täpse geomeetria.



Joonis 21. Uuritava teelõigu kolmnurkmudel, mille arvutusse kaasati kolm maapealset kontrollpunkti.

4.2 Droonipõhiste kolmnurkmudelite täpsushinnangute arvutamine

MeshLab on vabavaraline tarkvara kolmnurkmudelite töötlemiseks. Tarkvara võimaldab kolmnurkmudelite arvutamist punktipilvedest, loodud mudelite korrigeerimist ja visualiseerimist, aga ka erinevate mudelite vaheliste võrdluste tegemist (Cignoni et al., 2008). Antud töös kasutati tarkvara, et anda täpsushinnangud arvutatud droonipõhiste kolmnurkmudelitele kasutades etalonina laserskaneerimise põhise kolmnurkmudelit. Antud tarkvara valiti kasutusmugavuse ja õppimise kiiruse tõttu, aga ka seepärast et järgmisena kirjeldatav 3DReshaper ei anna täpsushinnanguid.

Täpsushinnangute määramiseks kasutati MeshLab tööriista Metro, mis võimaldab määrata Hausdorffi kauguse printsiibi alusel kahe mudeli vahelise KRV (Cignoni et al., 1998). Selle jaoks võrdleb tarkvara kahte sõlmepunktide osahulka (homogeensed juhuslikud valimid) ning leiab nendevaheliste minimaalsete kauguste suurima kauguse, kusjuures üks ülemhulk on defineeritud kui kõik droonipõhise kolmnurkmudeli sõlmepunktid ja teine kõik skaneerimise põhise kolmnurkmudeli sõlmepunktid. Seejärel arvutab tarkvara leitud Hausdorffi kauguste (defineeritud kui kahe osahulga minimaalsete kauguste suurim kaugus) põhjal KRV:

$$KRV = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}} \quad (5)$$

kus n on osahulkade koguarv ning Δ tähistab määratud Hausdorffi kauguseid kahe võrdluses osaleva kolmnurkmudeli vahel.

Antud töös on eeldatud, et laserskaneerimise põhjal loodud kolmnurkmudel on vigadeta. Seega seati see lähtepinnaks, mille suhtes leiti droonimõõdistuste põhise mudelite vead. Tööriist võimaldab defineerida maksimaalse hälbe (maksimaalne Hausdorffi kaugus, mida arvestatakse) ning osahulkade arvu parameetrid. Kõigi 13 võrdluse korral olid need parameetrid seatud samasuguseks: maksimaalne hälve 0,15 m ja osahulkade arv 1000000. Maksimaalne hälve on seatud selliselt, et elimineerida droonimudelites (tee keskel oleva) pörkepiirde (Joonis 12) mõju KRV hinnangutele.

4.3 Droonipõhiste kolmnurkmudelite vigade visualiseerimine

3DReshaper on veel üks kaasaegne tarkvara, mis on loodud punktpilvede töötlemiseks ja kolmnurkmudelite arvutamiseks (Hexagon 3D Reshaper, 2020). Lisaks võimaldab tarkvara näiteks:

1. 3D animatsioonide loomist
2. Projekteerimist
3. Objekti dimensioonide mõõtmist, mahtude määramist ning profiilide loomist
4. Erinevate objektide vahelisi võrdluseid

Antud töös oli selle tarkvara kasutamise eesmärk droonimõõdistuse põhiste mudelite ja laserskaneerimise põhise mudeli võrdluste visualiseerimine. Tarkvara võrdleb kahte kolmnurkmudelit ning loob nende põhjal erinevuste histogrammi ja uue võrdlusmudeli, mis kujutab kahe mudeli vahelisi erinevuseid sarnaselt tarkvarale MeshLab (3DReshaper visualiseerimisvalikud võimaldavad jooniseid sobivamalt modifitseerida). Küll aga ei anna 3DReshaper konkreetset numbrilist täpsushinnangut võrdluse tulemustele.

5 TULEMUSTE ANALÜÜS

Antud jaotis käsitleb eelkirjeldatud andmete töötamise tulemusena saadud tulemuste analüüsi. Kirjeldatakse drooni- ja laserskanneri põhiste kolmnurkmudelite võrdluseid ning hinnatakse kaamera kalibreerimiskoeffitsiente.

5.1 Droonimõõdistuse põhiste mudelite valideerimine

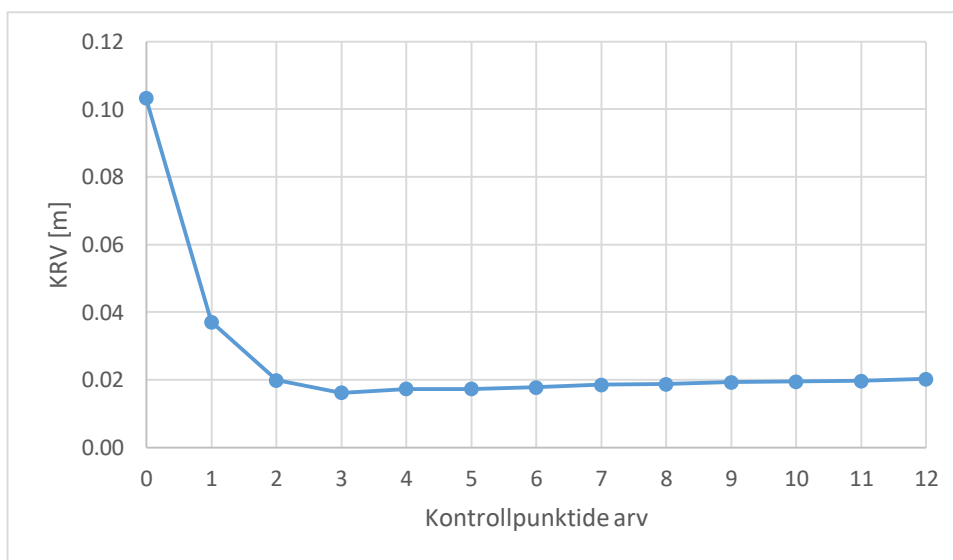
Keskmise ruutvea kasutamine on väga levinud täpsushinnangute andmisel ja seda peetakse reeglina üldotstarbeliseks veamõõduks (Agüera-Vega et al., 2017; James et al., 2017; Tahar, 2013). Samas tasub aga meeles pidada, et see on sobilik parameeter vaid konkreetse muutuja hindamiseks, mitte muutujate vaheliste hinnangute andmiseks, kuna need hinnangud on sõltuvad skaalast (Neill & Hashemi, 2018).

Viimastel aastatel on tehtud palju erinevaid juhtumianalüüse ja hinnatud erinevate maapealsete kontrollpunktide konfiguratsioonide mõju modelleerimise täpsusele. Näiteks Tonkin ja Midgley (2016) varieerivad kontrollpunktide arvu vahemikus 3 kuni 101 intervalliga 16. Uuringu (kasutades kaudse georefereerimise meetodikat) tulemused näitavad, et vertikaalsuunaline KRV jäi vahemikku 5,9–7,6 cm nelja või enamat maapealset kontrollpunkti kasutades, kusjuures modelleerimise täpsus suureneb koos kontrollpunktide arvu suurenemisega. Forlani et al. (2018) keskendus seevastu otsesele georefereerimisele, aga tegi ka katseid integreeritud georefereerimisega. Uuringus näidati, et vähemalt ühe kontrollpunkti lisamine arvutustesse (ehk kasutades integreeritud georefereerimist) võimaldab saavutada vertikaalsuunalise KRV umbes 3 cm.

Senised uuringud, kus kontrollpunktide tihedust ja jaotust on varieeritud märkimisväärselt, on seega näidanud et kontrollpunktide arvu suurenemisega suureneb ka modelleerimise täpsus. Samas ei ole üheselt ära määratud veel piiranguid ega ka parimaid tavasid kontrollpunktide paigutusele (Liao & Wood, 2020). Seega on kontrollpunktide optimaalse arvu ning paigutuse küsimus endiselt lahtine. Käesoleva töö käigus saadud georefereerimise KRV hinnangud (arvutatud alajaotises 4.2 kirjeldatud meetodikat kasutades) on esitatud Tabelis 4 ning Joonisel 22.

Tabel 4. Droonimõõdistuse põhiste mudelite veahinnangud (leitud võrdlustest skaneerimis põhise kolmnurkmudeliga) ning mudelite arvutamisesse kaasatud kontrollpunktid (vt Joonis 11 või 19).

Kasutatud kontrollpunktid	Kontrollpunktide arv	KRV [m]
–	0	0.103
1	1	0.037
1 ja 2	2	0.020
1 kuni 3	3	0.016
1 kuni 4	4	0.017
1 kuni 5	5	0.017
1 kuni 6	6	0.018
1 kuni 7	7	0.019
1 kuni 8	8	0.019
1 kuni 9	9	0.019
1 kuni 10	10	0.019
1 kuni 11	11	0.020
1 kuni 12	12	0.020



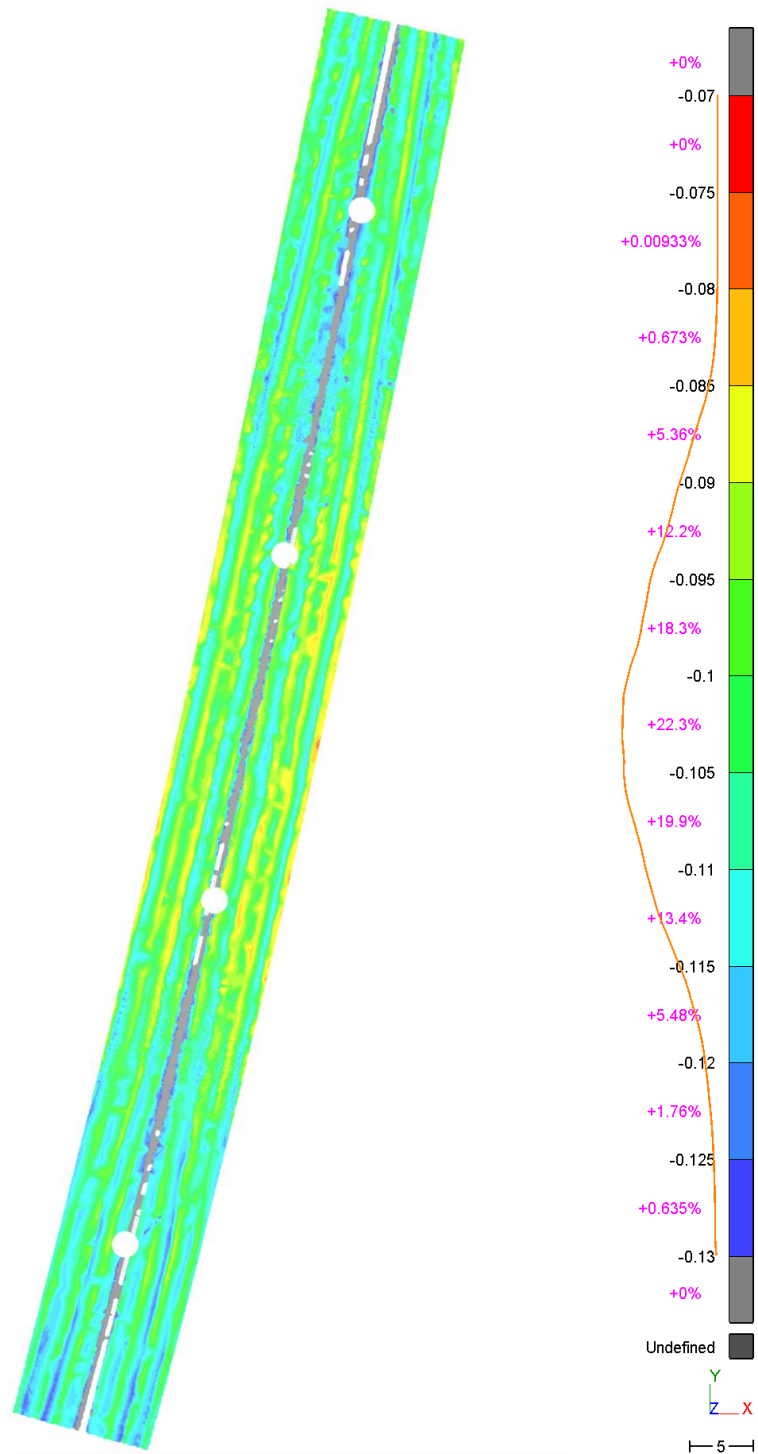
Joonis 22. Droonimõõdistuse põhiste kolmnurkmudelite veahinnangute graafik Tabeli 4 põhjal.

Joonisel 22 esitatud graafikust on näha, et suurim KRV suurusega 10,3 cm kirjeldab droonimõõdistuse põhiste mudelit, mis on arvutatud maapealseid kontrollpunkte kaasamata, ehk siis otsese georefereerimise meetodikal. Kontrollpunktide lisamisega arvutustesse, ehk kasutades integreeritud georefereerimise meetodikat, hakkab KRV

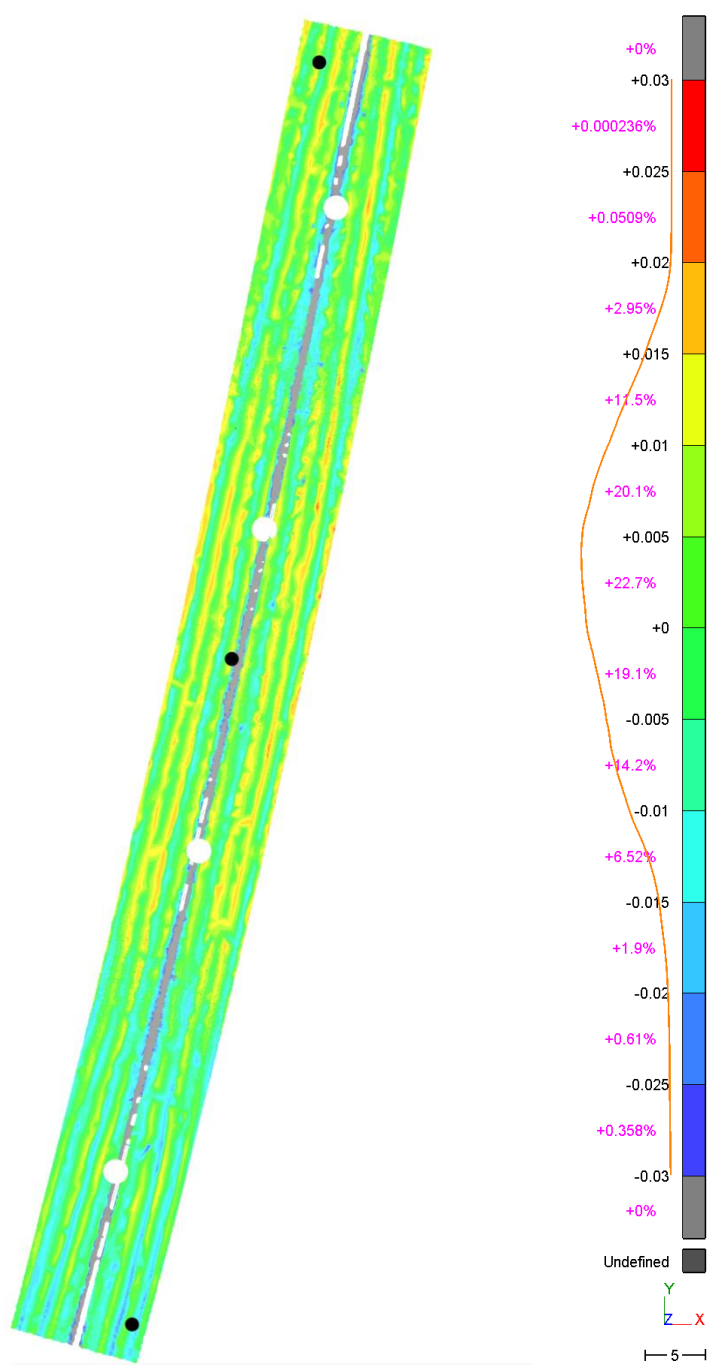
vähemena ning juba ainult kolme kontrollpunktiga jõuab minimaalse väärtuseni 1,6 cm. Antud lahendis kasutatud kontrollpunktide arvu ning paigutust võib seega võrdsustada optimaalse kontrollpunktide arvu ning paigutusega (punktid on jaotatud ühtlaselt, kus üks on mõõdistatava ala keskel ning kaks mõlemal pool otsas – vt Joonis 21). Kusjuures, kui lisada arvutustesse ainult üks maapealne kontrollpunkt, siis väheneb veahinnang 10,3 cm pealt 3,7 cm peale, ehk pea kolm korda.

Jooniselt 22 võib lisaks näha, et kui kaasata arvutustesse rohkem kui kolm kontrollpunkti, siis saavutatav modelleerimise täpsus hakkab ühtlaselt halvenema. See võib olla tingitud asjaolust, et suure hulga kontrollpunktide kaasamisel toimub mudeli ülesobitamine, mis halvendab modelleerimise kvaliteeti täpsuse mõttes (Liao & Wood, 2020). Suurem osa varasemaid kontrollpunktide põhiseid uuringuid on tehtud kasutades kaudset georefereerimist. Antud töö rakendab aga integreeritud georefereerimise meetodikat ehk andmetöötlusesse kaasatakse ka drooni RTK-GNSS määratud andmed. Seega on lähteandeid tunduvalt rohkem kui kaudse georefereerimise korral ning see võib soodustada mudelite ülesobitamist olukorras kus kaasatakse liiga suur hulk maapealseid kontrollpunkte. Tõenäoliselt on see ka põhjus, miks valdav osa varasemaid uuringuid ei ole veel käsitletud sellist probleemi.

Lisaks KRV hinnangutele on oluline uurida modelleerimisel tekkinud vigasid ka visuaalselt (Joonised 23 ja 24 ning Lisa 1). Laserskanneri- ja droonipõhise ilma kontrollpunktideta (otsese georefereerimise meetodikal arvutatud) kolmnurkmudelite võrdlemisel (Joonis 23) on näha, et suurem osa vigadest jääb vahemikku $-8,5$ kuni $-12,0$ cm. Seevastu kui uurida võrdlust mudeliga, mille arvutusse kaasati 3 kontrollpunkti (Joonis 24), jääb suurem osa vigadest vahemikku $+2,0$ kuni $-1,5$ cm. Kui aga analüüsida mudeleid, milles kasutatakse 4 või enam kontrollpunkti (Lisa 1), siis nende puhul jäävad suurem osa vigadest vahemikku $+3,0$ kuni $-1,0$ cm. Seega on selge, et otsese georefereerimise meetodikal arvutatud mudel on võrreldes integreeritud georefereerimise meetodikal arvutatud mudelitega kõrguslikult nihkes. Säärane nihe võib olla tingitud isekalibreerimisel hinnatud fookuskauguse F ebatäpsusest (Taddia et al., 2020; Varbla et al., 2020). Seda on lähemalt uuritud töö järgmises jaotises.



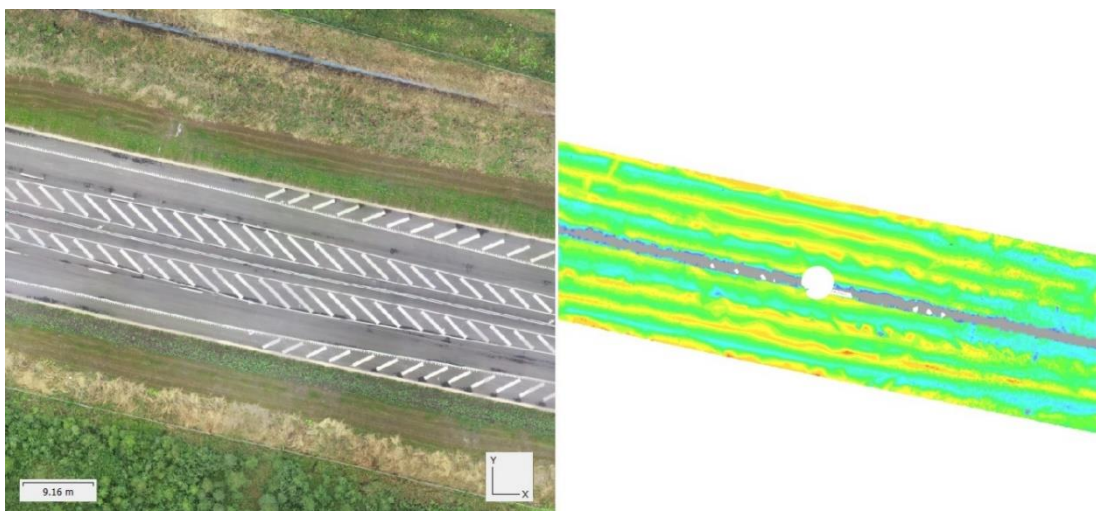
Joonis 23. Otsese georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (st ilma maapealseid kontrollpunkte kaasamata) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 10,3 cm). Droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.



Joonis 24. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse kolm maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,6 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.

Analüüsid Joonist 23 edasi võib märgata, et erinevused teelõigu otstes ($-7,5$ kuni $-8,0$ cm) on väiksemad kui tee keskel ($-10,0$ kuni $-11,0$ cm). Tõenäoliselt on selline hälvete erinevus teelõigu otste ning keskaiga vahel tingitud kaamera radiaalmoonutuse koefitsientide ebatäpsustest. Nii on Joonisel 23 olev kõverdumine radiaalne moonutus, mistõttu on droonimõõdistuse tulemusena saadud mudelisse tekkinud n-ö „kausi efekt“ (Carbonneau & Dietrich, 2016), kus servaalade poole liikudes kõrguste vahe tegelikkusega suureneb. Lisades andmetöötlusesse kontrollpunkte (ehk rakendades integreeritud georefereerimist) antud moonutus kaob.

Jooniseid 23 ja 24 (ning neid Lisas 1) analüüsid võib näha samades kohtades selgelt eristatavaid teelõiguga samasuunalisi jooni. Selliste hälvete, mis jäävad enamasti 2 cm piiresse, tekke tõenäoline põhjus võib olla see, et vahetult enne mõõdistusi värviti teelõigule teekattemärgistus (Joonis 14; Joonisel 18 olev foto on tehtud teistkordse mõõdistamise ajal, mistõttu on seal nähtav märgistus juba määrdunud). Jooniselt 25 võibki näha, et hälbed langevad osaliselt kokku teekattemärgistusega. Selline probleem võib ilmneda nimelt seetõttu, et fotodelt ei ole tuvastatav teekattemärgistuse tekstuur. Teekattemärgistus jääb fotodele lihtsalt valgete pindadena. Seega on arvutusalgortimidel keeruline õigesti modelleeritud geomeetria luua, kuna piltide vahel on ühiseid punkte keeruline leida (Varbla et al., 2020). Siin tuleks arvesse võtta ka asjaolu, et modelleerimisel valiti kvaliteedi parameetrik „keskmine“, ehk modelleerimise käigus vähendati fotode originaalresolutsiooni 16 korda. Võib eeldada, et kui kvaliteedi parameeter oleks valitud kõrgem, siis oleksid sellised hälbed mudelites väiksemad. Mudeleid analüüsid võiks aga öelda, et uuritava objekti materjal ning seega tekstuur näib mõjutavat oluliselt modelleerimise täpsust. Kuigi ka laserskaneerimise täpsust mõjutab mõõdistatava pinna tekstuur, siis antud juhul skaneerimise põhises mudelis selliseid hälbeid ei esine.



Joonis 25. Võrdlus ortofotomosaiigi (Joonis 11) ning võrdlusmudeli (vt Joonis 24) vahel.

5.2 Kaamera kalibreerimiskoeffitsientide hindamine

Kaamera kalibreerimise ülesanne on saada täpsed matemaatilised seosed 3D ruumipunktide ja nende 2D projektsioonide vahel, ehk siis leida kalibreerimiskoeffitsientide väärtused mis kirjeldaksid mudelisse sisestatud eelmainitud seost (Forlani et al., 2020). Antud töös on rakendatud kaamera isekalibreerimist, mille Agisoft Metashape teostab piltide joondamise töötapi käigus automaatselt (juhul kui ei anta ette juba varem määratud koeffitsiente). Tabelites 5 ja 6 on esitatud kõikide 13 loodud mudeli isekalibreerimise käigus määratud kaamera kalibreerimiskoeffitsiendid. Iga koeffitsiendi väärtuste sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust on esitatud ka vastavatel graafikutel (Joonised 26, 27 ja 28 ning Lisa 2). Edasi on lähemalt analüüsitud fookuskauguse F ning radiaalse moonutuse koeffitsientide K_1 ja K_2 sõltuvust kontrollpunktide arvust, kuna need on kõige suuremat mõju omavad koeffitsiendid.

Tabel 5. Kaamera kalibreerimiskoeffitsiendid. Numbrid esimeses veerus näitavad maapealsete kontrollpunktide arvu igas mudelis.

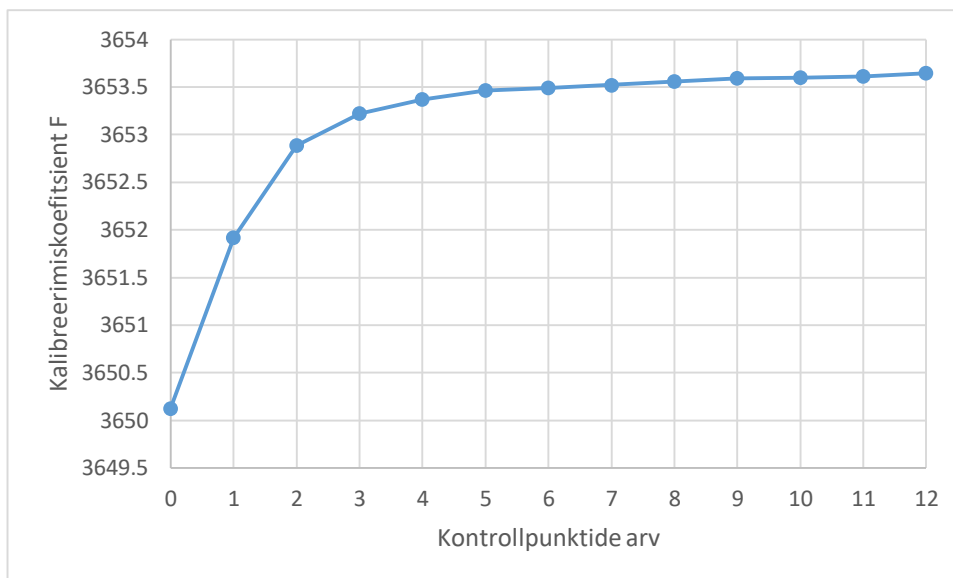
	F	K_1	K_2	K_3	K_4	C_x
0	3650.12185	-0.265689	0.103997	-0.0273259	-	-25.9279
1	3651.91916	-0.267789	0.115733	-0.0462583	0.00924482	-27.5882
2	3652.88828	-0.268075	0.116147	-0.0465653	0.00933016	-27.5862
3	3653.22376	-0.268217	0.116334	-0.0466956	0.00936496	-27.5889
4	3653.37089	-0.268290	0.116434	-0.0467684	0.00938519	-27.5895
5	3653.46551	-0.268301	0.116455	-0.0467868	0.00939070	-27.5904
6	3653.49368	-0.268312	0.116464	-0.0467890	0.00939019	-27.5884
7	3653.52175	-0.268331	0.116485	-0.0468011	0.00939287	-27.5862
8	3653.55940	-0.268331	0.116487	-0.0468035	0.00939363	-27.5862
9	3653.59320	-0.268343	0.116508	-0.0468215	0.00939921	-27.5858
10	3653.60007	-0.268348	0.116515	-0.0468273	0.00940139	-27.5848
11	3653.61364	-0.268356	0.116524	-0.0468329	0.00940284	-27.5837
12	3653.64648	-0.268364	0.116537	-0.0468437	0.00940627	-27.5817

Tabel 6. Kaamera kalibreerimiskoeffitsiendid. Numbrid esimeses veerus näitavad maapealsete kontrollpunktide arvu igas mudelis.

	C_y	P_1	P_2	B_1	B_2
0	-7.72601	0.000804236	-0.0002982360	-	-
1	-11.3710	0.000778321	-0.0001675300	0.821771	-0.194869
2	-12.8971	0.000777950	-0.0001250460	1.109790	-0.192537
3	-13.4867	0.000777249	-0.0001022060	1.280980	-0.187890
4	-13.7489	0.000776880	-0.0000912377	1.365020	-0.185725
5	-13.8714	0.000776907	-0.0000902550	1.364200	-0.185697
6	-13.9237	0.000776861	-0.0000880593	1.381690	-0.184833
7	-13.9830	0.000776789	-0.0000846799	1.409340	-0.184026
8	-14.0288	0.000776730	-0.0000848358	1.404550	-0.183848
9	-14.0746	0.000776701	-0.0000836475	1.411450	-0.183683
10	-14.0929	0.000776664	-0.0000824228	1.421470	-0.183210
11	-14.1194	0.000776653	-0.0000810361	1.432730	-0.182841
12	-14.1677	0.000776666	-0.0000799660	1.439290	-0.182983

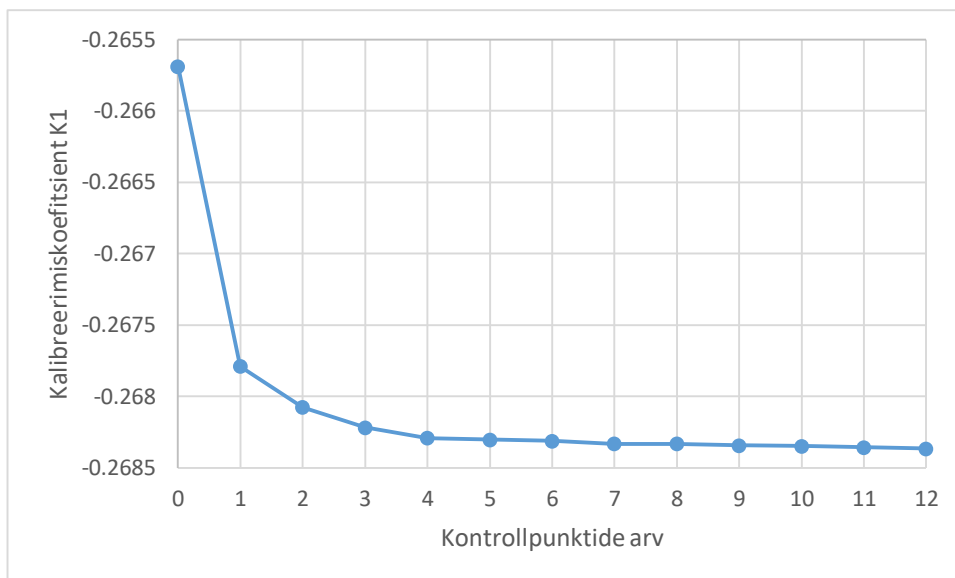
Kalibreerimiskoeffitsientide tähised (Agisoft System Requirements, 2021):

- F – Fookuskaugus (pikslites)
- K_i – Radiaalse moonutuse koeffitsiendid
- C_x, C_y – Peapunkti nihe pildi keskpunkti suhtes (pikslites)
- P_i – Tangentsiaalse moonutuse koeffitsiendid
- B_1, B_2 – Afiinsuse ja mitteortogonaalsuse (viltususe) koeffitsiendid

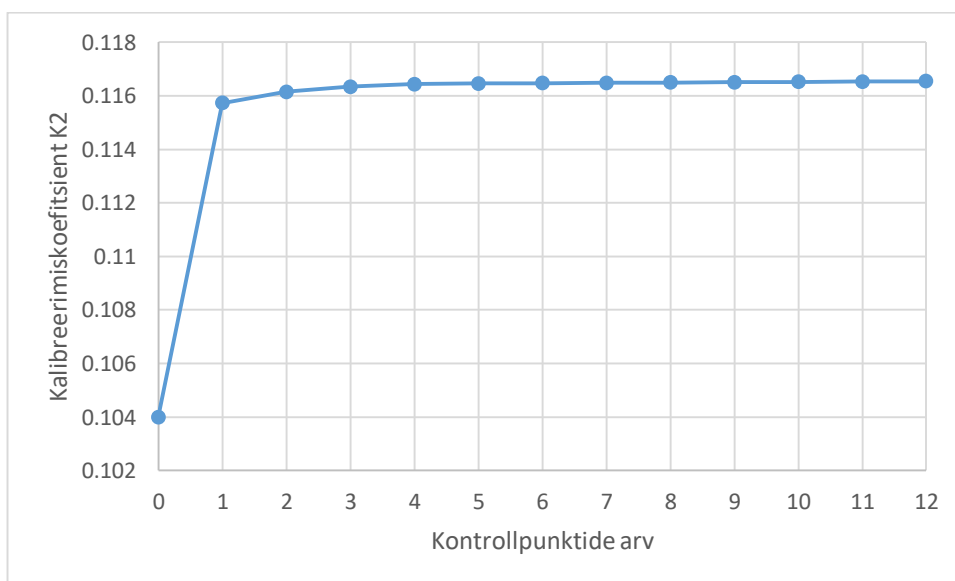


Joonis 26. Fookuskauguse F (pikslites) sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.

Tabelis 5 ning Joonisel 26 on esitatud fookuskauguse sõltuvus andmetöötles kasutatud maapealsete kontrollpunktide arvust. Kui võrrelda Joonist 26 Joonistega 22 kuni 24 (ning nendega Lisas 1) on nähtav seos kõrgusliku nihke ning fookuskauguse F vahel. Nii toimub ühe kontrollpunkti andmetöötlesse lisamisega kõige suurem muutus koefitsiendi F väärtuses sarnaselt varem kirjeldatud KRV hinnanguga. Lisaks näib Joonise 26 põhjal, et kuni 4 kontrollpunkti kasutamisega muutub koefitsient F kiiresti, kuid kui kasutada enam kui 4 kontrollpunkti, siis on edasine muutus ühtlane aga samasuunaline. Kui meenutada alajaotises 5.1 esitatud tulemusi, siis optimaalne lahend saavutati kasutades kolme maapealset kontrollpunkti. Enam kui kolme kontrollpunkti kasutades hakkas aga saavutatav täpsus langema (ehk graafiku liikumise suunas toimus muutus).



Joonis 27. Radiaalse moonutuse koefitsiendi K_1 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.



Joonis 28. Radiaalse moonutuse koefitsiendi K_2 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.

Tabelis 5 ning Joonistel 27 ja 28 on toodud radiaalse moonutuse koefitsientide K_1 ja K_2 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust. Vaadeldes esmalt koefitsiendi K_1 käitumist, mille ebatäpsused tingivad radiaalse moonutuse, siis võib näha sarnaseid tendentse võrdluses fookuskauguse F väärtustega. Kuni 4 kontrollpunkti kasutamisega muutub koefitsient K_1 kiiresti, kuid kui kasutada enam kui 4 kontrollpunkti, siis on edasine muutus ühtlane aga samasuunaline. Tasub mainimist, et valdav osa koefitsiendi väärtuse muutusest toimub kui lisada arvutustesse üks kontrollpunkt (koefitsient F muutus aeglasemalt). Seevastu koefitsient K_2 käitub võrdluses K_1 -ga natukene teisiti.

Lisades arvutustesse vaid ühe kontrollpunkti toimub koefitsiendi väärtuses suur muutus, peale mida püsib koefitsient võrdlemisi stabiilne täiendavate kontrollpunktide lisamisega. Kui vaadelda uuesti Jooniseid 23 ja 24 (ning neid Lisas 1), siis võib näha, et „kausi efekt“ mõjutab suuresti vaid otsese georefereerimise meetodikal arvutatud mudelit, ehk kui lisada arvutustesse üks kontrollpunkt, siis „kausi efekt“ (radiaalne moonutus) kaob pea täielikult mudelitest.

Ülejäänud kalibreerimiskoefitsiendid, mille graafikud on esitatud Lisas 1, käituvad sarnaselt koefitsientidele F , K_1 ja K_2 . Koefitsientide analüüsi põhjal võiks öelda, et radiaalne moonutus on mudelitest suuresti eemaldatud kui lisada arvutustesse üks kontrollpunkt ning vertikaalne nihe kaob kui lisada 4 kontrollpunkti. Seega on kalibreerimiskoefitsientide põhjal hinnatud optimaalne kontrollpunktide arv 4 (KRV põhjal hinnati optimaalseks kontrollpunktide arvuks 3). Kuni nelja kontrollpunktiga muutuvad koefitsientide väärtused kiiresti, kuid rohkem kui nelja kontrollpunktiga asendub väärtuste kiire muutus ühtlase aeglase muutusega või siis stabiliseerub muutus täiesti. Seega saab järeldada, et kaamera kalibreerimiskoefitsiendid muutuvad sarnaselt droonipõhiste kolmnurkmudelite KRV hinnangutele (vt Joonis 22). Saadud võrdlus viitab sellele, et kaamera kalibreerimiskoefitsientide käitumise põhised hinnangud on sobivad optimaalsete maapealsete kontrollpunktide lahendite otsimisel.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö esimeseks eesmärgiks oli uurida, kuidas sõltub integreeritud georefereerimise täpsus fotogrammeetrilisse andmetöötlusesse kaasatavate maapealsete kontrollpunktide arvust. Töö teine eesmärk oli aga uurida, kas kaamera kalibreerimiskoeffitsientide põhjal saab hinnata optimaalset kontrollpunktide arvu.

Tee-ehituslik katselõik, mis oli käesolevas töös uuringuobjektiks, asub Järvemaal Võõbu külas Tallinn–Tartu–Võru–Luhamaa maantee (E263) kilomeetrite 67,076 kuni 67,256 vahel. Teelõigu stabiilsuse uurimiseks paigaldatud asfaldinaeltest kasutati antud töös 12 maapealsete kontrollpunktidenä georefereerimiseks. Asfaldinaelad on koordineeritud Trimble S6 robottahhümeetriga, kus mõõtmiste baas määrati RTK-GNSS mõõtmistega kasutades Trimble R8-t. Ülejäänud vajalike andmete saamiseks kasutati digitaalnivelliiri Trimble DiNi 0.3 (asfaldinaelte kõrguste määramiseks), laserskannerit Leica ScanStation C10 (teelõigu etalon kolmnurkmudeli loomiseks) ning drooni DJI Phantom 4 RTK (käesolevas töös kasutatud olulisimate lähteandmete – fotode – tegemiseks).

Fotogrammeetrilise modelleerimise tulemusena saadi teelõigust 13 erinevat kolmnurkmudelit, kus on varieeritud kontrollpunktide arvu ning paigutust (paigutusel prooviti tagada kontrollpunktide ühtlane jaotus): 1 mudel otsese georefereerimise meetodikal (st ilma kontrollpunkte arvutustesse kaasamata) ja 12 integreeritud georefereerimise meetodikal (kontrollpunkte lisati mudelitesse ühekaupa). Saadud mudelid valideeriti kasutades laserskaneerimise põhise etalon kolmnurkmudelit. Arvutati välja mudelite KRV hinnangud ning koostati hälbejoonised.

KRV hinnangute analüüsi tulemusena selgus, et antud töös on optimaalne kontrollpunktide arv 3, kusjuures KRV hinnang on sellisel juhul 1,6 cm (Tabel 4 ja Joonised 22 ning 24). Kontrollpunktid on jaotatud ühtlaselt: kaks on asetatud uurimisala otstesse ning üks keskele (vt Joonis 24; st kontrollpunktid paiknevad teineteise suhtes umbes 100 m vahedega). Seevastu kirjeldab suurim määratud KRV suurusega 10,3 cm droonimõõdistuse põhise mudelit, mis on arvutatud maapealseid kontrollpunkte kaasamata, ehk otsese georefereerimise meetodikal (Tabel 4 ja Joonised 22 ning 23). Kontrollpunktide lisamisega arvutustesse, ehk kasutades integreeritud georefereerimise meetodikat, hakkab KRV vähenema ning juba ainult kolme kontrollpunktiga jõuab eelmainitud minimaalse väärtuseni 1,6 cm. Peale seda hakkavad KRV väärtused täiendavate kontrollpunktide lisamisega ühtlaselt kasvama. See võib olla tingitud asjaolust, et kui arvutustesse kaasatakse suur hulk kontrollpunkte, toimub mudeli üleliigne sobitamine, mis halvendab mudeli kvaliteeti täpsuse mõttes. Oluline on veel

mainida, et vaid ühe kontrollpunkti kasutamine arvutustes parandab tulemusi märkimisväärselt (ligi kolm korda). Seega oleks soovituslik RTK-GNSS droone rakendades mõõdistustel kasutada vähemalt ühte maapealset kontrollpunkti.

Tulemuste analüüsist võib veel näha, et otsese georefereerimise tunduvalt halvema täpsushinnangu põhjustavad ebatäpsused kaamera kalibreerimiskoeffitsientides (Tabel 5 ja 6 ning Joonised 26 kuni 28). Need ebatäpsused põhjustavad nii kõrgusliku nihke (isekalibreerimisel hinnatud fookuskauguse F ebatäpsuse tõttu) kui ka mudeli kõverdumise ehk n -ö „kausi efekti“ (radiaalmoonutuse koeffitsientide K_i ebatäpsuste tõttu). Eelmainitud moonutused vähenevad või kaovad kontrollpunktide lisamisega arvutustesse. See avaldub kalibreerimiskoeffitsientide stabiliseerumisega lisades täiendavaid kontrollpunkte (muutused koeffitsientide väärtustes on sellisel juhul kas väikesed või kaovad täielikult). Saadud võrdlused viitavad sellele, et ainult mõne üksiku kontrollpunkti lisamine arvutustesse täpsustab isekalibreerimist, samas kui kasvav kontrollpunktide arv ei muuda tulemust oluliselt. Seega muutuvad kaamera kalibreerimiskoeffitsientide väärtused sarnaselt droonipõhiste kolmnurkmudelite KRV hinnangutega. Võib järeldada, et kaamera kalibreerimiskoeffitsientide põhjal saab seega hinnata optimaalset kontrollpunktide arvu, kusjuures antud töös oli selleks hinnanguks 4 (KRV põhjal hinnati optimaalseks kontrollpunktide arvuks 3).

Magistritöös käsitletud teematikat on võimalik edasi uurida ning uurimistulemuste täpsust ja usaldusväärsust kontrollida kasutades droonide põhiste fotogrammeetrilist modelleerimist erineva profiiliga maastikel ning laiendades uurimispiirkonda. Käesolev töö keskendus võrdlemisi väikesele joonobjektile pikkusega umbes 200 m, kusjuures droonimõõdistuseks kulus umbes 20 minutit. Seega võiks edaspidistes uuringutes keskenduda kas pikematele joonobjektidele või suurematele maa-aladele, et selgitada välja, kas käesolevas töös leitud tendentsid peavad ka siis paika. Nii võiks näiteks uurida, kas 400 m pikkuse joonobjekti täpseks georefereerimiseks on piisav 5 maapealse kontrollpunkti arvutustesse kaasamine (hinnates kontrollpunktide vaheliseks kauguseks umbes 100 m sarnaselt käesolevale tööle). Huvitav oleks ka uurida, kuidas mõjutavad mõõdistustäpsust erinevad ilmastikutingimused. Lisaks saaks suurendada ühest piirkonnast loodavate mudelite arvu veelgi, et täpsemalt analüüsida modelleerimise täpsuse sõltuvust erinevate parameetrite varieerimisest (näiteks täpsuse sõltuvus modelleerimise kvaliteedi parameetrist).

Lõpetuseks tuleb lisaks veel märkida, et töö tulemuste analüüs viitab sellele, et vähese tekstuuriga pinnad võivad tekitada modelleerimisel vigasid. See probleem võib laheneda tulevikus, kuna fotogrammeetria andmetöötlustarkvarade algoritme arendatakse

pidevalt. Samuti on tõenäoline, et mõni muu tarkvara (peale antud töös kasutatud Agisoft Metashape'i) võib anda täpsema tulemuse vähese tekstuuriga pindade modelleerimisel. Ka võib modelleerimist parandada täiendavate lähifotode tegemine sellistest pindadest (et vähene tekstuur oleks paremini nähtav) või andmetöötluse käigus kõrgemate modelleerimisparameetrite valik (antud töös kasutati modelleerimisel kvaliteedi parameetrit „keskmine“ ehk fotode originaalresolutsiooni vähendati 16 korda). Ka vähese tekstuuriga pindade modelleerimist tasub edaspidi lähemalt uurida.

SUMMARY

Two aims were set for the current thesis. The first one was to investigate how the accuracy of integrated georeferencing depends on the number of ground control points involved in photogrammetric data processing. The second aim of the work was to investigate whether the optimal number of control points can be estimated based on the camera's calibration coefficients.

The road construction test section, which was the object of research in this work, is located in Vööbu village, Järva County, between kilometers 67.076 and 67.256 of the Tallinn–Tartu–Võru–Luhamaa highway (E263). From a network of survey nails installed into the asphalt of the test section to investigate its stability, 12 were used for georeferencing purposes as ground control points. The survey nails are coordinated with a Trimble S6 robotic total station, whereby the measurement base was determined with RTK-GNSS measurements using a Trimble R8. The Trimble DiNi 0.3 digital level (for determining the heights of survey nails), the Leica ScanStation C10 laser scanner (for creating an etalon triangle mesh model of the road section) and the DJI Phantom 4 RTK drone (for collecting the image data used in this work) were used to obtain the remaining necessary data.

Photogrammetric modeling resulted in 13 different triangle mesh models of the road section, whereby a varying number and location of ground control points were used (layout of ground control points aimed to always ensure an even distribution). One model was compiled using the direct georeferencing methodology (i.e., without including ground control points into the computations) and 12 by using the integrated georeferencing methodology (ground control points were added to the models' solutions one by one). The computed models were then validated using the laser scanning based etalon triangle mesh model. The drone-based triangle mesh models' RMSE (root mean square error) estimates were calculated and the deviation maps with respect to the etalon model were compiled.

The analysis of RMSE estimates revealed that the optimal number of control points in this work is 3, whereby the RMSE estimate in this case is 1.6 cm (Table 4 and Figures 22 and 24). The ground control points are evenly distributed: two at the ends of the road section and one in the middle (Figure 24; distance between the ground control points is roughly 100 m). In contrast, the largest determined RMSE of 10.3 cm describes a model computed without the inclusion of ground control points, i.e., by using the direct georeferencing methodology (Table 4 and Figures 22 and 23). By adding ground control points to the calculations, i.e., by using the integrated georeferencing methodology, the

RMSE starts to decrease and with the inclusion of only three ground control points reaches the aforementioned minimum value of 1.6 cm. When additional ground control points are then added to the computations, the RMSE values start to increase slightly. This may be due to the fact that if a large number of ground control points are included in the computations, the model will be overfit, which will degrade the accuracy of the modelling solution. It is also important to mention that the accuracy of the results improves significantly by using only one ground control point (almost three times). Thus, it is recommended to utilise at least one ground control point during RTK-GNSS equipped drone surveys.

Further analysis of the results suggests that the significantly worse accuracy estimate of direct georeferencing based model is caused by inaccuracies within the camera calibration coefficients (Tables 5 and 6 and Figures 26 to 28). These inaccuracies cause both an offset of the model (due to the inaccuracy of the focal length F estimated by the self-calibration procedure) and a radial distortion originating "bowl effect" (due to inaccuracies of the coefficients K_i). The comparisons obtained show that the inclusion of only a few ground control points into the computations refines the camera self-calibration, whilst the increasing number of ground control points does not significantly change the values of the coefficients. Thus, the values of the camera's calibration coefficients change similarly to the RMSE estimates of the drone-based triangle mesh models. It can be concluded that the optimal number of ground control points can thus be estimated on the basis of the calibration coefficients of the camera, whereby in this work the estimated optimal number was 4 ground control points (recall that the optimal number of ground control points estimated on the basis of RMSE was 3).

The topics covered in this master's thesis can be further studied and the accuracy and reliability of the research results can be confirmed by using drone-based photogrammetric modeling on landscapes with different profiles and expanding the research area. The present work focused on a relatively small object with a length around 200 m, whereby the drone survey took around 20 minutes. Thus, future research could focus on either longer line features or larger areas to determine if the trends found in this work are still valid. Thus, for example, it could be investigated whether the inclusion of 5 ground control points is sufficient for accurate georeferencing of a 400 m long line object (similarly to the present work the distance between ground control points would be around 100 m). It would also be interesting to study how different weather conditions affect the resulting modelling accuracy. In addition, the number of models generated from one region could be further increased to analyze the modelling accuracy dependence on the variation of different parameters (e.g., the dependence of accuracy on a modeling quality parameter).

It should also be noted that the analysis of the results suggests that low-textured surfaces may cause modeling errors. This problem may be solved in the future as algorithms for photogrammetric data processing are constantly being developed. It is also likely that software other than Agisoft Metashape used in this work may provide more accurate results when modeling low-textured surfaces. Modeling can possibly be also improved by including additional close-up photos of such low-textured surfaces into the computations (so that the texture is more distinguishable) or by choosing higher modeling parameters during the data processing (the quality parameter “medium” was used in this work, i.e., the original resolution of the photos was reduced 16 times). The modeling of low-textured surfaces is also worth of further studying.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

Agisoft System Requirements. (2021).

https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf

Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. – *Measurement*, 221-227.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>

Börlin, N., & Grussenmeyer, P. (2014). Camera Calibration using the Damped Bundle Adjustment Toolbox. Conference: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. Volume: II-5, 89-96. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-89-2014>

Carbonneau, P.E., & Dietrich, J.T. (2016). Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. – *Earth Surface Processes and Landforms*, 473-486.

<https://doi.org/10.1002/esp.4012>

Cignoni, P., Rocchini, C., & Scopigno, R. (1998). Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces. – *Computer Graphics forum*, Volume 17, number 2 pp. 167-174.

<https://doi.org/10.1111/1467-8659.00236>

Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, F., Ganovelli, F., & Ranzuglia, G. (2008). MeshLab : an Open-Source Mesh Processing Tool. - Eurographics Italian Chapter Conference.

<http://dx.doi.org/10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136>

Douterloigne, K., Gautama, S., & Philips, W. (2009). Fully automatic and robust UAV camera calibration using chessboard patterns. - *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5418141>

Drooniäpp. (2021).

https://drooni.app/?fbclid=IwAR1rcaNIU_fXyxR6txaGA2On6BDyhP5Kp_bKyveLlhbT9ZG98M3AGEF1Duw

Eugster, H. (2011). Echtzeit-Georegistrierung von Videodaten mit Hilfe von Navigationssensoren geringer Qualität und digitalen 3D-Landschaftsmodellen. [Phd, Humboldt-Universität zu Berlin, Germany]. http://www.ion.ch/media/navigare11/pdf/04-Eugster_Navigare2011.pdf

Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., Morra di Cella, U., Roncella, R., & Santise, M. (2018). Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning. - *Remote Sens*, 10(2), 311. <https://doi.org/10.3390/rs10020311>

Forlani, G., Diotri, F., Morra di Cella, U., & Roncella, R. (2020). UAV block georeferencing and control by on-board gnss data. - *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2020, 9–16. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-9-2020>

Forsman, J., Dettenborn, T., Skepast, P., Mets, M., Olep, M., Ellmann, A., ... Kontson, K. (2016). Road Embankment Test Sections over Soft Peat Layer, Võõbu, Estonia. *The 13th Baltic Sea Region Geotechnical Conference Historical Experience and Challenges of Geotechnical Problems in Baltic Sea Region: The 13th Baltic Sea Region Geotechnical Conference Historical Experience and Challenges of Geotechnical Problems in Baltic Sea Region*, 2424-5976. <https://doi.org/10.3846/13bsgc.2016.046>

Gerke, M., & Przybilla, H. J. (2016). Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns. - *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation Jahrgang*, 17-30. <https://doi.org/10.1127/pfg/2016/0284>

Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. - *Progress in Aerospace Sciences*, 99-131. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

Hastedt, H., & Luhmann, T. (2015). Investigations on the quality of the interior orientation and its impact in object space for UAV photogrammetry. - *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W4, 321–328. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-321-2015>

Heipke, C., Jacobsen, K., & Wegmann, H. (2002). Analysis of the Results of the OEEPE Test Integrated Sensor Orientation. - *Integrated sensor orientation; test report and workshop proceedings*, 43, 31-52.

Huul, K. (2016). Drooni fotogramm-meetria rakendamise kõrgusmudelite ja ortofotode loomiseks Raadi karjääri näitel. [Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool]. TÜ Raamatukogu Digikogu. <http://dspace.ut.ee/handle/10062/52945?locale-attribute=de>

James, M. R., & Robson, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Process and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>

James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., & Niethammer, U. (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. - *Geomorphology*, 51-66. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>

Jaud, M., Passot, S., Allemand, P., Le Dantec, N., Grandjean, P., & Delacourt, C. (2018). Suggestions to Limit Geometric Distortions in the Reconstruction of Linear Coastal Landforms by SfM Photogrammetry with PhotoScan® and MicMac® for UAV Surveys with Restricted GCPs Pattern. - *Drones 2019*, 3(1), 2. <https://doi.org/10.3390/drones3010002>

Julge, K., Ellmann, A., & Köök, R. (2019). Unmanned Aerial Vehicle Surveying For Monitoring Road Construction Earthworks. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 14(1):1-17. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2019-14.430>

Leica ScanStation C10. The All-in-One Laser Scanner for Any Application . (2011). https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/ScanStation%20C10/brochures-datasheet/Leica_ScanStation_C10_DS_en.pdf

Liao, Y., & Wood, R. L. (2020). Discrete and Distributed Error Assessment of UAS-SfM Point Clouds of Roadways. - *Infrastructures*, 5(10), 87. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5100087>

Li, D., Liu, J., Feng, L., Zhou, Y., Liu, P., & Chen, Y. F. (2020). Terrestrial laser scanning assisted flatness quality assessment for two different types of concrete surfaces. - *Measurement*, 154, 107436. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107436>

Losè, L. T., Chiabrando, F., & Tonolo, F. G. (2020). Boosting the Timeliness of UAV Large Scale Mapping. Direct Georeferencing Approaches: Operational Strategies and Best Practices. - *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), 578. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100578>

Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F-J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F-J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. - *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>

Martínez-Carricondo, P., Carvajal-Ramírez, F., Yero-Paneque, L., & Agüera-Vega, F. (2019). Combination of nadiral and oblique UAV photogrammetry and HBIM for the virtual reconstruction of cultural heritage. Case study of Cortijo del Fraile in Níjar, Almería (Spain). - *Building Research & Information*, 140-159. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1626213>

Mitin & Nikolsky (2013): Митин, М. Д., Никольский, Д. Б. (2013). Современные тенденции развития отрасли беспилотных летательных аппаратов. - *Геоматика* (27-31).

Neill, S. P., & Hashemi, M. R. (2018). Chapter 8 - Ocean Modelling for Resource Characterization. - *Fundamentals of Ocean Renewable Energy. Generating electricity from the sea*, 193-235. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810448-4.00008-2>

Nesbit, P. R., & Hugenholtz, C. (2019). Enhancing UAV-SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images. - *Remote Sensing*, 11(3), 239. <https://doi.org/10.3390/rs11030239>

Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. - *Applied Geomatics*, 6, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>

Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., & Saleri, R. (2013). Accuracy and block deformation analysis in automatic UAV and terrestrial photogrammetry - Lesson learnt. - *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W1, 203-208. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-203-2013>

Pentjärv, A. (2019). Droonifotode otsene georefereerimine Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni abil. Direct Georeferencing of UAV imagery using Helmert Three-Dimensional Transformation. [Magistritöö, Tartu Ülikool]. TÜ Raamatukogu Digikogu. <http://dspace.ut.ee/handle/10062/65029?locale-attribute=et>

Peppas, M. V., Hall, J. M., Goodyear, J., & Mills, J. P. (2019). Photogrammetric assessment and comparison of DJI Phantom 4 Pro and Phantom 4 RTK small unmanned aircraft systems. - *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, XLII (2/W13), 503–509. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-503-2019>

Pesci, A., Teza, G., Bonali, E., Casula, G., & Boschi, E. (2013). A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations. - *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 79, 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.021>

Pejić, M., 2013. Design and optimisation of laser scanning for Tunnels geometry Inspection. - *Tunnelling and underground space technology*, 37, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.04.004>

Przybilla, H. J., Baumker, M., Luhmann, T., Hastedt, H., & Eilers, M. (2020). Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for RTK-based UAV photogrammetry. - *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2020, 485–492. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-485-2020>

Pfeifer, N., Briese, C., & Glira, P. (2012). Direct georeferencing with on board navigation components of light weight UAV platforms. - *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B7, 487–492. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-487-2012>

PHANTOM 4 RTK Specs. (2018). <https://www.dji.com/ee/phantom-4-rtk/info#specs&Phclickrefb=1101ldNtTCgi>

Pik, S. (2015). Drooniga lendamise piirangud Eestis. Keelualad, kontrollitav õhuruum ja lennuloa taotlemine. *Photopointi ajaveeb*.

Taddia, Y., Stecchi, F., & Pollegrielli, A. (2020). Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode. - *Drones*, 4(2), 9. <https://doi.org/10.3390/drones4020009>

Tahar, K.N. (2013). An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block. - *The International Archives of the*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-2/W2, 93–98.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-2-W2-93-2013>

Tonkin, T.N., & Midgley, N. G. (2016). Ground-Control Networks for Image Based Surface Reconstruction: An Investigation of Optimum Survey Designs Using UAV Derived Imagery and Structure-from-Motion Photogrammetry. - *Sensors*, 8(9), 786.
<https://doi.org/10.3390/rs8090786>

Transpordiamet. (2016). Mehitamata õhusõidukid, sealhulgas droonid. Tsoon 9.
<https://www.ecaa.ee/et/lennundustehnika-ja-lennutegevus/mehitamata-ohusoidukid-sealhulgas-droonid/tsoon-9>

Trimble DiNi. Digital Level. (2013).
<https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2019-03/Datasheet%20-%20DiNi%20Digital%20Level%20-%20English%20A4%20-%20Screen.pdf>

Ulyanov, S. (2017). Разработка системы стереозрения для мобильного робота. – *Программные продукты и системы*, 435-438. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.119.435-438>

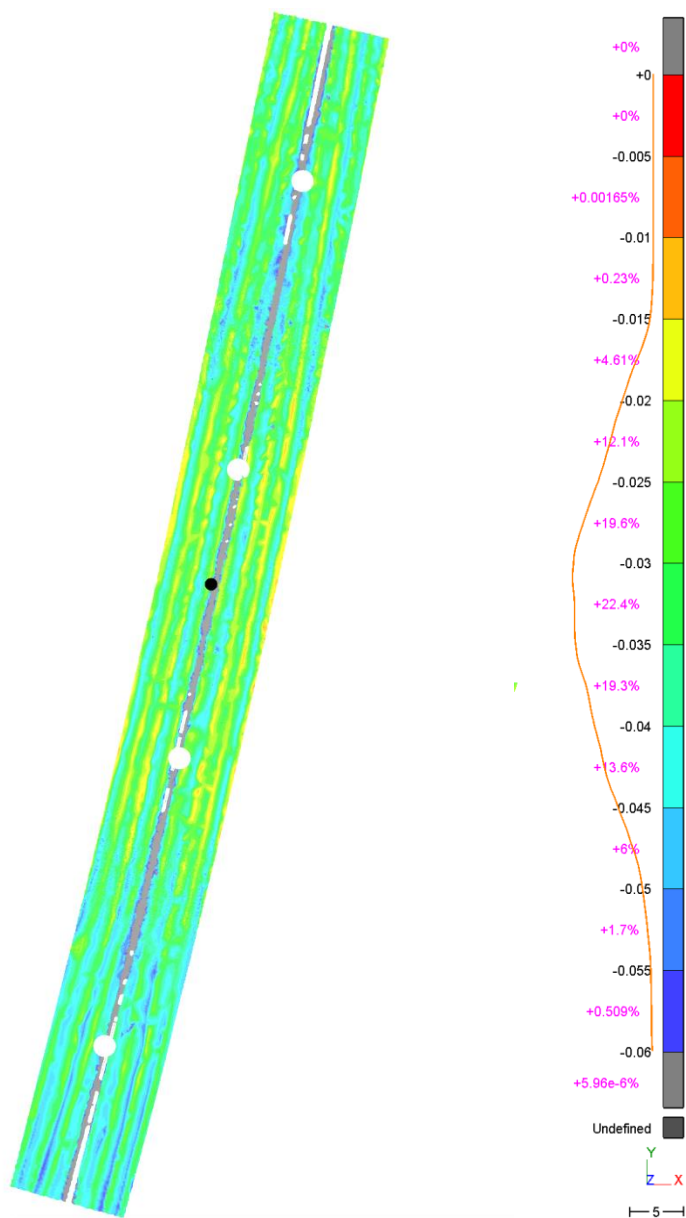
Varbla, S., Puust, R., & Ellmann, A. (2020). Accuracy assessment of RTK-GNSS equipped UAV conducted as-built surveys for construction site modelling. - *Survey Review*. <https://doi.org/10.1080/00396265.2020.1830544>

Vasuki, Y., Holden, E-J., Kovesi, P., & Micklethwaite, S. (2014). Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. - *Computers & Geosciences*, 69, 22-32.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.012>

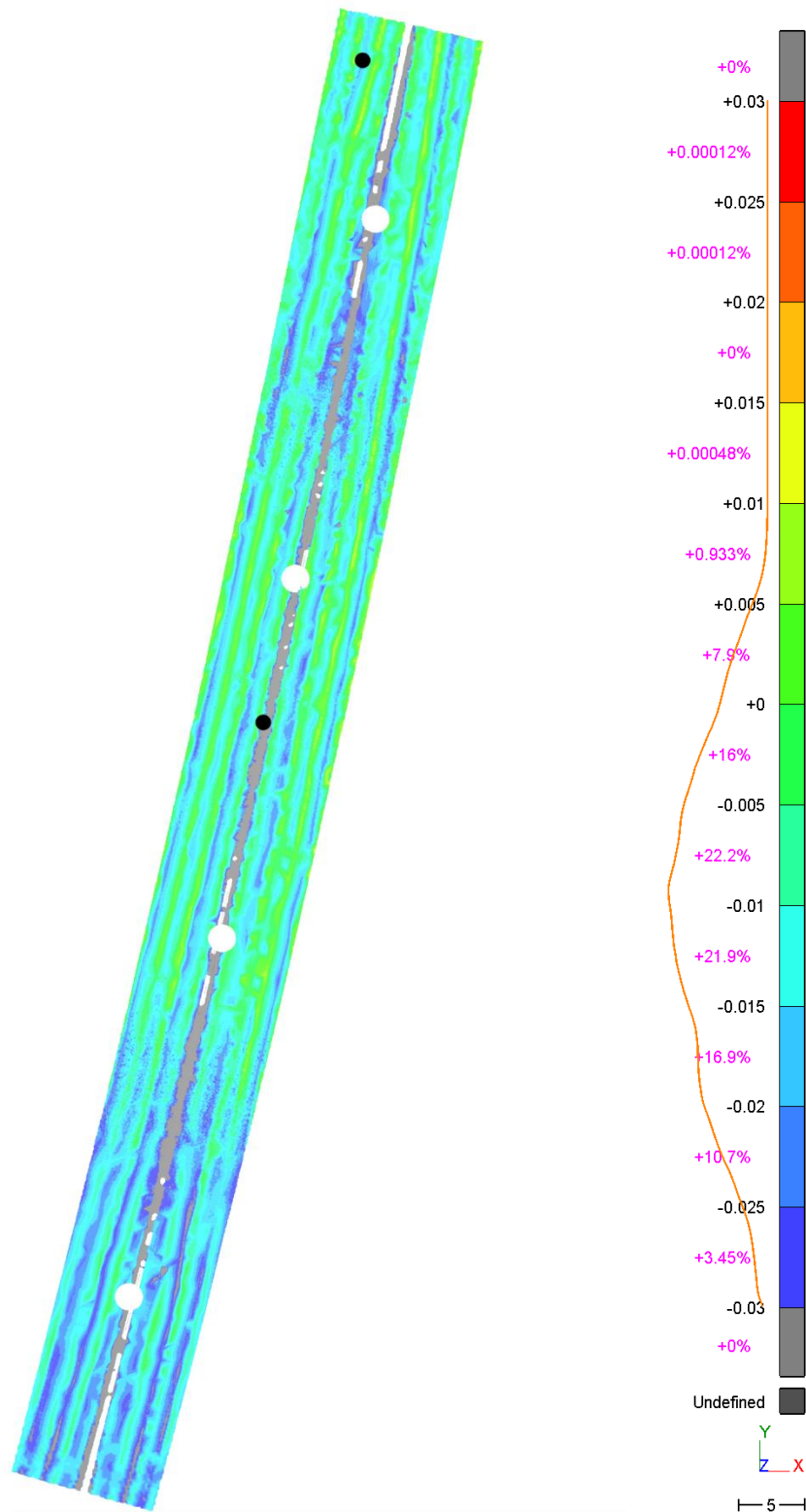
Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. - *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

LISAD

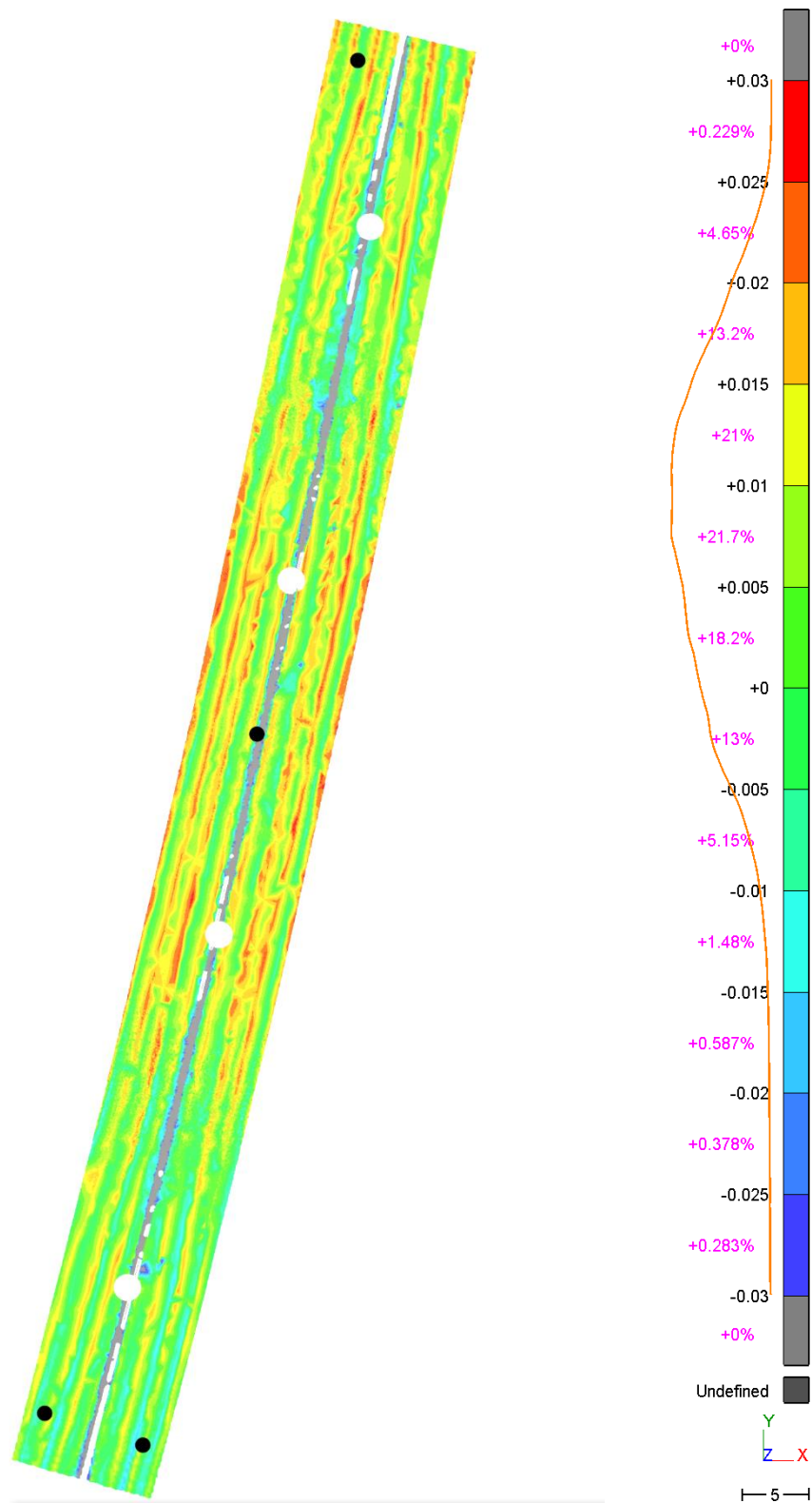
Lisa 1 Drooni ja laserskanneri andmete põhjal arvutatud kolmnurkmudelite võrdlus



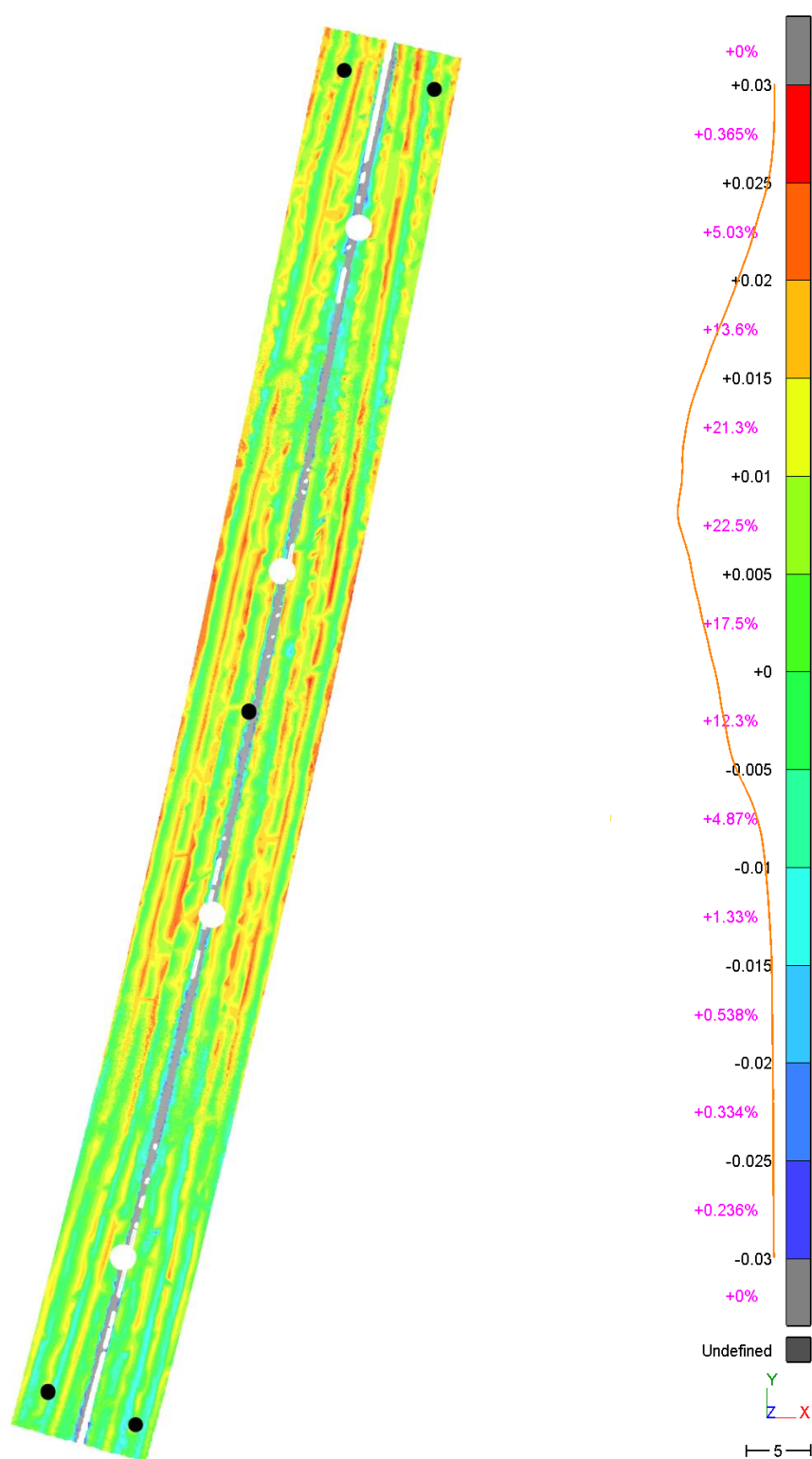
Joonis L1. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvutatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse üks maapealne kontrollpunkt, mille ligikaudne asukoht on tähistatud musta punktiga) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes ($KRV = 3,7$ cm). Droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.



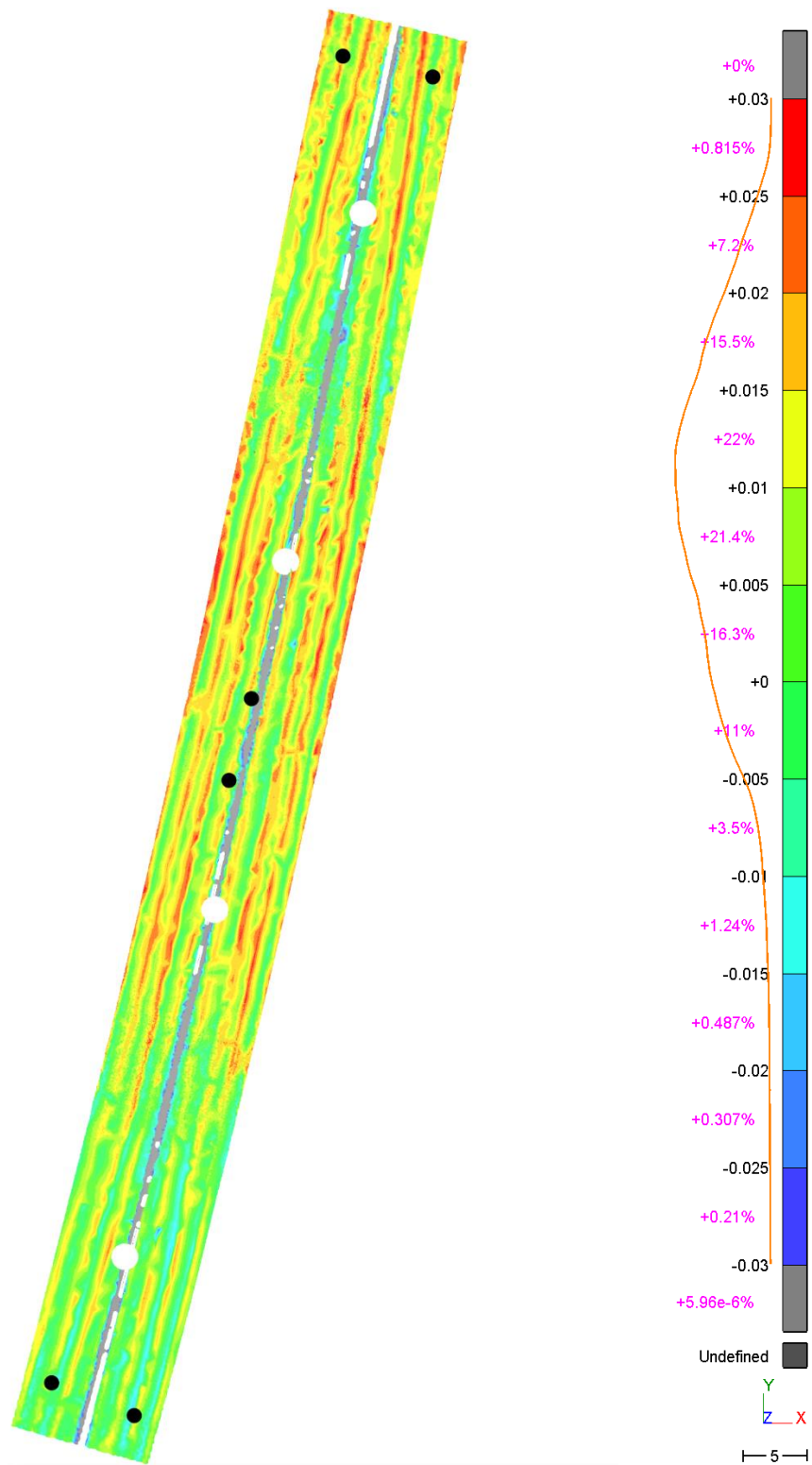
Joonis L2. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse kaks maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes ($KRV = 2,0$ cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörrepiirde asukohta.



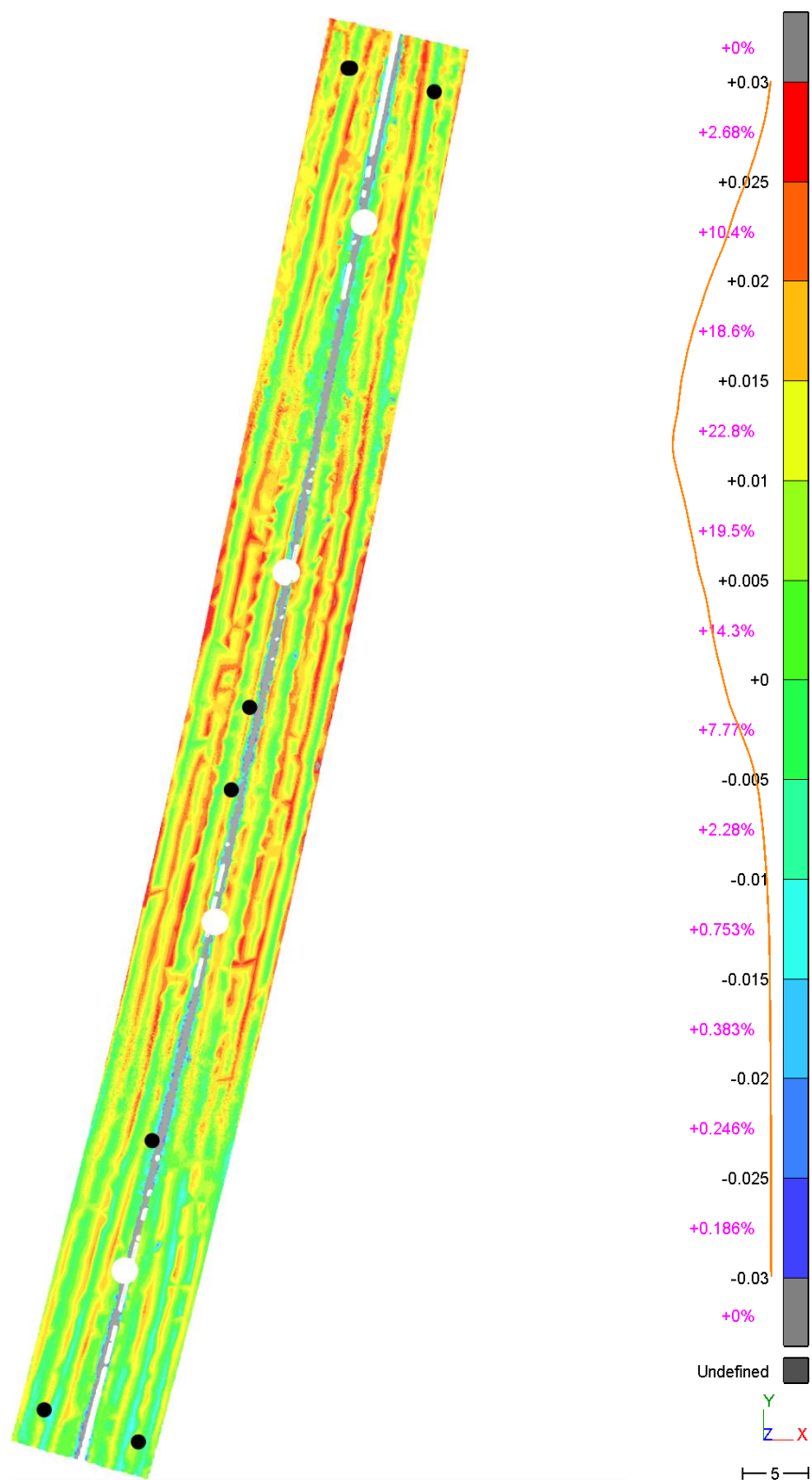
Joonis L3. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 4 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes ($KRV = 1,7 \text{ cm}$). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörrepiirde asukohta.



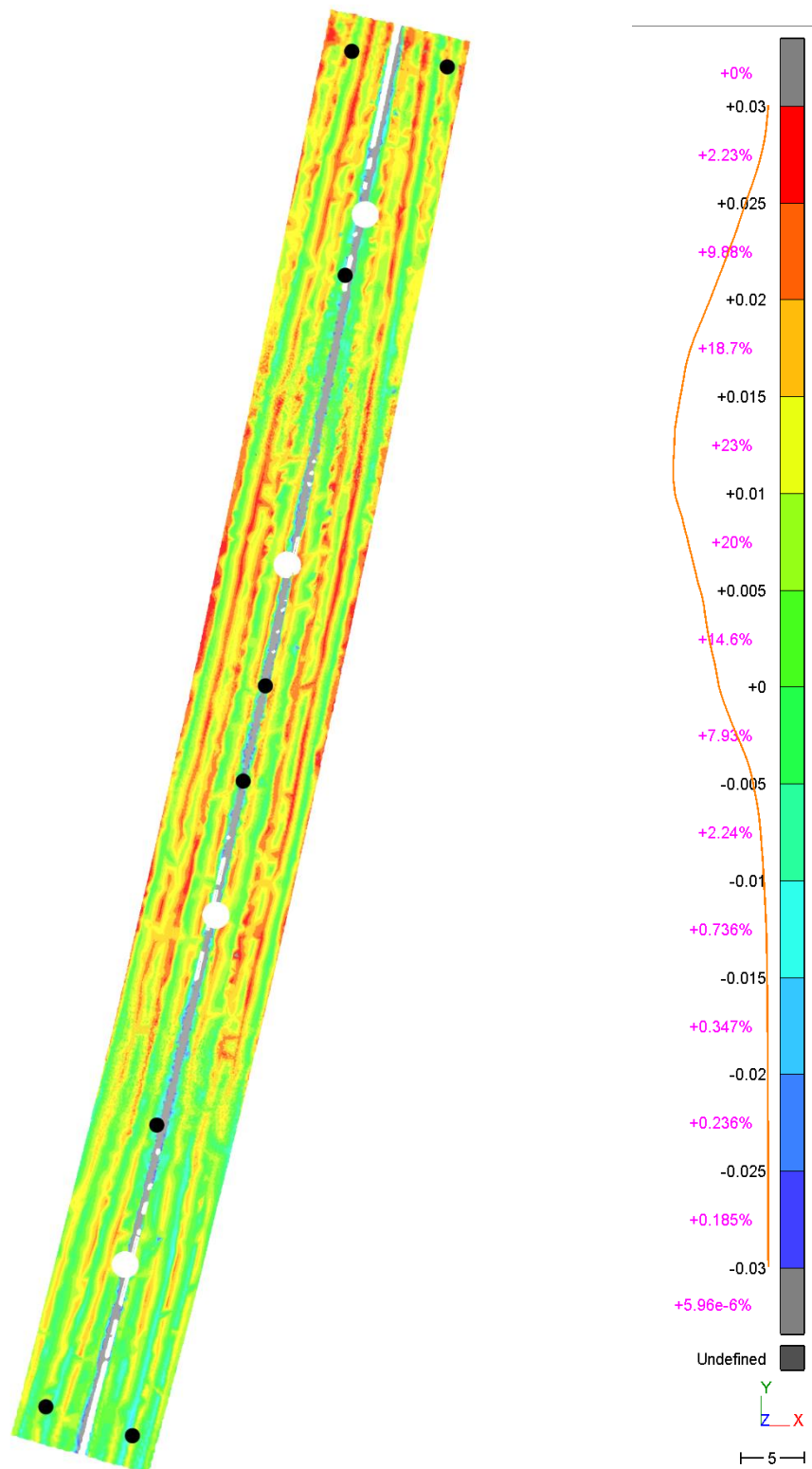
Joonis L4. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvutatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutuse 5 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes ($KRV = 1,7 \text{ cm}$). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.



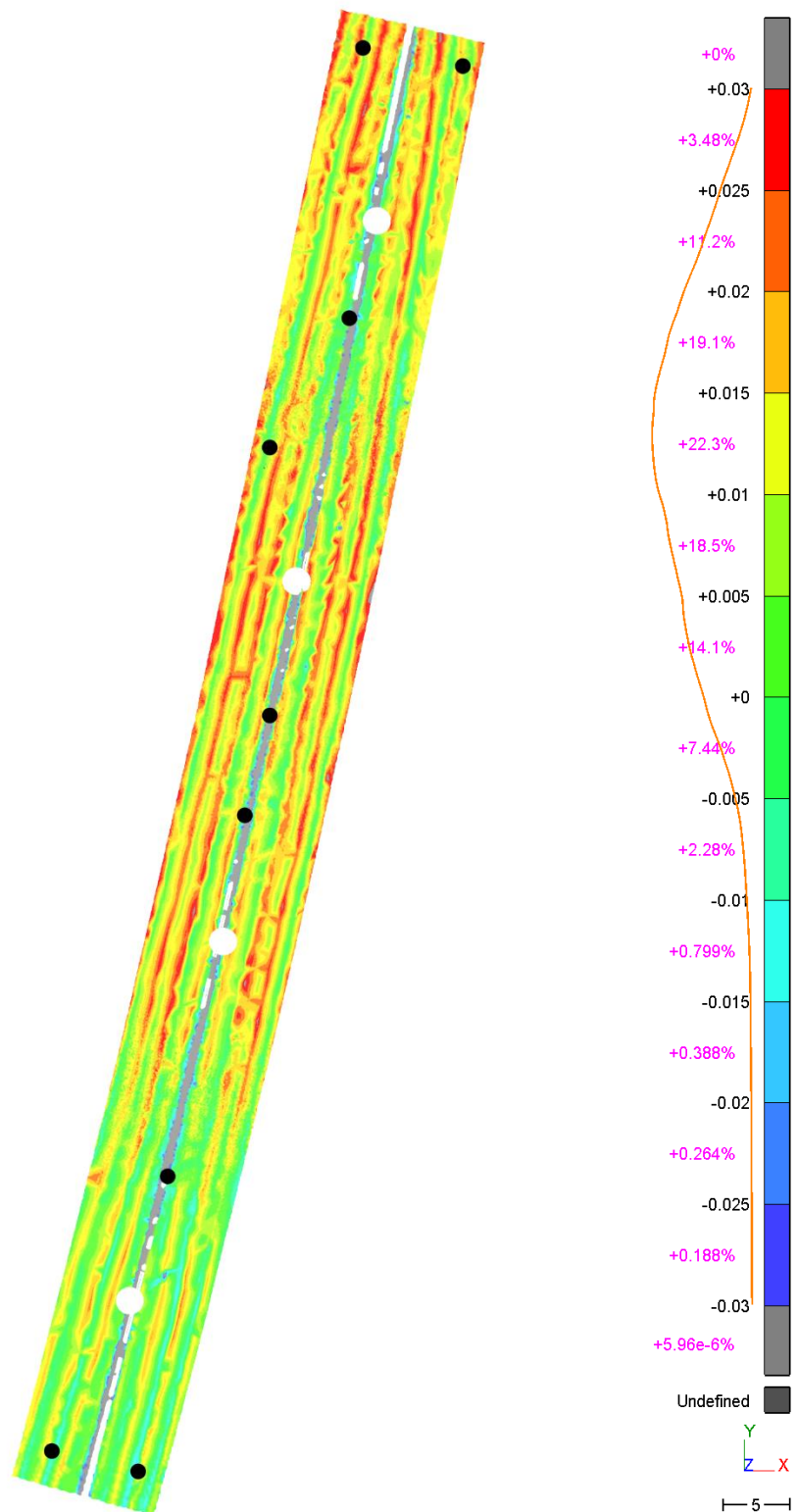
Joonis L5. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 6 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,8 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.



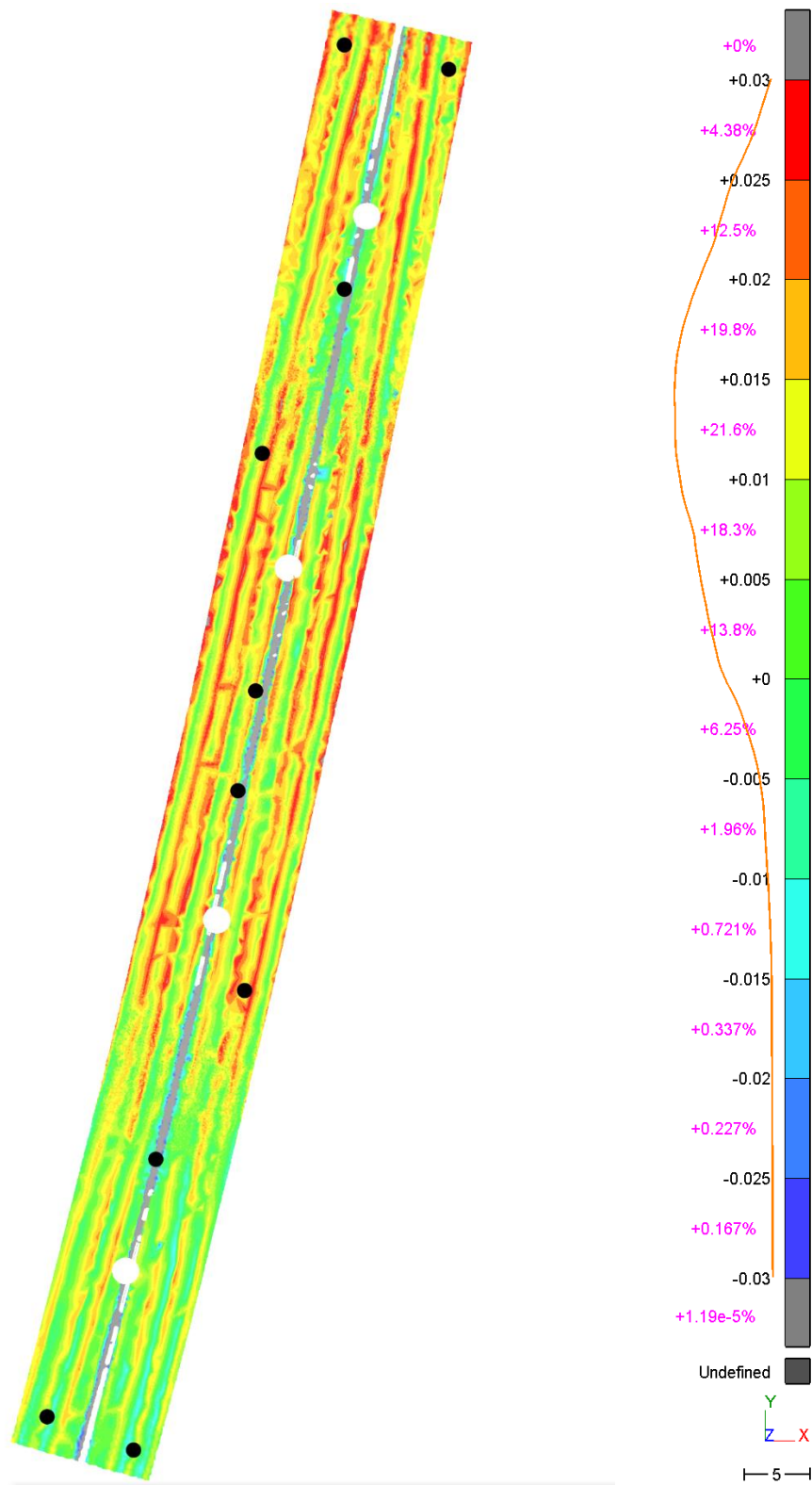
Joonis L6. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvutatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 7 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes ($KRV = 1,9 \text{ cm}$). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.



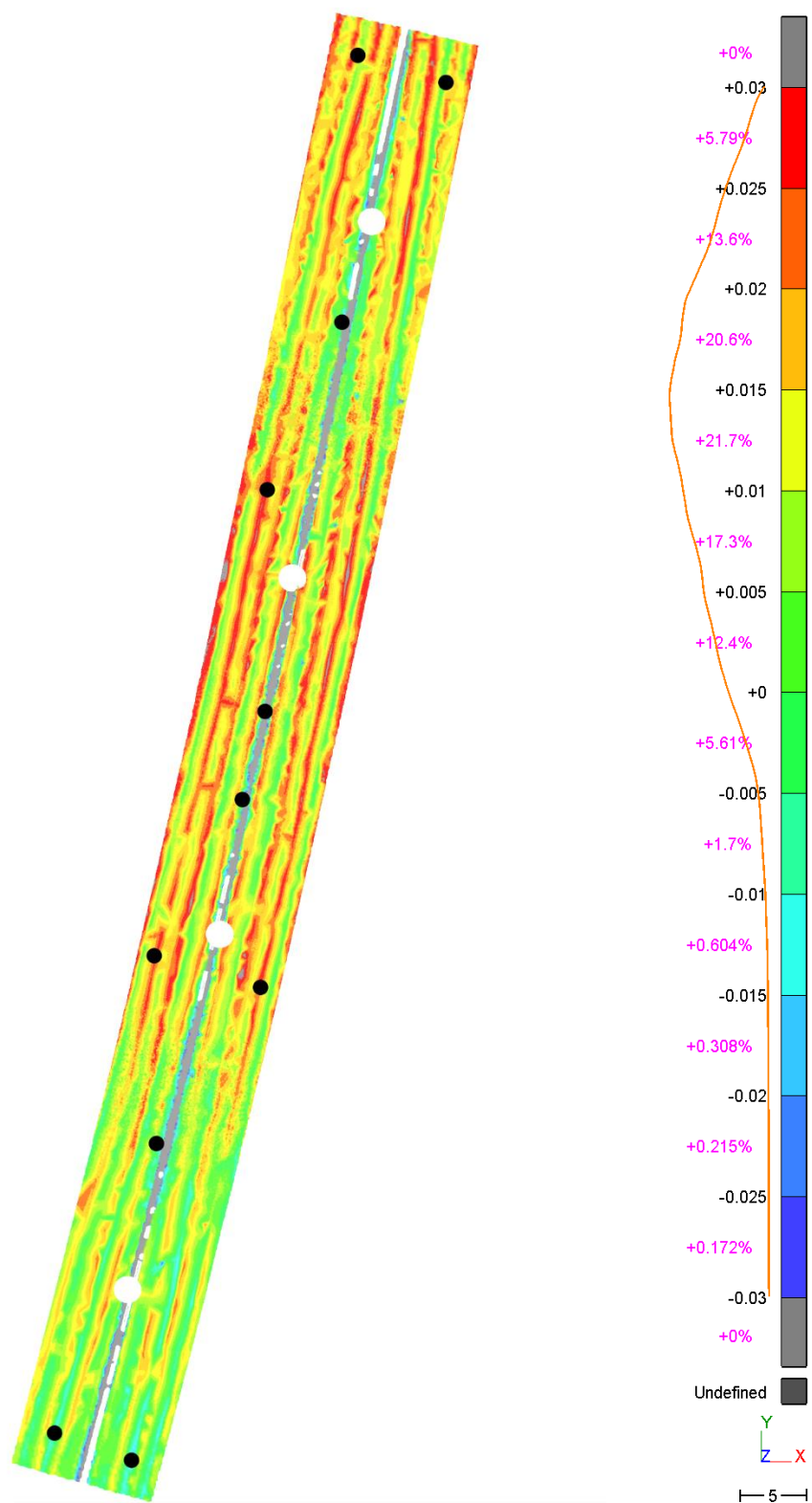
Joonis L7. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 8 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes (KRV = 1,9 cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörrepiirde asukohta.



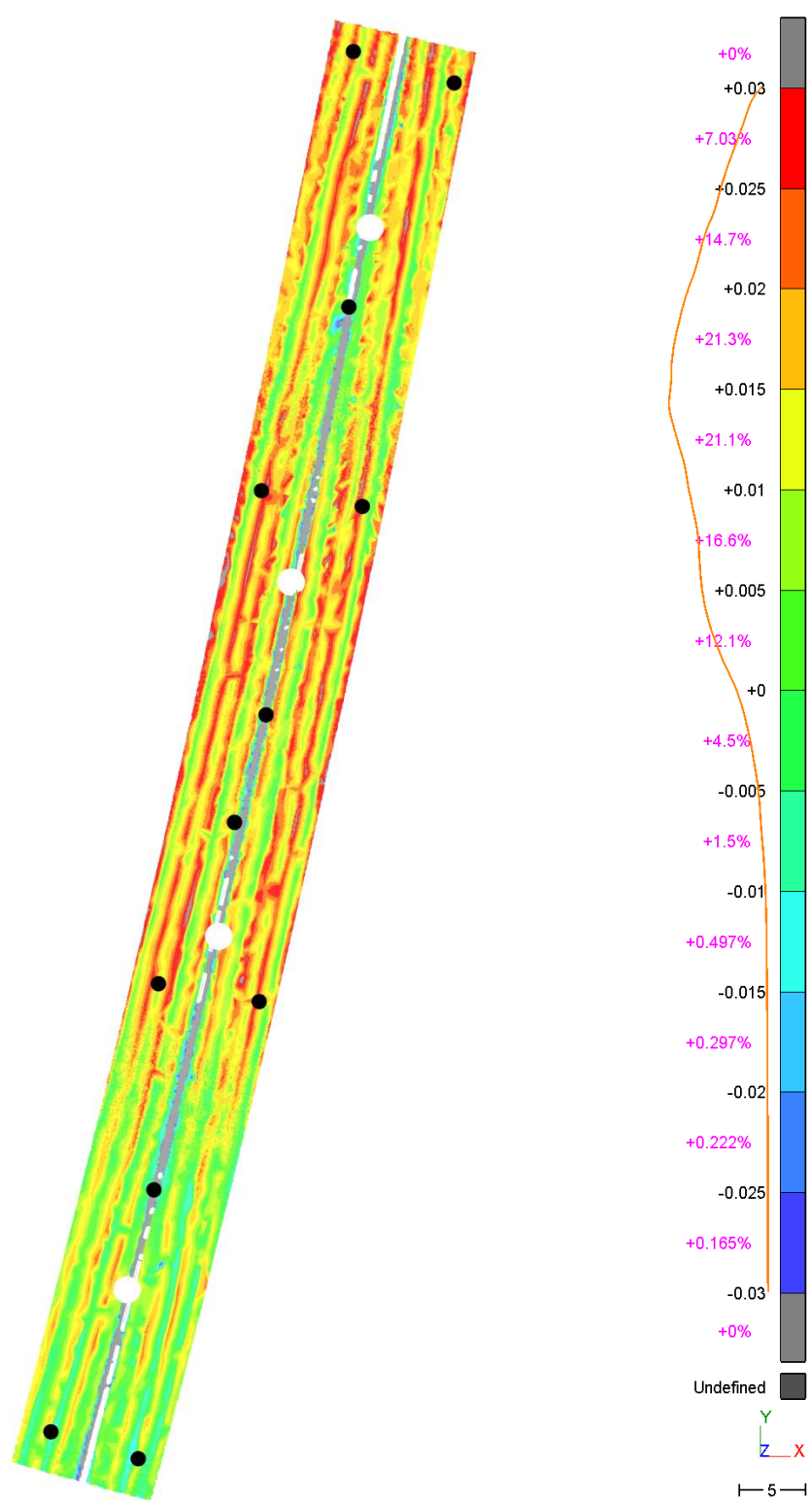
Joonis L8. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 9 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes ($KRV = 1,9 \text{ cm}$). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.



Joonis L9. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvutatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 10 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes ($KRV = 1,9 \text{ cm}$). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.

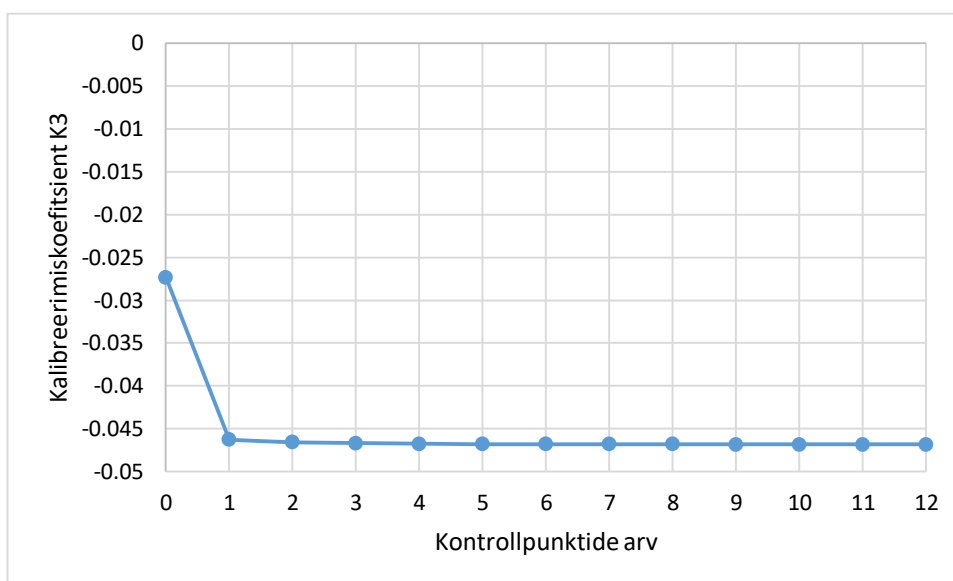


Joonis L10. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 11 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes ($KRV = 2,0$ cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörrepiirde asukohta.

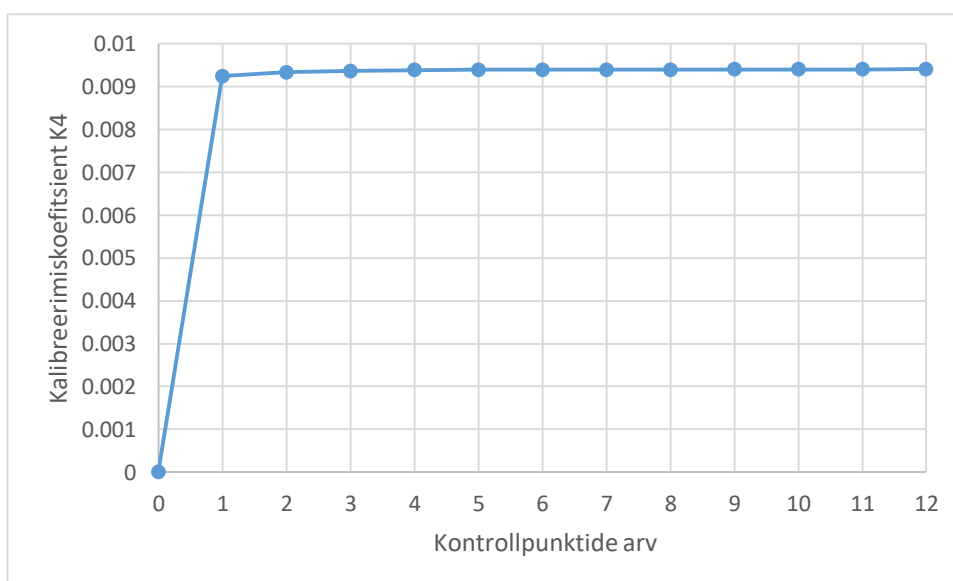


Joonis L11. Integreeritud georefereerimise meetodikal arvatud droonimõõdistuse põhise mudeli (kaasates arvutusse 12 maapealset kontrollpunkti, mille ligikaudsed asukohad on tähistatud mustade punktidega) võrdlus laserskaneerimise põhise kolmnurkmudeli suhtes ($KRV = 2,0$ cm). Sinakad toonid näitavad, et droonimõõdistuse põhine mudel on kõrgemal kui laserskaneerimise põhine mudel. Protsentväärtused skaalal kirjeldavad histogrammi. Skaala ühikud on meetrites. Tee keskel olev hallikas riba tähistab pörkepiirde asukohta.

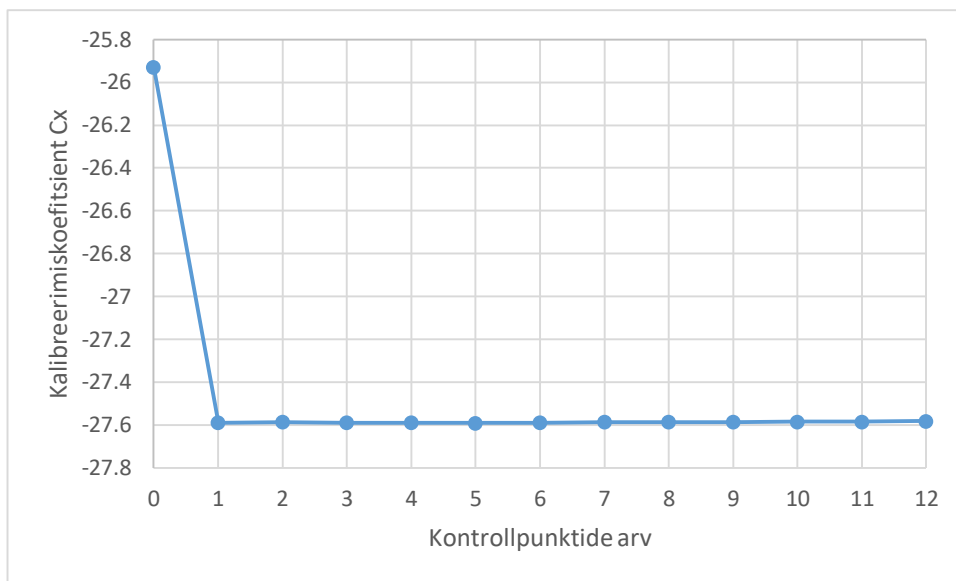
Lisa 2 Kaamera kalibreerimiskoefitsientide sõltuvus kontrollpunktide arvust



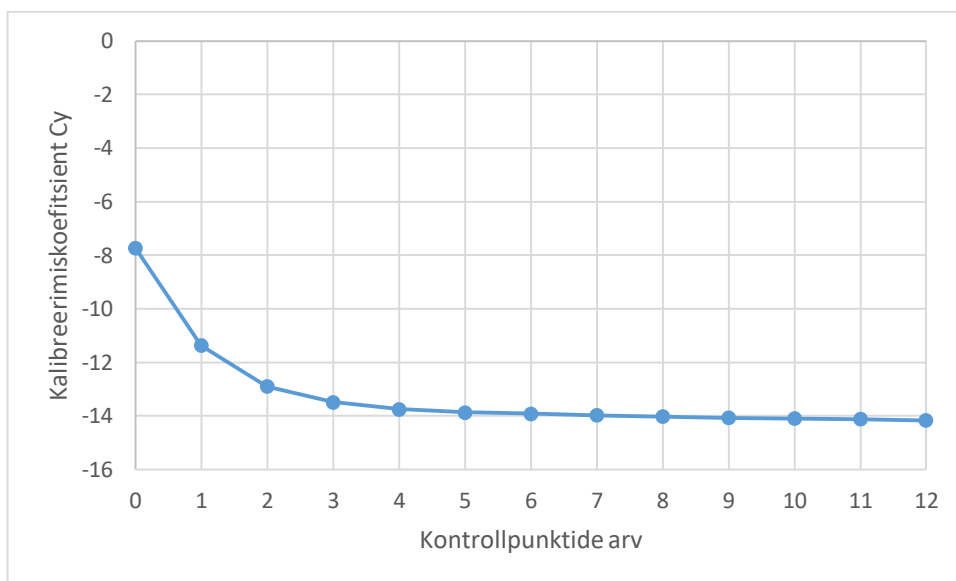
Joonis L12. Radiaalse moonutuse koefitsiendi K_3 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.



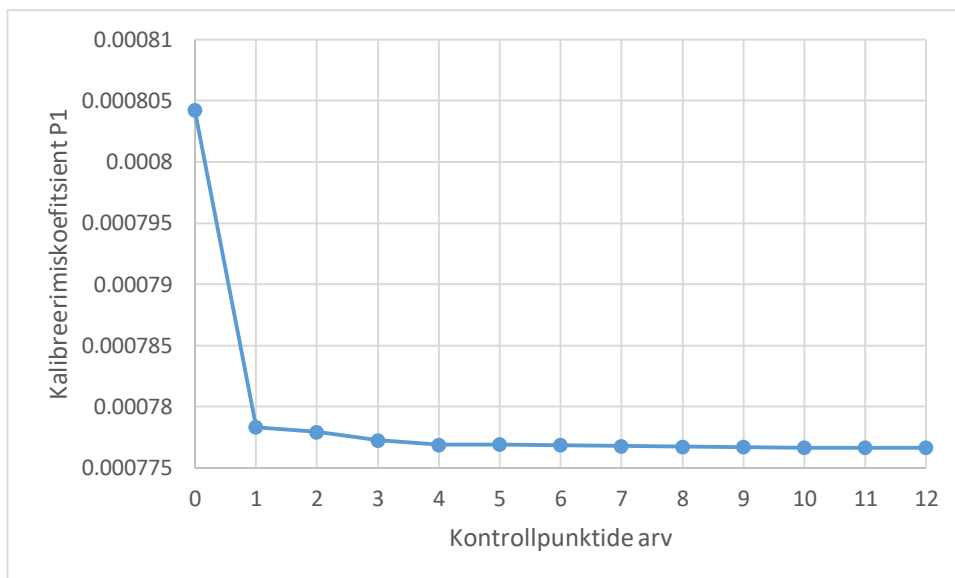
Joonis L13. Radiaalse moonutuse koefitsiendi K_4 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.



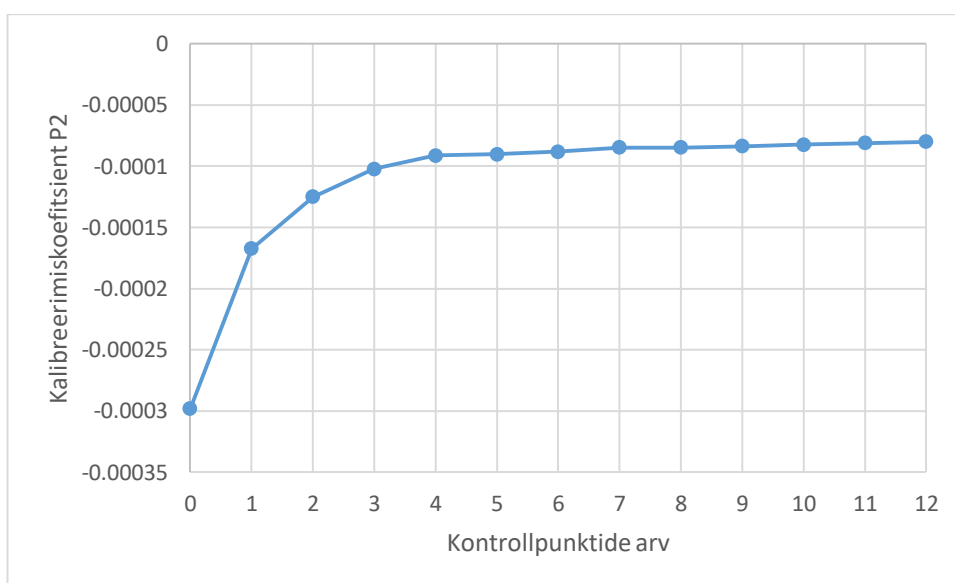
Joonis L14. Peapunkti nihke C_x sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.



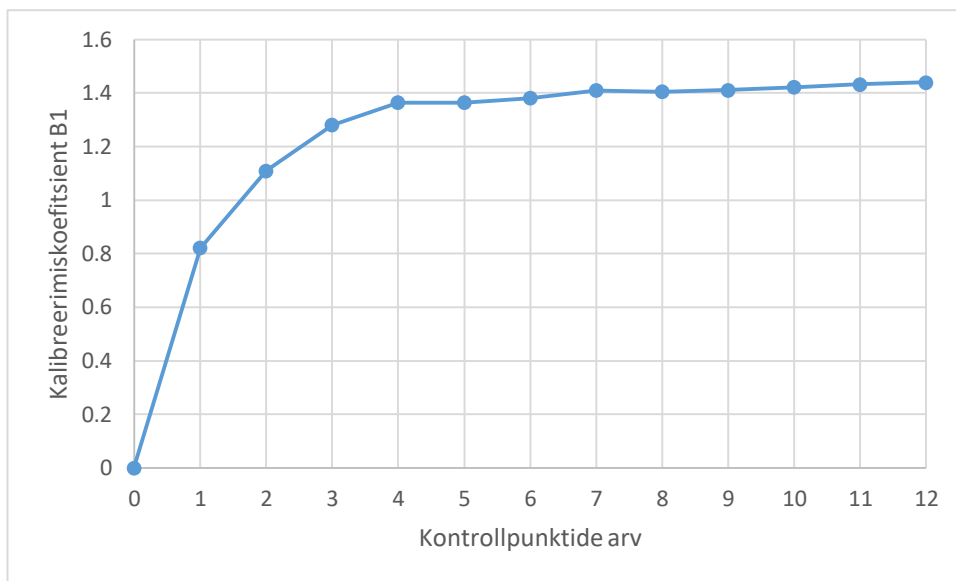
Joonis L15. Peapunkti nihke C_y sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.



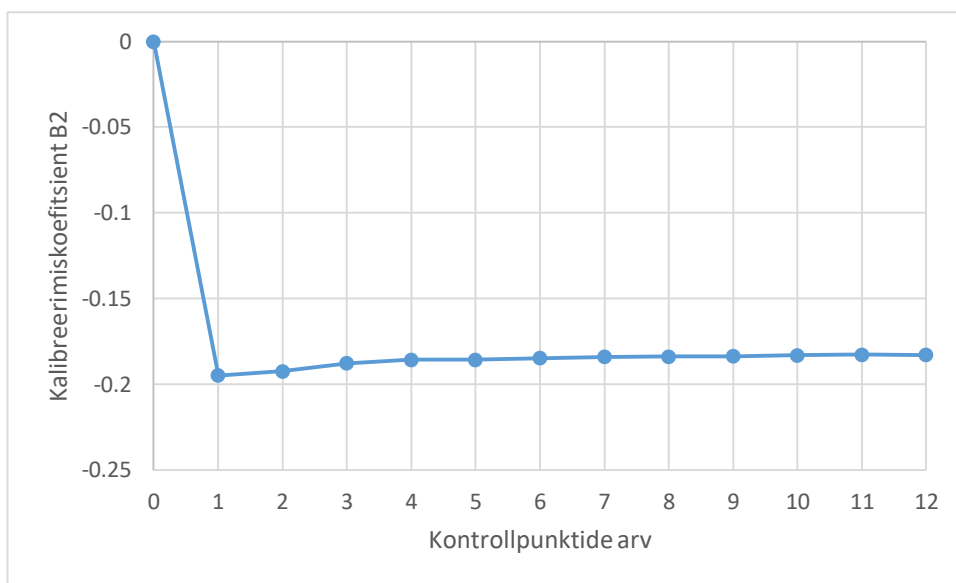
Joonis L16. Tangensiaalse moonutuse koefitsiendi P_1 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.



Joonis L17. Tangensiaalse moonutuse koefitsiendi P_2 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.



Joonis L18. Afiinsuse koefitsiendi B_1 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.



Joonis L19. Mitteortogonaalsuse koefitsiendi B_2 sõltuvus maapealsete kontrollpunktide arvust.

Geodeesia lõputööd Tallinna Tehnikaülikoolis alates 1993

TEEDEEHITUSE JA GEODEESIA õppekava (vastuvõtt alates 2017) TRANSPORDIEHITUSE õppekava (1992–2017) RAKENDUSGEODEESIA õppekava (1998–2007)

Tähistused:

	Teadusmagistri lõputöö
	4 või 5 aastase õppe lõputöö (bakalaurus, diplomiinsener või magister)
	Rakendusgeodeesia eriala lõputöö

Üliõpilane	Aasta	Töö teema
Maiolt Kakko	1993	Tallinna linnahalli geotehniline uurimine
Tauno Saks	1993	Suuremõõtkavaline stereofotogramm-meetriline mõõdistamine
Mati Oja	1993	GPS mõõdistamine Eesti piirialade näitel
Risto Pomerants	1993	Eesti Vabariigi 2. klassi geodeetiline põhivõrk Türi objekti näitel
Peep Kirsimäe	1995	Jätkuvtala-pingbetoonsilla (36+54+36m) projekt koos geodeetiliste töödega
Valdar Tammin	1995	Sillamäe linna plaanilise põhivõrgu ülevaatus ja selle rekonstrueerimise projekt
Marja Talvari	1996	Territoriaalandmete kogumine ja digitaalkaardistus
Arvi Taru	1996	Tallinna geodeetiliste koordinaatsüsteemide võrdlus
Karin Kollo	1996	GPS kontseptsioonid ja nende kasutamine Eesti tihendusvõrgus
Vello Kala	1997	Monteeritavate karkasshoonete rajamise geomeetrilise täpsuse tagamiseks tehtavate geodeetiliste tööde tehnoloogilise kompleksi väljatöötlus ja täpsuse analüüs (magistritöö)
Marek Rannala	2000	Teegeomeetria mõõdistamine reaalaraja kinemaatilise GPS abil
Vallo Padari	2000	Raudtee rekonstrueerimisprojekti geodeetilised uurimistööd Tapa-Nõmmküla objektil
Karin Kollo	2000	Ida-Viru maakonna tihendusvõrgu objekti tasandamine ja arvutustulemuste analüüs (magistritöö)
Arvi Taru	2000	Tallinna kohaliku koordinaatide süsteemi ja Lambert-Est koordinaatide süsteemi sidemest (magistritöö)

Aidi Pank	2002	Koidula raudtee piiriületuspunkti maa-ala topogeodeetilised uurimistööd (rakendusgeodeesia)
Tatjana Belova	2003	Kõrgelasuvate ehituskonstruksioonide kõrguste mõõdistamine muudetud trigonomeetrilisel meetodil (rakendusgeodeesia)
Kert Rebane	2003	Uuringud programmeerimiskeele JAVA kasutamiseks geodeetilise mõõdistussüsteemi loomisel (rakendusgeodeesia)
Andrei Anissimov	2003	Lasernivelliiri QL310 DS täpsuse uurimine (rakendusgeodeesia)
Laura Salumaa	2003	Kohaliku geodeetilise põhivõrgu eelarvutused (rakendusgeodeesia)
Kersti Peetersoo	2003	Muhu vald, Lõetsa ja Tupenurme küla maade tagastamine (rakendusgeodeesia)
Kirsika Koitjärv	2003	Maa raskuskiirenduse mõju hinnang nivelleerimistulemustele Eesti kõrguselise põhivõrgu valitud käikudel (rakendusgeodeesia)
Laura Ulla	2003	Kaalude mõju hindamine Eesti gravimeetrilise põhivõrgu tasandamistulemustele (rakendusgeodeesia)
Kristi Käär	2003	Pakterminali geotehniline kontroll (rakendusgeodeesia)
Kristi Kõiva	2003	Elektro-optilise kaugusmõõtja kalibreerimistulemuste ja mõõtmisandmete redutseerimise vajalikkus kohalike geodeetiliste põhivõrkude tasandamiseks (rakendusgeodeesia)
Kersti Lohvart	2004	Ekvivalentse projektsiooni kasutamine katastrimõõtmisel (rakendusgeodeesia)
Kadi Vahuri	2004	Polügonomeetria mõõtmiste täpsustest kohalike plaaniliste geodeetiliste põhivõrkude rekonstrueerimisel ja rajamisel (rakendusgeodeesia)
Toomas Marrandi	2004	Aerolaserskaneerimise mõõdistusmetoodika ja kasutatav tehnoloogia (rakendusgeodeesia)
Sirle Sink	2004	Geodeetilisi probleeme hüdrograafilisel mõõdistamisel (rakendusgeodeesia)
Riho Võigemast	2004	Uued nõuded projekteerimise geodeetilistele uurimistöodele (1:500-1:2000) (rakendusgeodeesia)

Maido Ridalaan	2004	Balti-Kiisa 330kV ülekandeliini trassi L504 geodeetilised kompleksuuringud, meetodika optimeeritud lahendused (rakendusgeodeesia)
Raivo Ranne	2004	Geodeesia aluste õppematerjalid (teadusmagister)
Annika Hussar	2005	Kaardilehe servade ühildamine. Probleemid ja lahendused Eesti põhikaardi näitel (rakendusgeodeesia)
Rait Riim	2005	Daatumite transformatsioon ja transformeerimisparameetrite määramine vabavara programmidega (rakendusgeodeesia)
Tuuli Viljamaa	2005	Tallinna teletorni deformatsioonide vaatlused (rakendusgeodeesia)
Kaja Liik	2005	Tornimäe 3 kõrgosa ehituse geodeetilise teenindamise projekt (rakendusgeodeesia)
Ülle Türner	2005	Pääsküla prügila vertikaalsete ja horisontaalsete deformatsioonide kontrollmõõtmised (rakendusgeodeesia)
Erkki Mäekivi	2005	Raskuskiirenduse andmete interpoleerimine Eesti kõrgusvõrgu reeperitele Tartu piirkonnas ning tulemuste analüüs (rakendusgeodeesia)
Gabriela Kotsulim	2005	Uuringud sadamaehitiste rajamisel (magistritöö)
Lauri Lilja	2006	Sangaste-Valga raudteelõigu, pikett 498,87-503,76 geodeetilise alusvõrgu rajamine ja ballasti puhastamise ehitusgeodeetiline teenindamine (rakendusgeodeesia)
Tatjana Belova	2006	Valguskaugusmõõtuuri töö uurimine (magistritöö)
Kristi Kõiva	2006	Välistingimuste mõju GPS mõõtmistulemustele (magistritöö)
Kersti Lohvart	2006	Nivelliiri Leica NA2002 põhistingimuse muutus temperatuuri mõjul (magistritöö)
Ardo Kollo	2006	Geodeetilised tööd naftaplatformide X ja Y ehitamisel (rakendusgeodeesia)
Martin Loosaar	2007	Tallinna lauluväljaku mõõdistamise analüüs (rakendusgeodeesia)
Andrei Anissimov	2007	Refraktsiooni mõju trigonomeetrisel nivelleerimisel keskmise pikkusega madalate vaatekiirtega (magistritöö)
Angeelika Sepp	2007	Geodeetiliste tööde probleemid Mercedes-Benz Kuressaare

		teeninduskeskuse ehitamisel (rakendusgeodeesia)
Kristi Käär	2007	Pakterminali vajumisvaatluste problemaatika ja graafiline kujutamine (magistritöö)
Marju Lember	Kevad 2008	Narva mnt 5 ehitusaegne naaberhoonete geotehniline kontroll
Tarvo Mill	2008	Erinevate mõõtmistehnika võrdlus silla geodeetilisel mõõdistamisel (magistritöö)
Erkki Mäekivi	2008	Raskuskiirenduse andmete võrgustamine ja interpoleerimine Eesti kõrgusvõrgu reeperitele (magistritöö)
Anti Gruno	Kevad 2011	Läänemere valgala hoojaliste massivariatsioonide arvutamine satelliitgravimeetriliste andmete põhjal
Kirill Šapošnitšenko	Juuni 2012	Refraktsiooni ja kalibreerimisparandite arvestamisest täppisnivelleerimisel reeperite stabiilsuse uurimiseks
Silja Talvik	Juuni 2012	Astanguliste pinnavormide mõjust Maa raskuskiirenduse väljale ja täppisnivelleerimise tulemustele Põhja-Eesti klintranniku näitel
Erkko Grünthal	Juuni 2013	Rannaprotsesside monitooring aerolaserskaneerimise korduvmõõtmistest
Kalev Julge	Juuni 2013	Aerolaserskaneerimise andmetest maapinna tuvastamine erinevate filtreerimisalgoritmidega
Eigo Kärdi	Juuni 2013	Deformatsioonide uuringud Kiviõli vanal tuhamäel
Aleksandra Kolõganova	Jaanuar 2014	Pinnasetööde mahuarvutused erinevate GIS tarkvarapakettidega Kohtla-Järve poolkoksi ladestu sulgemistöde näitel
Liis Elmi	Juuni 2014	Fassaadide võrdlev mõõdistus tahhümeetria, maapealse fotogrammmeetria ja laserskaneerimisega
Merle Kivistik	Juuni 2014	Korteremaja vajumise uuring kõrgtäpse nivelleerimisega ja invarlattide lihtsustatud kalibreerimise aprobeerimine
Hannes Lõhmus	Juuni 2014	Terrestrilise laserskaneerimise kaasamine sildade koormuskatsetuste geodeetilistel uuringutel
Sander Saarik	Juuni 2014	Elektrontahhümeetrite ja laserskanneri kaugusmõõturi täpsuse hindamine
Martin Sobak	Juuni 2014	Pinnavormide terrestriline laserskaneerimine ja 3D modelleerimine

Katrin Uueküla	Juuni 2014	Terrestilise laserskaneerimise andmete baasil loodud 3D mudelite kvaliteedi analüüs
Annika Urbel	Jaauuar 2015	Aerolaserskaneerimise andmetest jõgede pikiprofiilide määramine keila jõe näitel
Taavi Talver	Jaauuar 2015	Trigonomeetriline nivelleerimine ja laserskaneerimine teede külmakergete uurimisel
Silver Aule	Jaauuar 2015	Mittestandardtse kujuga ehitiste laserskaneerimine ja punkt pilve põhjal modelleerimine TTÜ veetorni näitel
Simo Rebane	Juuni 2015	Mittestandardsete hoonete rajamise geodeetiline teenindamine kaasaegsete mõõdistustehnoloogiate kaasamisega
Aidi Sula	Juuni 2015	UAV mõõdistuse kõrgusliku ja plaanilise täpsuse valideerimine
Jaanus Metsar	Juuni 2015	Riiklik GNSS püsijaamade võrk, selle aegridade kasutamine jääajajärgse maatõusu täpsustamisel
Priidu-Evert Pärna	Juuni 2017	Laohoone karkassi teostusmõõdistamise meetodite võrdlus
Martti Putnik	Jaauuar 2018	Mobiilse laserskaneerimise tehnoloogia rakendamine teekatendite mõõdistamisel
Romet Köök	Jaauuar 2018	Mehitamata lennumasinade (UAV) fotogramm-meetriliste mõõdistuste põhjal koostatavate pinnamudelite täpsus tee-ehituslike rakenduste näitel
Sander Varbla	Juuni 2019	Meregeoidi mudelite valideerimine laeval mõõdetud GNSS ning aerolaserskaneerimise kõrgusprofiilidega
Kaia Malberg	Juuni 2019	Siseruumide ja allmaakaevõõnte ruumikuju määramine mobiilse laserskaneerimisega
Jürgen Resev	Juuni 2019	UAV fotogramm-meetria kasutamine hoone välisgeomeetria ja deformatsioonide mõõdistamisel Tallinna Lennusadama näitel
Kevin Reimann	Juuni 2019	GNSS-RTK võimekusega mehitamata lennumasinatega saavutatava mõõdistustäpsuse evalveerimine
Emil Haljend	Jaauuar 2020	Sildkraanatee laserskanneriga mõõdistamise täpsuse aprobeerimine