



**TALLINNA
TEHNIKA KÕRGGKOO**

Laura Lüll

**TARISTU
KOLMEMÕÕTMELINE
TOPO-GEODEETILINE
ALUSPLAAN**

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2023

Laura Lüll

TARISTU KOLMEMÕÕTMELINE TOPO-GEODEETILINE ALUSPLAAN

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut
Rakendusgeodeesia õppekava
Juhendaja: Katrin Uueküla

Tallinn 2023

Mina

Laura Lüll,

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Katrin Uueküla */allkirjastatud digitaalselt/*

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina,

Laura Lüll

Sünnikuupäev: 28.04.2000

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Taristu kolmemõõtmeline topo-geodeetiline alusplaan“

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas,

/allkirjastatud digitaalselt/



Ehitusinstituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja: **Laura Lüll**
Õpperühm: KRG2019
Eriala: Rakendusgeodeesia (1824)
Lõputöö teema: **Taristu kolmemõõtmeline topo-geodeetiline alusplaan**

Lähteandmed töö koostamiseks:

Maa-ameti geoportaali andmebaas, avaliku sektori nõuded, instrumentide spetsifikatsioonid, Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmöödistamisele esitatavad nõuded

Töö sisu, ülesehitus ja lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Töö eesmärgiks on selgitada välja kõige efektiivsem – odavam, kiirem ja täpsem viis kolmemõõtmelise alusplaani koostamiseks.

Kirjeldada avaliku sektori nõudeid ja möödistuse vajalikku täpsust, kirjeldada möödistusmeetodeid ja ettevalmistustöid, instrumentide iseloomustus, möödistusvõrgu loomine, erinevate meetoditega andmete kogumine ja kogutud andmete võrdlus.

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:

Seletuskirja maht on ca 40-60 lehekülge. Töö graafilise materjali moodustavad fotod, tabelid ja joonised.

Lõputöö juhendaja: **Katrin Uueküla**
(nimi)

Lõpetaja: **Laura Lüll**
(nimi)

Kinnitaja: **Aivars Alt**
ehitusinstituudi direktor

 22.02.2023
(allkiri) (kuupäev)

 22.02.2023
(allkiri) (kuupäev)

 22.02.2023
(allkiri) (kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 22.02.2023
Lõputöö esitamise tähtaeg: 05.05.2023

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1 KOLMEMÕÕTMELISELE TOPO-GEODEETILISELE PLAANILE ESITATAVAD NÕUDED	7
2 NÄIDISOBJEKT	8
2.1 Lähteülesanne	9
2.2 Mõõdistusvõrk.....	10
3 ANDEMETE KOGUMISE VIISID.....	11
3.1 Laserskaneerimine	11
3.1.1 Mobiilne laserskaneerimine	11
3.2 Aerofotogramm-meetria	13
3.3 Elektrontahhümeeter.....	16
4 ERINEVATE MEETODITEGA ANDMETE KOGUMINE	18
4.1 Kasutatud instrumendid.....	18
4.1.1 Laserskanner Riegl VMZ/VZ-400 ja GNSS baasjaam Sokkia GCX-2	18
4.1.2 Droon DJI Phantom 4 RTK ja DJI D-RTK GPS tugijaam	20
4.1.3 Elektrontahhümeeter Trimble S5	21
4.1.4 Väliarvuti Trimble TSC7	21
4.1.5 Digitaalnivelliir Trimble DiNi-0.3	22
4.1.6 GNSS-vastuvõtja Trimble R8s.....	22
4.1.7 Pihuarvuti Trimble TDC600	23
4.2 Trimble VRS Now.....	24
4.3 ESTPOS.....	24
4.4 Mõõdistamine mobiilse laserskanneriga	25
4.4.1 Ettevalmistustööd	25
4.4.2 Alusvõrgu loomine.....	25
4.4.3 Andmete kogumine	26
4.4.4 Andmetöötlus	26
4.5 Mõõdistamine aerofotogramm-meetriliselt	27
4.5.1 Ettevalmistustööd	27
4.5.2 Alusvõrgu loomine.....	27
4.5.3 Andmete kogumine	28
4.5.4 Andmetöötlus	28

4.6	Mõõdistamine tahhümeetriselt	28
4.6.1	Ettevalmistustööd	28
4.6.2	Alusvõrgu loomine	28
4.6.3	Andmete kogumine	29
4.6.4	Andmetöötlus	29
5	MAA-ALA PLAANI KOOSTAMINE	30
6	MODELLEERIMINE	35
6.1	Maapinnamudeli koostamine.....	35
6.2	Rajatiste ja elementide modelleerimine.....	36
7	KOGUTUD ANDMETE VÕRDLUS.....	40
7.1	Plaanilise asendi täpsus	40
7.1.1	Liiklusmärgid	40
7.1.2	Äärekivi ja katendite servad	41
7.1.3	Vertikaalseintega ehitised	42
7.2	Kõrguste täpsus.....	43
7.2.1	Maapinnamudelite võrdlus	48
8	MÕÕDISTUSVIISIDE ANALÜÜS	51
8.1	MLS mõõdistus.....	51
8.2	Drooniga mõõdistus.....	51
8.3	Tahhümeetiline mõõdistus	52
	KOKKUVÕTE.....	53
	SUMMARY	56
	VIIDATUD ALLIKAD.....	58
	LISAD	61
	Lisa 1. GPS sidumise arvutuste raport	62
	Lisa 2. Agisoft raport	63

SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö teemaks on „Taristu kolmemõõtmeline topo-geodeetiline alusplaan“. Töö koostamiseks valiti näidisobjektiks REIB OÜ töö TT-6043 „Riigitee 13187 Toila-Oru km 4,341 Voka asula ristmiku maa-ala topo-geodeetilised uurimistööd“. Objekt asub Ida-Virumaal Toila vallas. Töö tellijaks oli ROADPLAN OÜ, kelle põhieesmärgiks töö tellimisel oli antud ristmiku ümberehitamine liiklusohutuse tõstmiseks ning täiendavaks eesmärgiks oli võrrelda ja hinnata erinevaid mõõdistusmeetodeid ning nende käigus kogutud andmeid. Töö tulemuste alusel hakati täiendama Transpordiameti nõudeid topo-geodeetilistele uurimistöödele teede projekteerimisel.

Antud lõputöö eesmärgiks oli selgitada välja kõige efektiivsem – odavam, kiirem ja täpsem viis kolmemõõtmelise alusplaani koostamiseks, kirjeldada kolmemõõtmelisele topo-geodeetilisele plaanile esitatavaid nõudeid ja erinevaid mõõdistusmeetodeid, tutvustada kasutatud instrumente, kirjeldada erinevate meetoditega andmete kogumist ja kogutud andmeid ning ka mõõdistusmeetodeid omavahel võrrelda.

Töö on jaotatud kaheksaks osaks. Kõigepealt tuuakse välja milliseid nõudeid peab kolmemõõtmeline topo-geodeetiline alusplaan järgima. Seejärel teises osas tutvustatakse näidisobjekti ning põhjalikumalt lähteülesannet. Kolmandas osas kirjeldatakse erinevaid objekti mõõdistamiseks kasutatud mõõdistusmeetodeid (mobiilne laserskaneerimine, aerofotogramm-meetria ja tahhümeetiline mõõdistamine). Neljandas osas on välja toodud erinevate mõõdistusmeetoditega andmete kogumise protsessid ja iseloomustatud kasutatud instrumente. Viies osa hõlmab 2D maa-ala plaani koostamist ja koostamise põhimõtteid ning kuues osa selgitab 3D maapinnamudeli ja erinevate rajatiste/objektide modelleerimist. Seitsmendas osas võrreldakse erinevate mõõdistusmeetoditega kogutud andmete plaanilise asendi täpsust ning kõrguslikku täpsust ja kaheksandast osast leiab kasutatud mõõdistusviiside analüüsi. Töö lõpus asuvad nii eesti kui ka inglise keelsed kokkuvõtted, millele järgnevad viidatud allikad ja lisad. Lisades asuvad kaugseire mõõdistusmeetodite andmetöötluse käigus koostatud arvutuslikud raportid.

Tänapäeva kiiresti arenevas maailmas on ka geodeesia valdkond pidevas arengus. Paraku ei võeta uuendusi, mis muudaksid tööde teostamised lihtsamaks, kiiremaks ja ohutumaks eriti vastutulelikult kasutusele. Kõik usaldavad klassikalist ja aeganõudvat kontaktseires tahhümeetrilise mõõdistuse tulemusi ning tihti kaheldakse kaugseire meetodites. Antud lõputöö hüpoteesiks on, et kaugseire meetodid on tänapäeval sama usaldusväärsed kui kontaktseires tahhümeetiline mõõdistamine.

1 KOLMEMÕÕTMELISELE TOPO-GEODEETILISELE PLAANILE ESITATAVAD NÕUDED

Kolmemõõtmelisi plaane (üldjuhul tellija poolsete erinõuetega) tellitakse liiklusrajatiste projekteerimiseks. Kui erinõuded on sätestatud tellija poolses tehnilises kirjelduses või lähteülesandes ja on erinevates projektides teatud varieeruvustega, siis üldnõuded kehtivad kõikidele uuringutele.

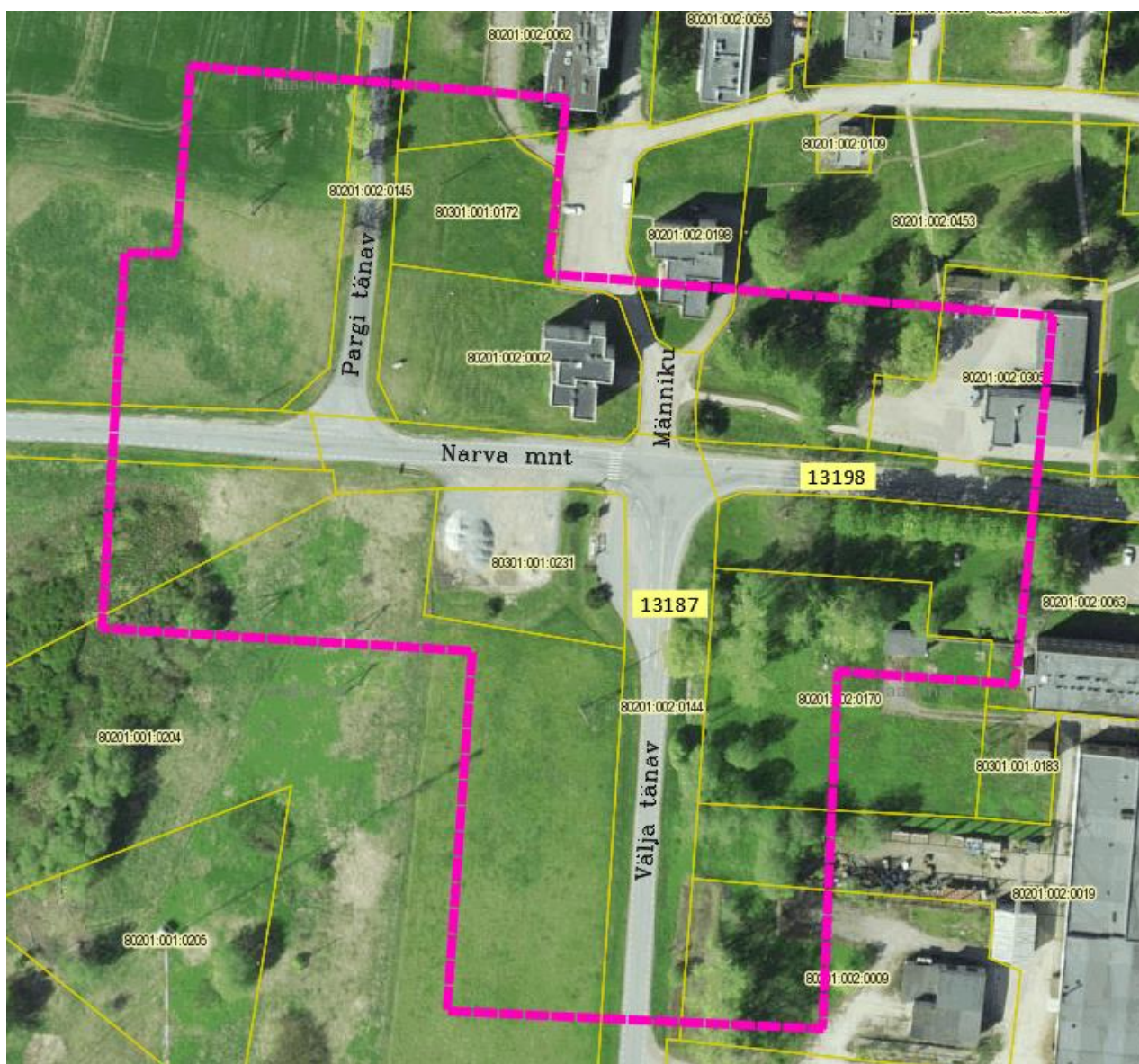
Kõik topo-geodeetilised uurimistööd peavad olema kooskõlas Majandus- ja taristuministri 14. aprilli 2016.a. määrusega nr 34: „Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded“.

Täiendavalt peavad liiklusrajatiste projekteerimiseks tehtavad uurimistööd vastama Maanteeameti peadirektori 13.05.2008 käskkirjaga nr 102 kinnitatud juhendile „Täiendavad nõuded topo-geodeetilistele uurimistöödele teede projekteerimisel“. Tuleb tõdeda, et antud Transpordiameti nõuded on tänaseks päevaks vananenud ja ei sisalda selgeid ning ühtseid juhiseid kolmemõõtmelise topo-geodeetilise alusplaani loomiseks. Seega hetkeolukorras otsesed nõuded puuduvad ja see on probleemiks nii töö tegijale kui tellijale. Tihti peale ei tea tellijad täpselt millist informatsiooni peab konkreetne uurimistöö sisaldama ja kui detailset tööd projekteerimiseks tegelikult vajatakse. Reaalsuses selgub ka, et tellijatel puudub tellitud kolmemõõtmeliste tööde formaatidega töötamiseks vajalik spetsiaalne tarkvara.

Käesoleva lõputöö valmimise ajal olid uuendatud Transpordiameti nõuded koostamisel.

2 NÄIDISOBJEKT

Antud lõputöö objektiks oli Ida-Virumaal Toila vallas asuva riigitee 13187 Toila-Oru km 4,341 Voka asula ristmik (Joonis 1). Tegemist oli ~4,02 ha suuruse maa-alaga, kus asus osaliselt valgustatud ja kanaliseerimata neljajaruline ristmik. Ristmiku piirkonnas asus riigitee 13187 km 4,359 paremal poolel bussipeatus „Voka”. Tegemist oli isetekkelise bussitaskuga koos ootealaga, kuhu oli paigaldatud ootekoda. Bussitasku mõõtmed ei vastanud nõuetele ning ristmiku ja bussitasku piir ei olnud tajutav. Ristmiku alal puudusid kergliiklejate ühendusteed ning jalakäijad kasutasid teepeenart. Lisaks asus ristmiku piirkonnas riigitee 13187 ääres määramata otstarbega plats, mida kasutati tagasipöördekohana või parkimisplatsina. Puudus konkreetne sisse- ja väljasõit. [1]



Joonis 1. Riigiteede 13187 Toila-Oru ja 13198 Voka-Sillamäe ning kohaliku tee nr 8020641 Männiku tänava neljajaruline ristmik [2]

2.1 Lähteülesanne

Töö tellijaks oli ROADPLAN OÜ.

Töö põhieesmärgiks oli ristmiku ümberehitamine, et tõsta liiklusohutuse taset. Töö täiendavaks eesmärgiks oli piloteerida erinevate kaugseire meetodite (fotogramm-meetria, mobiilne laserskaneerimine) abil alusandmete kogumist projekteerimise faasis ning koostada erinevate meetodite ja andmete võrdlusanalüüs kontaktse tahhümeetrilise mõõdistuse andmetega. Töö tulemuse alusel hakati täiendama Transpordiameti nõudeid topo-geodeetilistele uurimistöödele teede projekteerimisel. [1]

Topo-geodeetilised uuringud tuli teostada vastavalt majandus- ja taristuministri 14.04.2016 määrusele nr 34 „Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded“ ja Maanteeameti peadirektori 13.05.2008 käskkirjaga nr 102 kinnitatud juhendile „Täiendavad nõuded topo-geodeetilistele uurimistöödele teede projekteerimisel“. [1]

Objekti tuli mõõdistada kolmel eri viisil: mobiilse laserskanneriga, drooniga fotogramm-meetriliselt ja kontaktset tahhümeetriga. Kõik mõõdistused pidid olema teostatud täpsusega, mille alusel oli võimalik koostada geodeetiline alusplaan mõõtkavas 1:500 vastavalt määruses „Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded“ toodule. [1]

Iga mõõdistusviisi kohta tuli koostada eraldi kolmemõõtmeline digitaalne maapinnamudel. Maapinnamudeli failis pidid olema esitatud maapinnale iseloomulikud murdejooned (katte serv, mulde serv, äärekivi ülemine ja alumine serv, kraavide ülemine ja alumine serv). Rajatiste ja elementide modelleerimisel tuli esitada mudelifailidena järgnevate rajatiste ja elementide näidised [1]:

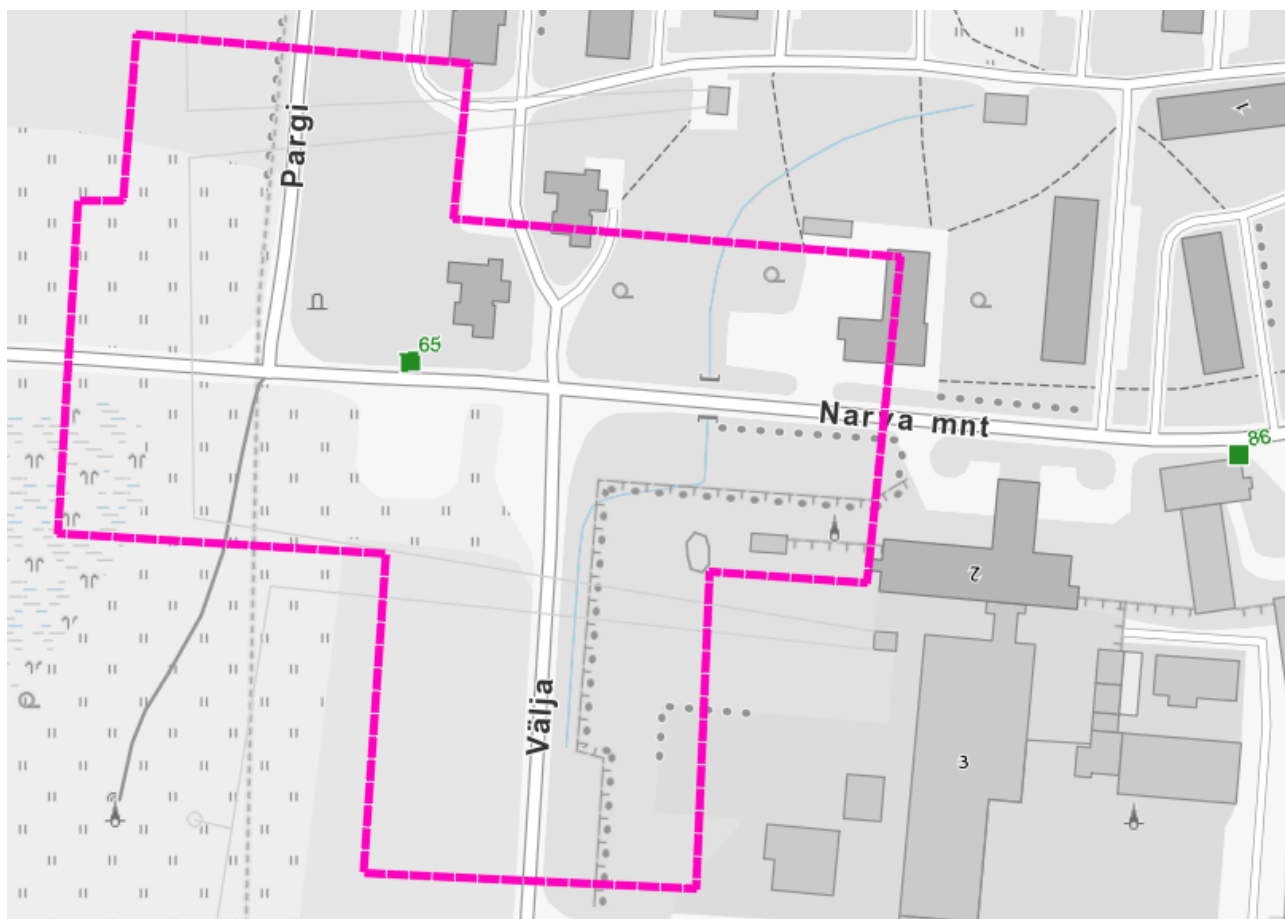
- katte pind;
- äärekivi;
- valgustuspostid;
- õhuliin;
- liiklusmärgid;
- bussiootepaviljon;
- truup.

2.2 Mõõdistusvõrk

Kõik mõõdistused tuginesid objektile asuval polügonomeetriapunktile nr 65 ja objekti läheduses asuval polügonomeetriapunktile nr 86 (Tabel 1, Joonis 2). Koordinaadid on L-EST 97 koordinaatsüsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis.

Tabel 1. Polügonomeetriapunktide koordinaadid [3]

Punkti nr.	X	Y	H
PP65	6590563.768	703186.289	37.717
PP86	6590535.483	703439.728	31.827



Joonis 2. PP65 ja PP86 paiknemine (roosaga tähistatud mõõdistusala piir) [2]

3 ANDEMETE KOGUMISE VIISID

3.1 Laserskaneerimine

Laserskaneerimine on kaugseire meetod, mis kasutab eemal asuvate objektide detailseks mõõtmiseks laserkiiri ja mille eesmärk on koguda vastavatest objektidest punktipilv. Objektide kolmemõõtmeline (3D) punktipilv arvutatakse välja kasutades kaugusi ja nurki, mille alt laserkiir välja saadeti. [4]

Punktipilv koosneb paljudest mõõdistuspunktidest ja hõlmab endas iga objektilt salvestatud punkti kaugust ja selle asukohta ruumis, mis tulenevad punkti kolmemõõtmelistest (x, y, z) koordinaatidest. Punktipilve saab kasutada objekti kuju uurimiseks, mõõtude määramiseks, visualiseerimiseks ning modelleerimiseks. [5]

Iga mõõdistatud punkt sisaldab lisaks asukohalisele informatsioonile ka intensiivsuse (I) väärtust (väärtus on standardiseerimata), mis kuvatakse punktipilves kas ühe värvitooni gradatsioonina (toon vahemikus 0-255 väärtust) või RGB värvidega (toonid 0-255; 0-255; 0-255). Sisuliselt kirjeldab intensiivsus tagasipeegeldunud signaali võimsust (sellest ka punkti värvitoon). [5]

Skaneerimisel on võimalik salvestada ka objekti tegelikud värvandmed (RGB – värvikood). Sellisel juhul on võimalus punktipilve kuvada ka objekti reaalse värvidega. Üksainus punktipilve punkt omab seega asukoha koordinaatide infot (x, y, z), intensiivsuse (I) väärtust ja võib omada ka tegelikku värviinfot (RGB-koodi). [5]

Laserskaneerimine võib jaguneda kolmeks, vastavalt sellele kuhu on kinnitatud laserskanner. Kui laserskanner on paigutatud statiivile on tegemist terestriiline laserskaneerimisega (TLS), kui on paigutatud maapealsele liikuvplatvormile on tegemist mobiilse laserskaneerimisega (MLS) või kui on paigutatud lennumasinale on tegemist aerolaserskaneerimisega (ALS).

3.1.1 Mobiilne laserskaneerimine

Mobiilne laserskaneerimine tähendab mingisuguselt liikuvvahendilt skaneerimist. Laserskanner on sel juhul kinnitatud liikuva sõiduki külge, mis liigub maa all, maa peal või vees. Mobiilselt skaneerides tõuseb välitöö jõudlus, kuna ei pea skannerit igas jaamas eraldi üles seadma ja tõuseb ka tööde tegemise ohutus. Lisaks on sõidukile paigaldatud fotokaamerad, mis teevad ka hilisema punktipilve töötamise lihtsamaks ning kiiremaks.

Kuna laserskanner liigub tekivad igal mõõtmisel punktid uue koordinaatsüsteemi järgi. Punktipilve ühtsesse koordinaatsüsteemi viimiseks peab mobiilne skanner olema varustatud GNSS-vastuvõtja ning IMU (*Inertial Measurement Unit*) seadmega. Lisaks sellele peavad kõigi kasutatavate sensorite kellad olema täpselt sünkroniseeritud. [6]

Mobiilsel laserskaneerimisel on kaks peamist mõõdistusmeetodit: peatu – ja – mööda meetod, ning pideva mõõtmise meetod.

Peatu – ja – mööda meetodil on skanner kinnitatud sõiduki küljes olevale platvormile. Sõiduki valik sõltub töö olemusest. Maanteedel kasutatakse põhiliselt mikrobusse või maastureid, sisetöödel võib kasutada ka käsitsi lükatavaid käreid. Skaneerimine toimub staatiliselt ehk ühest punktist, skaneerimise ajal asukohta ei muudeta ega skannerit ei keerata. Skaneerida saab ka kogu panoraami korraga, kuid ainult ühe suuna skaneerimine ühe skanneriga on tõhusam – aukude vältimiseks punktipilvedes võib mööda trassi tagasi liikudes uued mõõtmised teha (edasi – tagasi meetod). Pärast ühest punktist skaneerimist liigub sõiduk uude kohta ning seejärel alustatakse järgmise skaneerimisega. Niimoodi mõõdetakse pikad objektid samm-sammult. [6]

Peatu – ja – mööda meetodil on igast skaneeritud punktist saadud punktipilv mille koordinaadid on määratletud skanneri ajutiste asukohakoordinaatide ja skanneri telgede asendiga. Kuna peatu – ja – mööda sarnaneb tööpõhimõttelt staatilise mõõtmisega, siis pilvede kokku seadmine ja globaalsesse koordinaatsüsteemi panemine baseerub samadel algoritmidel, mis staatilise mõõtmise puhul. Punktipilvede kokku seadmiseks ehk registreerimiseks on tavaliselt vaja vähemalt 50% kattuvust punktipilvede vahel. [6]

Pideva mõõtmise meetod tähendab, et sõiduk liigub mööda trajektoori ilma peatusteta ja laserskanner on seadistatud mõõtma pidevalt kahemõõtmelisi profiile. Kuna sõiduk liigub mööda trajektoori joonistub profiilidest kokku kolmemõõtmeline punktipilv. Seega skaneerimise resolutsioon sõltub põhiliselt profiilide resolutsioonist ja sõiduki kiirusest. [6]

Pideva mõõtmise meetodi puhul tekib igal mõõtmishetkel punktidele individuaalne koordinaatsüsteem, seega kõige keerulisem on punktipilve ühte koordinaatsüsteemi saada. Siinkohal on väga oluline IMU seadme ning GNSS-vastuvõtja olemasolu. Skanneri hetkeasukohta ja telgede asendit tuleb mõõta pidevalt ja väga täpselt ruumilises koordinaatsüsteemis samal ajaskaalal. Asukoha ja asendi andmeid saadakse kombineeritud süsteemist – IMU seade, kaks GNSS-vastuvõtjat ja odomeeter. [6]

Punktipilve kokkupanek ja globaalsesse koordinaatsüsteemi panemine on kõige suuremaks erinevuseks pideva mõõtmise ja peatu – ja – mõõda meetodi vahel.

Peatu – ja – mõõda meetod on võrreldes pideva mõõtmise meetodiga stabiilsem, kuna konstante skaneerimiskiirus mõõdistamise ajal tagab täpsemad tulemused. Pideva mõõtmise ajal põhjustavad ebatäpsusi tee kumerused ja külmud, mis mõjutavad skanneri platvormi stabiilsust, mis omakorda häirib IMU seadme ja GNSS-vastuvõtja tööd. [7]

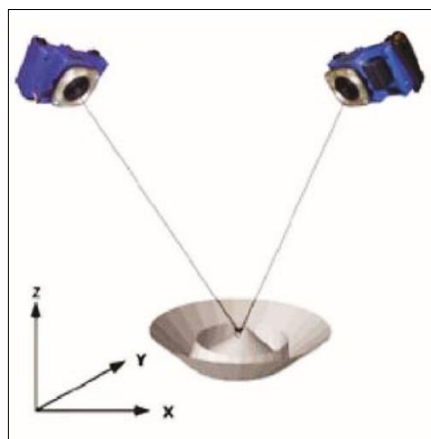
3.2 Aerofotogramm-meetria

Fotogramm-meetria on teadus objekti kuju, mõõtmete ja asendi määramiseks fotode järgi. Fotogramm-meetria jagatakse vastavalt pildistamismeetodile kolmeks [8]:

- satelliitfotogramm-meetria – fotod tehakse satelliidilt;
- aerofotogramm-meetria – fotod tehakse õhusõidukilt;
- terestiline fotogramm-meetria – fotod tehakse maapinnalt.

Fotogramm-meetria üheks põhiliseks väljundiks maa-ala plaani koostamise eesmärgil on kattuvatest 2D fotodest genereeritud 3D punktipilv, kus iga punkt omab iseloomulikke kolmemõõtmelisi (x , y , z) koordinaate.

Punktidele määratakse koordinaadid aerotriangulatsiooni põhimõttel. Ühele punktile koordinaatide määramiseks peab konkreetne punkt olema kujutatud vähemalt kahel fotol ehk kõikidel fotodel peab olema ülekate (Joonis 3). Omades fotode või maapinnal asuvate kontrollpunktide koordinaate ja pildistamise suunda, on võimalik punkti koordinaadid hilisemas andmetöötluses määrata õiges koordinaatsüsteemis. Kui algkoordinaadid puuduvad on tulemuseks suvalises koordinaatsüsteemis ja mõõtkavas paiknevatest punktidest koosnev punktipilv. [9]



Joonis 3. Fotode ülekate, ühe punkti triangulatsioon [9]

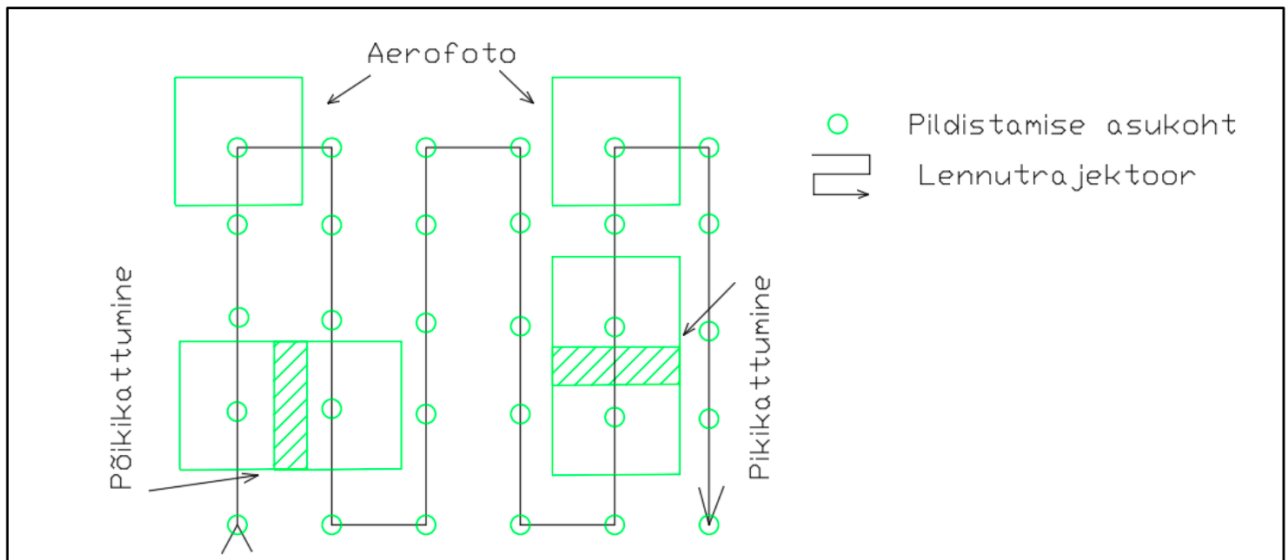
Aerofotogramm-meetrilise mõõdistuse täpsus sõltub kasutatava kaamera kvaliteedist, ilmastikutingimustest ja aeromõõdistusel kasutatavatest lennuparameetritest.

Otseselt oleneb aerofotogramm-meetrilisel mõõdistusel tehtavate fotode kvaliteet ja sellest tulenevalt ka kogu mõõdistuse kvaliteet kaamera parameetritest. Peamised kaamera parameetrid mis mõjutavad fotode kvaliteeti on piksli suurus, fotosensori suurus, fookuskaugus, ISO (*International Organization for Standardization*), kaamera avaus ja säriaeg. Piksel ehk pildielement on üks värvi ja heledust omav punkt millest foto koosneb – mida suurem pikslite suurus, seda suurem on fotode signaali ja müra suhe. Fotosensor registreerib sellele langenud valguse pildistamise ajal – mida suurem fotosensor, seda laiem on vaateväli ehk FoV (*Field of View*). Fookus on punkt kus valguskiired lõikuvad, kui objekt on fookuses jääb tulemuseks selge, terav ja hea lahutusvõimega foto. Mida suurem fookuskaugus, seda väiksem jääb foto lahutusvõime ehk GSD (*Ground Sampling Distance*) ja vaateväli ehk FoV. GSD näitab kahe kõrvuti asuva piksli tsentrite vahekaugust. Fookuskaugust mõjutavad kaamera lääts materjal ja selle pinna kõverusraadius. ISO väärtus mõjutab fotode heledust – mida suurem ISO väärtus, seda heledam foto. Kaamera avaus ja säriaeg määravad fotosensori valguse saamise aja ja mahu. Säriaeg näitab kui pikalt on fotosensor valgusele avatud. [10]

Täpseima aerofotogramm-meetrilise mõõdistuse tulemuse saamiseks tuleb lennu planeerimisel arvestada ka ilmastikutingimustega. Mõõdistustes põhjustavad ebatäpsusi (liigne müra, fotode hägusus, puudulik või moonutatud info) sademed, tugev tuul ja talvised olud. Samuti mõjutab fotode kvaliteeti madal päike, mis põhjustab objektide juurde pikki varje, mis omakorda muudavad hilisemas andmetöötlemises objektide asukoha täpse tuvastamise aerofotolt keeruliseks (eriti kõrgete vertikaalsete objektide puhul) ja põhjustavad ebaloomulikke hälbeid ka kõrgusinfos.

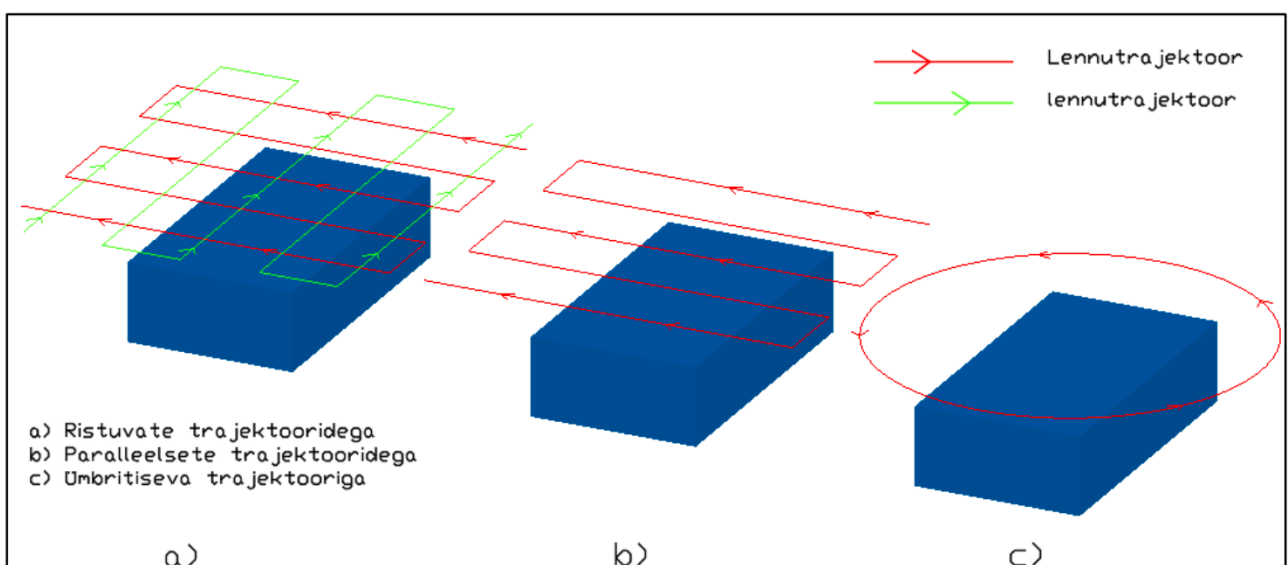
Lennu planeerimisel on mõõdistuse vajaliku detailsuse ja täpsuse saavutamiseks arvestada objekti eripäradega ja valida vastavalt sobivad lennuparameetrid: lennukiirus, lennukõrgus, lennutrajektoor, fotode ülekattumine ja kaamera asend. Lennukiirus mõjutab lennuaega ja fotode kvaliteeti – kiirema kiiruse puhul jõuab mõõdistada suurema maa-ala, kuid suureneb võimalus hägusate fotode tekkeks. Lennukõrgus ehk objekti (näiteks maapinna) ja õhusõiduki vaheline vertikaalne vahemaa mõjutab samuti lennuaega ja fotode kvaliteeti – kõrgema lennu puhul jääb fotole suurem maa-ala, kuid foto kvaliteet väheneb ning madalama lennu puhul on küll fotod detailsemad, kuid lennuaeg pikeneb ja kõrvuti asuvatel fotodel olevate ühiste punktide arv väheneb. Lennukõrgusest sõltub suuresti ka üks olulisim drooniga mõõdistamise kvaliteedi näitaja – GSD. Parema GSD väärtuse saamiseks tuleb lennukõrgust vähendada või kaamera fookuskaugust suurendada. GSD väärtus võiks olla 1/5 väikseima huvipakkuva objekti suurusest. [10]

Lennutrajektorist ehk õhusõiduki liikumise teekonnast sõltuvad fotode ülekattuvust iseloomustavad suurused: piki- ja põikikattumine. Pikikattumine on lennutrajektoori suunaline kahe järjestikuse foto ühisosa ja põikikattumine on kahe paralleelsel lennutrajektoril asuvate fotode külgmise ühisosa (Joonis 4). Fotode kattumisi väljendatakse protsentides. Soovituslik põikikattumine aeromöödistamisel on 60 % ja pikikattumine vähemalt 75 %. [10]



Joonis 4. Aeromöödistamise piki- ja põikikattumine [10]

Et piki- ja põikikattumise nõudeid täita on soovitatav möödistada korrapärase paralleelsete trajektoridenä või kui objektil palju nähtavust piiravaid objekte, siis ristuvate trajektoridega (Joonis 5). Kui möödistatakse ainult ühte kõrget objekti on otstarbekas kasutada objekti ümbritsevat lennutrajektoori (Joonis 5). [10]



Joonis 5. Aeromöödistamise erinevad lennutrajektorid [10]

Vastavalt lennujuhtimistarkvarast võivad kaamera asend ja kaamera vaatenurga väärtus erineda. Kaamera vaatenurk valitakse vastavalt aerofotogramm-meetrilise mõõdistuse tulemuse eesmärgist. Objektide plaaniliseks kaardistamiseks on kõige optimaalsem valida kaamera vaatenurgaks 90°. See tähendab, et kaamera on suunatud loodjoonega samas suunas, ehk vaatenurk on nadiirsuunaline. Kui soovitakse detailsemalt mõõdistada kõrgemaid vertikaalseid objekte, on soovitatav kaamera vaatenurka muuta ja sellisel juhul on tulemuseks kaldaerofoto. [10]

3.3 Elektrontahhümeeter

Elektrontahhümeeter on kombinatsioon elektroonilisest laserkaugusmõõturist ja elektroonilisest nurgamõõturist (teodoliidist). Seadmesse on integreeritud mikroprotsessor, elektrooniline andmekoguja ja salvestussüsteem. Seadmega mõõdetakse üheaegselt horisontaal- ja vertikaaltasandil olevaid nurki ning kaldkaugust mõõdistatava objektini. [11]

Laserkaugusmõõtuuri ülesanne on täpselt mõõdistada kaldkaugust instrumendist objektini. Teodoliidi ülesanne on mõõta vertikaalseid ja horisontaalseid nurkasid. Integreeritud mikroprotsessor töötleb kogutud andmeid (kaldkaugust, vertikaal- ja horisontaalnurki), et arvutada mõõdistatava punkti kõik kolm koordinaati – plaaniline asetus (x, y) ja kõrgus (z). Automaatselt arvestatakse juurde töö teostaja poolt siestatud temperatuuri ja õhurõhu parandid. Kogutud andmed saab sobivasse formaati eksportida ja vastavasse arvutitarkvarasse edasiseks andmetöötluseks importida. [11]

Tahhümeetriga mõõdistamiseks on vajalik veel prisma koos prismauuga, statiiv, treeger ja väliarvuti. Tahhümeeter paigutatakse statiivile ja looditakse treegeri küljes olevatest loodimiskruvidest. Tahhümeetri juhtimiseks kasutatakse väliarvutit, kust näeb jooksvalt mõõdistatud tulemusi ja saab kiirelt muuta vastavalt vajadusele mõõtmise parameetreid. Prismaga ühenduse korral või tagasipeegeldunud laserkiire abil mõõdetakse kaugus ja fikseeritakse elektroonilise horisontaal- ja vertikaalringi lugemid. [12]

Õigete plaaniliste koordinaatide saamiseks peab instrument (limb) olema õigesti orienteeritud, selleks tuleb kõigepealt läbida „orienteerimisprogramm“. Tahhümeetri orienteerimine tähendab, et elektroonilise horisontaallimbi lugem peab võrduma viseerimiskiire suunalise direktsiooninurgaga. Kui tahhümeeter asub tuntud koordinaatidega seisupunktil, on orienteerimiseks vaja veel ühte tuntud koordinaatidega punkti (kindelpunkti). Tahhümeetri mikroprotsessor arvutab geodeetilisest vastuülesandest tahhümeetri seisupunktilt kindelpunktisuunalise direktsiooninurga. Suunates viseerimiskiire kindelpunktile, jääbki elektroonilise limbi lugemiks selle suuna direktsiooninurk ja limb on sellisel juhul õigesti orienteeritud. Veel on võimalik tahhümeetrit orienteerida, kui on olemas

kaks kindelpunkti ja tahhümeeter paigutatakse suvaliste koordinaatidega kohale kust on nähtavus mõlemale punktile. Mõõtes kindelpunktid sisse, arvutab mikroprotsessor tahhümeetri seisupunkti koordinaadid ning instrument (limb) on õigesti orienteeritud. Jälgida tuleks vaid, et lõikesuundade vaheline nurk ei jääks alla 30° ja ei oleks suurem kui 150° . [12]

Mõõdistatavatele punktidele saadakse kõrgused trigonomeetrilise nivelleerimise põhimõtetel. Kõrguskasvu arvutamiseks on tahhümeetrile vajalikud jaama kõrgus, instrumendi kõrgus, viseerimiskõrgus ehk prisma kõrgus ja mõõdetud vastav vertikaaltasandi nurk ning kaldkaugus. [12]

Õigete koordinaatide (x, y, z) mõõdistamine oleneb suuresti ka prismaaia vertikaalasendis hoidmisest.

4 ERINEVATE MEETODITEGA ANDMETE KOGUMINE

4.1 Kasutatud instrumendid

4.1.1 Laserskanner Riegl VMZ/VZ-400 ja GNSS baasjaam Sokkia GCX-2

Mobiilne laserskaneerimine sooritati skanneriga Riegl VMZ/VZ-400 (Foto 1 ja Foto 2). Skanneri mõõtmistäpsuseks on ± 3 mm. Punktimõõtmiskiirus on kuni 122 000 punkti sekundis ja skaneerimiskaugus 1,5 – 600 m. Skanneri mõõteulatus vertikaalasendis on 100° ja horisontaalasendis 360° . Seade töötab temperatuuridel -10°C kuni $+50^\circ\text{C}$. [13]



Foto 1. Riegl VMZ/VZ-400 laserskanner [13]



Foto 2. Kasutatud laserskanner Riegl VMZ/VZ-400 [14]

Foto 2 on kasutatud laserskanner, mida on täiendatud GNSS vastuvõtja ja inertsimõõtja IMU (*Inertial Measurement Unit*) seadmega, ning selle külge on kinnitatud Nikon D800 36,3 Mpix fotokaamera.

Mobiilselt skaneerides paigaldati objektile baasjaamaks Sokkia GCX-2 GNSS vastuvõtja (Foto 3), mis kogus asukohaandmeid kogu skaneerimise perioodi vältel. Vastuvõtja asukoha kõrguslik täpsus staatilise mõõdistusrežiimi korral on 5 mm + 0,5 ppm. [15]



Foto 3. GNSS baasjaam Sokkia GCX-2 [15]

4.1.2 Droon DJI Phantom 4 RTK ja DJI D-RTK GPS tugijaam

Aerofotogramm-meetrilisel mõõdistusel kasutati drooni DJI Phantom 4 RTK ja DJI D-RTK GPS tugijaama (Foto 4). Drooni vertikaalne positsioneerimise täpsus on $1.5 \text{ cm} + 1 \text{ ppm (RMS)}$ ja horisontaalne positsioneerimise täpsus on $1 \text{ cm} + 1 \text{ ppm (RMS)}$. 1 ppm on vea kaugusest sõltuv komponent 1mm 1km kohta. Kaamera on varustatud 1 tollise 20 MP CMOS sensoriga. Piksli mõõt maapinnal (GSD – *ground sample distance*) arvutatakse valemiga $H \div 36.5 \text{ cm/piksel}$, H on drooni kõrgus (kaldepiltide korral kaugus) maapinna või muu pildistatava elemendi suhtes. [16]



Foto 4. Kasutatud droon DJI Phantom 4 RTK ja DJI D-RTK GPS tugijaam [16]

4.1.3 Elektrontahhümeeter Trimble S5

Kontaktne tahhümeetriline mõõdistus viidi läbi robottahhümeetriga Trimble S5 (Foto 5). Tegemist on USA tehnoloogiafirma instrumendiga mille on projekteerinud Rootsi insenerid. Nurgaline täpsus on 2", kauguse mõõtmistäpsus prismaga $\pm 1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ ja laseriga $\pm 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$. Võimalus kasutada integreeritud mõõtmisrežiimi, ehk üheaegselt mõõta nii GNSS-süsteemis kui ka tahhümeetriliselt. [17]



Foto 5. Trimble S5 tahhümeeter [17]

4.1.4 Väliarvuti Trimble TSC7

Tahhümeetrilisel mõõdistamisel kasutati robotahhümeetriga Trimble S5 väliarvutit Trimble TSC7 (Foto 6). Antud kontrolleri on kombinatsioon ühendatud tahvelarvutist ja sülearvutist, mis kasutab Microsoft® Windows® 10 Pro ja Trimble Access™ tarkvara. Kontrolleriil on puutetundlik ekraan, taustavalgusega klaviatuur ja kaks kiirelt laetavat akut, mida saab vajadusel töö käigus vaheldumisi vahetada, ilma, et peaks kontrolleri välja lülitama. Puutetundliku ekraani suurus on 7". [18]



Foto 6. Trimble TSC7 kontrolleri [18]

4.1.5 Digitaalnivelliir Trimble DiNi-0.3

Nivelleerimiskäigu loomisel kasutati digitaalset kõrgusemõõtjat Trimble DiNi täpsusega 0.3 mm (Foto 7). Seade vastab tolmu ja vee vastasele kaitseklassile IP55, ekraani ja ringloodi sisse ehitatud valgustus võimaldavad töötada ka hämarates tingimustes ja kauakestvad akud võimaldavad töötada ühe laadimisega kuni kolm päeva. Seade töötab temperatuuridel -20°C kuni +50°C. [19]



Foto 7. Trimble DiNi-0.3 digitaalnivelliir [19]

4.1.6 GNSS-vastuvõtja Trimble R8s

GNSS mõõdistusel kasutati vastuvõtjat Trimble R8s (Foto 8). Seade on integreeritud antenniga ja kasutab kahte Trimble Maxwell 6 kiipi 440 GNSS kanaliga. Reaalajas mõõtes on horisontaalseks täpsuseks 8 mm ja vertikaalseks täpsuseks 15 mm. Positsioneerimise uuendamissagedus on 20 Hz ja seade sisaldavad Trimble 360° tehnoloogiat, mis toetavad kõiki erinevaid konstellatsioone. Vastuvõtjaga on võimalik registreerida järgnevaid satelliitsüsteeme ja nende sagedusi [20]:

- GPS: L1C/A, L1C, L2 C, L2E, L5;
- GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3;
- SBAS: L1C/A, L5;
- Galileo: E1, E5A, E5B;
- BeiDou (COMPASS): B1, B2;
- SBAS: QZSS, WAAS, EGNOS, GAGAN.



Foto 8. Trimble R8s GNSS-vastuvõtja [20]

4.1.7 Pihuarvuti Trimble TDC600

GNSS-vastuvõtjaga Trimble R8s kasutati väliarvutina pihuarvutit Trimble TDC600 (Foto 9). Tegemist on täiesti tavaliselt funktsioneeriva nutitelefoniga, millesse on integreeritud professionaalne GNSS-vastuvõtja. GNSS täpsus on 1,5 meetrit, arvuti töötab operatsioonisüsteemiga Android 8.0 ja ekraani suurus on 15,2 cm/6". Suurte andmemahutade kiireks töötlemiseks on seade varustatud 2,2 GHz Qualcomm® Snapdragon 626 protsessoriga. [21]

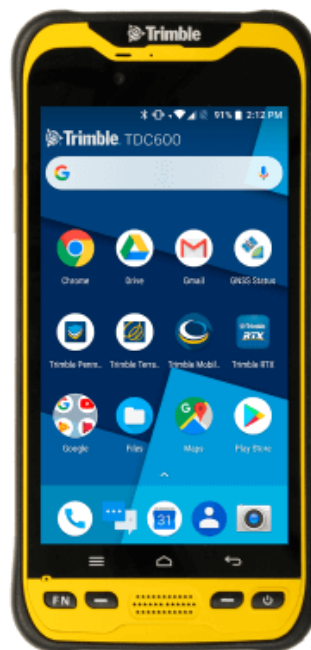


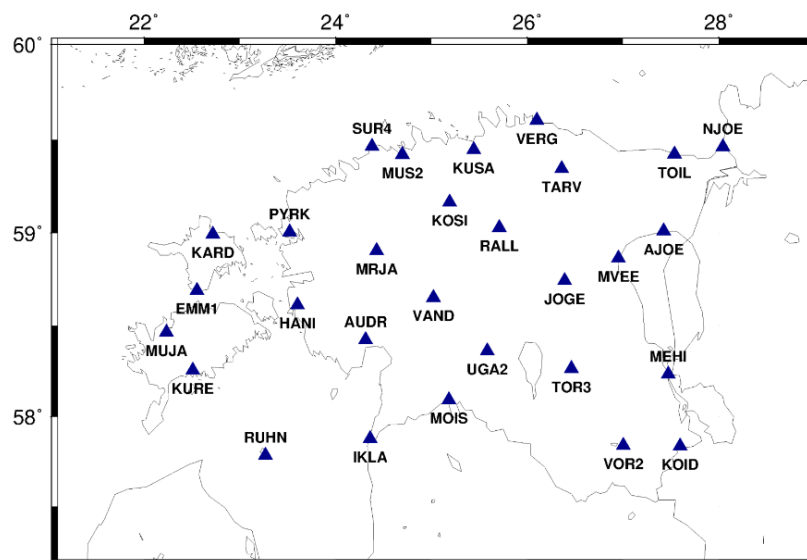
Foto 9. Trimble TDC600 pihuarvuti [21]

4.2 Trimble VRS Now

MLS mõõdistus, droonimõõdistus ja GPS-mõõdistus sooritati Trimble VRS Now võrgus. Tegemist on kommertsteenusega, mis võimaldab baasjaama kasutamata kohest juurdepääsu reaalajas kinemaatilistele (RTK – *real-time kinematic*) GPS ja GLONASS (GNSS) parandustele. Parandeid arvutatakse üle Eesti paigaldatud kontrolljaamade võrgu abil, mis koosneb üheksateistkümnest pidevalt töötavast referentsjaamast. Kontrolljaamad saadavad andmeid keskserverile ja server arvutab pidevalt välja võrguga kaetud regiooni kohast ja atmosfäärist tulenevaid parandusi. Maamõõtjate liikuvjaamad ühenduvad mobiiltelefoni ühenduse kaudu selle süsteemiga ja saadavad sellele NMEA (*National Marine Electronics Association*) formaadis andmete voona oma asukoha andmed. Keskserver tunneb liikuvjaama kui VRS seadme ära ja arvutab välja unikaalsed parandused liikuvjaamast mõne meetri kaugusele ulatuva ala kohta. See likvideerib ebatäpsused, mis varem baasjaamadest kaugemale liikumisest tulenesid. Lõppkasutaja saab 1 – 3 cm horisontaalse ja 1 – 5 cm vertikaalse täpsusega parandused. [22]

4.3 ESTPOS

ESTPOS on riiklik globaalse navigatsioonisatelliitide süsteemi sateliitandmete keskus, mille võrku kuulub 29 ühtlaselt Eesti territooriumile jaotatud GNSS-püsijaama (Joonis 6). Süsteemi kasutatakse Eesti geodeetilise referentsüsteemi komponentide jälgimiseks, eelkõige koordinaatide ning maapinna liikumiste määramiseks. Süsteemi abil on tagatud täpse asukohapõhise info kättesaadavus reaalajas positsioneerimise täpsusega 2-3 cm kogu riigis. Püsijaamade vaatlusandmeid ning GNSS reaalajas mõõtmiste teenust (RTN) on võimalik kasutada kõikidel riigiasutustel ja teaduslikel eesmärkidel. [23]



Joonis 6. ESTPOS GNSS-püsijaamade võrk [23]

4.4 Mõõdistamine mobiilse laserskanneriga

4.4.1 Ettevalmistustööd

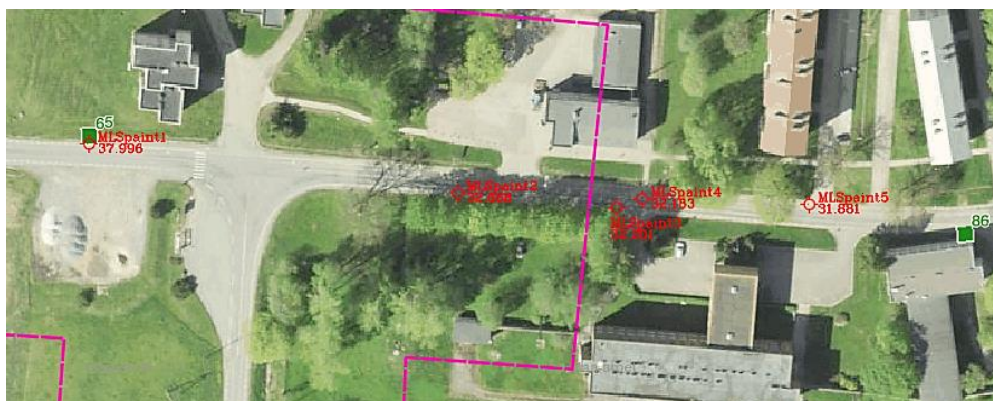
Kõigepealt määrati kindlaks ala ning mõõdistuspiir ja seejärel planeeriti baasjaama või -jaamade ning kontrollpunktide asukohad.

4.4.2 Alusvõrgu loomine

Mõõdistus seoti kõrguslikult objektile asuva kohaliku geodeetilise võrgu punktiga nr 65 ($H=37,717$). Objektile paigaldati GNSS-baasjaam Sokkia GCX-2, mille koordinaadid arvutati tarkvaraga Magnet Tools Maa-ameti püsijaamade võrgu ESTPOS ja Trimble VRS püsijaamade võrgu suhtes (Joonis 7). Sidumise arvutuste kohta on lisades vastav raport (Lisa 1). Kontrollpunktide asukohtadeks valiti iseloomulikud kohad situatsioonis, mis olid punktipilvest hästi äratuntavad, tähistati need värviga ja mõõdistati tahhümeetriga Trimble S5 geodeetiliste punktide 65 ja 86 suhtes (Joonis 8). [24]



Joonis 7. MLS mõõdistusvõrgu skeem [2]



Joonis 8. MLS kontrollpunktide asukohad [2]

4.4.3 Andmete kogumine

Mõõdistus teostati 14.07.2021 mobiilse laserskanneriga Riegl VMZ/VZ-400. Skanner oli paigutatud auto katusele.

Mõõdistuse täpsus tagatakse järgmiste seadete ja metoodikatega [24]:

- seade on varustatud kõrgtäpse inertsimõõtjaga (IMU/GNSS) ja rattapöörete lugejaga (DMI – *Distance Monitoring Item*);
- trajektoor määratakse kahe auto katusel oleva GNSS-antenni abil;
- enne ja peale mõõdistust tehakse spetsiaalse metoodika alusel laserskanneri, IMU, GNSS vastuvõtjate ja kaamera initsialiseerimised.

Skaneerimine toimus lehvikulaadselt, skanneri asend (horisontaalasend) ja orientatsioon valiti sellised, et ühe sõiduga skaneeriti auto liikumise suhtes tagasisuunaliselt 8,5-9 m laiune riba (7 m liikumistrajektooriga vasakule ja 2 m paremale). Punktiridade maksimaalne vahekaugus skaneerimisel on 5 cm ja punktide vahekaugus ühes reas (teega ristsuunaliselt) on ca 5 mm. Skanneri vertikaalasendis on maksimaalne skaneerimiskaugus 600 m. Sõidukiirus oli skaneerimisel 10-30 km/h. [24]

Mõõdistati ainult need piirkonnad, kuhu oli tagatud juurdepääs autoga mööda avalikuks kasutamiseks mõeldud teid. Eramadel ning teedeta aladel autoga ei liigutud.

4.4.4 Andmetöötlus

Punktipilve täpsus tagatakse täpse trajektooriarvutusega, kus kasutatakse kõiki skanneri, IMU, DMI, GNSS vastuvõtjate ja lähtepunktile püstitatud staatilisest GNSS-vastuvõtjast saadud andmeid.

Punktipilve arvutus ja töötlus toimus järgnevate etappidena [24]:

- trajektoori GNSS – arvutus;
- trajektoori arvutusele DMI koefitsiendi lisamine;
- punktipilvedest tolmu eemaldamine;
- eri sõitude punktipilvede ühitamine;
- punktipilvedest müra (autod, inimesed, vihm jne) puhastamine;
- punktipilve kontrollimine vastavalt kontrollmõõdistusele.

Punktipilv eksporditi *.las ja *.bin/idx formaatidesse, *.las failid sisestati programmi Autodesk ReCap ning loodi punktipilve ReCap failid.

4.5 Mõõdistamine aerofotogramm-meetriliselt

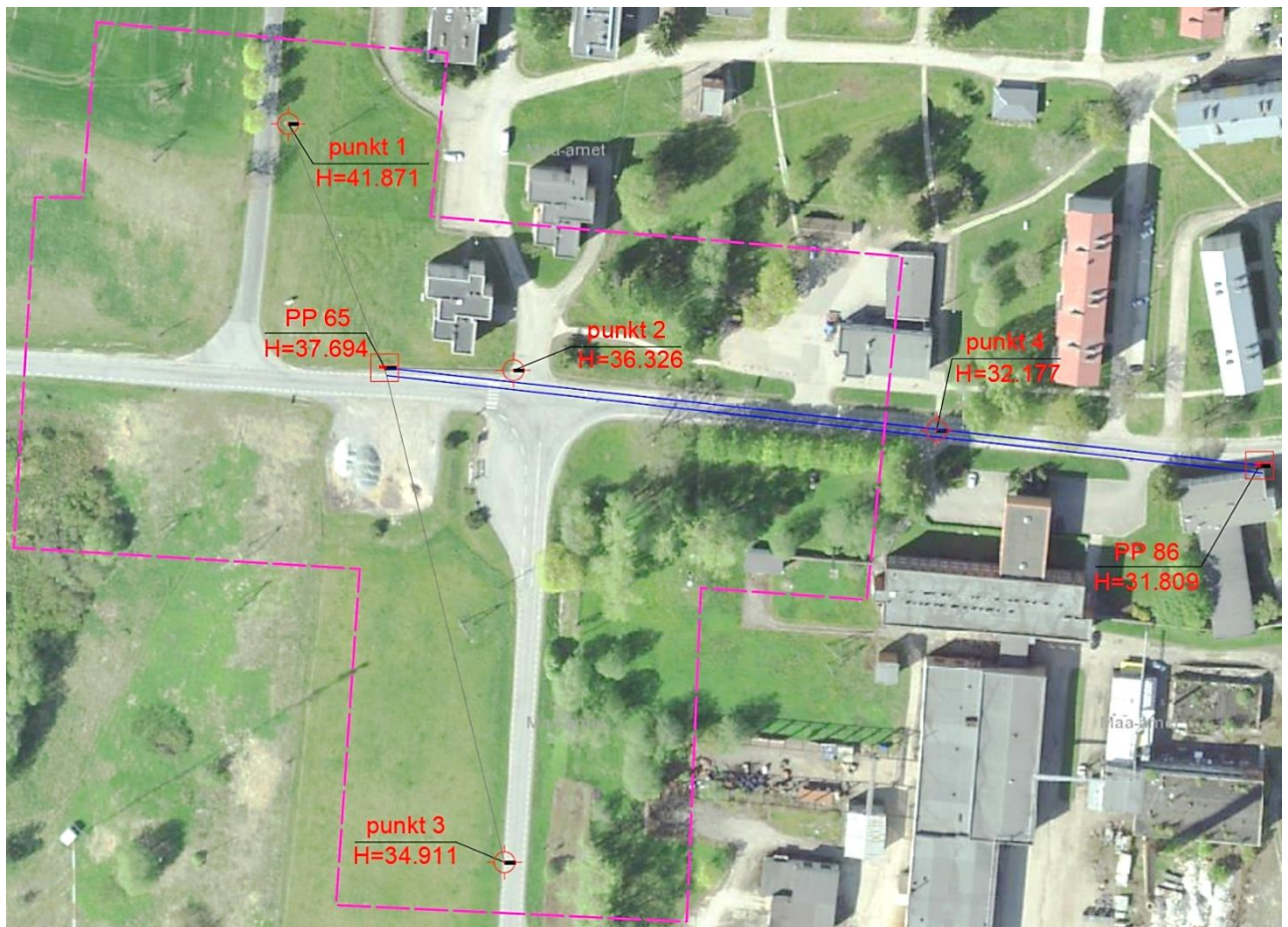
4.5.1 Ettevalmistustööd

Selgitati välja objekti parameetrid ja planeeriti ning koostati droonile lennuplaan. Planeeriti baasjaamade ning kontrollpunktide asukohad.

4.5.2 Alusvõrgu loomine

Mõõdistus tugines polügonomeetriapunktidele nr 65 ($H=37,717$) ja 86 ($H=31,827$). Punktidele nr 65 paigaldati DJI D-RTK GPS tugijaam.

Kontrollpunktide (GCP) mõõdistamisel märgiti maha 4 ajutist punkti, mille asukohad ja kõrgused mõõdeti täisvõttega geodeetiliste punktide 65 ja 86 suhtes robottahhümeetriga Trimble S5 (Joonis 9).



Joonis 9. Drooni mõõdistusvõrgu skeem [2]

4.5.3 Andmete kogumine

Mõõdistus teostati 12.08.2021 kell 13:07-13:57 drooniga DJI Phantom 4 RTK. Ilm oli mõõdistuse ajal pilvine. Lennukõrgus geodeetilise punkti nr 65 suhtes oli 80 meetrit, piksli suurus maapinnal 2,21 cm/pix ja lennukiiruseks oli 3,5 m/s. Kaamera nurk horisontaaltasapinna suhtes oli 90 kraadi, fotode ülekate mõlemas suunas oli 80% ja pildistatud puhvertsooniks ümber mõõdistusala jäi +50 meetrit. [25]

Lend koosnes korrapärastest paralleelsetest trajektooridest. Järgiti fotogramm-meetria tehnoloogia põhimõtteid, drooni tootja juhiseid, hea tava põhimõtteid ja kogemustega omandatud.

4.5.4 Andmetöötlus

Fotogramm-meetrilised arvutused ja punktipilve arvutus teostati tarkvaraga Agisoft 1.7.

Fotogramm-meetrilised arvutused andsid keskmisteks ruutvigadeks 3cm tasapinnaliselt ja 5cm kõrguslikult, mis on tavapärane UAV-mõõdistuste juures. Täpsemad karakteristikud on välja toodud lisades asuvas Agisoft raportis (Lisa 2). [25]

4.6 Mõõdistamine tahhümeetriselt

4.6.1 Ettevalmistustööd

Mõõdtpiir kopeeriti väliarvutisse *.dxf formaadis, tutvuti geodeetilise võrgu lähtepunktidega ja planeeriti täiendavaks mõõdistamiseks vajalik alusvõrk.

4.6.2 Alusvõrgu loomine

Mõõdistus tugines polügonomeetriapunktidele nr 65 (H=37,717) ja 86 (H=31,827). Esimene löige tehti lähtudes polügonomeetriapunktidest ja täiendavalt lisati mõõdistuse käigus vastavalt vajadusele ajutisi alusvõrgu punkte, mis kindlustati naelaga ja mõõdistati täisvõttega (Joonis 10). [26]



Joonis 10. Tahhümeetrilise mõõdistusvõrgu skeem [2]

4.6.3 Andmete kogumine

Mõõdistus teostati robotelekrontahhümeetriga Trimble S5. Esimene jaam rajati polügonomeetriapunktide 65 ja 86 alusel ning edasi liiguti kasutades vastavalt vajadusele täiendavaid alusvõrgupunkte ning samu polügonomeetriapunkte 65 ja 86. Mõõdistus toimus kontaktseires prismaauega. [26]

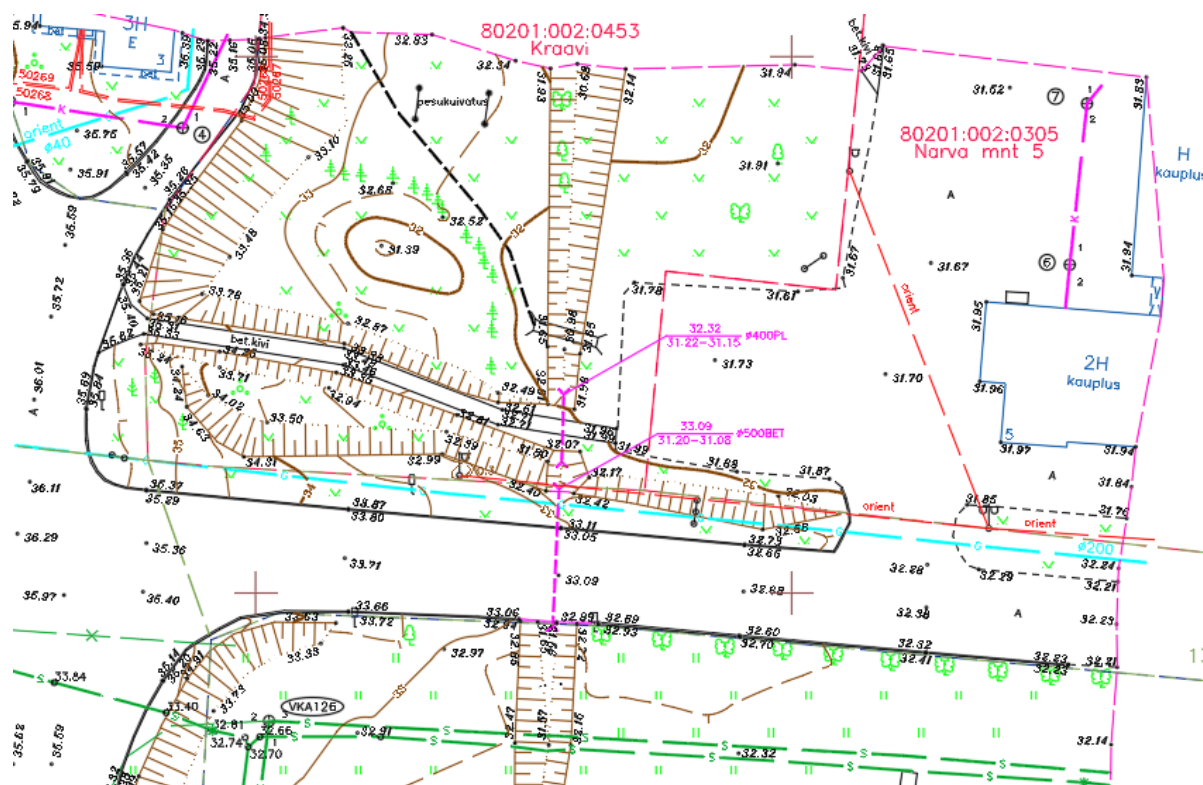
4.6.4 Andmetöötlus

Andmetöötlus oli tänu korrektsele positsioneerimisele ja korralikule protokollimisele lihtne ning kiire. Punktid väliarvutist eksporditi mälu pulgale ja imporditi programmi ZWCAD+ 2021 Professional Edition.

5 MAA-ALA PLAANI KOOSTAMINE

Maa-ala plaan tehti kooskõlas Majandus- ja taristuministri 22. aprill 2016.a. määrusega nr 34: „Topogeodeetilisele uuringule ja teostusmöödistamisele esitatavad nõuded”.

Plaan koostati vastavalt lähteülesandes sätestatule mõõtkavas 1:500-le. Projekteerimiseks tehtud plaan järgis enim tahhümeetrilise möödistuse tulemusi (Joonis 11).

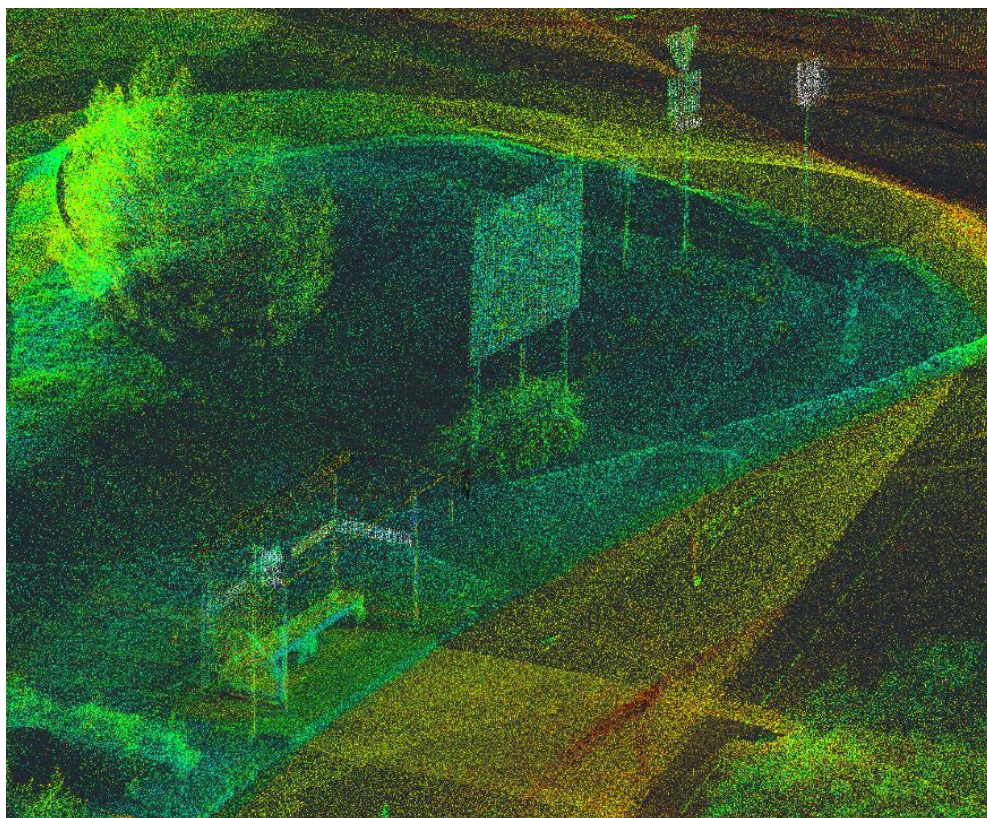


Joonis 11. Väljavõtte maa-ala plaanist

Plaani koostamisel kasutati tarkvarapakette Autodesk AutoCAD English 2022 ja ZWCAD+ 2021 Professional Edition.

Vastavalt andmete kogumise viisidele oli maa-ala plaani koostamine mõneti erinev.

Mobiilse laserskanneriga möödistamise korral eksporditi punktipilv *.las ja *.bin/idx formaatidesse, *.las failid sisestati programmi Autodesk ReCap ning ühitati ühtseteks punktipilve ReCap *.rcp failideks. ReCap punktipilv imporditi programmi Autodesk AutoCAD English 2022, kus algas joonestustöö (Joonis 12, Joonis 13). Punktipilve on võimalik AutoCAD programmis parima võimalikult täpse situatsiooni tõlgendamise eesmärgil kuvada kas skaneerimise värvidega, objekti värvidega, punkti orientatsiooni värvidega, kõrguslike värvidega, intensiivsuse alusel või *.las failide klassifikatsiooni alusel.

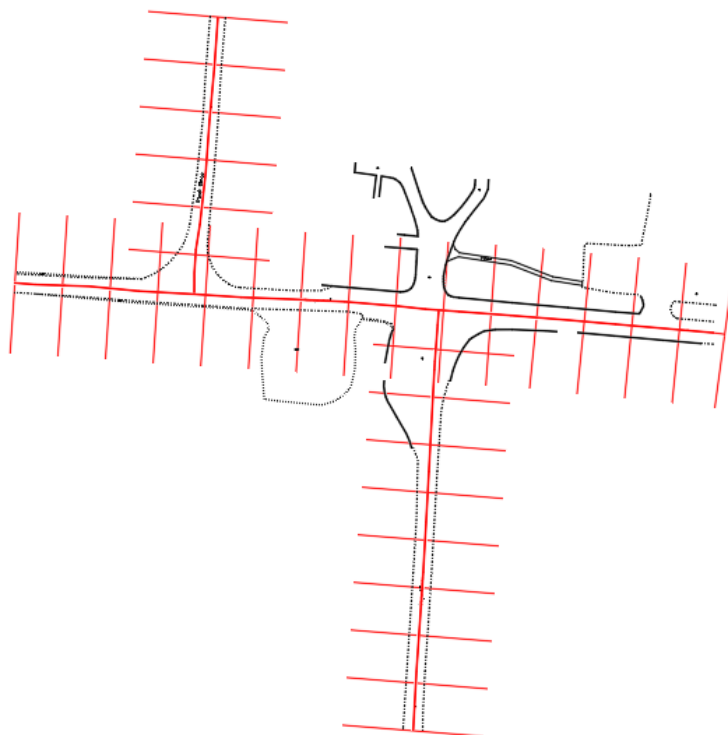


Joonis 12. MLS punktipilv intensiivsuse alusel kuvatuna



Joonis 13. MLS punktipilv intensiivsuse alusel kuvatuna

Punktipilvest maa-ala plaani joonestatakse pealtvaates, situatsiooni asukohta visuaalselt hinnates ja leppemärke ning jooni käsitsi välja tõmmates. Töö lihtsustamiseks on võimalik teede keskele tõmmata telgjooned ja tekitada abijoonena ristlõikejooned (Joonis 14). Nende ristlõigete juurde saab joonestamise käigus lisada punkti, kuhu saab hiljem automaatsuga lisada kõrguseid. Nii saab kogu teele lisada kõik kõrgused automaatselt (Joonis 15). Punktipilve kõrguspunktid imporditakse joontele *.idx failidest.



Joonis 14. Tee telgjoon ja ristlõikejooned (punased)



Joonis 15. Automaatselt lisatud teekõrgused (punased)

Joonestamise käigus tuli pidevalt situatsiooni jälgida ning kontrollida objektile tehtud fotodega. Samuti tuli jälgida kontrollmõõdistuse käigus saadud andmete vastavust punktipilvega. Maa-ala plaani asendi täpsus sõltub suuresti töö tegija kogemustest ja punktipilve tõlgendamise oskusest. Kogu joonestustöö toimub ikkagi käsitsi, sest hetkel ei ole veel kasutuses ühtegi usaldusväärset punktipilvest objektide automaatse tuvastamise programmi.

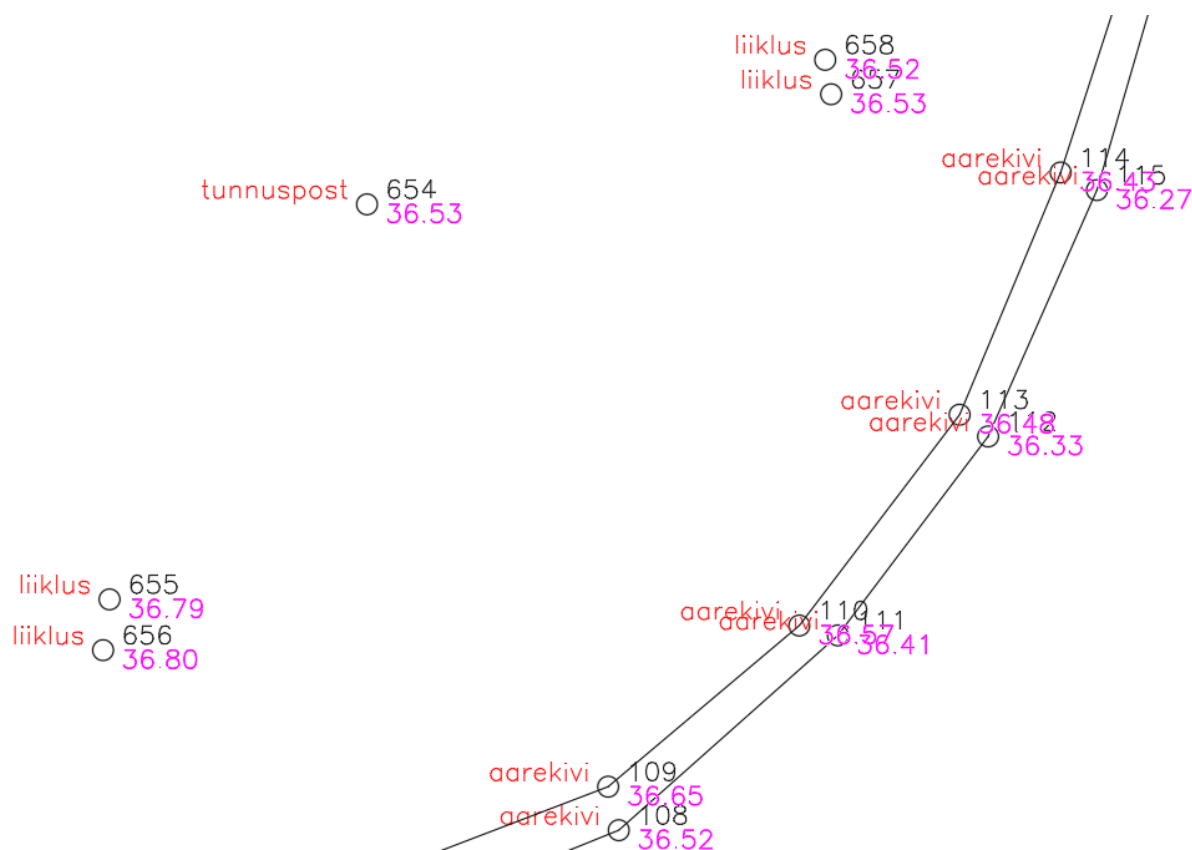
Aerofotogramm-meetrilise mõõdistuse korral arvutati punktipilv tarkvaraga Agisoft 1.7. Arvutatud pilv ja ka ortofoto imporditi programmi Autodesk AutoCAD English 2022, kus algas joonestustöö (Joonis 16).



Joonis 16. Aerofotogramm-meetrilise mõõdistuse ortofoto

Joonestamine toimub pealtvaates punktipilve ja ortofoto järgi, situatsiooni asukohta visuaalselt hinnates ja leppemärke ning jooni käsitsi välja tõmmates. Töö teevad siinkohal samuti lihtsamaks teedale tõmmatud telgjooned, ristlõikejooned ja automaatselt lisatavad kõrgused. Joonestamise käigus tuli jälgida kontrollmõõdistuse tulemusi ning maa-ala plaani asendi täpsus sõltub samuti töö tegija kogemustest ja tõlgendamise oskusest.

Tahhümeetrilise mõõdistuse korral eksporditi punktid väliarvutist mälupulgale ja imporditi programmi ZWCAD+ 2021 Professional Edition. Kuna välitool oli mõõdistus korrektselt positsioneeritud ja korralikult protokollitud oli edasine joonestustöö lihtne ning kiire. Maa-ala plaani loomiseks tuli punktid vastavalt mõõdistamisele käsitsi ühendada kasutades MKM nõuetes sätestatud joonetüüpe ning leppemärke (Joonis 17). Töö teeb lihtsamaks joonte automaatne kõrguste lisamise võimalus.



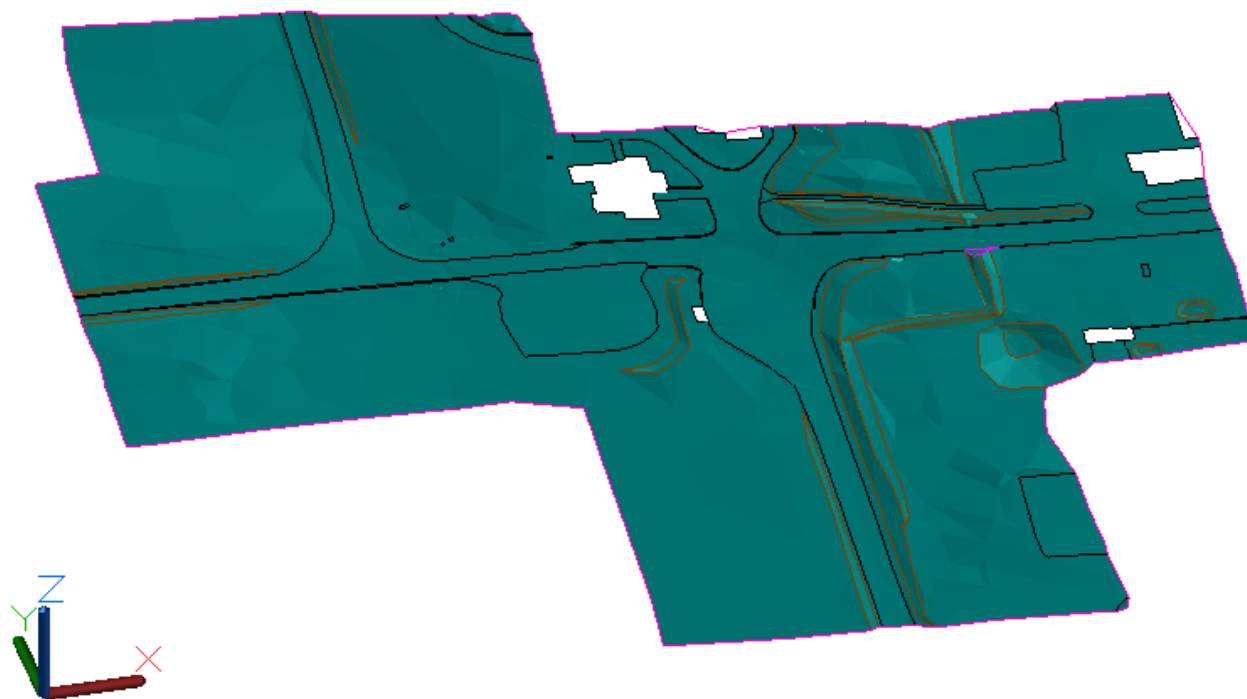
Joonis 17. Mõõdistuspunktid

Tehnovõrgud kanti plaanile mõõdistamistulemuste, uurimisandmete ning varasemate mõõdistus- ja uurimistööde ning teostusmõõdistuste alusel. Tehnovõrkude olemasolu kohta on info saadud Maa-ameti kitsenduste kaardilt. [26]

6 MODELLEERIMINE

6.1 Maapinnamudeli koostamine

Maapinnamudel, kus on kujutatud ka kõikide katendite pinnad, on koostatud programmiga Autodesk Civil 3D 2022 (Joonis 18). Mudel salvestati tellijale esitamiseks formaati LandXML.



Joonis 18. Maapinna kolmnurkmudel

Mudelis peavad olema esitatud maapinnale iseloomulikud murdejooned (katte serv, mulde serv, äärekivi ülemine ja alumine serv, kraavide ülemine ja alumine serv). Kasutatakse kõiki maapinnakõrgusi, välja jäetakse mõõdistatud muude objektide kõrgused, mis pannakse kihti „MOOTKORGMUU-EH2000“.

Kui on teada, et tuleb luua maapinnamudel, tuleb tahhümeetrilise mõõdistamise käigus arvestada, et igas käänupunktis peab olema kõrgus. Detailselt tuleb kindlasti mõõta ka kõik truubipäised ja reljeefi mõõtmise samm peaks maapinna iseärasusi arvestades reaalse olukorra kujutamiseks olema tihedam. MLS ja drooniga mõõdistamise käigus salvestatakse niigi piisavalt maapinnakõrgusi, seega lisaks millegagi arvestamine ei ole vajalik. Halva nähtavuse korral ja ligipääsmatutes kohtades tuleb ka ilma mudeli loomise nõudeta tahhümeetri või GNSS vastuvõtjaga lisamõõdistusi teha.

6.2 Rajatiste ja elementide modelleerimine

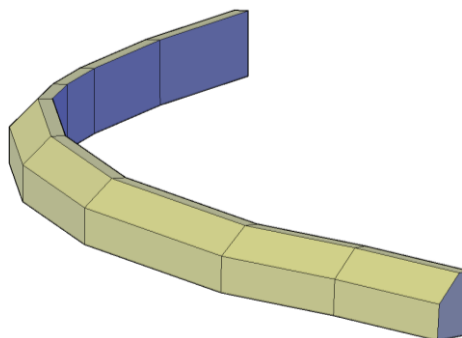
Teised modelleeritavad objektid (katendi pind, äärekivid, valgustuspostid, õhuliinid, liiklusmärgid, bussiootepaviljonid ja truubid) loodi samuti kasutades programmi Autodesk Civil 3D 2022. Kõik modelleerimiseks vajalikud kõrgused saadi mõõdistustulemustest.

Kuna kõikide katendite pinnad on juba maapinnamudelis kujutatud, tuleb sealt vastavad jooned välja valida ja nendest tellija soovil Solid 3D element tekitada (Joonis 19). Kõigist kolmest mõõdistusviisist saab modelleerimiseks vajalikud andmed tavapärase mõõtmistöö käigus kätte. Element salvestatakse tellijale esitamiseks *.ifc-formaati.



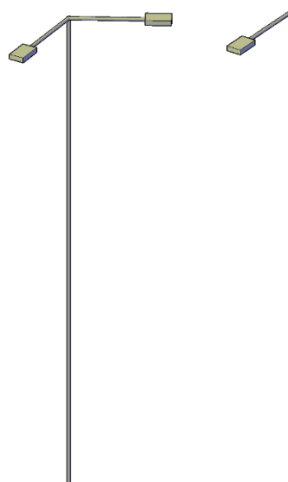
Joonis 19. Katte pinna Solid 3D element

Äärekivi kujutamiseks on vaja pinnamudelist äärekivi maapinnakõrgustega sisemist ja välimist piirjoont ning täiendavalt konstrueerida CAD keskkonnas kivi ülemist serva jälgendav joon, kuhu on kindlasti lisatud äärekivi kõrguste muudatused. Tahhümeetiline mõõdistamine eeldab väljas lisatööd – äärekivi on vaja mõõta vähemalt kolme punktiga ja fikseerida tulevad ka kõik kivi kõrguse muudatused. MLS mõõdistusest saab vajalikud andmed tavapärase mõõdistustöö käigus kätte. Drooniga mõõdistamisel saab vajalikud andmed kätte vaid juhul, kui töö on tehtud ideaalsetes valgustingimustes ja väga hea GNSS täpsusega (üldiselt on keeruline ülemist serva tuvastada). Tekitatakse Solid 3D element ja salvestatakse tellijale esitamiseks *.ifc-formaati (Joonis 20). [27]



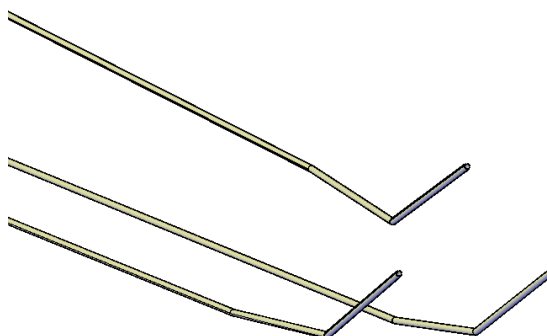
Joonis 20. Äärekivi Solid 3D element

Valgustipostide kujutamiseks on vaja tellijaga eelnevalt kokku leppida postil oleva valgusti detailsus, sest need on üldiselt väga erinevad ja detailne kujutamine eeldab siinkohal palju ajakulukat lisatööd. Modelleerimiseks on vajalikud maapinnakõrgus posti all, posti ja laternate kõrgused ning samuti suunad. Tahhümeetiline mõõdistamine eeldab väljas lisatööd – juurde on vaja mõõta posti ja laternate kõrgused ning suunad. MLS mõõdistusest saab vajalikud andmed tavapärase mõõdistustöö käigus kätte. Drooniga mõõdistamisest on samuti võimalik vajalikud andmed kätte saada, vaja on vaid kõikide kõrguste välja lugemiseks tavapärase lennu asemel suunatud lendu. Tekitatakse Solid 3D element ja salvestatakse tellijale esitamiseks *.ifc-formaati (Joonis 21). [27]



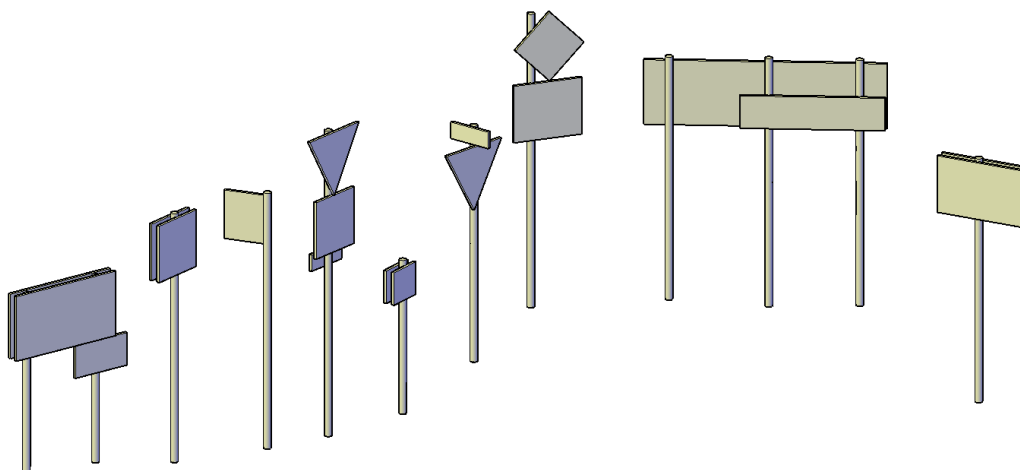
Joonis 21. Valgustipostide Solid 3D elemendid

Õhuliinide korrektseks kujutamiseks on liinile vaja anda kolm kõrguspunkti, postide juurest kinnituskõrgus ja keskelt rippekõrgus. Tahhümeetiline mõõdistamine eeldab väljas lisatööd – mõõdistada tulevad kõik ristumiskohad ja lisaks ka riputuskõrgused MLS ja drooniga mõõdistamisest saab vajalikud andmed tavapärase mõõdistustöö käigus kätte, välja arvatud takistuste korral. Tekitatakse Solid 3D element ja salvestatakse tellijale esitamiseks *.ifc-formaati (Joonis 22). [27]



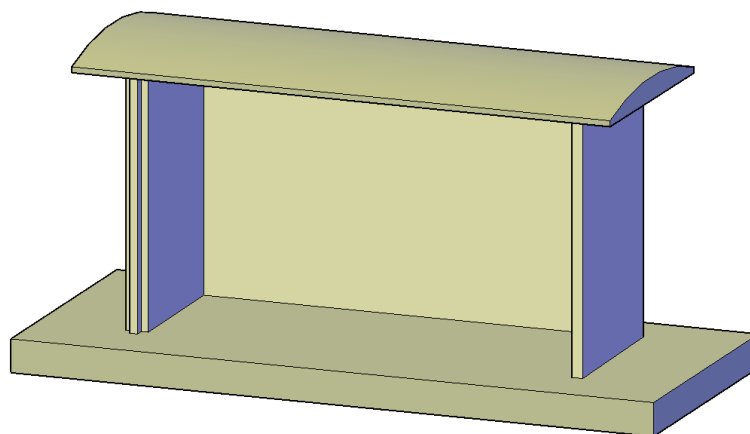
Joonis 22. Õhuliinide Solid 3D elemendid

Liiklusmärkide kujutamiseks peab teadma maapinnakõrgust posti all, posti kõrgust ja postil olevate märkide mõõtmeid ning kõrgusi. Tahhümeetriline mõõdistamine eeldab väljas lisatööd – tuleb mõõta postide ja nendel olevate liiklusmärkide kõrgused. MLS mõõdistusest saab vajalikud andmed tavapärase mõõdistustöö käigus kätte. Drooniga mõõdistamisel on vajalik suunatud lend, kõik vajalikud kõrgused on võimalik välja lugeda. Liiklusmärkide suurused tulevad standardist. Tekitatakse Solid 3D element ja salvestatakse tellijale esitamiseks *.ifc-formaati (Joonis 23). [27]



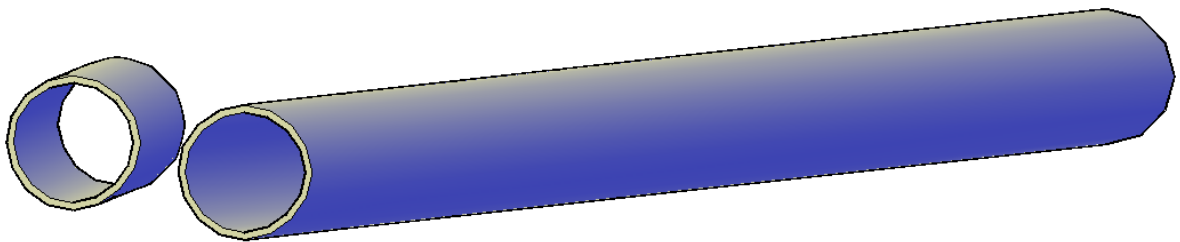
Joonis 23. Liiklusmärkide Solid 3D elemendid

Bussiootepaviljonid on arhitektuursed elemendid ja eeldavad seega detailsemat mõõtmist vastavalt konkreetsele juhtumile. Detailsus tuleb eelnevalt tellijaga kokku leppida. Tahhümeetriline mõõdistamine eeldab väljas lisatööd – vajalik on paviljoni eripärasid arvestav mõõdistus. MLS mõõdistusel jääb paviljoni tagumine külg üldiselt skannerile kättesaamatuks ja seega jääb mõõdistamata (võib osutada probleemiks modelleerimisel). Drooniga mõõdistamisel on vajalik suunatud lend, kõik vajalikud kõrgused oleks võimalik välja lugeda. Tekitatakse Solid 3D element ja salvestatakse tellijale esitamiseks *.ifc-formaati (Joonis 24). [27]



Joonis 24. Bussiootepaviljoni Solid 3D element

Truupide kujutamiseks on vaja detailselt mõõta nende päised, et oleks modelleerimiseks kõik vajalikud kõrgused. Truubi enda kujutamiseks on vaja kas ülemise või alumise ääre kõrgust ja läbimõõtu. Truubi päis on kujutatud ka korrektse pinnamudeliga, seega saab vajadusel päise modelleerimiseks vajalikud kõrgusandmed ja jooned sealt. Tahhümetrilise mõõdistamise korral ei ole lisatöö vajalik, kuna maapinnamudeli nõude korral on truupide päised juba piisava detailsusega mõõdistatud ja truupide enda kõrgused on vaja mõõta ka ilma igasuguste mudelite nõueteta. MLS mõõdistuse andmetest ei ole enamasti võimalik kõiki vajalikke andmeid kätte saada. Ka drooniga mõõdistamisel ei ole võimalik vajalikke andmeid täpselt koguda. Truubid nõuavad üldjuhul alati kaugseire meetodite puhul kontaktseires ülemõõdistust. Tellija soovil tekitatakse truubist Solid 3D element ja salvestatakse esitamiseks *.ifc-formaati (Joonis 25). [27]



Joonis 25. Truupide Solid 3D elemendid

7 KOGUTUD ANDMETE VÕRDLUS

7.1 Plaanilise asendi täpsus

Plaanilise asendi täpsuse hindamisel võrreldi erinevate mõõdistusviisidega saadud objektide asukohti omavahel.

7.1.1 Liiklusmärgid

MKM nõuetes §8 lõige 2 punkt 3 all on välja toodud, et liiklusmärkide asukoha määramise täpsus lähima geodeetilise märgi suhtes on +/- 8 cm.

„§8. Situatsioonimõõdistamise täpsusnõuded

(2) Maapealse situatsioonielemendi tasapinnalise asendi suurim lubatav viga on:

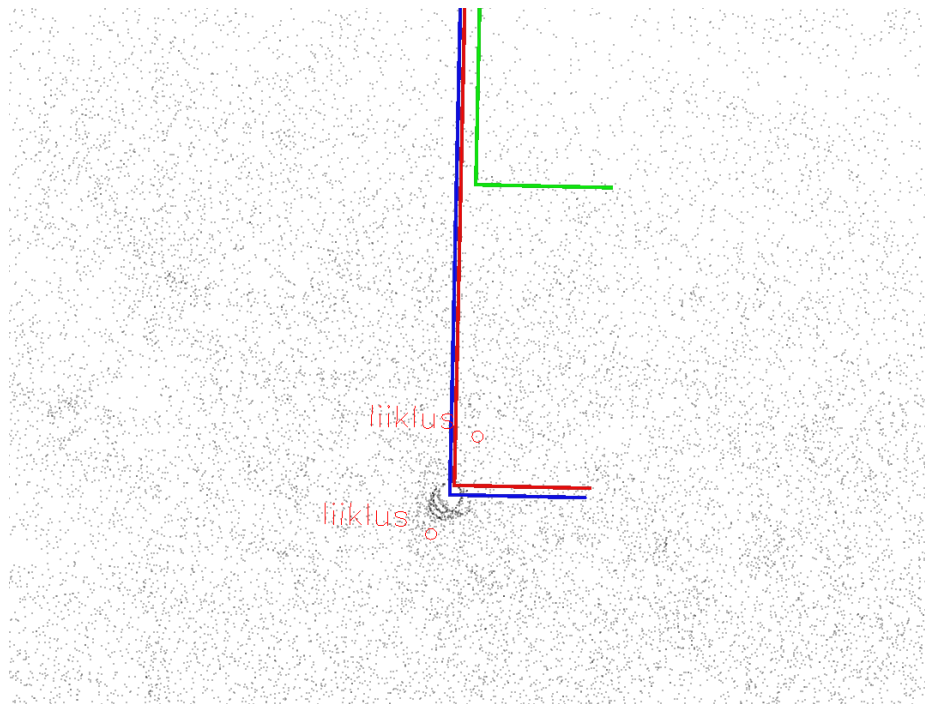
- 3) tehnovõrgu kaevu, aia, piirde, tee ja platsi servade, erinevate postide ja väiksemate tugitarindite ning muu rajatise asendi puhul 8 sentimeetrit lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes.“ [28]

MLS mõõdistusel määratakse liiklusmärgi asukoht punktipilves posti kohale tekkinud „augu“ järgi, liiklusmärgi leppemärk paigutatakse selle keskele (Joonis 26).

Tahhümeetrilisel mõõdistusel ei kasutatud kõrvale mõõtmise funktsiooni ega ka kaldu mõõtmise tehnoloogiat. Liiklusmärgi asukoha kindlaks määramisel mõõdeti aparadi suhtes märgist vasakule ja paremale prismaaia loodis hoides punktid ja märk paigutati mõõdistatud punktide keskele.

Plaanilise asendi täpsus sõltus liiklusmärkide vertikaalsusest ja jäi nii tahhümeetrilise kui ka MLS mõõdistuse korral alla 7 cm (Joonis 26). Vaid ühe märgi asukoht, mille post oli viltune, erines asukoha poolest 19 cm võrra. [27]

Drooniga mõõdistusel määratakse märgi asukoht loodud ortofoto järgi. Liiklusmärkide asukohad erinesid teiste mõõdistusviisidega saadud asukohtadest kuni 3,2 meetrit. Vertikaalseid objekte on drooniga mõõdistusest moonutuste tõttu raskem täpselt tuvastada ja töö tegija tõlgendaski liiklusmärkide asukohti siinkohal valesti (Joonis 26). [27]



Joonis 26. Liiklusmärkide võrdlus (sinine märk MLS mõõdistusest, punane tahhümeetrilisest mõõdistusest, roheline droonimõõdistusest)

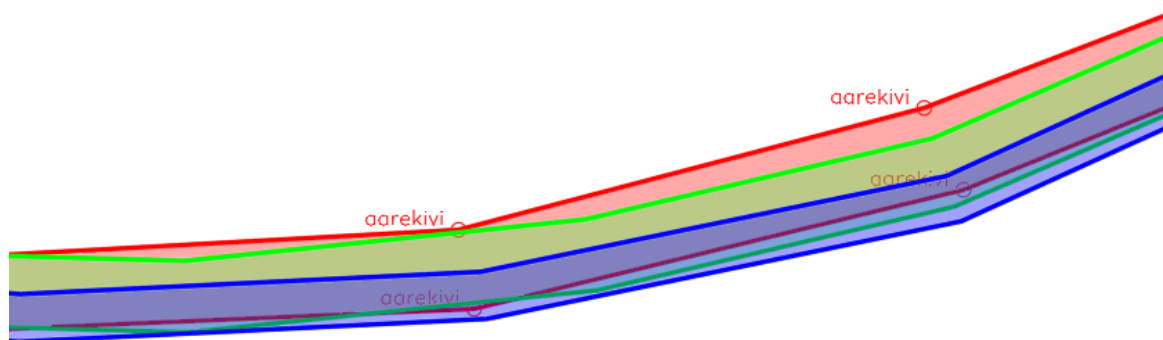
7.1.2 Äärekivi ja katendite servad

MKM nõuetest §8 lõige 2 punkt 3 alt selgub ka, et äärekivide ja katendi servade asukoha määramise täpsus lähima geodeetilise märgi suhtes on ± 8 cm. Siinkohal tuleb aga arvestada, et vanade ja osaliselt lagunenenud katendite, äärekivide ja siirdekateendite servad ei ole üheselt määratletavad. Seega ei sõltu määramise täpsus ainult mõõdistusmeetodist, vaid ka mõõdistaja või andmetöötleja tunnetusest piiride kindlaks määramisel ja üldistamisel.

Plaanilise asendi täpsusnõude täitmist saab võrrelda vaid üheselt määratavate katendiservade või äärekivide korral. Drooniga mõõdistades määratakse asukohad loodud ortofoto järgi. Ortofoto täpsuse määravad fotode tegemise kaugus ja ka kaldenurk, mis võib äärekivide juures moonutusi põhjustada. Tahhümeetriliselt mõõdistades määrab servade asukoha prismaaia asetamise ja loodis hoidmise täpsus. Ühe punkti mõõtmisega tuleb tagada nii plaaniline kui ka kõrguslik täpsus. Hea punktiviisilise mõõdistustäpsuse korral võib plaanilise asendi täpsus siiski kaduma minna, kuna punktid ühendatakse omavahel sirgjoontega. Seega on serva plaanilise asukoha täpsel määramisel oluline roll ka piisaval situatsiooniga arvestaval mõõtmistihedusel. MLS mõõdistusel on punkt pilvest raskem määrata servi kus on kõrguse muutuseta üleminekud (näiteks asfaldilt kuursale või peene fraktsiooniga killustikule). Samuti võib olla keeruline servi täpselt tajuda pinnatud ja

niiskete katete korral. Plaanilise asendi täpsus sõltub suuresti töö teostaja kogemustest punktipilvega töötamisel. [27]

Võrdlemiseks valiti äärekivid Narva mnt 1 juures, kus olid hästi eristatavad servad (Joonis 27). MLS mõõdistusega ja tahhümeetrilise mõõdistusega määratud servade erinevused jäid 3 cm piiridesse. Drooniga ja tahhümeetriga määratud servade erinevused jäid 6 cm piiridesse. Kõik tulemused jäid siinkohal määrukses sätestatud vea piiridesse. [27]



Joonis 27. Äärekivi võrdlus (sinine joon MLS mõõdistusest, punane tahhümeetrilisest mõõdistusest, roheline droonimõõdistusest)

7.1.3 Vertikaalseintega ehitised

MKM nõuetes §8 lõige 2 punkt 1 all on sätestatud, et hoonete ja teiste üheselt määratavate ehitiste asukoha määramise täpsus lähima geodeetilise märgi suhtes on +/- 5 cm.

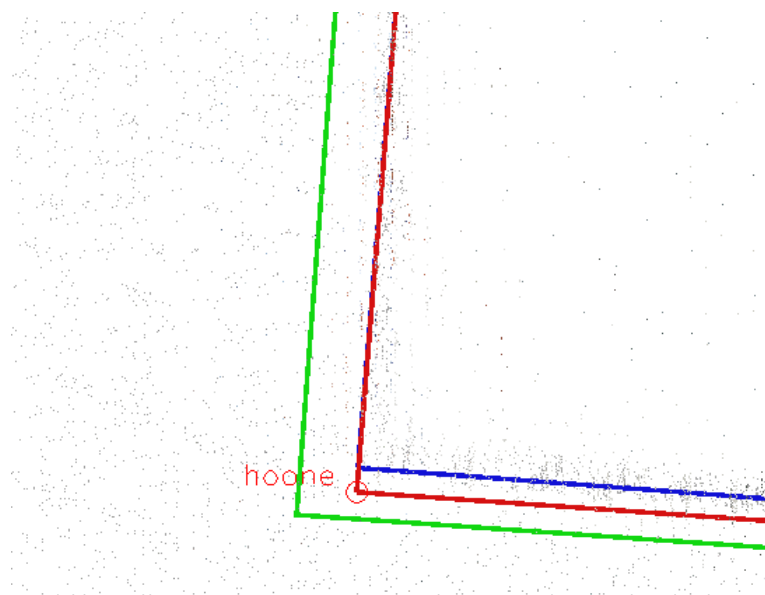
„§8. Situatsioonimõõdistamise täpsusnõuded

(2) Maapealse situatsioonialemendi tasapinnalise asendi suurim lubatav viga on:

- 1) hoone ja üheselt määratava kontuuriga rajatise asendi puhul 5 sentimeetrit lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes.“ [28]

Siinkohal tuleb samuti arvestada, et vanad, deformeerunud ja viltused ehitised ei ole üheselt määratletavate nurkadega. Plaanilise asendi täpsust mõjutab ka ehitise ehitus- või viimistlusmaterjal (näiteks ei ole üheselt määratlevate nurkade või seintega palkhooned, paekivimüüritised, erisugused fassaadelemendid, jne). Hoonete põhikontuur määratakse plaanile 1. korruse välisseinte välisparameetri alusel, millele lisatakse kõik muud elemendid (näiteks sokkel, trepid ja teised detailid). [27]

Võrdlemiseks valiti Narva mnt 5 lamekatusega hoone, mis jäi küll vaid osaliselt mõõdistusalasse, aga mille põhikontuuri määramine oli töö teostajatele üheselt tõlgendatav (Joonis 28). MLS ja tahhümeetrilise mõõdistuse tulemused erinesid teineteisest vaid 3-4 cm. Erinevused tulevad ilmselt sellest, et hoone mõõdeti prismaauaga ja saua ei olnud võimalik hoone nurkades täpselt tsentreerida. Tahhümeetriga mõõdetud nurgapunktid on seetõttu hoonest 2-4 cm väljaspool. Drooniga mõõdistusel on teiste mõõdistusviisidega võrreldes erinevusi kuni 10 cm. [27]



Joonis 28. Hoone võrdlus (sinine joon MLS mõõdistusest, punane tahhümeetrilisest mõõdistusest, roheline droonimõõdistusest)

7.2 Kõrguste täpsus

Kõrguste määramiseks punktipilvedest kasutati kahte skeemi, mis võimaldavad plaanilistele x ja y koordinaatidele määrata vastava kõrguse (z).

MLS mõõdistuse punktipilvest kõrguse määramiseks võeti soovitava punkti ümbrusest 5 cm küljepikkusega ruudu sisse jäävad punktid ja loendati kokku iga punkti naaber punktid (mille kõrgused ei erinenud rohkem kui 15 mm). Seejärel võeti kõige suurema punktide arvuga tasapind ja arvutati välja soovitava punkti keskmine kõrgus. Selline meetodika võimaldab punkti kõrguse määramisel välja jätta juhuslikust peegeldumisest tekkinud vigase kõrgusega punktid. [27]

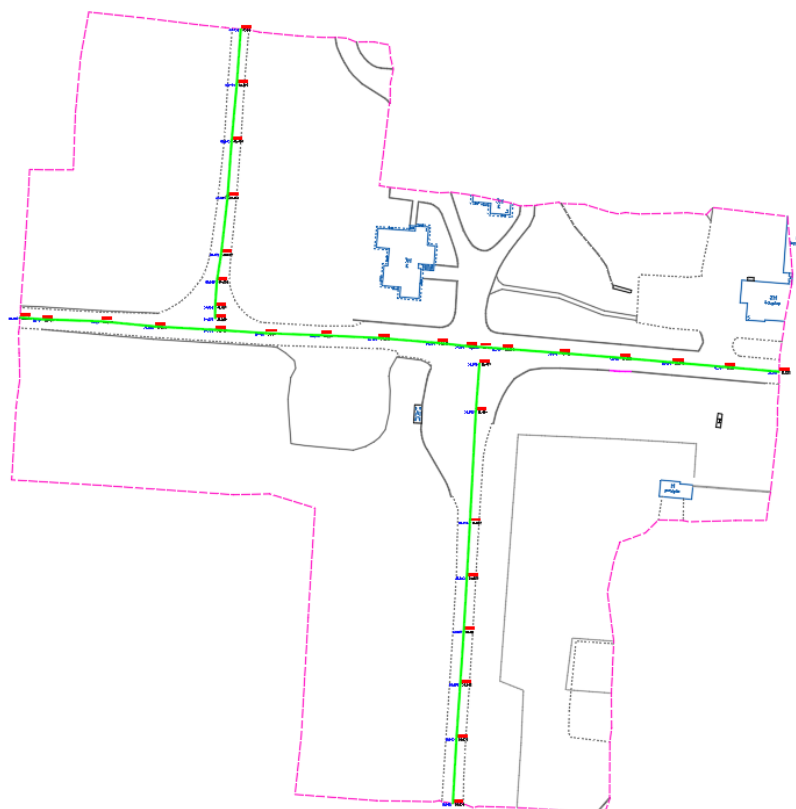
Kõrguste määramiseks kasutati järgnevat lineaarvõrrandit (1) [27]:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Klassifitseeritud punktipilvedest kõrguse määramiseks kasutati ainult „maapinnana“ klassifitseeritud kõrguspunkte.

Kõrguste täpsuse võrdlemise aluseks võeti tahhümeetrilisel mõõdistusel saadud punktid.

Järgnevas tabelis (Tabel 2) on esitatud tee teljele (Joonis 29) mõõdistatud punktidele vastavad punktipilvedest määratud kõrgused.



Joonis 29. Tee telg (tähistatud roheline joonega)

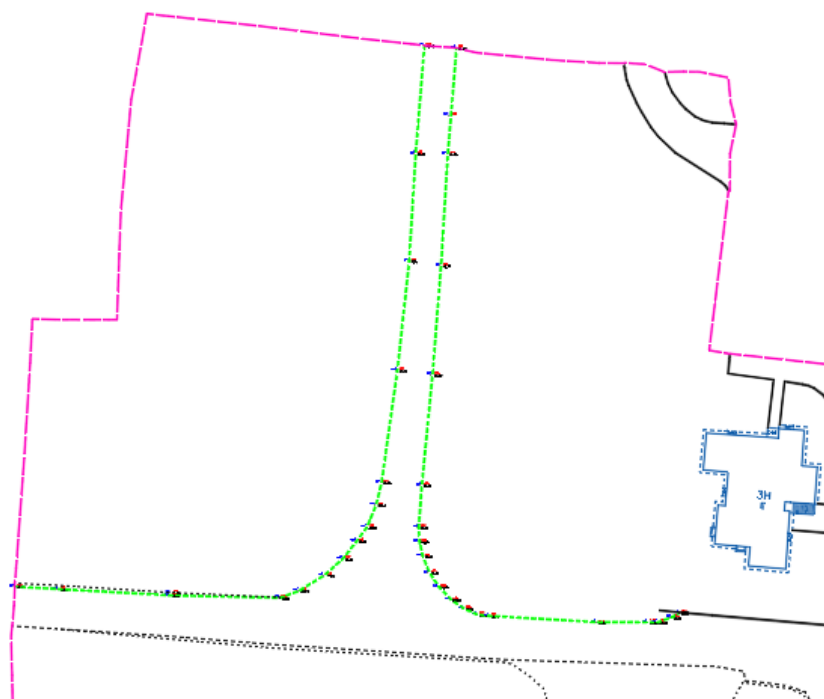
Tabel 2. Tee telje kõrgused [27]

Tahhümeeter			MLS		Droon	
N	E	H	H	T-M, mm	H	T-D, mm
6590547.11	703330.31	32.23	32.248	-18	32.221	9
6590548.66	703312.57	32.38	32.397	-17	32.390	-10
6590550.14	703295.52	32.68	32.693	-13	32.671	9
6590551.65	703278.26	33.09	33.092	-2	33.062	28
6590553.26	703258.33	33.71	33.698	12	33.688	22
6590554.65	703239.82	35.36	35.359	1	35.339	21
6590556.57	703218.25	36.79	36.799	-9	36.768	22

Tahhümeeter			MLS		Droon	
N	E	H	H	T-M, mm	H	T-D, mm
6590555.53	703227.80	36.29	36.296	-6	36.271	19
6590549.81	703232.14	35.97	35.978	-8	35.921	49
6590534.06	703230.98	35.59	35.587	3	35.569	21
6590497.69	703229.03	35.11	35.118	-8	35.087	23
6590479.57	703228.03	35.01	35.013	-3	34.977	33
6590461.91	703227.01	34.96	34.967	-7	34.920	40
6590444.65	703225.86	34.95	34.958	-8	34.931	19
6590426.69	703224.61	34.96	34.973	-13	34.931	29
6590405.39	703223.44	34.95	34.962	-12	34.933	17
6590558.17	703199.14	37.57	37.584	-14	37.546	24
6590559.04	703180.29	38.25	38.264	-14	38.228	22
6590559.74	703162.21	38.89	38.882	8	38.850	40
6590564.56	703145.54	39.28	39.273	7	39.229	51
6590560.85	703145.49	39.18	39.175	5	39.156	24
6590561.94	703125.89	39.28	39.282	-2	39.244	36
6590563.64	703108.16	39.28	39.290	-10	39.249	31
6590564.28	703088.87	39.15	39.160	-10	39.084	66
6590564.85	703081.65	39.09	39.107	-17	39.049	41
6590585.70	703147.52	40.69	40.672	18	40.647	43
6590576.83	703146.10	40.07	40.046	24	40.019	51
6590568.48	703145.54	39.47	39.455	15	39.421	49
6590604.35	703149.60	41.71	41.691	19	41.653	57
6590622.95	703150.96	42.67	42.663	7	42.624	46
6590641.48	703152.65	42.93	42.946	-16	42.892	38
6590659.53	703153.93	43.13	43.138	-8	43.090	40

Tahhümeetrisest mõõdistusest ja MLS pilvest määratud kõrguste maksimaalne kõrguslik erinevus oli 24 mm ning keskmine kõrguslik erinevus oli 10 mm. Tahhümeetrisest mõõdistusest ja drooni pilvest määratud kõrguste maksimaalne kõrguslik erinevus oli 66 mm ning keskmine kõrguslik erinevus oli 32 mm.

Järgnevas tabelis (Tabel 3) on esitatud tee servas (Joonis 30) mõõdistatud punktidele vastavad punktipilvedest määratud kõrgused.



Joonis 30. Tee servad (tähistatud roheline joonega)

Tabel 3. Tee servade kõrgused [27]

Tahhümeeter			MLS		Droon	
N	E	H	H	T-M, mm	H	T-D, mm
6590562.13	703180.38	38.22	38.242	-22	38.204	16
6590562.12	703189.10	37.88	37.896	-16	37.837	43
6590562.11	703190.69	37.83	37.854	-24	37.812	18
6590562.96	703193.11	37.79	37.805	-15	37.770	20
6590563.69	703194.36	37.72	37.743	-23	37.736	-16
6590563.19	703162.12	38.83	38.821	9	38.790	40
6590566.25	703126.79	39.26	39.252	8	39.235	25
6590566.66	703108.15	39.28	39.282	-2	39.231	49
6590567.73	703089.18	39.15	39.174	-24	39.110	40
6590568.14	703081.80	39.14	39.152	-12	39.084	56
6590567.45	703129.98	39.24	39.232	8	39.213	27
6590570.10	703134.28	39.24	39.224	16	39.199	41

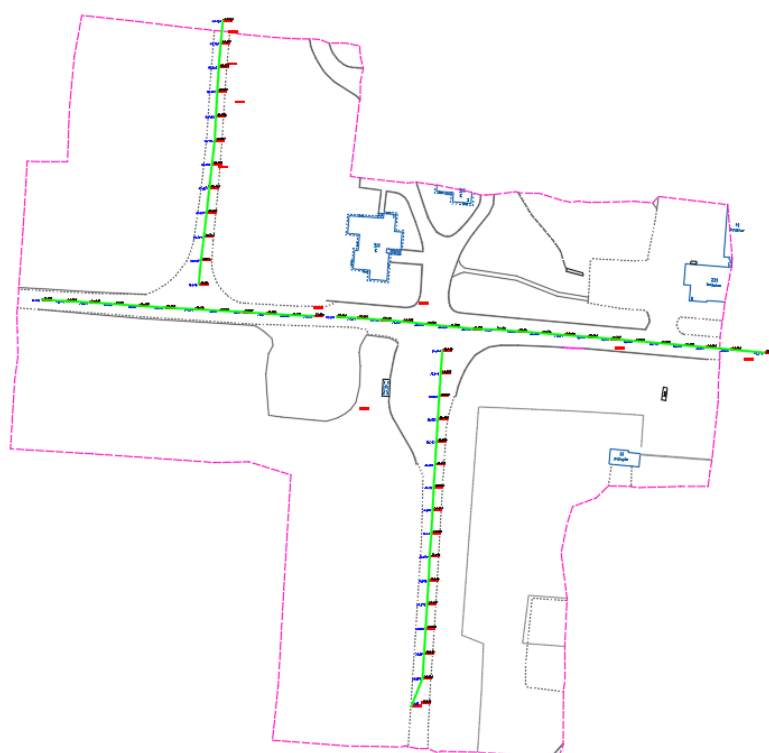
Tahhümeeter			MLS		Droon	
N	E	H	H	T-M, mm	H	T-D, mm
6590572.91	703137.40	39.39	39.383	7	39.357	33
6590575.86	703139.70	39.66	39.649	11	39.622	38
6590578.21	703141.44	39.91	39.898	12	39.866	44
6590581.97	703142.98	40.26	40.234	26	40.206	54
6590585.76	703143.90	40.53	40.521	9	40.493	37
6590585.34	703150.71	40.70	40.686	14	40.684	16
6590578.24	703150.20	40.13	40.132	-2	40.117	13
6590575.77	703150.32	39.90	39.899	1	39.869	31
6590573.28	703150.88	39.67	39.673	-3	39.633	37
6590570.50	703152.01	39.39	39.387	3	39.334	56
6590568.10	703153.62	39.10	39.129	-29	39.088	12
6590565.93	703155.68	38.94	38.962	-22	38.939	1
6590564.42	703157.85	38.85	38.839	11	38.818	32
6590563.40	703160.14	38.85	38.844	6	38.808	42
6590604.05	703152.53	41.67	41.665	5	41.632	38
6590604.76	703146.58	41.76	41.755	5	41.736	24
6590623.25	703148.58	42.72	42.716	4	42.684	36
6590622.46	703153.97	42.53	42.521	9	42.517	13
6590641.39	703155.12	42.78	42.798	-18	42.757	23
6590641.46	703149.68	43.00	43.008	-8		
6590659.36	703156.59	42.97	42.987	-17	42.940	30
6590659.73	703151.16	43.17	43.180	-10	43.163	7

Tahhümeetrilisest mõõdistusest ja MLS pilvest määratud kõrguste maksimaalne kõrguslik erinevus oli 29 mm ning keskmine kõrguslik erinevus oli 12 mm. Tahhümeetrilisest mõõdistusest ja drooni pilvest määratud kõrguste maksimaalne kõrguslik erinevus oli 56 mm ning keskmine kõrguslik erinevus oli 31 mm.

7.2.1 Maapinnamudelite võrdlus

Lähteülesandes sätestatu alusel tuli luua iga mõõdistusmeetodi tulemustest maapinnamudel. Mudelite kõrgusliku täpsuse hindamiseks ja võrdlemiseks rajati täiendavalt teetelgedelt polügonomeetriapunktide nr 65 ja 86 vaheline loodimiskäik ning mõõdeti katendile võrdluspunktid. Punktide kõrgused määrati digitaalnivelliiriga Trimble DiNi-0.3 ja asukohad määrati GNSS-seadmega Trimble R8s.

Järgnevas tabelis (Tabel 4) on esitatud tahhümeetrilise, MLS ja droonimõõdistuse maapinnamudelite ning looditud punktide (Joonis 31) võrdlused.



Joonis 31. Loodimiskäik tee teljel (tähistatud roheline joonega)

Tabel 4. Maapinnamudelite võrdlus [27]

Loodimine			Tahh. Mudel		MLS mudel		Drooni mudel	
N	E	H	H	L-T, mm	H	L-M, mm	H	L-D, mm
6590558.63	703186.40	38.035	38.026	9	38.034	1	37.904	131
6590558.97	703178.21	38.346	38.320	26	38.352	-6	38.269	77
6590559.48	703169.49	38.666	38.632	34	38.656	10	38.525	141
6590560.11	703161.14	38.915	38.901	14	38.891	24	38.816	99
6590560.54	703152.67	39.103	39.051	52	39.090	13	38.987	116

Loodimine			Tahh. Mudel		MLS mudel		Drooni mudel	
N	E	H	H	L-T, mm	H	L-M, mm	H	L-D, mm
6590561.07	703144.19	39.201	39.186	15	39.150	51	39.148	53
6590561.64	703133.64	39.201	39.240	-39	39.220	-19	39.131	70
6590562.27	703124.24	39.306	39.280	26	39.275	31	39.206	100
6590562.92	703115.65	39.329	39.280	49	39.320	9	39.252	77
6590563.44	703106.92	39.265	39.259	6	39.263	2	39.190	75
6590563.95	703098.65	39.175	39.216	-41	39.209	-34	39.150	25
6590564.45	703089.97	39.151	39.157	-6	39.160	-9	39.100	51
6590569.92	703145.61	39.551	39.572	-21	39.533	18	39.484	67
6590578.45	703146.44	40.172	40.183	-11	40.136	36	40.023	149
6590586.82	703147.46	40.753	40.753	0	40.720	33	40.699	54
6590595.43	703148.46	41.250	41.224	26	41.223	27	41.189	61
6590604.05	703149.36	41.681	41.695	-14	41.714	-33	41.662	19
6590612.47	703150.30	42.200	42.129	71	42.168	32	42.151	49
6590620.87	703151.29	42.580	42.562	18	42.561	19	42.525	55
6590629.40	703151.69	42.827	42.752	75	42.780	47	42.752	75
6590638.30	703152.18	42.935	42.889	46	42.927	8	42.878	57
6590646.91	703152.72	43.010	42.998	12	43.018	-8	42.968	42
6590655.31	703153.39	43.114	43.089	25	43.097	17	43.037	77
6590558.41	703194.36	37.736	37.742	-6	37.747	-11	37.699	37
6590557.91	703201.88	37.479	37.458	21	37.484	-5	37.434	45
6590557.31	703210.09	37.143	37.124	19	37.149	-6	37.106	37
6590556.70	703217.86	36.816	36.807	9	36.795	21	36.742	74
6590555.77	703225.95	36.400	36.387	13	36.370	30	36.323	77
6590554.96	703234.26	35.824	35.741	-83	35.812	12	35.781	43
6590554.15	703242.56	35.109	35.108	1	35.096	13	35.090	19
6590553.86	703250.65	34.310	34.396	-86	34.301	9	34.282	28
6590553.25	703258.68	33.701	33.699	2	33.784	-83	33.783	-82
6590552.60	703266.84	33.408	33.445	-37	33.404	4		
6590551.90	703275.32	33.167	33.182	-15	33.169	-2	33.143	24
6590551.26	703283.34	32.951	32.969	-18	32.96	-9	32.923	28
6590550.58	703291.56	32.747	32.774	-27	32.761	-14	32.75	-3

Loodimine			Tahh. Mudel		MLS mudel		Drooni mudel	
N	E	H	H	L-T, mm	H	L-M, mm	H	L-D, mm
6590549.81	703299.99	32.584	32.600	-16	32.594	-10	32.517	67
6590549.03	703309.06	32.429	32.440	-11	32.455	-26	32.368	61
6590548.26	703317.48	32.336	32.338	-2	32.353	-17	32.332	4
6590547.57	703325.44	32.272	32.271	1	32.286	-14	32.268	4
6590546.45	703231.98	35.916	35.884	32	35.844	72	35.843	73
6590538.43	703231.36	35.703	35.693	10	35.696	7	35.669	34
6590530.39	703230.89	35.527	35.537	-10	35.516	11	35.463	64
6590522.18	703230.37	35.416	35.432	-16	35.403	13	35.35	66
6590514.23	703229.88	35.307	35.328	-21	35.307	0	35.321	-14
6590506.16	703229.40	35.208	35.222	-14	35.207	1	35.197	11
6590498.13	703228.92	35.118	35.116	2	35.13	-12	35.078	40
6590490.06	703228.50	35.066	35.067	-1	35.072	-6	34.995	71
6590481.77	703228.07	35.026	35.021	5	35.022	4	34.974	52
6590473.60	703227.46	34.974	34.992	-18	34.992	-18	34.914	60
6590465.01	703227.07	34.972	34.968	4	34.966	6	34.884	88
6590456.67	703226.56	34.972	34.955	17	34.968	4	34.922	50
6590448.05	703226.06	34.957	34.952	5	34.959	-2	34.884	73
6590439.15	703225.51	34.950	34.952	-2	34.953	-3	34.888	62
6590430.37	703224.94	34.953	34.956	-3	34.962	-9	34.891	62
6590421.63	703224.28	34.969	34.957	12	34.971	-2	34.918	51

Looditud punkti ja tahhümeetrilise mõõdistuse mudeli maksimaalne kõrguslik erinevus oli 86 mm ning keskmine kõrguslik erinevus oli 21 mm. Looditud punkti ja MLS mõõdistuse mudeli maksimaalne kõrguslik erinevus oli 83 mm ning keskmine kõrguslik erinevus oli 17 mm. Looditud punkti ja droonimõõdistuse mudeli maksimaalne kõrguslik erinevus oli 149 mm ning keskmine kõrguslik erinevus oli 59 mm.

8 MÕÕDISTUSVIISIDE ANALÜÜS

Kõikide mõõdistusviiside puhul vajab tööde teostaja geodeesia põhiteadmisi ja käsitletavate instrumentide ning tarkvara väljaõpet. Ilma teadmisteta on kõiksugused vead vältimatud.

8.1 MLS mõõdistus

Suurimaks eeliseks mobiilse laseskanneriga mõõdistamisel on välitööde kiirus ja ohutus. Mõõdistatakse tuhandeid punkte sekundis. Võimalik on mõõdistada ka öösel. Tulemused ei sõltu täielikult kohalikest geodeetilistest võrkudest ja nende võimalikest vigadest ning mõõdistus on kõrge detailsusega. Piisava täpsuse saab tagada andmetöötuse käigus tehtava arvutustööga ja vastavalt vajadusele kontrollpunktide lisamisega. [27]

Miinuseks on asjaolu, et mõõdistus sõltub paljuski ilmaoludest. Talvistes oludes mõõtes jääb palju vajalikku informatsiooni kogumata. Mõõdistust saab teostada ainult sõidetavatel teedel, ehk kõikide eemal asuvate objektide informatsioon jääb kogumata. Kogutud andmemahud on suured ja andmetöötlus ajamahukas, mis nõuab spetsiifilist tarkvara ja oskusi. Tehnoloogia on kallid koos paljude lisasensoritega ja vähelevinud. [27]

8.2 Drooniga mõõdistus

Välitöö on drooniga mõõdistuse korral kiire ja töö teostajale üldjuhul ohutu. Teatud ohtudesse võib sattuda ainult seade ise. Mõõdistada on efektiivselt võimalik kohtadest kuhu on kontaktse mõõdistuse teostamiseks raske või liialt ohtlik ligi pääseda ja töö tulemuseks saab väga hea lahutusvõimega ortofoto. Tehnoloogia on kättesaadava hinnaga ja mõõdistamiseks vajalik väljaõpe lihtne. [27]

Puudusteks jääb asjaolu, et mõõdistus on tundlik erinevatele ilmastikuoludele. Näiteks ei saa mõõta vihmaga, tugeva tuulega ega talvistes oludes. Mõõdistada ei saa ka varju ja moonutuse aladele jäävaid elemente. Kogutud andmemahud on samuti suured ja ka drooniga mõõdistamise järeltöötlus nõuab spetsiifilist tarkvara ning oskusi. Kogutud kõrgusinfo nõuab põhjalikku kontrollimist ja on tihti kasutamiseks ebapiisava täpsusega. Ainult drooniga mõõdistatud andmetega ei usaldaks terve objekti plaani ning mudelit koostada, kindlasti tuleks fotogramm-meetrilise mõõdistusega muid mõõtmisviise kombineerida ja rohkelt kontrollmõõdistusi teha. [27]

8.3 Tahhümeetiline mõõdistus

Tahhümeetriselt saab mõõdistada peaaegu igas olukorras ja igas asukohas. Ka talvistes oludes on teoreetiliselt võimalik kogu informatsioon tahhümeetriga kätte saada. Mõõdistus ei ole võimalik vaid juhul, kui geodeetiline võrk puudub täielikult. Kui mõõdistus on korrektselt positsioneeritud ja protokollitud on edasine andmetöötlus oluliselt kiirem ja lihtsam kui näiteks drooni või MLS-i andmetöötlus, sest tahhümeeter arvutab tänu integreeritud mikroprotsessile koheselt välja mõõdistava punkti kolm koordinaati, arvestades sealjuures automaatselt temperatuuri ja õhurõhu parandeid. [27]

Suurimaks puuduseks tahhümeetrilise mõõdistuse korral on välitööde ohtlikkus töö teostajale ja tööde ajamahukus. Keskmiselt jõuab geodeet mõõta 500 – 1000 punkti päevas ja mõõdistuspunktide tihedus jääb sõltuvalt olukorrast vahemikku 50 – 500 punkti/ha. Iga punkt mõõdistatakse eraldi ja punktide vahelise ala kohta jääb info kogumata. Mõõdistus sõltub täielikult kohapealse geodeetilise võrgu olemasolust ja olukorrast. [27]

KOKKUVÕTE

Kolmemõõtmelisi topo-geodeetilisi plaane tellitakse liiklusrajatiste projekteerimiseks. Kõik plaanid peavad olema kooskõlas Majandus- ja taristuministri 14. aprilli 2016.a. määrusega nr 34: „Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded“ ja täiendavalt ka Maanteeameti peadirektori 13.05.2008 käskkirjaga nr 102 kinnitatud juhendiga „Täiendavad nõuded topo-geodeetistele uurimistöodele teede projekteerimisel“. Samuti tuleb töö tegemisel lähtuda tellija poolt esitatud erinõuetest.

Käesolevas lõputöös kasutati REIB OÜ töö TT-6043 raames kogutud andmeid. Lõputöö annab ülevaate erinevatest mõõdistusmeetoditest ja neid meetodeid järgides reaalsest mõõdistamistöödest – kaugseires mobiilsest laserskaneerimisest ja aerofotogramm-meetriast ning kontaktseires tahhümeetrisest mõõdistusest. Seejärel kirjeldati kuidas loodi kogutud andmete põhjal 2D maa-ala plaan ning 3D maapinnamudel koos modelleeritud elementide ja rajatistega. Lisaks võrreldi erinevate meetoditega kogutud andmeid ja nende asendilist ning kõrguslikku täpsust. Omavahel võrreldi ka kõiki kasutatud mõõdistusmeetodeid.

Lisades asuvad kaugseire mõõdistusmeetodite andmetöötluse käigus koostatud arvutuslikud raportid.

Antud lõputöö kõige põnevamaks osaks olid kindlasti mõõdistusmeetodite ja nendega kogutud andmete täpsuste võrdlused.

Sõltumata mõõdistusviisist mõjutab suuresti tulemuste täpsust ka kasutatud tehnoloogia. Usaldusväärsete tulemuste saamiseks kasutati käesolevas lõputöös ainult mõõdistamiseks ette nähtud instrumente ning tarkvarasid.

Plaanilise asendi täpsuse hindamisel võrreldi tahhümeetri, MLS-i ja drooni tulemusi omavahel. Võrdluseks valiti postielemendid (liiklusmärgid), katendite servad ja vertikaalseintega ehitised. Võrdlusest selgus, et nii tahhümeetiline mõõdistusviis kui ka MLS on plaaniliselt sarnase täpsusega. Sõltuvalt objekti eripäradest on vigade tekkimise ohud erinevates kohtades. Näiteks vertikaalseintega ehitiste asukohad, mis paiknevad teede vahetusläheduses, saab kõige täpsemini ja detailsemalt kätte MLS-i mõõdistusandmetest. Kui aga ehitised jäävad teest kaugemale või jääb skanneri ning ehitise vahele takistus, siis täpsus langeb või muutub mõõdistamine võimatuks. Drooniga mõõdistamisel jäid tulemused võrreldes MLS-i ja tahhümeetrit umbes kaks korda ebatäpsemaks.

Kõrguslikku täpsust hinnati tahhümeetrilise mõõdistuse alusel ja kõva katendiga pinnasel (asfaldil). Võrdluseks kasutati tee telje ning servade kõrgusi. Võrdlusest selgus, et nii tahhümeetriline mõõdistusviis kui ka MLS on kõrguslikult sarnase täpsusega. Tuleb arvestada, et tahhümeetrilisel mõõdistusel puudub mõõdistatud punktide vahelt täpne info, seega sõltuvalt tee piki- ja ristprofiilist on MLS tahhümeetri mõõdistuspunktide vahelisel alal täpsem. Seetõttu on sobivates ilmastikuoludes parimaks meetodiks tee katendite mõõtmisel MLS. Kui aga ilmaolud ei soosi (näiteks lumi on maas) jääb kõige usaldusväärsemaks ikkagi tahhümeeter. Drooniga mõõdistuse kõrguslik täpsus jäi MLS-i ja tahhümeetri kõrval nõrgemaks.

Takistuste korral (hooned, rajatised, haljastus, jne.) ja nende vahetusläheduses jääb korrektselt mõõtes küll kõige aeganõudvamaks aga ka kõige täpsemaks meetodiks nii plaaniliselt kui kõrguslikult siiski tahhümeetriline mõõdistamine. Katenditeta aladel (näiteks heinamaa) jääb kõrguslikult täpsemaks tahhümeeter.

Mobiilse laserskaneerimise meetod on kiire ja detailne ning sobib topo-geodeetilise plaani koostamise eesmärgil kasutamiseks igale poole, kus on võimalik autoga ligi pääseda. Sõidetavatest teedest kaugemale jäävate objektide kohta jääb aga info paraku kogumata või ei ole enam piisavalt täpne.

Aerofotogramm-meetria ehk droonilt mõõdistamine on kiire ning detailne ja sobib topo-geodeetilise plaani koostamise eesmärgil enim avatud alade mõõdistamiseks. Kõrghaljastuse alla jääva situatsiooni, samuti kõrgemate ehitiste endi ja vahetusse lähedusse jääva situatsiooni mõõdistamist drooniga piisavatel täpsusnõuetel teha ei saa.

Klassikaline tahhümeetriline mõõdistusviis osutub väljakutsuvates tingimustes kõige usaldusväärsemaks. Mõõta on võimalik peaaegu igal pool ja väljaõpe tahhümeetriga mõõtmiseks on lihtne ning kiire. Mõõdistustöö on aeganõudev ja toimub punktiviisiliselt. Seetõttu jäävad tulemused (reljeefi kõrguslikud erinevused ja kõverused) paljuski mõõtja tunnetuse taha. Samuti on palju inimlike vigade tekkimise kohti mida on hiljem keeruline tuvastada, näiteks prismaaia loodis hoidmine mõõtmise hetkel, vead protokollimisel (punktile jääb vale kood) või joonestustöö käigus tekkinud vead (punktid ühendatakse valesti).

Lõputöö eesmärgiks oli välja selgitada kõige efektiivsem – odavam, kiirem ja täpsem viis kolmemõõtmelise alusplaani koostamiseks. Siinkohal on oluline eelnevalt tellijaga kooskõlastada modelleeritavate objektide detailsus, et mõõdistamise ajal sellega arvestada. Töö tulemustest selgus, et kõige hõlpsamalt saab kolmemõõtmeliseks modelleerimiseks andmeid koguda mobiilse

laserskanneriga. MLS tehnoloogia on küll kallis, kuid osutus kõige kiiremaks, täpsemaks ja detailsemaks viisiks, kõiki andmeid oli võimalik koguda tavapärase mõõdistustöö käigus. Ka aerofotogramm-meetrilise mõõdistusega on võimalik enamik modelleerimiseks vajalik info kokku koguda, tihtipeale on vaja lihtsalt suunatud lendu. Mõõdistusviis on samuti kiire ning ei vaja palju aeganõudvat lisatööd. Tahhümeetrilise mõõdistuse korral on kolmemõõtmeliseks modelleerimiseks vaja enim väljas lisatööd teha. Halva nähtavuse korral või ligipääsmatutes kohtades on aga ainsaks lahenduseks tahhümeetriline mõõdistamine, seega see on ainuke mõõdistusviis, millega on kindlasti võimalik kõik andmed kokku koguda.

Lõputöö hüpoteesiks oli, et kaugseire meetodid on tänapäeval sama usaldusväärsed kui kontaktseires tahhümeetriline mõõdistamine. Töö tulemustest selgus, et kaugseire meetodite puhul sõltuvad kõik tulemused konkreetse objekti eripäradest, takistustest, mõõdistust soosivast ilmast ja GNSS-ühendusest. Kogutud andmete võrdlustest võib hinnata korrektselt sooritatud MLS mõõdistuse tahhümeetrilisega võrdväärseks. Aerofotogramm-meetriline mõõdistus jäi konkreetse töö raames umbes kaks korda ebatäpsemaks, kuid korrektse mõõdistustöö ja kontrollmõõdistuste abil on võimalik ka drooniga usaldusväärseid tulemusi saada. Kaugseire meetodid muudavad tööde teostamised lihtsamaks, kiiremaks ja ohutumaks ning neil on tahhümeetri kõrval täiesti arvestatav koht (võivad olla teatud juhtudel isegi paremad kui tahhümeeter). Siiski ei saa tahhümeetrist veel üle ega ümber, sest teatud tingimustes on see meetod endiselt asendamatu. Kaugseire mõõdistused vajavad täpsuse tõstmiseks ja kontrollimiseks samuti tahhümeetri abi.

SUMMARY

The following thesis *Three-Dimensional Topo-Geodetic Plan of the Infrastructure* provides an overview of different surveying methods and real surveying works following these methods – mobile laser scanning (MLS) and aerial photogrammetry in remote monitoring and surveying with a total station in contact monitoring. Then it describes how a 2D topo-geodetic plan and a 3D ground model with modeled elements and facilities were created based on the collected data. In addition, the data collected by different methods and their positional and height accuracy were compared. All used surveying methods were also compared among themselves.

Three-dimensional topo-geodetic plans are commissioned for the design and redesign of traffic facilities. REIB OÜ work TT-6043 “National road 13187 Toila-Oru km 4,341 topo-geodetic works of the land area of the intersection of the Voka settlement” was chosen as a sample object for this thesis.

The aim of the thesis was to find out the most effective – cheaper, faster and most accurate way to prepare a three-dimensional topo-geodetic plan. The results of the work revealed that the easiest way to collect data for three-dimensional plans is with a mobile laser scanner. MLS technology is expensive, but it turned out to be the fastest, most accurate and most detailed way, all data could be collected during normal surveying work. It is also possible to gather most of the information needed for modeling with aerial photogrammetric surveying, often just a directed flight is needed. The measurement method is also quick and does not require a lot of time-consuming additional work. In the case of total station surveying, the three-dimensional modeling requires the most additional work in the field. However, in case of poor visibility or in inaccessible places (where remote monitoring methods are useless), tachymetric surveying is the only solution, so it is the only surveying method with which it is definitely possible to collect all the data.

The most exciting part of this thesis was definitely the accuracy of the collected data with different measurement methods.

Positional accuracy was assessed with the comparison of total station, MLS and aerial photogrammetry. Post elements (traffic signs), pavement edges and buildings with vertical walls were selected as objects for this comparison. The comparison revealed that both – the total station surveying method and MLS have a similar accuracy. Depending on the characteristics of the object, there are risks of errors occurring in different places. For example, the locations of buildings with

vertical walls located near roads can be obtained most accurately and with high detail from MLS survey data. However, if the buildings are further from the road or there are obstacles between the scanner and the building, the accuracy will decrease or the surveying will become impossible. When surveying with a drone, the results were about twice as inaccurate as compared to the MLS and total station.

Height accuracy was assessed based on total station measurements and on hard surfaced soil (asphalt). The heights of the road axis and edges were used for this comparison. The comparison revealed that both the total station surveying method and the MLS have a similar height accuracy. It should be taken into account that total station surveying lacks accurate information between the measured points, so depending on the longitudinal and transverse profile of the road, MLS is more accurate in the area between the total station surveying points. Therefore, in suitable weather conditions, MLS is the best method for measuring road pavements. However, if the weather conditions are not favorable (for example, there is snow on the ground), the total station is still the most reliable. The height accuracy of drone surveying was weaker next to MLS and total station.

In the case of obstacles (buildings, facilities, landscaping, etc.) and in their immediate vicinity, total station surveying remains the most time-consuming but also the most accurate method, both in terms of plan and height, if measured correctly. In unpaved areas (meadows, for example), the tachymeter remains the most accurate in terms of altitude.

The hypothesis of this thesis was that remote monitoring methods are nowadays as reliable as classical total station surveying in contact monitoring. The results of the work revealed that in the case of remote monitoring methods, all results depend on the particularities of a specific object, obstacles, favorable weather and GNSS connection. From the comparison of the collected data, a correctly performed MLS measurement can be evaluated as equivalent to a total station one. In this specific job aerial photogrammetric surveying was about twice as inaccurate, but with the help of correct surveying work and control measurements, it is also possible to obtain reliable results with a drone. Remote monitoring methods make the execution of work easier, faster and safer, and they have a completely respectable place next to the total station (may be even better than the tachymeter in certain cases). However, the tachymeter cannot be overcome or bypassed yet, because under certain conditions this method is still irreplaceable. Remote monitoring measurements also need the help of a total station to increase and check measurement accuracy.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] ROADPLAN OÜ, *Tehniline kirjeldus*, 2021.
- [2] Maa-ameti geoportaal, [Võrgumaterjal]. Available: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/gpa>. [Kasutatud 24. aprill, 2023].
- [3] Geodeetiliste punktide andmekogu, [Võrgumaterjal]. Available: <https://gpa.maaamet.ee/>. [Kasutatud 24. aprill, 2023].
- [4] K. Julge, „Laserskaneerimine ehitiste ja looduslike pinnavormide mõõdistamisel ning tulemuste modelleerimine,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/0407cf35-5af9-4323-9731-86b12b84166d>. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [5] T. Mill, „Terrestriline laserskaneerimine ehituskonstruksioonide mõõdistamisel,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/055d1d6e-e50c-4a23-95de-0786f7b1096c>. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [6] K. Kokamägi, „Mobiilse laserskaneerimise kõrgusliku täpsuse hindamine erineva taimeestiku korral,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/2622>. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [7] G. Annok, „Mobiilse laserskaneerimise kõrguslik täpsus metsa ja lageda ala korral,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/3261>. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [8] N. Liba, *Fotogramm-meetria alused*, Tartu: Eesti Maaülikool, Metsandus- ja maaehitusinstituut, 2005, p. 303.
- [9] GIS Resources, „Basics of Photogrammetry,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://gisresources.com/basic-of-photogrammetry_2/. [Kasutatud 24. aprill, 2023].
- [10] J. Resev, „UAV fotogramm-meetria kasutamine hoone välisgeomeetria ja deformatsioonide mõõdistamisel Tallinna Lennusadama näitel,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/631b76ab-ed6f-4628-b70b-6cf20f828da5>. [Kasutatud 24. aprill, 2023].
- [11] The Construction Encyclopedia, „Total Station in Surveying: Operation, Uses and Advantages,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://theconstructor.org/surveying/total-station-operation-uses-advantage/6605/>. [Kasutatud 24. aprill, 2023].
- [12] R. Ranne, *Geodeesia alused. II osa*, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2006, p. 76.

- [13] RIEGL, „RIEGL VZ-400,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_VZ-400_2017-06-14.pdf. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [14] V. Tammin, „Riegl VMZ/VZ-400 punktipilv ja selle andmetötlusega seotud väljakutsed,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://estgis.ee/archive/wp-content/uploads/2017/09/Riegl-VMZ_EstGis.pdf. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [15] SOKKIA, „GCX2 GNSS Receiver Operator's Manual,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: https://eu.sokkia.com/sites/default/files/sc_files/downloads/1005278-01-rva_gcx2_om_secured.pdf. [Kasutatud 19. aprill, 2023].
- [16] Meridein OÜ, „DJI Phantom 4 RTK + D-RTK 2 mobiilne baasjaam,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://droon.ee/toode/dji-phantom-4-rtk-d-rtk-2-mobile-station-combo/>. [Kasutatud 17. aprill, 2023].
- [17] Geosoft OÜ, „Trimble S5,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://geosoft.ee/trimble-s5/>. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [18] Geosoft OÜ, „Trimble TSC7,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://geosoft.ee/trimble-tsc7/>. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [19] Geosoft OÜ, „Trimble DiNi,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://geosoft.ee/trimble-dini/>. [Kasutatud 24. aprill, 2023].
- [20] Geosoft OÜ, „Trimble R8s,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://geosoft.ee/trimble-r8s/>. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [21] Geosoft OÜ, „Trimble TDC600,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://geosoft.ee/trimble-tdc600/>. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [22] Geosoft OÜ, „Trimble VRS Now,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://geosoft.ee/vrs-Now/>. [Kasutatud 02. aprill, 2023].
- [23] Maa-ameti Geoportaal, „ESTPOS - riiklik GNSS satelliitandmete keskus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/ESTPOS-riiklik-GNSS-satelliitandmete-keskus-p838.html>. [Kasutatud 19. aprill, 2023].
- [24] M. Kakko ja V. Tammin, *Riigitee 13187 Toila-Oru km 4,341 Voka asula ristmiku maa-ala topo-geodeetilised uurimistööd MLS meetodil*, Tallinn: Rakendusgeodeesia ja Ehitusgeoloogia Inseneribüroo OÜ, 2021.

- [25] M. Kakko ja B. Golubjatnikov, *Riigitee 13187 Toila-Oru km 4,341 Voka asula ristmiku maa-ala topo-geodeetilised uurimistööd. Drooniga mõõtmise osa*, Tallinn: Rakendusgeodeesia ja Ehitusgeoloogia Inseneribüroo OÜ, 2021.
- [26] K. Rebane ja I. Pilden, *Riigitee 13187 Toila-Oru km 4,341 Voka asula ristmiku maa-ala topo-geodeetilised uurimistööd*, Tallinn: Rakendusgeodeesia ja Ehitusgeoloogia Inseneribüroo OÜ, 2021.
- [27] M. Kakko ja V. Tammin, *Riigitee 13187 Toila-Oru km 4,341 Voka asula ristmiku eri mõõdistusmeetodite tulemuste võrdlusanalüüs*, Tallinn: Rakendusgeodeesia ja Ehitusgeoloogia Inseneribüroo OÜ, 2021.
- [28] Riigi Teataja, „Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/119042016003>. [Kasutatud 24. aprill, 2023].

LISAD

Lisa 1. GPS sidumise arvutuste raport

Lisa 2. Agisoft raport

Lisa 1. GPS sidumise arvutuste raport

Points

Page 1 of 1



Project Summary

Project name: **Gps_20210714**

Surveyor:

Comment:

Linear unit: **Meters**

Projection:

Geoid:

Adjustment

Control Tie Analysis: **success**

Adjustment type: **Plane + Height, Constraint**

Confidence level: **95 %**

Number of adjusted points: **5**

Number of plane control points: **4**

Number of used GPS vectors: **8**

A posteriori plane or 3D UWE: **2.61839** , Bounds: (**0.6341473** , **1.365911**)

Number of height control points: **4**

A posteriori height UWE: **1.452099** , Bounds: (**0.4913538** , **1.51233**)

Points				
Name	Latitude	Longitude	Ell.Height (m)	Code
EEAH	59°20'18.94458"N	27°24'51.23226"E	109.529	
EENA	59°22'42.99417"N	28°10'44.10284"E	75.898	
Gps3_0714	59°24'13.86449"N	27°34'44.75837"E	55.410	
NJOE	59°27'38.52457"N	28°02'28.70069"E	38.124	
TOIL	59°25'19.33154"N	27°32'11.86844"E	76.701	

Lisa 2. Agisoft raport

TT-6043 Voka Droon

Processing Report
13 August 2021



Survey Data

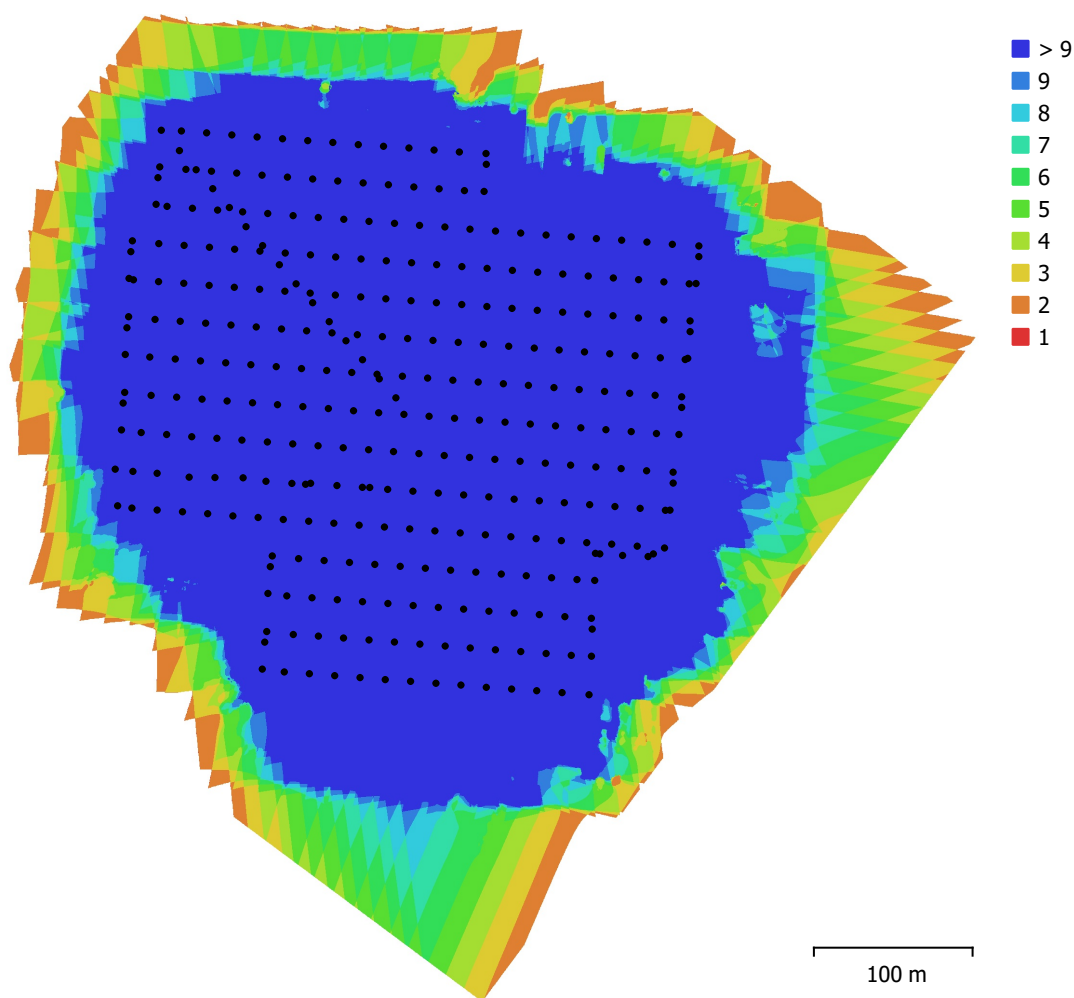


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	329	Camera stations:	328
Flying altitude:	89.5 m	Tie points:	72,330
Ground resolution:	2.21 cm/pix	Projections:	378,901
Coverage area:	0.233 km ²	Reprojection error:	0.431 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm	Yes

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

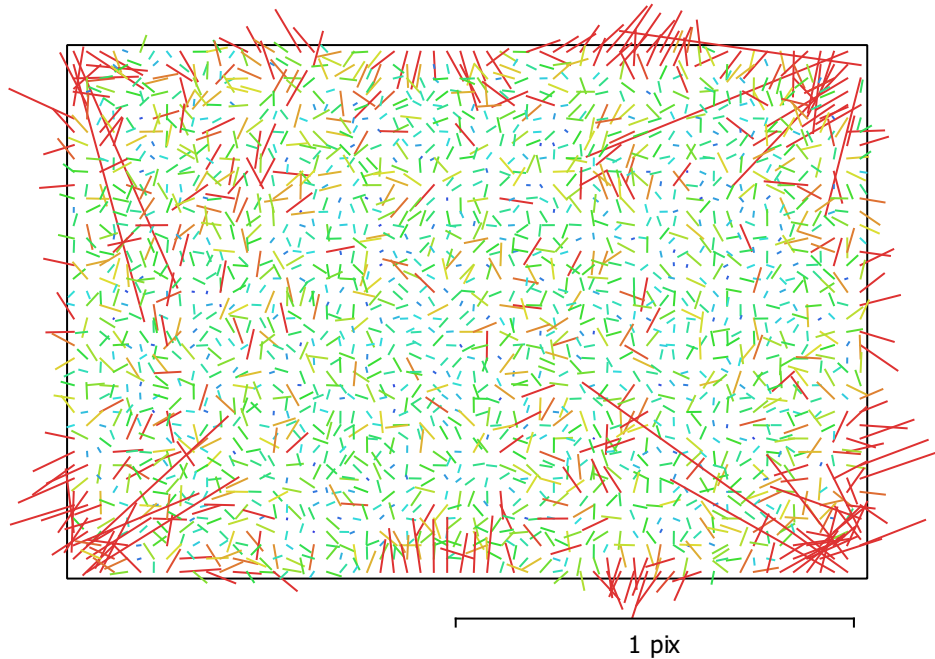


Fig. 2. Image residuals for FC6310R (8.8mm).

FC6310R (8.8mm)

329 images, precalibrated

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	3687	0.13	1.00	0.02	-0.02	0.01	0.03	-0.64	0.55	-0.51	-0.01	0.03
Cx	-30.8202	0.1		1.00	-0.01	-0.03	-0.08	0.01	-0.02	0.01	0.84	0.03
Cy	-34.7345	0.11			1.00	0.04	-0.05	-0.02	0.03	-0.03	0.00	0.86
B1	0.114317	0.017				1.00	0.01	0.02	-0.12	0.18	-0.04	0.05
B2	0.0876895	0.011					1.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.09	-0.03
K1	-0.270403	8.4e-05						1.00	-0.98	0.95	0.02	-0.04
K2	0.101295	0.00013							1.00	-0.99	-0.01	0.04
K3	-0.0224753	6.6e-05								1.00	0.01	-0.04
P1	-0.000262974	4.2e-06									1.00	0.04
P2	0.000306342	4.6e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations



Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
1.15126	0.758256	2.66957	1.37853	3.00449

Table 3. Average camera location error.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

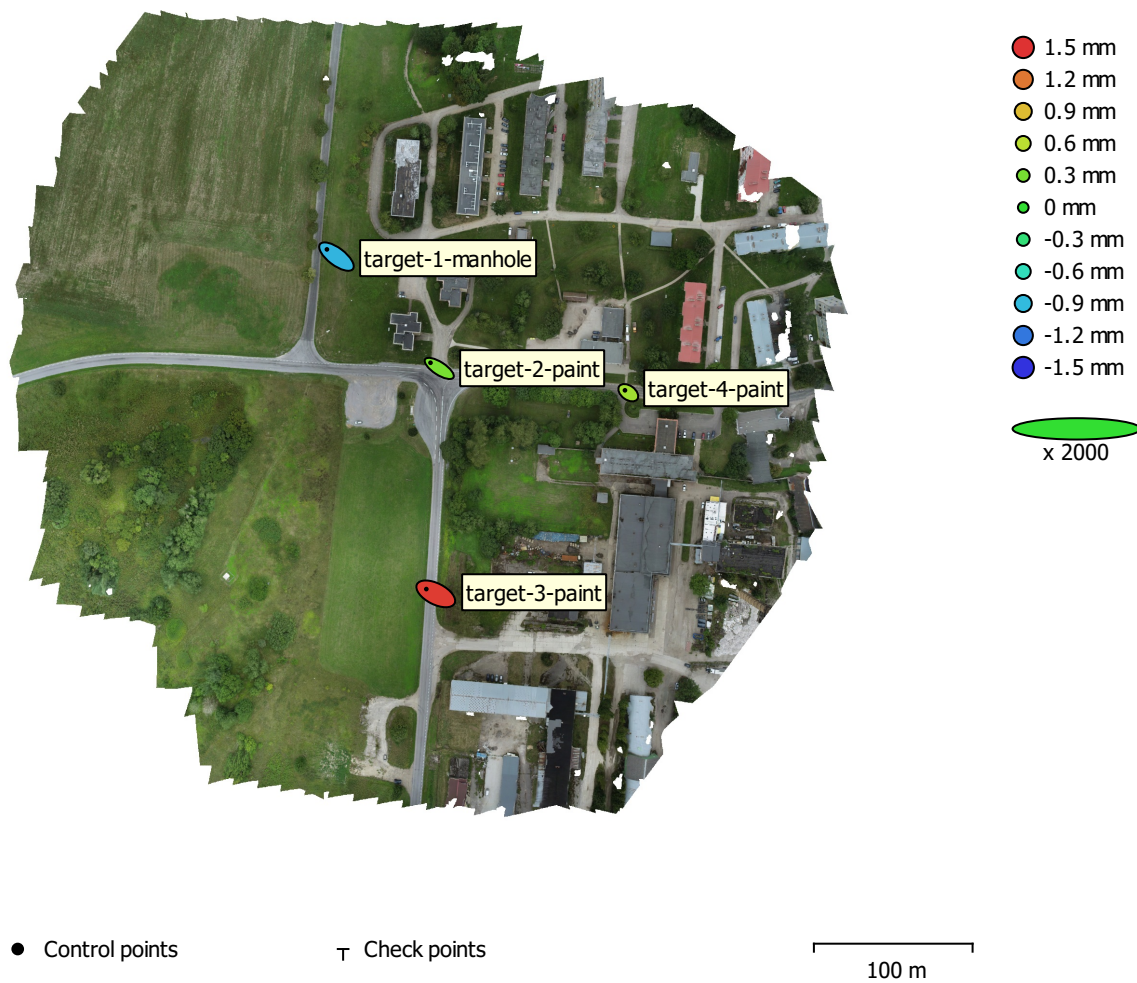


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
4	5.15939	3.34254	0.911723	6.14751	6.21475

Table 4. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
target-1-manhole	-6.0193	4.53492	-0.934226	7.5941	1.671 (28)
target-2-paint	-5.52258	3.56947	0.303621	6.58272	1.479 (36)
target-3-paint	-5.9452	3.01667	1.45847	6.82443	1.418 (40)
target-4-paint	-2.09789	1.51105	0.482542	2.63007	0.791 (33)
Total	5.15939	3.34254	0.911723	6.21475	1.372

Table 5. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

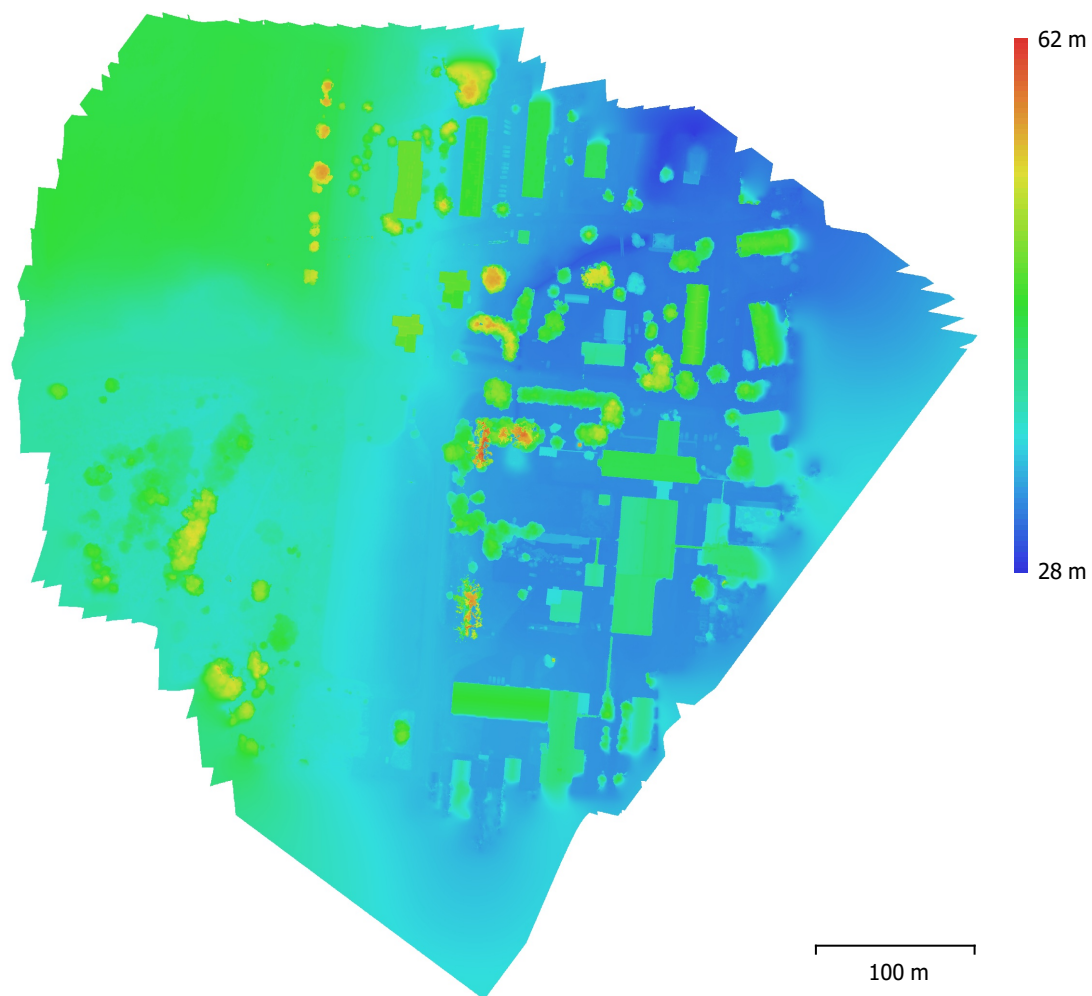


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 8.85 cm/pix
Point density: 128 points/m²

Processing Parameters

General

Cameras	329
Aligned cameras	328
Markers	4
Coordinate system	Estonian Coordinate System of 1997 + EST-GEOID Height
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	72,330 of 322,562
RMS reprojection error	0.180821 (0.430554 pix)
Max reprojection error	0.481076 (1.75756 pix)
Mean key point size	2.397 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	5.56011

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	60,000
Tie point limit	5,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	6 minutes 18 seconds
Matching memory usage	965.41 MB
Alignment time	2 minutes 44 seconds
Alignment memory usage	164.39 MB

Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Fit additional corrections	Yes
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	9 seconds
Software version	1.7.2.12070
File size	29.99 MB

Depth Maps

Count	318
-------	-----

Depth maps generation parameters

Quality	Medium
Filtering mode	Moderate
Processing time	40 minutes 14 seconds
Memory usage	1.43 GB
Software version	1.7.2.12070
File size	647.38 MB

Dense Point Cloud

Points	32,483,667
Point colors	3 bands, uint8

Depth maps generation parameters

Quality	Medium
Filtering mode	Moderate
Processing time	40 minutes 14 seconds

Memory usage	1.43 GB
Dense cloud generation parameters	
Processing time	8 minutes 33 seconds
Memory usage	7.13 GB
Software version	1.7.2.12070
File size	468.39 MB
Model	
Faces	6,496,732
Vertices	3,254,917
Vertex colors	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	Medium
Filtering mode	Moderate
Processing time	40 minutes 14 seconds
Memory usage	1.43 GB
Reconstruction parameters	
Surface type	Arbitrary
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Strict volumetric masks	No
Processing time	11 minutes 42 seconds
Memory usage	16.78 GB
Software version	1.7.2.12070
File size	148.80 MB
DEM	
Size	8,487 x 8,464
Coordinate system	Estonian Coordinate System of 1997 + EST-GEOID Height
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	2 minutes 19 seconds
Memory usage	307.02 MB
Software version	1.7.2.12070
File size	127.49 MB
Orthomosaic	
Size	27,528 x 28,108
Coordinate system	Estonian Coordinate System of 1997 + EST-GEOID Height
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
Processing time	26 minutes 20 seconds
Memory usage	9.58 GB
Software version	1.7.2.12070
File size	7.21 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.7.2 build 12070
OS	Windows 64 bit
RAM	63.93 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i9-9900 CPU @ 3.10GHz
GPU(s)	Quadro P620