



**TALLINNA
TEHNIKA KÕRGKOO**

Martin Nõgu

HOONE GEODEETILINE INVENTARISEERIMINE

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2023



Martin Nõgu

Hoone geodeetiline inventariseerimine

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Rakendusgeodeesia õppekava

Juhendaja: Tarvo Mill

Tallinn 2023

Mina

Martin Nõgu,

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 Tarvo Mill, */allkirjastatud digitaalselt/*

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina,

Martin Nõgu,

sünnikuupäev:

22.02.1999,

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

“Hoone geodeetiline inventariseerimine“

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/

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja: **Martin Nõgu**
Õpperühm: **KRG2019**
Eriala: **Rakendusgeodeesia (1824)**
Lõputöö teema: **Hoone geodeetiline inventariseerimine**

Lähteandmed töö koostamiseks:

Lõputöö koostamiseks kasutatakse projektjooniseid, instrumentide manuaale, erialast kirjandust, õppematerjale ja normatiivdokumente.

Töö sisu, ülesehitus ja lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Takahuhdin kooli, Tampere, Soome laserskaneerimise ja mõõdistusvõrgu rajamisega seotud geodeetiliste tööde kirjeldus ja selgitus. Töö jaguneb kolmeks: objekti ja inventariseerimis tööde põhimõtete kirjeldus, mõõdistustööde ja andmetöötluse teostamine, analüüs ja tulemused. Lõputöös käsitletakse NavVis VLX tehnoloogia kasutamist hoone inventariseerimisel ning analüüsitakse tulemuste sobivust.

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:

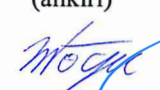
Lõputöö sisaldab fotosid, jooniseid, tabeleid ja skeeme. Lõputöö mahuks on ca 40-60 lehekülge.

Lõputöö juhendaja: **Tarvo Mill**
(nimi)

Lõpetaja: **Martin Nõgu**
(nimi)

Kinnitaja: **Aivars Alt**
ehitusinstituudi direktor

 **30.01.2023.**
(allkiri) (kuupäev)

 **30.01.2023**
(allkiri) (kuupäev)

 **30.01.2023**
(allkiri) (kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 30.01.2023
Lõputöö esitamise tähtaeg: 02.05.2023

SISUKORD

LÜHENDID	7
SISSEJUHATUS.....	9
1 HOONETE MÕÕDISTAMINE.....	10
1.1 Inventariseerimine	10
1.1.1 Inventariseerimisel kasutatavad mõõdistusviisid	10
1.2 GNSS iseloomustus ja mõõtmismeetodid	11
1.2.1 GNSS mõõtmismeetodid.....	11
1.3 Mõõdistamise alusvõrk.....	12
1.3.1 Alusvõrk	12
1.3.2 Mõõdistusvõrgud.....	13
1.3.3 Hooneväline mõõdistuskäik	14
1.3.4 Hoonesisene mõõdistuskäik	15
1.3.5 Mõõdistusvõrgu täpsusnõuded	16
1.4 Laserskaneerimine	17
1.4.1 Staatiline laserskaneerimine	17
1.4.2 Dünaamiline laserskaneerimine	18
1.4.3 Laserskaneerimise tähised.....	19
1.4.4 Laserskaneerimisel tekkivad vead ja vigade allikad	20
1.5 Fotogramm-meetria	21
1.5.1 Aerofotogramm-meetria põhimõtted.....	21
1.5.2 Aerofotogramm-meetria kontrollpunktid.....	23
1.5.3 Aerofotogramm-meetria mõjutavad tegurid	24
2 TÖÖDE LÄBIVIIMINE	25
2.1 Objekti kirjeldus	25
2.2 Töö lähteülesanne	26
2.3 Tööde planeerimine	27
2.4 Ettevalmistus	27
2.5 Mõõdistustööde protsess.....	31
2.5.1 Alusvõrgu rajamine	31
2.5.2 Laserskaneerimis tööde protsess	34
2.5.3 Aeropildistamise teostamine	37
3 ANDMETÖÖTLUS JA TULEMUSED	39

3.1	Andmete edastamine.....	40
3.2	Terrestrilise laserskaneerimise andmetöötlus.....	40
3.3	Mobiilse laserskaneerimise andmetöötlus	41
3.4	Fotogramm-meetria andmetöötlus.....	43
3.5	Andmetöötluse tulemused	44
3.6	Plaanide koostamine	45
KOKKUVÕTE.....		47
SUMMARY		48
VIIDATUD ALLIKAD.....		50
LISAD		52
Lisa 1. Joonestatud korruse plaan		53
Lisa 2. Joonestatud fassaadi vaade		55
Lisa 3. Joonestatud hoone lõige		57

LÜHENDID

GNSS	– (<i>Global Navigation Satellite System</i>) Globaalse navigatsiooni satelliitsüsteem;
GALILEO	– Euroopa Liidu arendatud satelliitnavigatsioonisüsteem;
GPS	– (<i>Global Positioning System</i>) Ameerika Ühendriikide arendatud satelliitnavigatsioonisüsteem;
GLONASS	– (<i>Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>) Venemaa arendatud satelliitnavigatsioonisüsteem;
BEIDOU	– Hiina Rahvavabariigi arendatud satelliitnavigatsioonisüsteem;
RTK	– (<i>Real Time Kinematic</i>) Reaalajas kinemaatiline mõõtmine;
OTF	– (<i>On-the-Fly</i>) Liikuv algtundmatute lahendusviis;
RTN	– (<i>Real Time Network</i>) Reaalajas püsijaamade mõõtmine võrgu toel;
DIN	– (<i>Deutsches Institut für Normung</i>) Saksamaa Standardiinstituut;
MKM	– (Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium) Geodeetilistele töödele nõudeid väljastav ministeerium;
2D	– (<i>Two Dimensional</i>) Kahemõõtmeline ehk plaaniline;
3D	– (<i>Three Dimensional</i>) Kolmemõõtmeline ehk ruumiline;
6D	– (<i>Six Dimensional</i>) Kuuemõõtmeline
TLS	– (<i>Terrestrial Laser Scanning</i>) Terrestriline laserskaneerimine;
MLS	– (<i>Mobile Laser Scanning</i>) Mobiilne laserskaneerimine;
ALS	– (<i>Airborne Laser Scanning</i>) Aerolaserskaneerimine;
IMU	– (<i>Inertial Measurement Unit</i>) Inertsiaalandur mõõtmaks joon- ja pöörlemiskiirust;
LIDAR	– (<i>Light detection and ranging</i>) Valgust tuvastav ja mõõtev laserskaneerimis seade;
IP	– (<i>Ingress Protection</i>) Rahvusvaheline standard mis näitab seadme vee- ja tolmukindlust;
GCP	– (<i>Ground Control Point</i>) Maapealsed kontrollpunktid aeropildistamise jaoks;
ISO	– (<i>International Organization for Standardization</i>) Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon;
HDR	– (<i>High Dynamic Range</i>) Suure ulatusega pildistamine;
VIS	– (<i>Visual Inertial System</i>) Visuaalne insertssüsteem;
SLAM	– (<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>) Seadme samaaegne lokaliseerimise ja kaardistamise võime;
SSD	– (<i>Solid-State Drive</i>) Pooljuhtketas, väikmälul põhinev andmesalvesti;

- ZIP – Kokku pakitud failide kaust;
- E57 – Failiformaat mida kasutatakse punktipilvede ja piltide salvestamiseks;
- RCS – Failiformaat mida kasutatakse punktipilvede salvestamiseks Autodesk ReCap programmis;
- DWG – Failiformaat mida kasutatakse kahe- ja kolmemõõtmeliste jooniste salvestamiseks;
- PDF – (*Portable Document Format*) Dokumentide failiformaat.

SISSEJUHATUS

Käesolev lõputöö käsitleb hoone geodeetilist inventariseerimist, mille puhul kasutati mobiilset kui ka staatilist laserskaneerimise meetodit ning lisaks veel aerofotogramm-meetrilist meetodit. Objektiks on Takahuhdin koolimaja Soomes, Tampere linnas. Objekti kogupindala on ca 21 200 m². Mõõdistustööd viidi läbi 2022 aasta oktoobris ning andmetöötlus ja plaanide joonestamine toimus 2022 aastal oktoobrist detsembrini. Tööde tellimuse põhjuseks oli koolimaja vanade plaanide uuendamine.

Käesolev lõputöö jaguneb kolmeks. Esimeses lõputöö osas luuakse ülevaade: hoone inventariseerimisest, mõõdistusvõrgu loomise põhimõtetest ja täpsusnõuetest ning selgitatakse ka laserskaneerimise ja fotogramm-meetria tehnoloogiad ja põhimõtteid hoone mõõdistamisel.

Teises osas käsitletakse objektil läbiviidud mõõdistustöid, selgitatakse lahti lähteülesanne ja tööde planeerimine. Antakse ülevaade laserskannerite tüüpidest ja skaneerimistöödest objektil. Lisaks luuakse ka ülevaade mõõdistusvõrkude töödest, seda nii mõõdistusvõrkude planeerimise kui ka rajamise kohta.

Lõputöö kolmas ja viimane osa tugineb andmetöötlusele ja saadud tulemustele. Käsitletakse punktipilvede andmete kokkupanemist ja georefereerimist erinevates programmides, punktipilvede alusel 2D plaanide joonestamist ning analüüsitakse saadud väljundeid ja tulemusi.

1 HOONETE MÕÕDISTAMINE

1.1 Inventariseerimine

Inventariseerimine ehk hoonete mõõdistamine tähendab olemasolevate hoonete kohta vajaliku informatsiooni kogumist, seda hoone kasutamiseks, haldamiseks või hooldamiseks. Inventariseerimine teostatakse vastavalt tellimusele kas ainult siseruumid või hoone tervikuna. Inventariseerimise tulemusel luuakse olemasolevast hoonest vaated, lõiked ja korruste plaanid, mis annavad selge ülevaate mõõdistustööde läbiviimise ajal hoone hetkolukorrast. Inventariseerimiseks viiakse läbi mõõdistustöid hoones näiteks peale objekti valmimist, kui tekib vajadus vanasid projekt plaane uuendada või kui vastavad plaanid on hävinenud või ära kaotatud. [1]

1.1.1 Inventariseerimisel kasutatavad mõõdistusviisid

Hoone inventariseerimiseks on mõõdistusviise erinevaid ning need jagunevad andmete kogumise põhjal kolmeks. Esimeseks mõõdistusviisiks on mõõdistamine mõõdulindiga või laserkaugusmõõturiga. Antud mõõdistusviis on teostatav, kuid nõuab see-eest rohkem aega kui tahta inventariseerida hoonet kogu ulatuses. Taoliste käepäraste instrumentide abil ei ole võimalik luua geomeetriliselt usaldusväärseid mõõdistusmudeleid ja mõõdistusjooniseid. Sellest tulenevalt sobib antud mõõdistusviis väiksemate ja lihtsamate objektide inventariseerimiseks, näiteks nagu hoone algupärase akna joonestamiseks või vanade keldriplaanide õigsuse kontrollimiseks. [2]

Teiseks hoone inventariseerimise viisiks on elektrontahhümeetiline mõõdistamine. Selline mõõdistamisviis on eelnevast märgatavalt tõhusam kuna punktide mõõtmine elektrontahhümeetriga on kiirem ja saadud informatsiooni hulk suurem kui tavalise mõõdulindi või laserkaugusmõõturiga saadud tulemused. Elektrontahhümeetri eeliseks eelnevate instrumentide ees on objekti mõõtmine puutevabalt, võimalus luua mõõdistuskäik ning võrreldes laserskaneerimisega on võimalik üksikute mõõdetud punktide asukohta valida. Lisaks kui instrument koordineerida ära riikliku koordinaatsüsteemiga, saab tagada mõõdistatava objekti geomeetriline asukoht. [3]

Kolmandaks ja kõige populaarsemaks meetodiks on inventariseerimist teostada läbi laserskaneerimise meetodi. Laserskaneerimine annab mõõdistamisel kõige rohkem informatsiooni mõõdetava hoone kohta. Laserskanner suudab mõõdistada pinna punkte tihedusega üks millimeeter ning tänu sellele saadakse hoonest väga detailne kujutis. Samuti tuleb kasuks laserskaneerimine ka igasuguste keeruliste ja detailsete konstruktsioonide mõõtmisel. Laserskannerite ainsaks puuduseks on nende tundlikus halbades ilmastikuoludes nagu näiteks suur niiskustase ning vihma- ja lumesadu.

Saadud punktipilve müratase võib olla nendel tingimustel suurenenud ja lisaks tekib oht, et vihmapiiskades laserkiir murdub ehk tekib refraktsioon ning mõõdetud punkt tekib tegelikkusest valesse kohta. [3]

Lisaks kasutatakse inventariseerimise töös fotogramm-meetria tehnoloogiaid. Hoone fotogramm-meetria jaguneb pildistamismeetodite järgi ning inventariseerimiseks kasutatakse peamiselt kahte fotogramm-meetria meetodit: aerofotogramm-meetria ja terestrilist ehk lähifotogramm-meetria. Enamjaolt kasutatakse neid kas hoone katuse ja/või fassaadi mõõdistamiseks. Fotogramm-meetria eelisteks on: suurema maa-ala katmine, ligipääs keerulistesse kohtadesse ja detailsus. Andmetöötluse käigus saadakse väljundiks hoone katusest ja/või fassaadist punktipilved mida hiljem on võimalik kasutada hoone inventariseerimisel. [4]

1.2 GNSS iseloomustus ja mõõtmismeetodid

Globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem ehk GNSS (*Global Navigation Satellite System*) on satelliitide süsteem, mis edastab asukoha- ja ajastusandmeid läbi signaalide GNSS vastuvõtjatele, mille järel kasutatakse neid andmeid täpse asukoha määramiseks. GNSS alla kuuluvad rahvusvahelised navigatsioonisüsteemid, neist neli suuremat navigatsioonisüsteemi on [5]:

- Galileo (Euroopa Liidu navigatsioonisüsteem);
- GPS (Ameerika Ühendriikide navigatsioonisüsteem);
- GLONASS (Venemaa navigatsioonisüsteem);
- BeiDou (Hiina Rahvavabariigi navigatsioonisüsteem).

1.2.1 GNSS mõõtmismeetodid

GNSS mõõtmismeetodeid on erinevaid. Vanim ja täpsem GNSS mõõtmismeetodiks peetakse staatilist mõõtmist. Staatiline mõõtmine koosneb vähemalt kahest GNSS vastuvõtjast, millega sooritatakse suhteline mõõtmine ning mille puhul on vastuvõtjad mõõtmiste ajal paigutatud. Mõõtmiste väljunditeks on kahe või enama punkti vahel moodustuvad ruumivektorid ehk koordinaatide erinevused (Δx , Δy , Δz). Antud mõõtmismeetod võimaldab saavutada millimeetri suurusjärgus täpsust kuid seda ainult ideaalsetel tingimustel, sõltudes: aparatuurist, mõõtmistingimustest, mõõtesessioonide pikkustest, andmetöötlusest ja muudest teguritest. Staatiline mõõtmine on ainuke mõõtmisviis, mis tagab piisava täpsuse ning mõõtmistulemuste kontrolli. [6, lk 228-229]

Staatilisele mõõtmisele järgneb kiirstaatiline mõõtmine. Kiirstaatiline mõõtmismeetod on staatilise meetodi erivorm. Ainsaks erinevuseks võib välja tuua lühemad mõõtmisessioonid, mis on umbes 5-

20 minuti pikkused ning mille tõttu kasutatakse ka väiksemaid signaalide salvestamise intervalle, 5-15 sekundit. Mõõtmise teostamiseks on vaja ühte või mitut GNSS vastuvõtjat lähtepunktil ja teine vastuvõtja liigub määratavalt punktilt teisele. Kiirstaatiline jääb oma täpsuselt staatilise ja RTK mõõtmismeetodi vahepeale tagades 1-2 sentimeetri täpsuse ja täpsus sõltuvalt lähtepunkti ja määratava punkti vahelisest kaugusest on $1\text{ cm} + 1\text{ ppm}$ (*part per million*). [6, lk 244]

Järgmiseks GNSS mõõtmismeetodiks nagu korra juba mainitud on kinemaatiline mõõtmine reaajas ehk RTK (*Real Time Kinematic*). RTK mõõtmine koosneb kahest GNSS vastuvõtjast, esimese vastuvõtja rolliks on käituda baasjaamana tuntud koordinaatidega punktil ning teine vastuvõtja liigub ühelt määratavalt punktilt teisele. Mõõtmisel saadakse teada baas- ja liikuvjaama vaheline vektor, millest arvutatakse reaajas välja kogu liikumistrajektoor või ainult valitud punktides tehtud pikemaajalised seisupunktide koordinaadid. RTK võimaldab saavutada plaanilise asendi täpsust $1\text{ cm} + 2\text{ ppm}$ ja kõrgusliku täpsuse $2\text{ cm} + 2\text{ ppm}$. Soovitud täpsuse tagamiseks on vajalik algtundmatute lahendamine, teisisõnu satelliidi ja vastuvõtja vaheliste tsüklite koguarvu leidmine, enne mõõtmise algust ehk initsialiseerimise käigus. Algtundmatute lahendamise viise lühiajalisel mõõtmisel on samuti erinevaid, kuid RTK puhul on valdavaks lahendusviisiks OTF (*On-the-Fly*). OTF suudab vastuvõtjas liikuvana lahendada algtundmatud 10 – 30 sekundiga, kahesageduslikel mõõtmiste puhul veel kiiremini. [6, lk 244-246]

RTK mõõtmismeetodiga sarnaneb väga RTN mõõtmismeetod. RTN (*Real Time Network*) on reaajas püsijaamade võrgu teel teostatavad GNSS mõõtmised. Peamiseks erinevuseks võrreldes RTK mõõtmismeetodiga on baasjaama kasutamise asemel parandite saamiseks olemasolevate püsijaamade võrgu kasutamine. RTN mõõtmiste eelduseks on püsijaamade asukoha teadmine, algtundmatute teadmine ja toimiv andmeside. RTN mõõtmistäpsused on sarnased RTK mõõtmismeetodiga, seega on võimalik saavutada plaaniline täpsus $1\text{ cm} + 2\text{ ppm}$ ja kõrguslik täpsus $2\text{ cm} + 2\text{ ppm}$. [6, lk 249]

1.3 Mõõdistamise alusvõrk

1.3.1 Alusvõrk

Geodeetiline alusvõrk on maastikul kindla kava järgi paigutatud, nõuetekohaselt kindlustatud ja ühises koordinaatide süsteemis olevate geodeetiliste punktide kogum, millest lähtutakse geodeetilistel ja topograafilistel mõõdistamistel [7]. Alusvõrke eristatakse nende võimalustest lähtuvalt. Eristatakse plaanilist, kõrguselist ja plaanilist-kõrguselist geodeetilist alusvõrku. Plaanilise võrgupunktid määratakse triangulatsiooni, trilateratsiooni või polügonomeetria meetodiga ning saadakse

tulemuseks x - ja y -koordinaadid. Triangulatsioonis mõõdetakse kolmnurga kõik sisenurgad ja vähemalt ühe kolmnurga joonepikkuse, ülejäänud kolmnurga külgede pikkused saab leida siinusteoreemiga lahendamisel. Trilateratsioonis mõõdetakse vastupidiselt kõik kolmnurga joonepikkused ning kolmnurga sisenurgad on arvutatavad koosinusteoreemi alusel. Polügonomeetria meetodi puhul mõõdetakse käigust tulnud lõikude pikkusi ja lõikudevahelisi nurki. Kõrgusliku geomeetrilise alusvõrgu punktid määratakse geomeetrilise nivelleerimisega ning saadakse tulemuseks H -absoluutkõrgus. Plaanilise-kõrgusliku võrgupunktide saamiseks kasutatakse kas elektrontahhümeetrit või satelliitgeodeetilisi mõõtmisviise, mille tulemusel saadakse punktide geotsentrilised koordinaadid X , Y , Z või ellipsoidi parameetreid rakendades geodeetilised nurkkoordinaadid maaellipsoidi pinnal B , L ja geodeetiline kõrgus h ellipsoidi pinnal. Antud suurused on peaaegu võrdtäpsed. [8]

1.3.2 Mõõdistusvõrgud

Mõõdistusvõrguks peetakse geodeetilist võrku mis on rajatud mõõdistatava maa-ala plaaniliseks ja kõrguslikuks sidumiseks ning mis on omakorda seotud riikliku või kohaliku geodeetilise võrguga. Mõõdistusvõrk on ühtlasi ka punktide kogum mis koosneb lähtepunktidest, mõõdistamisvõrgu punktidest ja sõlmpunktidest. Lähtepunktiks on riikliku või kohaliku geodeetilise võrgu punkt, millest lähtutakse mõõdistatava maa-ala ruumiliseks sidumiseks. Peale lähtepunktide koordineerimise mõõdetakse mõõdistusvõrgu punktid. Mõõdistusvõrgu punktid on ruumilise sidumise käigus rajatud kohtkindla märgiga kindlustatud punktid, millest omakorda luuakse sõlmpunktid. Sõlmpunktideks on samuti kohtkindlad punktid, millele tuginevad madalama astme mõõdistuskäigud. [9]

Mõõdistusvõrgust tulenevate punktide tähistamiseks kasutatakse tavaliselt asfaldinaelu, helkurkleepse, teipi, iseäralikke punkte ümbruskonnas ning markeri või aerosoolvärviga loodud riste või punkte.

Objekti asukoha, asendi ja situatsiooni määramiseks tuleb mõõtmisi teostada kindlas koordinaatsüsteemis ja kõrguses, mida tagatakse läbi mõõdistuskäigu. Käigu tegemisel mõõdetakse horisontaalnurgad ja joonepikkused ning nende abil seostatakse kindelpunktidele koordinaadid objekti mõõdistamiseks vajaminevate punktidele. Käigu seisupunktid valitakse ümbritseva situatsiooni alusel, tähtis on näha seisupunktist võimalikult palju ja vältida liigsete vabajaamade tekitamist. Käikude liike on erinevaid: rippuv käik, kinnine käik, lähtekülgedega käik ja lähtekülgedeta käik. Hoone mõõdistamiseks tehakse tavaliselt hoone ümber kinnine käik ja hoone sisemine käik seotakse

hoone välimise käiguga. Rajatava käigu täpsus hindamiseks kasutatakse käigu suhtelise vea valemit (1), suhteline viga peab olema väiksem või võrdne 1/10000. [8]

$$\frac{f_s}{\sum l} = \frac{\sqrt{f\Delta x^2 + f\Delta y^2}}{N} = \frac{1}{N} \leq \frac{1}{10\,000}, \quad (1)$$

kus f_s – käigu absoluutne jooneline sidumatus (sulgemisviga);
 $\sum l$ – käigu joonepikkuste summa ehk käigu perimeeter;
 $(f\Delta x, f\Delta y)$ – x ja y telgede suunalised sulgemisvead;
 N – käigu nurkade arv.

1.3.3 Hooneväline mõõdistuskäik

Hooneväline mõõdistuskäik luuakse tavaliselt ümber mõõdistatava hoone kinnise käiguna. Käigu punktidelt peab olema võimalik teha vabu seisupunkte hoone sisse ja kui tegemist on mitmekorruselise hoonega siis peab vajadusel olema ka nähtavus ülemistele korrustele. Hooneväline käik seotakse riiklike geodeetiliste punktidega või GNSS tehnoloogiaga mõõdetud lähtepunktidega. Vajadusel on võimalik kõrgust mõõta või kontrollida ka ümbruses lähedal asuva reeperiga. Käigust tulenevate mõõtmisvigade ärahoidmiseks on tähtis meeles pidada, et instrument oleks igal käigu punktil korrektselt tsentreeritud ja järgnevatele punktidele viseerimine oleks võimalikult täpne. [3]

Väliseks mõõdistuskäiguks kasutatakse hoone mõõdistamisel tavaliselt elektrontahhümeetrit. Olemasolevate punktide koordinaatide saamiseks tuleb punkte mõõta täisvõttega, et oleks tagatud instrumendi suurim täpsus. Enamus elektrontahhümeetritel on nurgamõõtmise täpsus vähemalt 5". DIN 18723 standardile vastavalt tähendab see, et mõõtes punkti kahe täisvõttega saadakse nurga täpsuseks viis sekundit. Sellest tulenevalt mõõtes punkti ühe täisvõttega on nurgamõõtmine täpsuseks 7,07" ja poolvõttega 10". [3]

Mõõdistustööde kindlustamiseks tasub olemasolevat alusvõrku tihendada. Alusvõrgu tihendamine suurendab käigu kontrollimise võimalust ja loob rohkem võimalusi keerulisemates situatsioonides vabu seisupunkte teha. Alusvõrku saab tihendada helkurkleepsude ja teibiga nii hoone sees kui ka väljas, kõrval asuvate hoonete ja kindlate objektidega. Samuste helkurkleepsude ja teibi abil on võimalik ruumide mõõdistamisel anda vabale seisupunktile koordinaadid (Joonis 1). [10]



Joonis 1. Kasutatavad helkurkleepsud

1.3.4 Hoonesisene mõõdistuskäik

Hoonesisesed mõõdistuskäigud rajatakse igale korrusele ja sedasi, et käigu punktidest oleks võimalik mõõta kõik vajalikud suurused. Käik rajatakse pikki koridore ja käigu punktid pannakse ukse avade kohale, et oleks võimalik mõõta igat ruumi eraldi. Käigu otsmistelt punktidele peab olema nähtavus hoonevälise mõõdistuskäigu punktidele selleks, et siduda omavahel hoonesisene ja hooneväline käik. Mõõdistuskäigu täpsuse tõstmiseks ja kontrolli tegemiseks tasub siduda käik kahe või enama hoonevälise mõõdistuskäigu punktiga. Sisemise mõõdistuskäigu punktid märgistatakse tavaliselt markeriga, teibiga või märgistatakse kleepe-paberile (Joonis 2). Puidust põranda puhul saab ka kasutada peeneid naelu, kuid sellised meetodeid tänapäeval enam siseruumidest tihti ei näe. [10]



Joonis 2. Kasutatud markerkleeps

Hoonesisestes mõõdistuskäikudes paratamatult kasutatakse ka ühe või kahe küljega rippuvaid käike. Rippuv käik pole kõige usaldusväärsem kuna selle otsapunkti asendiviga võib olla neli kuni viis korda suurem välise mõõdistuskäigu punktide asendiveast. Ehitusgeodeetiliste uurimustööde tegemise korral vastavalt tuleb meele pidada, et rippuva käigu maksimaalne lubatav pikkus M 1:1000 ja M

1:500 plaanide puhul on tiheasustusaladel 250 meetrit ja hajaasustusaladel 400 meetrit. Lisaks ei tohi rippuvas teodoliitkäigus tiheasustusaladel jooni olla rohkem kui kolm ja hajaasustusaladel rohkem kui kaks. [9]

1.3.5 Mõõdistusvõrgu täpsusnõuded

Tulenevalt MKM Ehitusgeodeetiliste uurimustööde tegemise korrast on ette määratud tahhümeetrilise käigu täpsuse nõuded. Plaanilise mõõdistusvõrgu täpsusnõuded on jaotatud mõõtkava alusel. Plaanilise mõõdistusvõrgu punktide maksimaalsed lubatavad vead lähtepunktide suhtes on järgmised (Tabel 1) [9]:

Tabel 1. Plaanilise mõõdistusvõrgu punktide maksimaalsed lubatavad vead lähtepunktide suhtes

Mõõtkava	Äärmine lubatav viga tiheasustusaladel, ± cm	Äärmine lubatav viga hajaasustusaladel, ± cm
1:500	5	8
1:1000	10	15
1:2000	20	30

Lähtudes Ehitusgeodeetiliste uurimustööde tegemise korrast on ettenähtud ka mõõdistusvõrgu kõrguslikud nõuded. Kõrgusliku mõõdistamisvõrgu punkti kõrguslik viga lähtepunktide suhtes ei tohi ületada ± 5 cm ning ühe geodeetilise uurimustöö piires ei tohi kõrgusliku mõõdistamisvõrgu punktide omavaheline kõrguslik viga ületada ± 3 cm. [9]

Juhul kui kasutatakse GPS-mõõdistamist, siis on lubatud määrata koordinaate baaspunktidele, mida kasutatakse teiste mõõdistamisviiside lähtepunktidenä. GPS-mõõdistamisega määratav baasjoone pikkus, baaspunktide omavaheline kaugus, ei või olla väiksem kui 300 meetrit. Situatsioonist tingitud nähtavuse ja horisondi piiratuse tõttu võib baasjoone pikkust erandjuhul vähendada 200 meetrini. [9]

Lisaks tuleb järgida teodoliitkäigu puhul ka käigu nurgalist täpsust. Selleks on Ehitusgeodeetiliste uurimustööde tegemise korra alusel on sätestatud lubatud nurkade vaheline sulgemis viga, mis ei tohi olla suurem kui ± 20", valem (2). [9]

$$f_{\beta_{lub}} = \pm 20'' \sqrt{n}, \quad (2)$$

kus $f_{\beta_{lub}}$ – suurim lubatud nurkade sulgemisviga;

n – nurkade arv käigus.

1.4 Laserskaneerimine

Laserskaneerimine on kaugseire meetod, mis kasutab laserkiiri objektide kõrge detailsusega, näiteks 1 mm + 10 ppm (*part per million*), mõõdistamiseks. Laserskaneritest välja lastud ja tagasi peegeldunud laserkiired sisaldava mõõdetud objekti kaugusi ja asukohta ruumis, millest arvutatakse välja objekti kolmemõõtmeline (3D) punktipilv. Üksiku punkti asukoha määramiseks kasutatakse valemit (3). [11]

$$\begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix}_{i=1..n} = \begin{bmatrix} \rho_i \sin \varphi_i \sin \theta_i \\ \rho_i \sin \varphi_i \cos \theta_i \\ \rho_i \cos \varphi_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

kus $\begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix}$ – üksiku punkti koordinaatjuurdekasv;
 ρ – punkti kaldkaugus;
 φ – punkti seniitkaugus ehk vertikaalnurk seniidist;
 θ – horisontaalnurk seadme lähtesuunast. [12]

Laserskaneerimist on võimalik kasutada ükskõik mille mõõtmiseks, kuid enamjaolt leiab see otstarvet ehituses hoonete, teede, sildade ja paljude muude rajatiste mõõdistamiseks. Laserskaneerimine oma olemuselt jaotub kolmeks: terestiline laserskaneerimine (TLS), mobiilne laserskaneerimine (MLS) ja aerolaserskaneerimine (ALS). [11]

1.4.1 Staatile laserskaneerimine

TLS ehk terestilist laserskaneerimine on üks esimesi laserskaneerimise viise. Terestiline laserskaneerimine kogub hoonete, sildade, teede, kujude ja teiste objektide kõrge eraldussuurusega ja täpseid ruumiandmed. Selline meetod tuleb kasuks objektidel mis on hästi detailsed ja keerukad ning mida ei ole praktiline mõõdistada traditsiooniliste geodeetiliste mõõtmismeetoditega, näiteks nagu detailsed hoone fassaadid, ümarad/kurvidega objektid jms. TLS laserskaneerimisega on võimalik andmeid koguda sentimeetri täpsusega ja paari millimeetrise eraldussuurusega. Igakord ei ole siiski vajalik taolisi täpsusi saavutada, säästes ajakulu ja andmemahutu mõõdistusel. Tavaliselt on mõõdistamisel piisavaks eraldussuuruseks on paar sentimeetrit, olenevalt objekti detailsusest. TLS mõõtmismeetodit kasutades on vaja objekti skaneerida mitmest erinevast jaamast selleks, et saada igast küljest täielik pilt. Kõikidest jaamadest saadud punktipilved vajavad hiljem andmetöötluse käigus registreerimist (*registration*) ehk punktipilvede kokku sidumist läbi transformeerimise. Andmete transformeerimisel toimub saadud andmete pööramine ja nihutamine, milleks kasutatakse

valemit (4) [12]. Punktipilvede sidumiseks peab olema naaber punktipilvede vahel piisvalt ülekattet. Tulemuseks tekib ühtses ristkoordinaadis olev suurem punktipilv mida saab omakorda tähistate abil georefereerida ehk viia punktipilv riiklikku koordinaatsüsteemi ja kõrgussüsteemi. [11]

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + R_{(K)} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}, \quad (4)$$

kus $(x, y, z)_d$ – koordinaadid millesse siiratakse;

$(T_x T_y T_z)$ – koordinaatide nihe;

$R_{(K)}$ – ümber z telje pöörlemise maatriks;

$(x, y, z)_m$ – siiratavad koordinaadid. [12]

1.4.2 Dünaamiline laserskaneerimine

Liikuvate laserskaneerimise meetodite puhul, näiteks nagu ALS ja MLS, peavad skannerid sisaldama GNSS vastuvõtjat ja IMU seadet (*Inertial Measurement Unit*). GNSS tagab liikuva skanneri võimalikult täpse asukoha ja IMU skanneri orientatsiooni ehk salvestab mõõdistusplatvormi pöördenurki ja pöörlemise kiirust. Saadud andmeid tuleb omavahel ühilduda kas reaalaaja meetodil (RTK) või andmetöötluse käigus. Kuna osadel liikuvatel laserskanneritel, nagu näiteks autodel, on juba küljes GNSS vastuvõtja siis mõõdistustööde väljundiks on riiklikus koordinaatsüsteemis punktipilved. [11]

ALS ehk aerolaserskaneerimise käigus kasutatakse objekti või maapinna mõõdistamiseks droone, lennukaid ja helikoptereid, millele on külge pandud LIDAR (*light detection and ranging*) seade. Aerolaserskaneerimine on mõeldud peamiselt suurte maa-alade kaardistamiseks, katuste ja fassaadide skaneerimiseks ning mahtude võtmiseks. ALS laserskaneerimise suurema mõõtekauguse tõttu on punktipilve tihendus ja täpsus võrreldes TLS laserskaneerimisega hõredam ja kehvem. Ideaalsetes tingimustest võib aerolaserskaneerimisel täpsus olla ± 15 cm, sõltuvalt ka lendamise kõrgusest. [11]

MLS ehk mobiilne laserskaneerimine sarnaneb oma olemuselt aerolaserskaneerimisega. Mobiilseid skannereid on erinevaid, nagu näiteks: auto, paat, seljakott, käru ja käsiskannerid. MLS skannerid kasutavad võrreldes ALS skanneritega nõrgemaid LIDAR seadmeid, millest tulenevalt saab neid

turvaliselt kasutada inimeste ümbruses. MLS laserskaneerimise täpsus jääb TLS ja ALS laserskaneerimise vahepeale. Täpsus oleneb hästi palju instrumendist, keskkonna oludest ja signaalist. MLS laserskaneerimise täpsuse hindamiseks on tehtud mitmeid erinevaid uuringuid ning on saadud ka erinevaid tulemusi. Käes ja seljas kantavate MLS skannerite puhul saadakse kolmemõõtmelise punkti täpsuseks alla ühe sentimeetri, olenevalt instrumendist ja kasutusviisist. Erinevad uuringud on näidanud, et antud meetodi täpsus sobib kasutamiseks geodeetilistes töödes. Mobiilseid laserskannereid kasutatakse näiteks teedehituses, hoonete mõõdistamisel ja deformatsioonide uurimisel. Võrreldes MLS tehnoloogiat TLS tehnoloogiaga siis võib järeldada, et MLS mõõdistamine on aega säästvam kuid sellepoolest ei ole MLS nii täpne kui TLS. Tihtipeale kasutakse mõõdistustöös väljatoodud tehnoloogiad koos, nagu näiteks hoone inventariseerimisel. Hoone inventariseerimisel mõõdistatakse näiteks siseruumid MLS laserskanneriga, hoone detailsem fassaad TLS laserskanneriga ja katus ALS tehnoloogia abil. [11]

1.4.3 Laserskaneerimise tähised

Laserskaneerimise käigus saadud punktipilved tuleb tihtipeale registreerida ja georefereerida ehk viia punktipilv riiklikku koordinaatsüsteemi ja kõrgussüsteemi. Selleks kasutatakse laserskaneerimise puhul tähiseid. Tähiseid kasutatakse erinevaid, nagu näiteks: pabertähised, magnetitähised ja spetsiaalsete hoidikute küljes olevad tähised. Hoonete inventariseerimisel kasutatakse peamiselt paber- ja magnetitähiseid (Joonis 3). Tähised peavad olema paigal ja liikumatut kogu skaneerimise vältel ning olema nähtavad erinevatest punktipilvedest. Tähised mõõdetakse ja koordineeritakse elektrontahhümeetriga. Tähised on soovituslik paigutada laserskanneri ümber vähemalt neli tükki ühe asukoha kohta ning jaotada ruumiliselt ja homogeeniselt alale laiali, hoides laserskanneriga mõistlikku vahet. [13]



Joonis 3. Kasutatavad ja andmetöötleses tuvastatud tähised: vasakul pööratavad must-valged magnetitähised, paremal sama pööratav magnetitähis punkt pilves

1.4.4 Laserskaneerimisel tekkivad vead ja vigade allikad

Tahes tahtmata pole ükski mõõdistustöö sada protsenti täpne ja seda ei ole ka laserskaneerimine. Peamised komponendid, mille järgi hinnatakse laserskanneri usaldusväärsust on järgmised [14]:

- õigsus (*accuracy*) – mõõdistamisel saadud mõõtude vastavus reaalse olukorraga;
- täpsus (*precision*) – mõõtmise korratavuse aste;
- resolutsioon (*resolution*) – vähim kaugus kahe kõrvuti oleva mõõdetav punkti vahel.

Laserskaneerimise ebatäpsused võivad olla tingitud mitmetest erinevatest komponentidest. Peamiselt mõjutavad andmete usaldusväärsust: kasutatavad instrumendid, objekti omadused ja keskkonnast tingitud omadused. Lisaks saab ka mõjutegurite alla lisada veel andmetöötlemisest ja instrumenti kasutavast isikust tulenevad vead. [14]

Instrumentidest tulenevad vead võivad olla igal tootjal erinevad ja omamoodi. Instrumentide dokumentatsioonis välja toodud näitajaid kontrollitakse tavaliselt ideaalsetes tingimustes näiteks nagu laborites. Tegelikult ideaalseid tingimusi tihti peale ei teki, juba keskkonnast ja ilmastikuoludest võivad tekkida dokumentatsioonis olevates andmetes muudatused sisse. Selleks, et teada saada kuidas instrument tegelikult töötab tuleb seda proovile panna erinevates olukordades. [14]

Mõõdistatava objekti omadustest peamiseks vea allikaks on objekti peegeldusvõime. Peegeldusvõime omakorda sõltub objekti värvist, laseri langemispunkti, materiaalsest kooslusest, mõõdistatava pinna niiskusest ja pinna temperatuurist. Näiteks tumedamad pinnad neelevad laserkiiri ja ei võimalda neil instrumenti tagasi peegelduda, seega langeb ka punktide kvaliteet. [14]

Keskkonna tingimustest mõjutavad mõõtmise näiteks: õhuniiskus, sademed, õhutemperatuur ja vibratsioon. Instrumentide tootjate dokumentatsioonis on sätestatud äärmised õhutemperatuurid, mida on testitud, ning mille vahel suudab laserskanner töötada. Lisaks on uutele seadmetele paigaldatud ka juurde termokate, mis hoiab instrumendi töö temperatuuri, kaitseb tolmu eest ja tagab lihtsama veekaitse. Tolmu ja veekaitse kvaliteedi kirjeldamiseks kasutatakse IP standardit (*Ingress Protection*). Terrestilise laserskanneril Leica RTC360 on näiteks standardi järgi IP54, mis kaitseb laserskannerit tahkete osakeste ja vedeliku sissepääsu eest. [14]

1.5 Fotogramm-meetria

Fotogramm-meetria on teadus objektide asendi, mõõtmete ja kuju määramine nende fotokujutiste järgi. Fotogramm-meetria rakendatakse peamiselt topograafiliste kaartide ja plaanide valmistamisel aerofotode või maapealsete ehk terrestriliste fotode järgi. Fotogramm-meetrisel mõõdistamisel on mitmeid väljundeid, kuid nendest põhilisemaks väljundiks on fotodest koostatud punktide pilv. Fotogramm-meetria jaguneb pildistamismeetodite alusel kolmeks [15]:

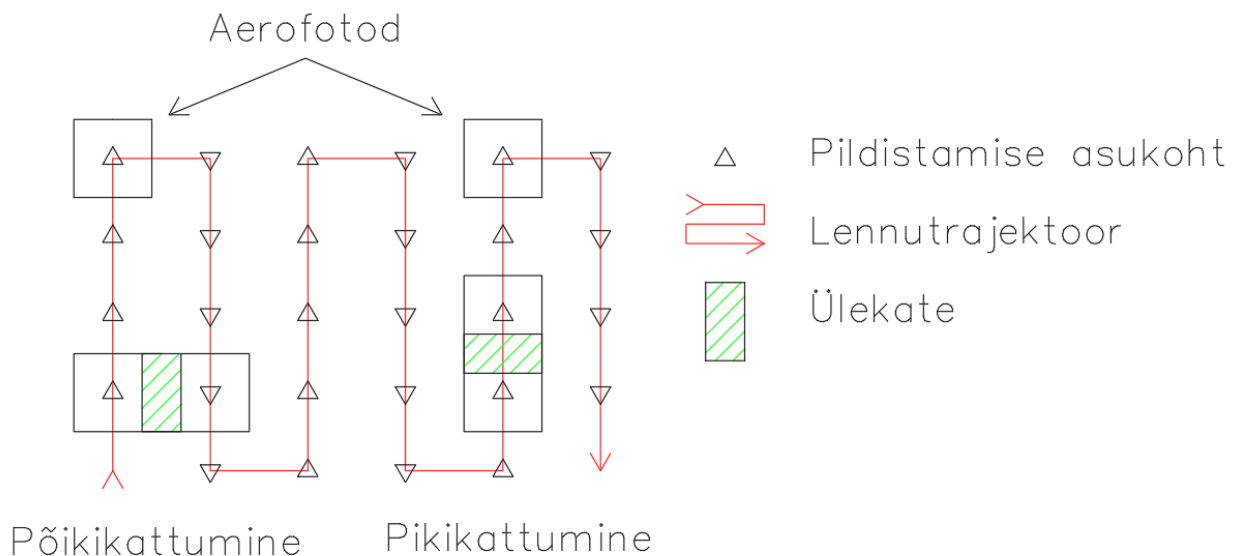
- aerofotogramm-meetria – fotode tegemiseks kasutatakse lennukit, helikopterit või mehitamata õhusõidukit;
- satelliitfotogramm-meetria – fotode tegemiseks kasutatakse satelliite;
- terrestiline fotogramm-meetria – fotod tehakse maa pinnal või selle vahetus läheduses. Tavaliselt on tegemist statiivile paigaldatud statsionaarsete filmi-, video- ja digitaalkaameratega, kuid pildistatakse ka näiteks nutitelefoniga.

1.5.1 Aerofotogramm-meetria põhimõtted

Aerofotogramm-meetria on üks fotogramm-meetria teostamise viise, mis uurib ja tegeleb objektide asendi, mõõtmete ja kuju määramisega aerofotodelt saadud kujutiste järgi. Aerofotodel kasutatakse tavaliselt ristkoordinaatide süsteemi (X_2 , Y_2 , Z_2). Foto koordinaatide süsteem on seotud lennuki lennu suunaga, kus X_2 on paralleelne lennu suunaga. Ristkoordinaatide määramiseks kasutatakse aerotriangulatsiooni ehk fototriangulatsiooni. Aerotriangulatsiooni puhul transformeeritakse

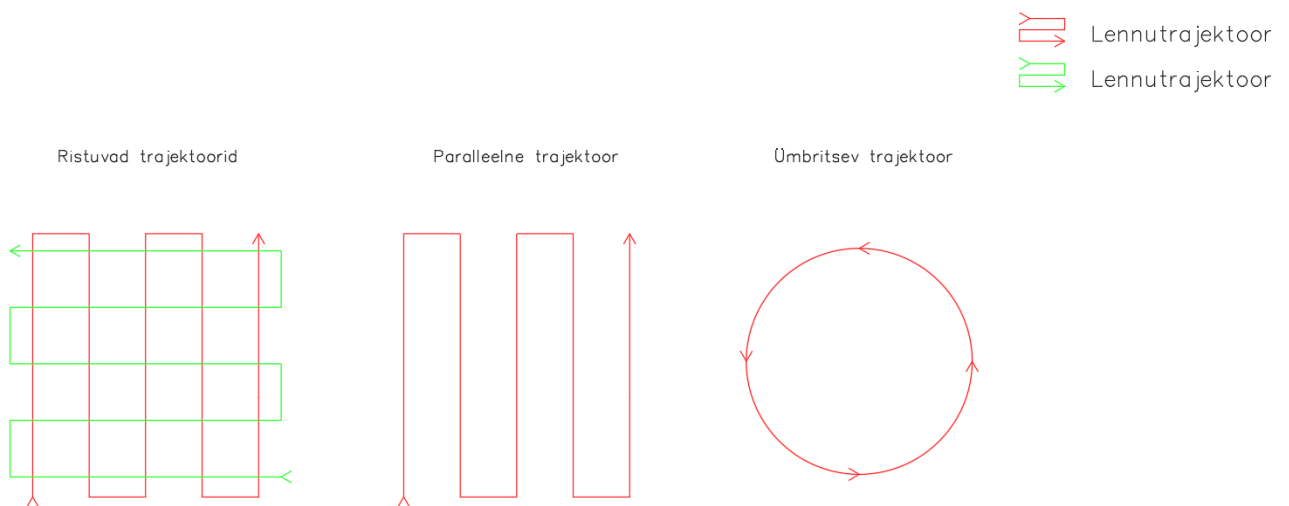
ülekatuvusega aerofotod kindlasse süsteemi maapinnal asuvate plaaniliste ja/või kõrguslike kindelpunktide abil. [15]

Aerofotogramm-meetrias mängivad pildistamisel rolli mitmed parameetrid, nagu näiteks: lennutrajektor, lennukõrgus, lennukiirus ja fotode ülekattumine. Lennutrajektoori valimisel soovitatakse valida trajektor, mis oleks mõõdetava objektiga risti. Lennutrajektoorist lähtudes tuleb meeles pidada pildistamisel fotode piki- ja põikikattumist. Pikikattumine on lennu marsruudiga samal suunal olevate kahe järjestikuse foto ülekate. Põikikattumine on paralleelsel lennusuunal asuvate fotode külgmise ülekate. Mõlemaid kattumisi väljendatakse protsentides, mehitamata õhusõidukite puhul on soovituslik pikikattumine eelneva fotoga 75% ja põikikattumine kõrval oleva fotoga 60% (Joonis 4). [16]



Joonis 4. Põiki- ja pikikattumine [16]

Tavaliselt viiakse aeropildistamist läbi paralleelsete lennutrajektoridega kuna see tagab nõutava piki- ja põikkattumise. Ristuvate lennutrajektoride kasutamine on otstarbekas kui nähtavus objektile on piiratud või kui on vaja saada detailsemat terviklikku pilti. Kõrgehitiste puhul soovitatakse kasutada aeropildistamiseks ümbritsevat lennutrajektoori (Joonis 5). [16]

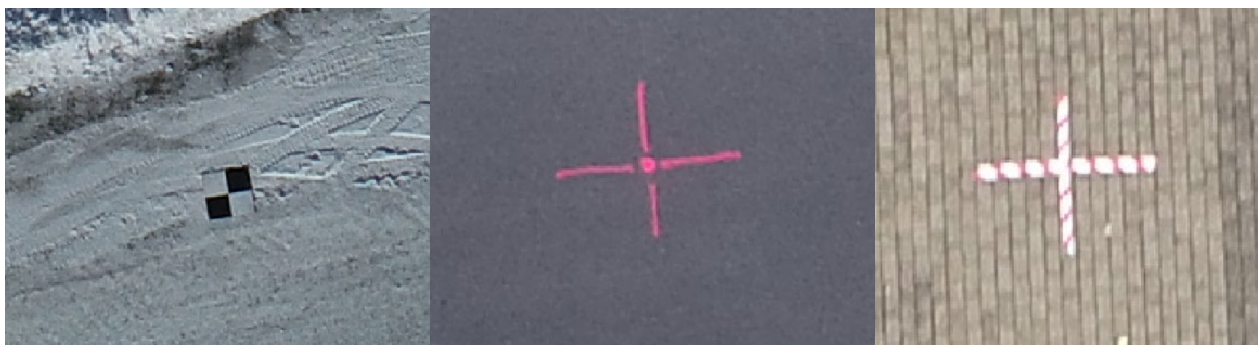


Joonis 5. Erinevad mõõdistamise lennutrajektoolid [16]

Lennukõrgus on mõõdistava objekti ja õhusõiduki vaheline vertikaalne kaugus. Lennukõrguse valimisel tuleb esiteks tagada ohutus terve lennu kestvusel ning lisaks tuleb veel meeles pidada foto kvaliteedi ja kaetava maa-ala omavahelist suhet. Madalama lennu puhul on foto kvaliteet parem kuid see-eest on lennuaeg pikem ja kaetav maa-ala väiksem. Kõrgema lennukõrguse puhul kaetakse suurem maa-ala kuid kaotatakse fotode kvaliteeti. Lennuaega ja fotode kvaliteeti mõjutab ka lennukiirus. Lennukiirus tuleb valida optimaalne selleks, et fotode kvaliteet ei langeks ja fotode hädusus oleks minimaalne ning lennuajaga oleks võimalik katta võimalik suur maa-ala. [16]

1.5.2 Aerofotogramm-meetria kontrollpunktid

Aeropildistamise kontrollpunktid ehk GCP (*Ground Control Point*) on õhust selgesti nähtavad ja äratuntavad kindelpunktid mida kasutatakse saadud fotode andmetöötluse käigus mõõdistuse plaaniliseks ja kõrguslikuks sidumiseks riikliku koordinaatsüsteemiga. Tihtipeale mõõdetakse kontrollpunkte GNSS seadmega või näiteks elektrontahhümeetriga hoonevälise mõõdistuskäigu tegemisel. Paigaldatud kontrollpunktid peavad olema ümbritsevast maapinnast eristatavad, ei tohi jääda kõrvaliste objektide taha peitu ja soovituslik on orienteerida üks külg põhja-lõuna suunaliselt, et andmetöötluse käigus oleks tsentrit lihtsam määrata. Vastavalt olukorrale kasutatakse spetsiaalseid mehitamata õhusõidukite tähiseid, aerosoolvärvi või äratuntavat värvilist teipi (Joonis 6). [16]



Joonis 6. Aerofotogramm-meetrias kasutatavad tähised. Vasakult alates: spetsiaalne mehitamata õhusõiduki tähis, aerosoolvärv ja värviline teip

1.5.3 Aerofotogramm-meetria mõjutavad tegurid

Aerofotogramm-meetria lõplikuks väljundiks on tavaliselt punkt pilv. Punkt pilv omakorda koosneb mõõdistuse käigus tehtud aerofotodest. Sellest järeldades peavad mõõdistuse käigus tehtud fotod olema hea kvaliteediga. Fotode kvaliteet sõltub otseselt kasutatavast kaamerast, kuid lisaks mõjutab kvaliteeti veel ilmastikuolud, kasutatavad lennuparameetrid ja lennuplaneerimisest tingitud tegurid. [16]

Mõõdistustöödel kasutatava kaamera tähtsamad näitajad on kaamera valgustundlikkus, mida kirjeldatakse ISO väärtusega (*International Organization for Standardization*), kaamera avaus ja säriaeg ehk valguse salvestuse aeg. ISO väärtus mõjutab fotode heledust. Kaamera avaus ja salvestuse aeg näitavad kui palju ja kui pikalt fotosensor valgust saab. [16]

Kindlasti ei sobi aerofotogramm-meetriliseks mõõdistamiseks ka vihmased ja tuulised ilmad. Lisaks võib tulemuste kvaliteeti mõjutada näiteks ka madal päike mis võib tekitada fotodele suuremad varjud ja pimestada fotosensorit. Ideaalseks aerofotogramm-meetria mõõdistus ilmaks peetakse pilvist, tuulevaikset ja sademeteta ilma. [16]

Isegi kui kasutatav tehniline varustus on väga hea ja ilmastikuolud on head, peab mõõdistus läbiviiv isik omama teadmisi vastava töö läbiviimiseks. Vead tekivad ka kui valitakse valed lennuparameetrid või planeeritakse lennu marsruuti valesti. Lennu parameetritelisteks vigadeks võivad olla: lennukõrgus, lennukiirus, määratav fotode ülekattuvus ja kaamera nurk. Lennu marsruudi planeerimisel ei pruugita arvestada kõrgemata objektiga mis võivad lennutrajektoorile ette jääda ning ei pruugita katta kogu vajaminevat maa-ala. [16]

2 TÖÖDE LÄBIVIIMINE

2.1 Objekti kirjeldus

Käesoleva lõputöö käsitletavaks objektiks on Takahuhdin põhikool Soomes, Ida-Tampere linnas, mis asub Helsingist 182 kilomeetrit põhja pool. Kooliruumid paiknevad kahes erinevas hoones – A ja B (Joonis 7). A-hoones, mis asub aadressil Hanhenmäenkatu 2, kus õpivad 5.-9. klassi õpilased ning B-hoones, mis asub aadressil Hintsankatu 4, kus õpivad 1.-4. klassi õpilased. Takahuhdin kool on üks Tampere suurimaid koole, kus õpib ligikaudu 1200 õpilast ning mille kogupindala on 21 200 m².



Joonis 7. Takahuhdin kooli A- ja B-hoone [17]

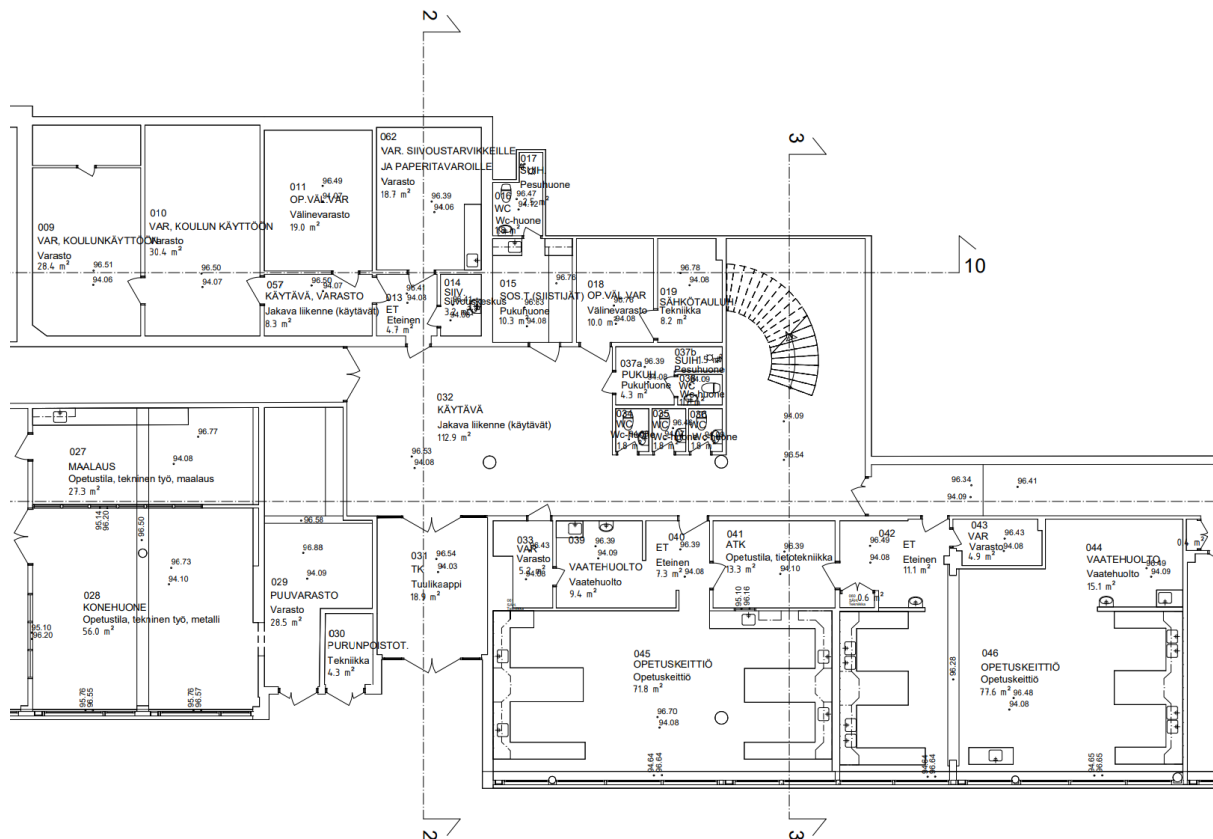
Takahuhdin kooli hoone A ja hoone B asuvad üksteisest 350 meetri kaugusel. Mõõdistustöödega alustati hoonest A ning peale mille lõpetamist alustati hoone B mõõdistustöödega. Käesolevas lõputöös käsitletakse A-hoone mõõdistamist (Joonis 8).



Joonis 8. Takahuhdin kooli A-hoone [17]

2.2 Töö lähteülesanne

Töö ülesandeks oli mõõdistada Takahuhdin kooli A- ja B-hoone täies ulatuses nii seest kui ka väljast. Töö eesmärgiks oli mõõdistustöödest saadud andmetest koostada 2D plaanid koos ruumipindade suuruste informatsiooniga. Mõlema koolimaja kõikidest korrustest oli vaja teha korruseplaanid, koolimajade katuse plaanid, mõlema koolimaja väliskülgedest fassaadi vaated ja vajalikud hoone lõike joonised. Plaanid peavad sisaldama lisaks üldisele ruumigeomeetriaale ka ruumi inventari nagu näiteks: aknad, ukSED, wc potid, kraanikausid jms (Joonis 9).



Joonis 9. Näide 2D plaani detailsusest

Lisaks pidid plaanid sisaldama detailide fikseeritud kõrguseid, ruumide nimetusi otstarbe alusel ja ruumide pindala. Töö väljundiks soovis klient saada kõiki plaane (korruse plaanid, katuse plaanid, fassaadi vaated ja hoone lõiked) koos mõõdistusandmetega. Plaanid koos mõõdistusandmetega edastati lõpuks kliendile AutoCad failidena kui ka .pdf formaadis väljavõtena.

2.3 Tööde planeerimine

Tööde planeerimisel tuli paika seada projekti optimaalne tööprotsess. Projekti planeerimis etapis tuginati ettevõtte Exact Geomark AS juhenditele, varasematele töökogemustele ja kliendilt saadud vanadele olemasolevatele plaanidele. Olemasolevate hoone plaanide alusel planeeriti skaneerimisjaamade asukohad, orienteeruv ajakulu mobiilsele laserskaneerimisel ning tähiste ja kontrollpunktide sobilikud asukohad. Kuna tegemist oli vanade hoone plaanidega, siis tuli ka arvestada võimalusega, et tegelik situatsioon on muutunud ning mõõdistustöodes võivad tekkida ajalised viivitused.

Käesoleva objekti mõõdistusvõrk planeeriti ja rajati GNSS ning elektrontahhümeetri mõõdistamise abil. Kuna lähimad polügonomeetria punktid ja reeperid olid objektist suhteliselt kaugel ja hõredalt asustatud, siis nende kasutamine mõõdistusvõrgu rajamiseks oleks olnud hästi aega nõudev protsess. Mõõdistusvõrgu kõrgusliku korrektsuse kontrollimiseks mõõdeti üks lähemal asuv reeper.

Projekti alguskuupäevaks oli 13. oktoober 2022 ja lõplikud failid pidid olema saadetud 16. detsember 2022, kokku kestis projekt 65 kalendripäeva. Välitöödega oli arvestatud viis kalendripäeva (sh nädalavahetus), mis koosnes laserskaneerimisest, drooni mõõdistamisest ja mõõdistusvõrgu rajamisest. Välitöö teostati kahekesti. Andmetöötluse ja andmete kontrolli jaoks oli määratud seitse kalendripäeva. Plaanide joonestamist alustati kohe peale andmetöötlust ning selleks oli aega kuni lõplike failide üleandmise kuupäevani, 16. detsemberini. Kuna tegemist oli igapäevaselt tegutseva koolimajaga, tuli suurem osa mõõdistustöödest viia läbi nädalavahetusel ja vabadel päevadel kui õpilastel koolis tunde ei toimunud. Tavapärase koolipäeva kestvuse ajal mõõdistati võimalikult palju hoone välist situatsiooni. Tööde sujuvamaks tegemiseks tagati uksekoodid ja ruumide võtmed, et oleks võimalik vajadusel ise avada ja ette valmistada mõõdistatavaid ruume.

2.4 Ettevalmistus

Enne Tampere objektile suundumist komplekteeriti ja teostati kontroll varustusele ja kaasavõetavatele instrumentidele. Laserskaneerimiseks kasutati terrestrilist laserskannerit Leica RTC360 ja mobiilset laserskannerit NavVis VLX.

Laserskanner Leica RTC360 (Joonis 10) on integreeritud sfäärilise HDR-pildisüsteemiga ja visuaalse inertssüsteemiga VIS (*Visual Inertial System*) reaajas registreerimiseks. [18]



Joonis 10. Kasutatud Leica RTC360 laserskanner [18]

Instrumendi tehnilised andmed [18]:

- esimese klassi laser;
- punktikogumise kiirus 2 000 000 punkti sekundis;
- kauguse mõõdistamise täpsus $\pm 1 \text{ mm} + 10 \text{ ppm}$;
- nurgamõõtmise täpsus $\pm 18''$;
- instrumendi vaateväli 360° horisontaalne ja 300° vertikaalne;
- töö mõõtekaugus 0.5 – 130 meetrit;
- töötemperatuur -5°C kuni $+40^\circ\text{C}$;
- tolmu ja veekindlus IP54.

Laserskanner NavVis VLX (Joonis 11) on seljas kantav mobiilne laserskanner koos kahe LIDAR skanneriga ja nelja tööstuskaameraga. VLX laserskanner kasutab NavVis poolt patenteeritud 6D SLAM (*Simultaneous localization and mapping*) tehnoloogiat, mis võimaldab jäädvustada tegeliku olukorda. 6D SLAM tehnoloogia tagab mõõdistuse käigus samaaegset lokaliseerimist ja kaardistamist arvestades instrumendi asukohta ja asendit. Instrumendi asukohta ja asendit hinnatakse kuue dimensiooni: horisontaalse kaldenurga, vertikaalse kaldenurga, pöördenurga ja x-, y-, z-telgede alusel. [19] [20]



Joonis 11. Kasutatud NavVis VLX laserskanner [21]

Instrumendi tehnilised andmed [22]:

- esimese klassi laser;
- ühe punkti ruumiline täpsus ± 6 mm, testitud keskkonnas 500 m²;
- skaneerimise kiirus kahe skanneri peale kokku 600 000 punkti sekundis;
- instrumendi vaateväli 360° horisontaalne ja 360° vertikaalne;
- töö mõõtekaugus maksimum 100 meetrit;
- töötemperatuur 0 °C kuni +35 °C;
- tolmu ja veekindlus IP42.

Mõõdistusvõrgu rajamiseks kasutati elektrontahhümeetrit Leica Viva TS15 (Joonis 12). Leica Viva TS15 võimaldab oma vaateväljas otsida, lukustada ja jälitada prismat. [23]



Joonis 12. Kasutatud Leica Viva TS15 [23]

Instrumendi tehnilised andmed [23]:

- nurgamõõtmise täpsus $\pm 1''$;
- mõõtekaugus 1000 – 5400 meetrit olenevalt mõõdistatavast prismast;
- standard mõõtetäpsus/mõõteaeg $\pm 1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm} / 2,4 \text{ sekundit}$;
- töötemperatuur $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $+50 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- tolmu ja veekindlus IP55.

Objekti aeromõõdistamiseks kasutati drooni DJI Phantom 4 Pro v2.0 (Joonis 13). Tervikliku kaaluga (koos aku ja propelleritega) 1388 grammine, lennuaeg 30 minutit. Drooni ees, taga ja külgedel asuvad sensorid mille abil suudab droon vältida lennutrajektoorile ettejäävaid takistusi ning kasutades allapoole suunatud kahte kaamerat ja ultraheli sensorit tagatakse drooni asukoha jälgimine. Antud drooniga on võimalik lennata kuni 50 km/h. Drooni külge on paigaldatud kaamera mis võimaldab teha 20 megapiksliseid fotosid ja filmida videot kuni 60 kaadrit sekundis. Kaamera valgustuse tundlikkuse ISO väärtus on automaatse pildistamise puhul 100 kuni 3 200 ja manuaalse pildistamise puhul 100 kuni 12 800. Kaamera valguse salvestuse aeg ehk säireaeg on 1/2000 kuni 1/8000 sekundit. [24]



Joonis 13. Kasutatud droon DJI Phantom 4 Pro v2.0

2.5 Mõõdistustööde protsess

2.5.1 Alusvõrgu rajamine

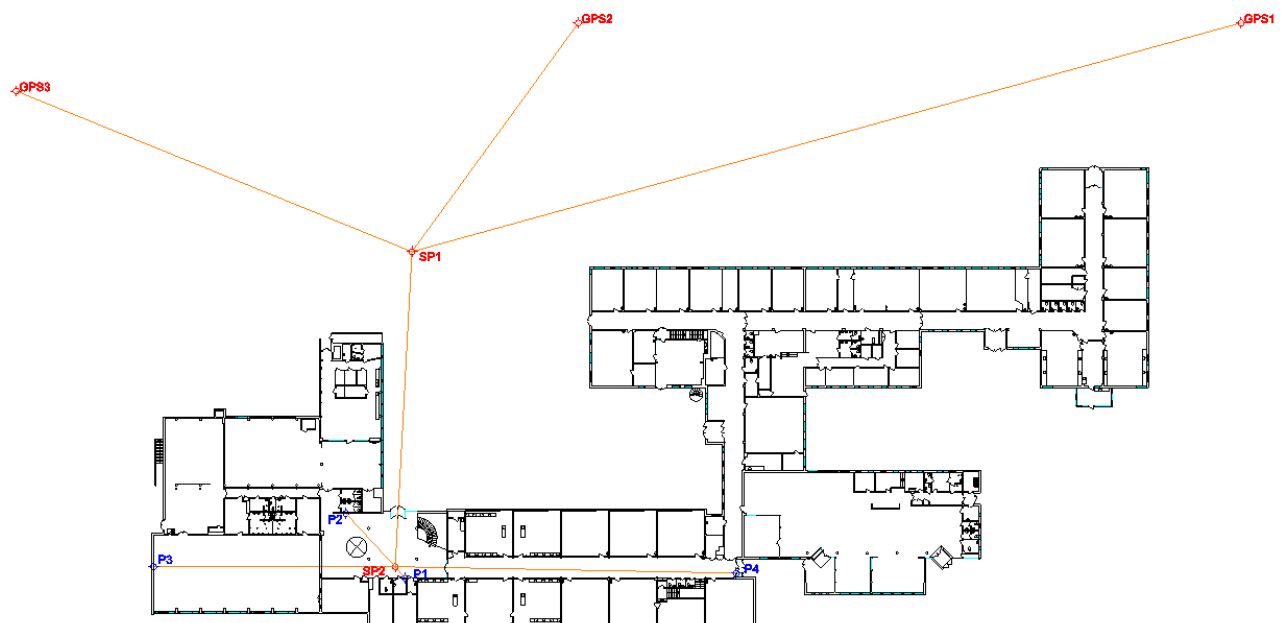
Objekti mõõdistusvõrgud oli võimalik rajada skaneerimistöödega samal ajal kuna korraga oli välitööl kaks inimest. Mõõdistuse käigus oli tähtis jälgida, et kasutatakse õiget koordinaat- ja kõrgussüsteemi. Soomes on koordinaatsüsteemiks ETRS-GK ja kõrgussüsteemiks NN2000. Tampere linn asub riiklikus süsteemis mõõtmistsoonis 24' 00". Mõõdistusvõrgu rajamiseks kasutati GNSS mõõtmismeetodit kuna lähimad riiklikud punktid asusid objektist suhteliselt kaugel, mille tõttu nende kasutamine ei oleks olnud otstarbekas. Lisaks kasutati mõõdistusvõrgu rajamiseks elektrontahhümeetrit (Joonis 12).

Mõõdistusvõrgu rajamisel kasutatakse kinnist, lähtekülgedega ja rippuvat teodoliitkäiku. Mõõdistusvõrgu rajamise esimeseks ülesandeks oli määrata ära lähtepunktide ehk GNSS punktide asukohad. Lähtepunktidenä kasutati eelnevalt paigutatud asfaldinaelu, mis pandi hoone ümber lagedamatele maa-aladele. Lähtepunkte mõõdeti RTN tehnoloogiat kasutades. Kokku pandi hoone ümber kuus lähtepunkti, mida igaühete mõõdeti kolm korda, et hiljem arvutada manuaalselt tulemuste keskmised koordinaadid ja kõrgused. Elektrontahhümeetri orienteerimiseks kasutati GNSS seadmega keskmistatud koordinaate ja kõrgusi. Lähtepunktiga orienteerimisel mõõdeti elektrontahhümeetriga punktid kahe täisvõttega. Mõõdistusvõrgu lähtepunktide koordineerimisel nõutud täpsus jäi lubatud piiridesse ehk ei ületanud äärmist lubatavat viga ± 5 cm.

Hoone välises mõõdistusvõrgus kasutati peamiselt helkurkleepse (Joonis 1), mis paigaldati kindlatele objektidele (hoone seinad, müürid jms) hoone ümber. Helkurkleepsud oma eesmärgilt tihendasid

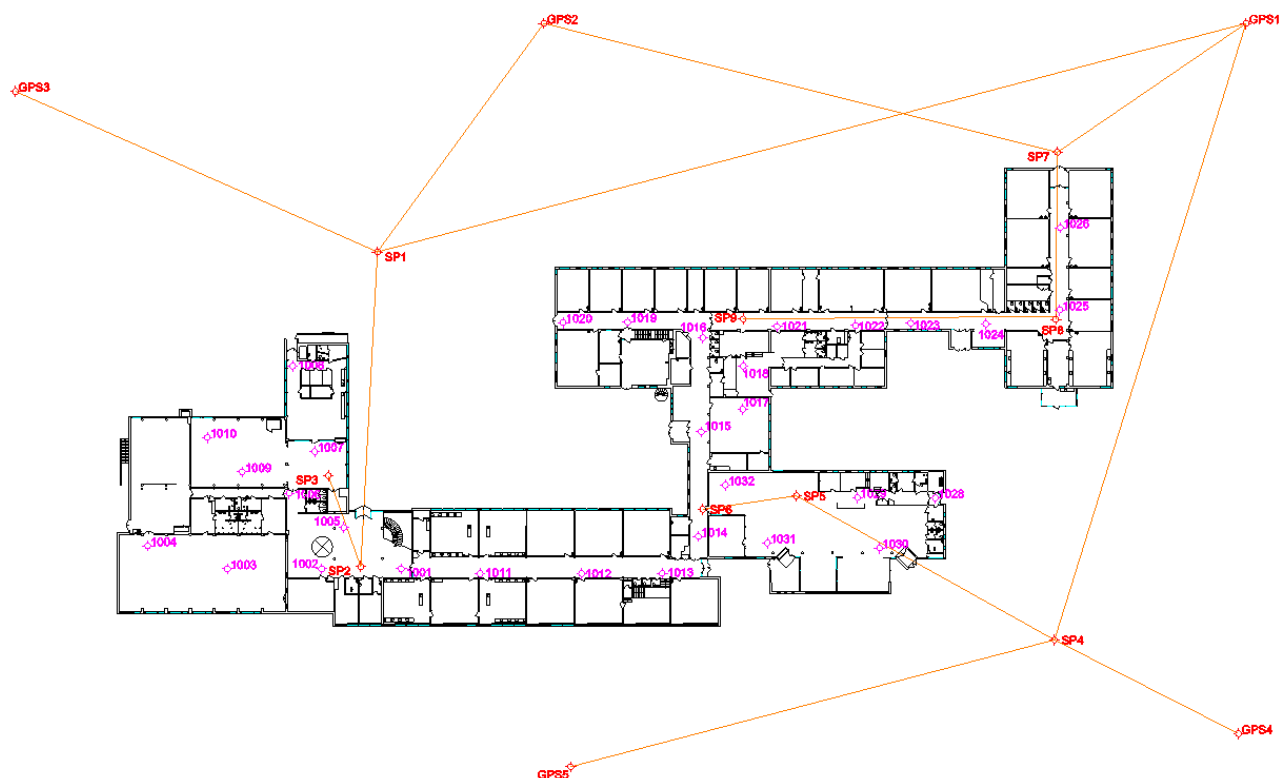
rajatud alusvõrku ning kiirendasid ja lihtsustasid hilisemates mõõdistusetappides instrumendi orienteerimist. Hoone sees kasutati mõõdistusvõrgu jaoks maalriteipi ja markerkleepse (Joonis 2), mis asetati seintele ja uste kohale. Käigupunkte mõõdeti elektrontahhümeetrit kasutades ühe täisvõttega ning laserskaneerimise jaoks paigaldatud tähised ja kontrollpunkte mõõdeti poolvõttega. Tähised, mis asusid kaugemal, näiteks nagu koridori lõpus, mõõdeti ühe täisvõttega. Sisemise mõõdistusvõrgu puhul kasutati põrandal olevate tähiste mõõtmiseks miniprismat.

Välismõõdistusvõrku seoti sisemise mõõdistusvõrguga läbi plaanilise-kõrgusliku teodoliitkäigu. Selleks orienteeriti elektrontahhümeetri ära väljas olevate lähtepunktidega (GPS1 – GPS2 – GPS3). Järgnevalt teostati lähteküljele toetuv rippuv teodoliitkäik (GPS1 – GPS3 – SP1 – SP2). Seisupunktist SP2 mõõdeti esimesel korrusel mõõdistusvõrgu punktid (P1, P2, P3, P4), mida sai kasutada ka edasiste teodoliitkäikude teostamisel (Joonis 14).



Joonis 14. Sidumiskäigu joonis A-hoone esimesel korrusel

Mõõdistusvõrgud loodi kõigile kolmele korrusele: esimene korrus, teine korrus ja kelder. A-hoone esimese korruse sisemine mõõdistusvõrk loodi kasutades kolme rippuvat teodoliitkäiku. Käigud olid vastavalt: rippuv käik üks (GPS1 - GPS3 - SP1 – SP2 – SP3), rippuv käik kaks (GPS1 – GPS4 – GPS5 – SP4 – SP5 – SP6) ja rippuv käik kolm (GPS1 – GPS2 – SP7 – SP8 -SP9) (Joonis 15).



Joonis 15. A-hoone esimese korruse mõõdistusvõrgu joonis, lilla värvitooniga on kujutatud tähised, punase värviga GNSS punktid (GPS) ja seisupunktid (SP) ning oranžide joontega käigu teekond

Alusvõrgu rajamist oleks saanud lahendada ka teistmoodi. Näiteks oleks saanud mööda pikka koridori seisupunktist SP2 seisupunkti SP7 luua kinnine käik. Ettemääratud ajagraafikus kinnipidamiseks otsustati siiski lahendada olukord vastavalt kolme rippuva käiguga. Mõõdistusvõrgu rajamise käigus mõõdeti igast seisupunktist kus võimalik mõõdistusvõrgu tihendamiseks punkte (P1, P2, P3, P4 jne) (Joonis 14), et oleks võimalik vajadusel lihtsasti käiku kontrollida ja/või orienteerida. Hoone kuju ja ruumijaotuse tõttu ei olnud võimalik kõiki laserskaneerimise tähiseid ühest seisupunktist mõõta, selleks teostati mitu rippuvat teodoliitkäiku nende mõõtmiseks (Tabel 2).

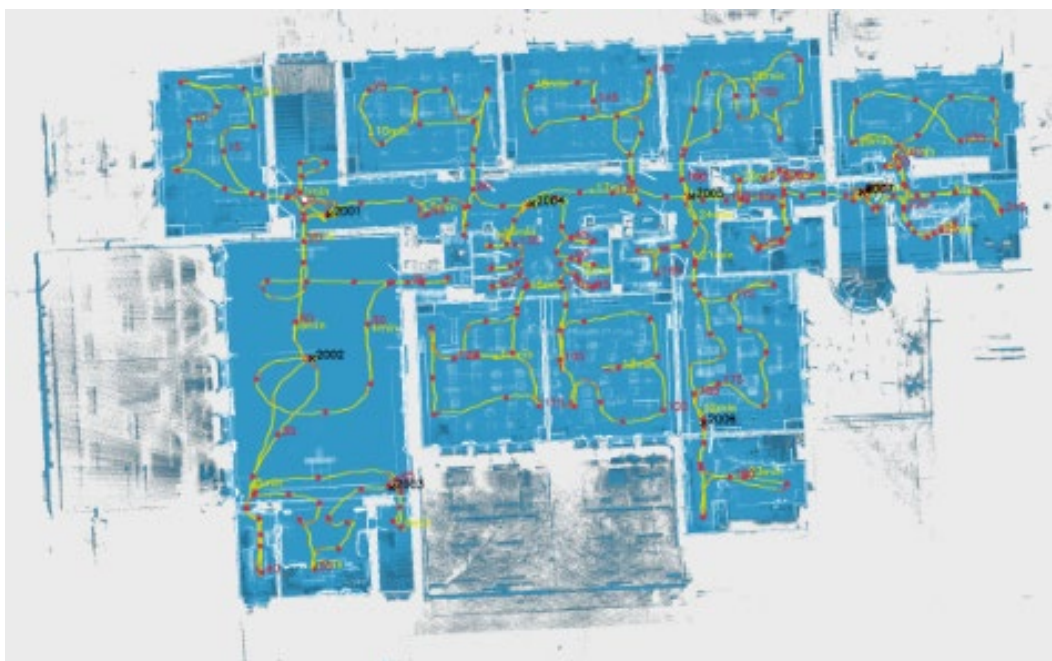
Tabel 2. A-hoone esimese korruse mõõdetud tähised

Seisupunkti nr	Mõõdetud tähise nr
SP2	1001, 1002, 1003, 1004, 1005, 1011, 1012, 1013
SP3	1006, 1007, 1008, 1009, 1010
SP5	1028, 1029, 1030, 1031, 1032
SP6	1014, 1015, 1016
SP8	1023, 1024, 1025, 1026
SP9	1017, 1018, 1019, 1020, 1021, 1022

2.5.2 Laserskaneerimis tööde protsess

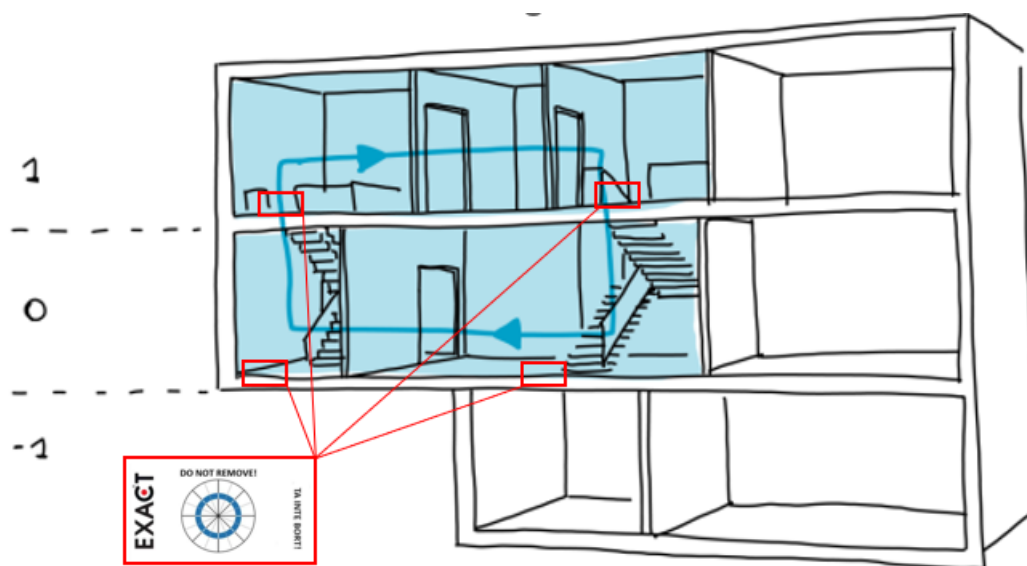
Möödistustööd teostati vastavalt Exact Geomark möötmise juhendile. [25] Koolimaja siseruumid skaneeriti nädalavahetusel ja vabadel päevadel kui õpilastel koolis tunde ei toimunud. Enne laserskaneerimise tööde algust teostati möödetava ala ülevaatus ja ettevalmistus. Ettevalmistuse käigus võrreldi olemasolevaid plaane reaalsuses oleva olukorraga, hinnati ruumidesse ligipääsetavust ning avati ja valmistati ette ruumid, millest oli plaanis skaneerimisega alustada. Ruumide ettevalmistamiseks eemaldati kardinaid akende eest, pandi valgustatavad tuled põlema kus vaja, avati ukse ja liigutati segavaid esemeid eemale olulistest detailidest, nagu näiteks ventilatsiooniavad. Lisaks paigutati laserskaneerimise jaoks sobivatesse asukohtadesse tähised, milleks olid markerklepsud (Joonis 2).

Siseruumide ettevalmistuse läbimisel käivitati mobiilne laserskanner NavVis VLX (Joonis 11) ning teostati instrumendi kiirendusmõõduri (*accelerometer*) kalibreerimine, mis võtab maksimaalselt aega üks minut. Peale instrumendi edukat kalibreerimist loodi möödistustöö ja asuti skaneerima. Skaneerimise käigus koostab laserskanner ümbruskonnast nn kvaliteet kaardi (*quality map*). Joonis 16 on kujutatud sinise tooniga skaneeritud ruumid. Kollased jooned iseloomustavad skaneerimise teekonda ja punased täpid joontel näitavad ära kus on tehtud laserskanneriga fotod. Lisaks on mustas toonis kujutatud tähiste asukohad koos tähist iseloomustavate numbritega.



Joonis 16. Laserskaneerimise ajal koostatud nn kvaliteet kaart

Skaneerimise ajal tehti ka panoraamfotosid, mis lisab punktipilvele värvitoonid ja võimaldab näha mõõdetud situatsiooni detailsemana. Panoraamfotode tegemise ajaks peab täielikult seisma jääma, et instrumendi kaamerad saaksid teha võimalikult detailse 360° foto. Panoraamfotosid on võimalik teha vastavalt vajadusele või automaatselt eelnevalt seadistatud ajalise intervalliga. Antud projekti puhul pildistati vastavalt situatsioonile, umbkaudu kahe meetriste intervallidega. Ühe foto tegemine võttis aega ca kaks sekundit. Tähtis oli silmas pidada, et kõik tähtsad elemendid (ukseavad, aknaavad, ventilatsiooniavad jt) oleksid skaneerimise ja pildistamise ajal nähtavad. Mõõdetud ala punktipilv ja koos fotodega kogutakse andmestikuna SSD kettale (*solid-state drives*). Selleks, et üks andmestik (kvaliteet kaart koos fotode ja informatsiooniga) liiga mahukaks ei muutuks skaneeriti ühte andmestiku maksimum 45 minutit, peale mida alustati pooleli jäänud asukohast uue andmestikuga. Takahuhdin A-hoone siseruumide mõõdistamist alustati esimeselt korruselt, mille järel mõõdeti keldri korrus ning viimasena hoone teine korrus. Korruste omavaheliseks sidumiseks mõõdeti eraldi andmestikuna trepid. Treppide skaneerimisel oli tähtis tekitada kinnine skaneerimis käik (*loop closure*). Selleks tuli skaneerida nii trepist üles minemist kui ka alla tulemist ning mõõta mõlemal korrusel trepi lähedal põrandal olevad tähised (Joonis 17).

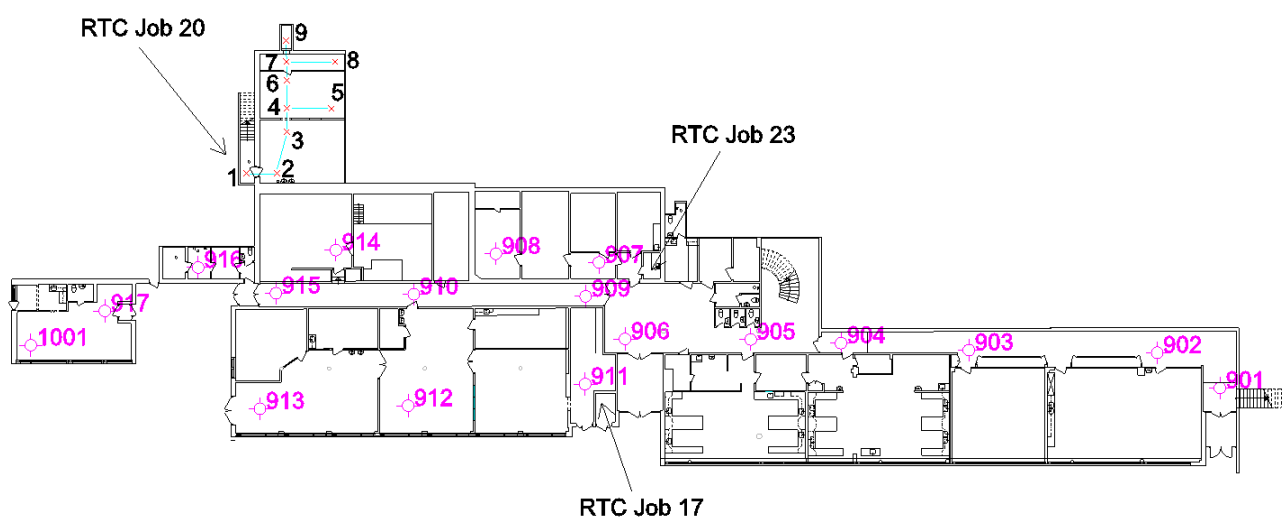


Joonis 17. Näide treppide skaneerimisest NavVis VLX ja soovituslik tähiste paigutamine [26]

Skaneeritud siseruumide koordineerimiseks kasutati eelnevalt paigutatud tähiseid. Mobiilse laserskaneerimise tähised (Joonis 2) paigutati siseruumides põrandatele umbkaudu 25 meetriste vahedega. NavVis VLX kasutades on võimalik mõõta tähist nii põrandalt kui ka seinalt. Seina tähiste puhul tuleb need asetada soovituslikult puusa või pea kõrgusele, puusa kõrgus umbes 90 cm põrandapinnast ja pea kõrgus umbkaudu 180 cm põrandapinnast. Antud mõõdistustööde käigus ei

tekkinud vajadust asetada tähiseid seintele. Samuti on võimalik mõõta ühte ja sama tähist mitu korda, et mõõdistatud alad oleksid omavahel paremini seotud.

Siseruumide skaneerimisel ainsaks probleemiks osutus üksikruumide ja tehniliste ruumide ligipääsetavus. Tavaliselt oli selle põhjuseks kas ust avava võtme puudus või kitsad ja täidetud ruumid, kuhu VLX laserskanneriga sisse ei mahtunud. Selliste olukordade puhul tehti märke abrissile ning mõõdistamine teostati hiljem terrestrialise laserskanneri RTC360 (Joonis 10). Skaneerimine teostati koos fotodega. Hilisema andmetöötluse lihtsustamiseks, kinniste üksikruumide märkimiseks ning objektile ja tähistel orienteerimiseks loodi mõõdistusalade kohta abriss (Joonis 18).

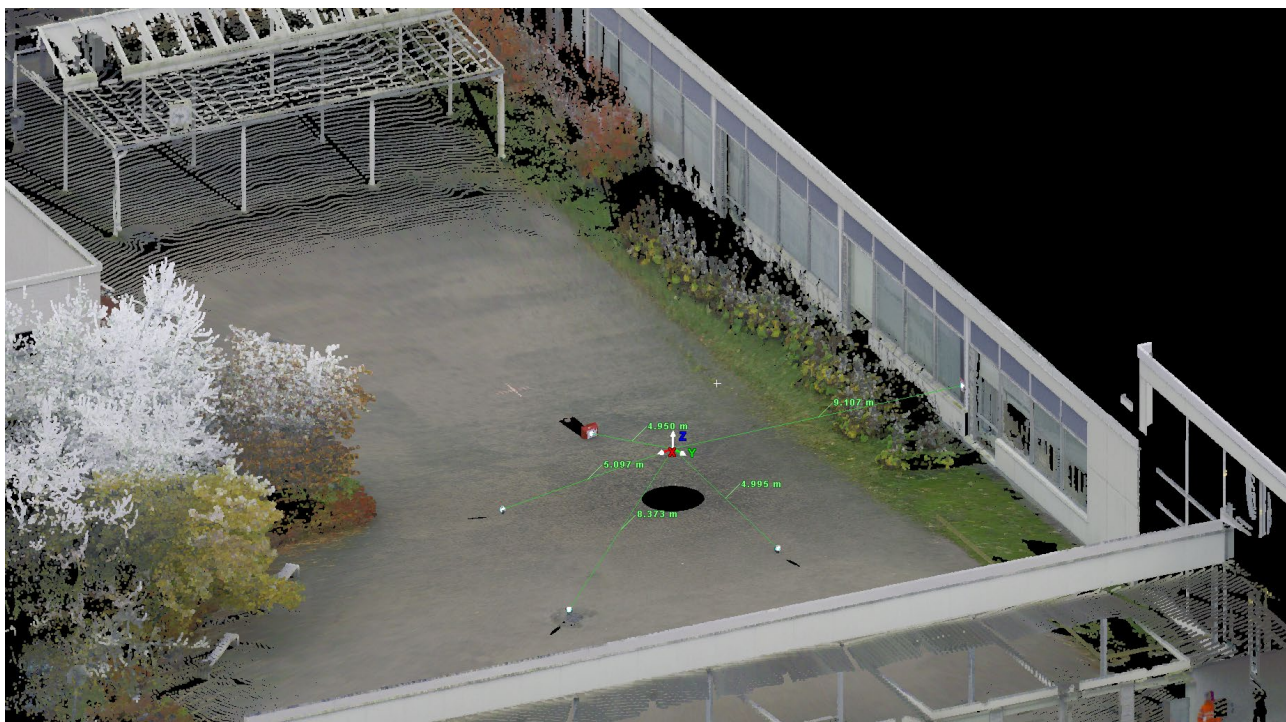


Joonis 18. A-hoone keldri abriss

Joonisel lilla värvitooniga on tähistatud mobiilse laserskaneerimise jaoks maha pandud tähised ligikaudse asukohaga. Lisaks on punase värviga tähistatud terrestrialise laserskanneri RTC360 jaamade ligikaudsed asukohad koos jaama numbritega ja sinise joonega on märgitud skaneerimisjaamade võimalikud seosed.

Hoone välist laserskaneerimist teostati terrestrialise laserskanneri RTC360 abil (Joonis 10). Enne skaneerima hakkamist seadistati skanneri parameetreid ja mõõterežiimi. Vastavad seadistused valiti situatsioonist ja vajaminevast punktitihedusest lähtuvalt. Valituks osutus nii tähistele kui ka situatsiooni mõõdistamisel skanneri keskmine mõõterežiim, mille eraldusvõimeks on kuus millimeetrit 10 meetri kohta, ning mille maksimum mõõtekaugus on 130 meetrit. Skaneerimine teostati koos fotodega. Ühe skaneerimise seisu tegemiseks kulus aega üks minut ja 50 sekundit. Vastavalt objekti lähteülesandele kontrolliti, et kõik tähtsad fassaadi elemendid oleksid nähtavad skaneerimise ajal. Fassaadi skaneerimine teostati päevasel ajal kui õpilastel olid koolimajas tunnid.

Fassaadi punktipilvede sidumiseks mõõdeti hoonevälise mõõdistusvõrgu rajamise ajal paigaldatud tähised. Kokku tehti fassaadi ümber viis tähiste gruppidega skaneerimise seisupunkti, millest igaüks sisaldas vähemalt nelja tähist. Tähisted seoti alusvõrguga elektrontahhümeetri abil ning kohe peale tähiste koordineerimist teostati ka tähiste skaneerimine, mis likvideeris tähiste mittepüsivusest tingitud vigade tekkimise. Tähisteks kasutati eelnevalt mainitud must-valgeid magnettähisteid ja pabertähisteid (Joonis 3). Tähisted paigutati laserskanneri ümber hajusalt ja erinevatele kaugustele (Joonis 19).

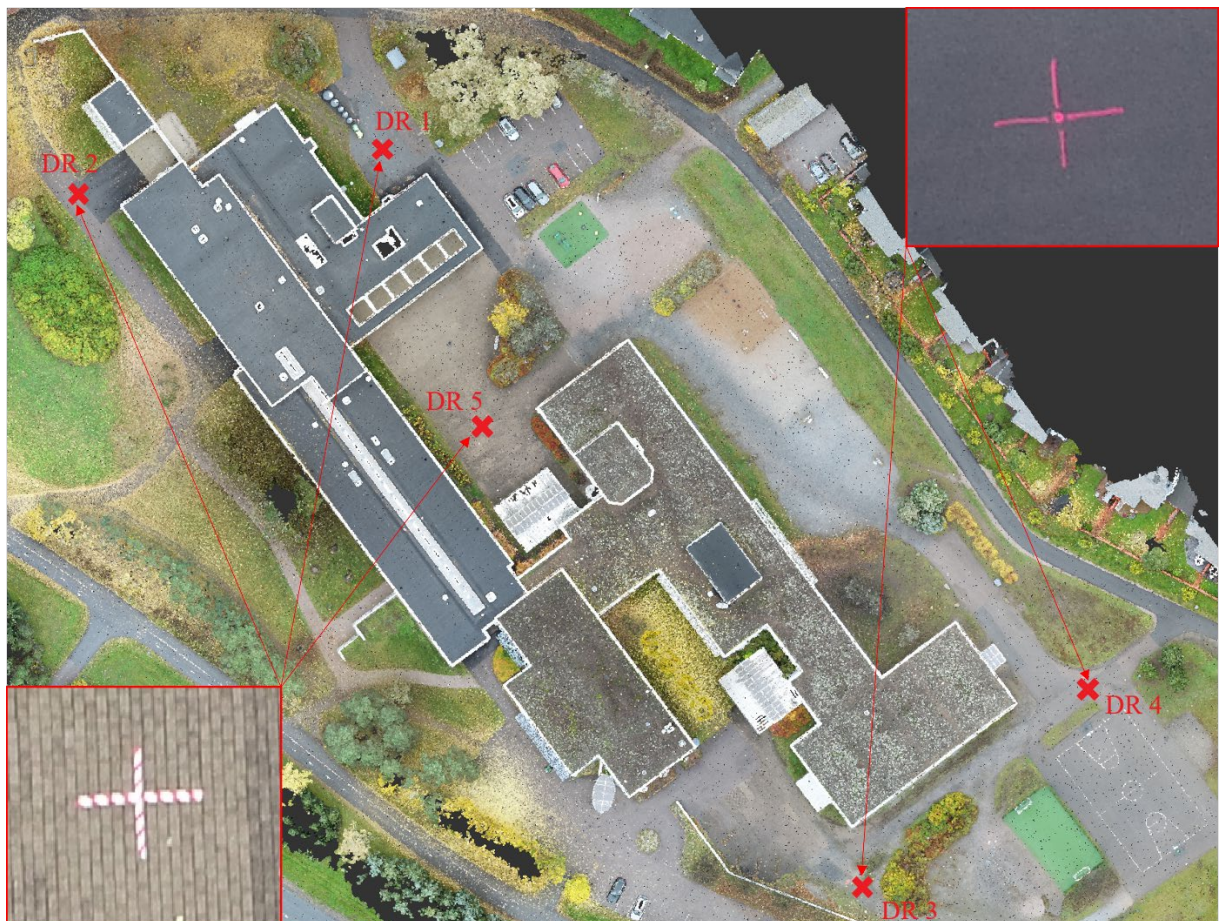


Joonis 19. Tähiste asetus skanneri suhtes, laserskannerit tähistab koordinaattelgede keskpunkt

2.5.3 Aeropildistamise teostamine

Aeropildistamine planeeriti kohapeal mõõdistustööde viimasetele päevadele kuna tööperioodi esimestel päevadel sadas vihma ja oli tugev tuul, mille tõttu ei olnud võimalik drooniga lennata. Mõõdistuspäeval oli taevast pilvine, mis hoidis ära päikesest tulenevad suuremad varjud ning ei tekkinud juhuslikke päike või fotosensorit pimestada. Lisaks oli sademeteta ja tuulevaikne ilm, tänu millele ei takistanud miski drooni lendamist ega pildistamist. Drooniga lendamiseks ei olnud vaja lennuluuba taodelda kuna Tampere linnas ja lähiümbruses on vastava kategooria kaugpiloodi loa omamisel võimalik lennata kuni 50 meetri kõrguselt.

Enne lendamise alustamist märgistati mõõdistava objekti ümber kontrollpunktid. Kontrollpunktide jaoks kasutati aerosoolvärvi ja värvilist teipi. Kasutati kahte erinevat kontrollpunktide märkimise viisi kuna kooli territooriumil ei olnud lubatud asfaldi peale aerosoolvärviga märkida. Kontrollpunktid DR3 ja DR4 märgiti aerosoolvärviga kuna tegemist oli kruusase pinnaga, selleks lükati üleliigne kruus maapinna pealt ära ja märgiti puhastatud pinnasele. Kontrollpunktid mõõdeti ja koordineeriti elektrontahhümeetriga (Joonis 20).



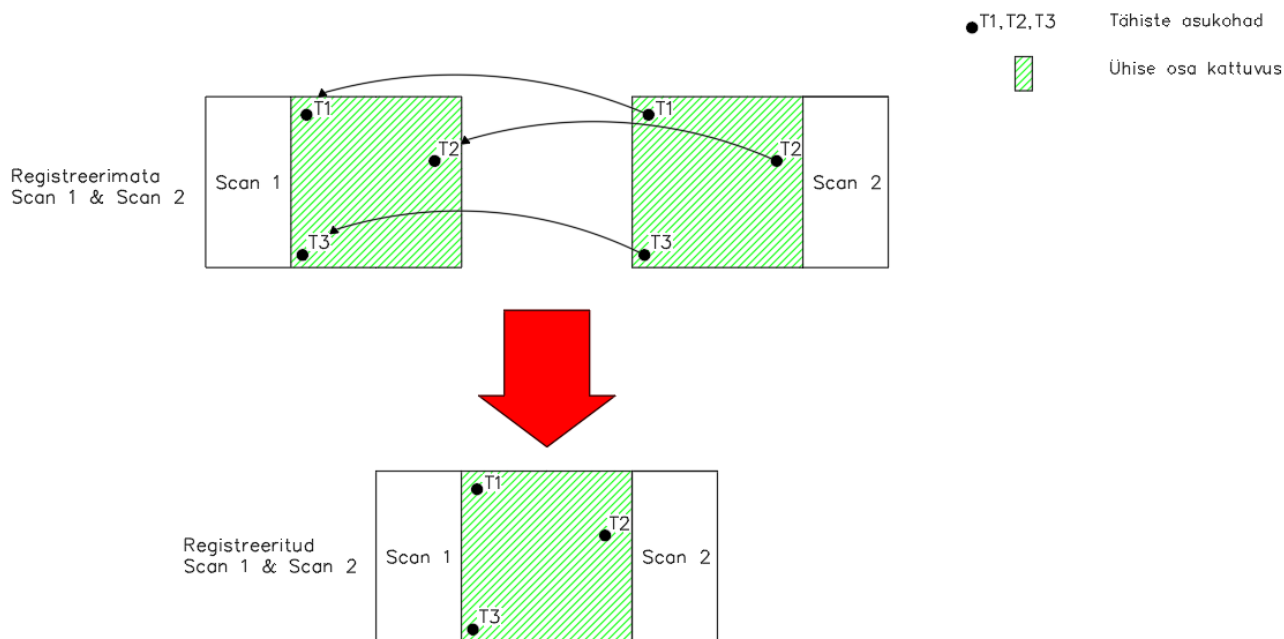
Joonis 20. Drooni kontrollpunktide asukohad, värvilise teibiga tähistatud DR1, DR2, DR5 ja aerosoolvärviga tähistatud DR3, DR4

Järgnevalt pandi kokku droon eesseisvaks aeropildistamiseks. Enne õige lennu algust teostati kontroll lend, millega kontrolliti sobilikku lennukõrgust ja vaadati, et lennutrajektoorile ei jääks ette takistusi. Ohutuks lendamiseks valiti lennukõrguseks 50 meetrit maapinnalt. Lennutrajektooriga kasutati ristuvate lennutrajektooriga meetodit mis tähendab, et kokku sooritati kaks 50 meetri kõrgust lendu. Lennutrajektooriga olid A-hoone pikima külje suhtes algul risti ning hiljem paralleelselt. Üks drooni lend võttis aega umbkaudu 30 minutit. Kokku võttis terve aeropildistamise protsess aega ligikaudu kaks tundi.

3 ANDMETÖÖTLUS JA TULEMUSED

Välitöödest saadud andmeid saab töödelda andmetöötlustarkvarades. Andmetöötlustarkvarasid on tänapäeval erinevaid, on olemas nii punktipilvede registreerimiseks ja töötlemiseks mõeldud tarkvarasid, joonestamise tarkvarasid kui ka modelleerimis tarkvarasid. Andmetöötlus on vajalik mõõdistusandmete: registreerimiseks, koordineerimiseks, tasandamiseks, hõrendamiseks, joonestamiseks, modelleerimiseks jne. [3]

Üks tähtsamaid andmetöötluste osasid kus kontrollitakse laserskaneerimisest tulenevate andmete õigsust ning luuakse alusfailid joonestamiseks ja/või modelleerimiseks on punktipilvede registreerimine ehk ühtsesse koordinaat- ja kõrgussüsteemi transformeerimine. Punktipilvede registreerimise käigus puhastakse toorandmeid ebavajalikust müra, seotakse andmed kokku ühiseks punktipilveks ja koordineeritakse vajadusel tähiste abil soovitudkoordinaat- ja kõrgussüsteemi. Punktipilvi on võimalik omavahel siduda läbi ühiste osade või tähiste abil (Joonis 21). [3]



Joonis 21. Tähiste abil punktipilve sidumine [3]

Joonis 21 on kujutatud kuidas registreerimise käigus on võimalik kahte erinevat punktipilve omavahel kokku siduda üheks ühtseks punktipilveks kasutades punktipilvedes olevaid tähisteid. Parema kvaliteediga punktipilve saamiseks tasub kasutada mõlemat viisi, algul punktipilvede ühiste osade omavahelist sidumist ja siis koordineerida ühine punktipilv ära ka tähistega.

3.1 Andmete edastamine

Suuremahulistel projektidel võib andmetöötlus võtta väga palju aega. Sellest tulenevalt on tähtis mõõdistustööde toorandmeid, nii laserskaneerimise kui ka elektrontahhümeetri andmed, võimalusel edastada kontoris, kus saadakse andmeid töödelda ja kontrollida. Antud projekti puhul edastati andmeid tööpäeva lõpus peale igat mõõdetud ala valmimist. Näiteks, kui ühe päevaga suudeti ära skaneerida fassaad ja fassaadi tähised, siis päeva lõpus edastati need juba Eestisse kontoris. Andmed laaditi algul instrumentidest alla kaasasolevasse sülearvutisse, kus komplekteeriti failid .zip kausta selleks, et suuremahuliste andmete edastamine toimuks võimalikult kiiresti. Andmed edastati projektijuhile läbi Dropboxi rakenduse, kust järgmise päeva hommikul saadi samused andmed tõsta juba kontoris olevasse serverisse ja võimalusel alustada andmetöötlusega. Mobiilse laserskanneri NavVis VLX andmete allalaadimise protsess käis samamoodi, kuid andmete edastamisel ei laaditud neid Dropbox rakendusse vaid laaditi kohe andmetöötlusprogrammi NavVis IVION, kus ligipääsuga tagatud isikud said samuseid andmeid kontrollida ja registreerida. Selline protsess võimaldas andmetöötlusega alustada võimalikult varakult ja kontrollida andmete sobilikust. Kokku oli andmetöötluse jaoks planeeritud seitse kalendripäeva.

3.2 Terrestrilise laserskaneerimise andmetöötlus

Terrestrilise laserskanneriga RTC360 mõõdetud fassaadid, üksikud ruumid ja tehnilised ruumid töödeldi andmetöötluse käigus Leica Cyclone programmis. Andmetöötluse käigus lähtuti Exact Geomark andmetöötluse juhendile. Alustuseks laaditi kõik toorandmed programmi, mille järel teostati punktipilve kokkupanek ehk registreerimine punktipilvede ühiste osade abil. Registreerimisel kasutati välitöö läbiviija poolt täidetud abrissi. Fassaadi mõõdistamise seisud, üksikruumide mõõdistamise seisud ja tehniliste ruumide mõõdistamise seisud seoti kokku üksteisest eraldi. Järgnevalt puhastati terviklikud punktipilved ebavajalikust müra ja lisati juurde tähistega tehtud skaneerimise seisupunktid. [27]

Tervikule fassaadi punktipilvele registreeriti külge tähistega seisupunktid ja lisati elektrontahhümeetri fail, tänu millele seati terve punktipilv riiklikku koordinaat- ja kõrgussüsteemi. Tähistega kaudu registreerimisel sai hinnata tähiste asukoha viga. Jälgiti, et kuvatavad vead ei ületaks 0,005 meetrit. Kui vead olid suuremad kui 0,005 meetrit kontrolliti vigaseid punktipilve sidemeid ja vajadusel lülitati vigane tähis või side välja, vastavalt Exact Geomark andmetöötluse juhendile (Joonis 22). [27]

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Overlap Points	Error
unlabeled	Job 017- Setu...	Job 018- Setu...	Coincident: Vertex - Vertex	Off	1.0000	n/a	0.008 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.004 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.003 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.003 m
unlabeled - 6	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.003 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.002 m
unlabeled - 2	Job 017- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.002 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.002 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.002 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.002 m
unlabeled	Job 017- Setu...	Job 018- Setu...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.002 m
Cloud/Mes...	Job 017- Setu...	Job 017- Setu...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	350480	0.002 m
unlabeled - 1	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	Off	1.0000	n/a	0.002 m
Cloud/Mes...	Job 018- Setu...	Job 017- Setu...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	383876	0.002 m
unlabeled - 1	Job 017- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.002 m
Cloud/Mes...	Job 017- Setu...	Job 017- Setu...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	232692	0.002 m
unlabeled - 4	Job 017- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.002 m
unlabeled	Job 017- Setu...	Job 018- Setu...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.002 m
Cloud/Mes...	Job 018- Setu...	Job 017- Setu...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	305514	0.002 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.001 m
Cloud/Mes...	Job 017- Setu...	Job 018- Setu...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	575330	0.001 m
unlabeled - 5	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	Off	1.0000	n/a	0.001 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.001 m
unlabeled	Job 017- Setu...	Job 018- Setu...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.001 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.001 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.001 m
Cloud/Mes...	Job 017- Setu...	Job 017- Setu...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	329380	0.001 m
unlabeled -...	Job 018- Setu...	B1 targets.txt (...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	n/a	0.001 m
Cloud/Mes...	Job 017- Setu...	Job 017- Setu...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	206278	0.001 m

Joonis 22. Fassadi punktipilve vigade kuvamine Leica Cyclone programmis

Joonisel on markeeritu punasega vigade tulp (*error*) koos vea suurustega. Kuna üks side ületas registreerimise käigus lubatava 0,005 meetrise piiri siis lülitati see välja. Väljalülitatud (*off*) sidet on võimalik näha väikses punase värviga märgitud kastis.

Enne lõpliku punktipilve eksportimist kontrolliti veelkord punktipilve sobilikust ning peale seda teostati punktipilve hõrendamine. Punktipilv hõrendati nii, et punktide tihedus pinnal jääks 15 millimeetri sisse, vastavalt Exact Geomark andmetöötuse juhendile. Töödeldud failid salvestati .e57 formaati ja transformeeriti hiljem Autodesk ReCap programmis .rcs faili formaati, et oleks võimalik erinevates programmides faile avada. [27]

Üksikute ruumide ja tehniliste ruumide jaoks eraldi tähiseid ei pandud. Antud ruumide seisupunktid seoti omavahel kokku, puhastati, hõrendati ning seoti terviklikud punktipilved ühiste osade järgi (ruumide nurgad, akende nurgad jms) "*cloud to cloud*" meetodil mobiilse laserskaneerimise punktipilve külge. Kuna mobiilse laserskaneerimise lõplik punktipilv oli õiges koordinaat- ja kõrgussüsteemis, siis lisa ruumidega kokku sidumisel pöörati ka need õigesse süsteemi. Lõplik punktipilv lisati NavVis IVION keskkonda ja eksporditi joonestamiseks jaoks .e57 ja .rcs failid.

3.3 Mobiilse laserskaneerimise andmetöötlus

Mobiilse laserskaneerimise puhul nagu eelnevalt juba mainitud laaditi välitöö toorandmed otse andmetöötlusprogrammi NavVis IVION. Andmetöötlus viidi läbi vastavalt NavVis enda poolt

tagatud dokumentatsiooni. Selleks loodi NavVis IVION keskkonnas uus projekt. Projektil määrati vastav koordinaat- ja kõrgussüsteem (EPSG:3878, ETRS89 / GK24FIN) ning lisati sobilikku asukohta projekti null, mille järgi arvutatakse punktide koordinaadid (Joonis 21). NavVis IVION keskkonnas peavad elektrontahhümeetriga mõõdetud tähiste andmed olema nullist sõltuvalt väikeste numbritega, et programm saaks neid kasutada. Tähiste fail valmistati ette Microsoft Exceli tabelis, kus mõõdetud koordinaatidelt lahutati maha nulli väärtused (Joonis 23). [26]

Edit your site's location ×

All data you will add to the site will have to be in close proximity to this location.

Address or coordinates

Map showing a red rectangle on a street map.

Lat & long (WGS 84) Spatial reference system

EPSG:3878, ETRS89 / GK24FIN ×

Base point

X / Easting (m) *	Y / Northing (m) *	Z / Height (m) *
24492000	6820000	0

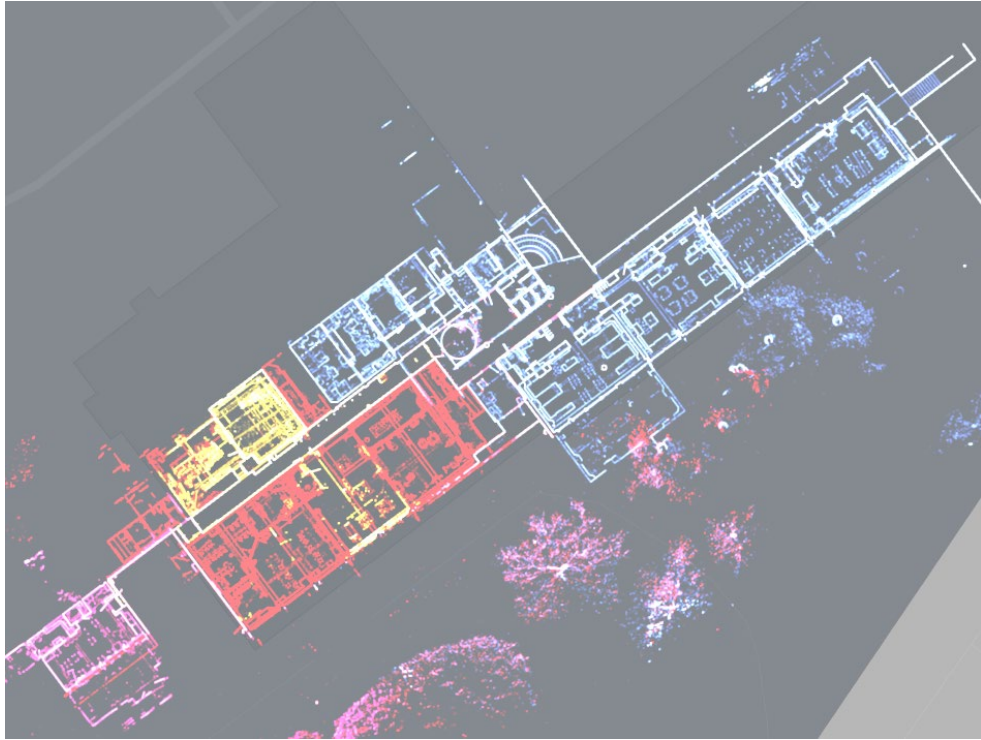
Rotation

Angle (°) *	rx *	ry *
0	1	0

Joonis 23. Projekti nulli loomine NavVis IVION keskkonnas

Joonisel on punasega märgitud Takahuhdin kooli A-hoone ja sinise ringiga määratud nullpunkt. Kõrval on kuvatud kasutatavad koordinaat- ja kõrgussüsteemi ning null punktile määratud X ja Y koordinaatide suurus.

Järgnevalt laaditi välitöö toorandmed NavVis IVION keskkonda ja viidi läbi lisatud andmete protsessimine. Peale protsessimise lõpetamist sorteeriti andmed ja lisati eelnevalt korrastatud tähiste fail. Kui failid olid sorteeritud ja tähised küljes teostati andmete järel töötus. Järel töötuse käigus teostati punktipilvede joondus ehk sidumine (*alignment*). Punktipilved seoti automaatselt tähiste abil (Joonis 20). Sidumisele järgnevalt kontrolliti punktipilvede sidemeid ja korrektsust ning vajadusel viidi sisse parandused. Peale kontrolli loodi nn objekti mudel (*site model*), kus määrati kokku pandud punktipilve piirid, puhastati ebavajalikust müra ja sorteeriti punktipilv korruste kaupa tükkideks (Joonis 24). Tulemusena saadakse joonestamise jaoks vajalikud failid .e57 ja .rcs faili formaadis. [26]

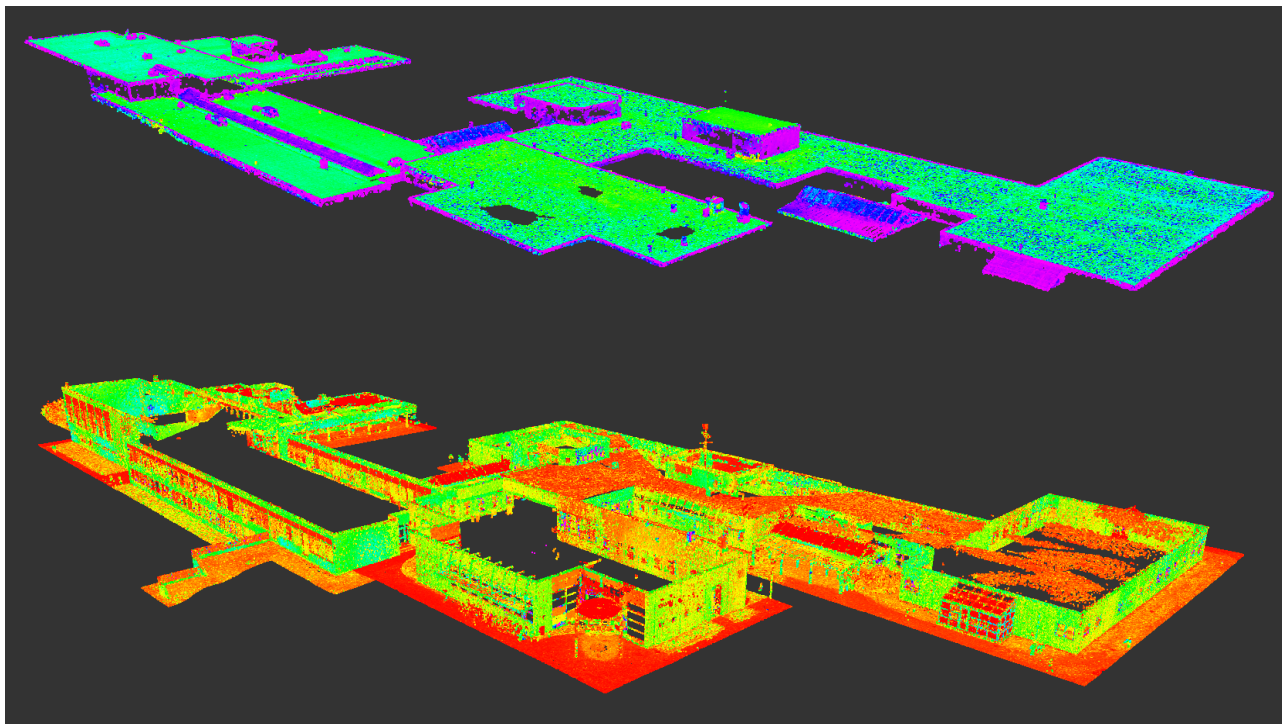


Joonis 24. A-hoone keldri korruse punktipilvede sidumine NavVis IVION keskkonnas

Joonisel on erinevates värvides välja toodud mõõdetud punktipilved, mis on omavahel kokku pandud. Kokku mõõdeti A-hoone keldri korruse kohta 6 erinevat punktipilve.

3.4 Fotogramm-meetria andmetöötlus

Fotogramm-meetrilise mõõdistuse andmetöötlus viidi läbi Agisoft Metashape programmis. Andmetöötlus teostati vastavalt EXACT Geomark Agisoft juhendile. [28] Saadud lendude fotodest valmistati objekti katusest terviklik punktipilv. Punktipilve transformeerimiseks riiklikku süsteemi lisati juurde elektrontahhümeetriga mõõdetud kontrollpunktid (Joonis 18). Saadud värviline punktipilv seoti kokku pindade kattuvuse meetodil maapealse mõõdistusega tehtud fassaadi punktipilvega, Leica Cyclone programmis (Joonis 25). Kahe punktipilve kokkupanemisel tekkis ülekatte aeropildistatud katuse punktipilve ja fassaadi punktipilve vahel. Teostati ülekatte visuaalne kontroll punktipilve ristlõigete abil. Katuse ja fassaadi punktipilve kokkupanekul loodi nõ lõplik fassaadi punktipilv. Peale kontrolli tehti veel viimane punktipilve puhastus, hõrendati ühine punktipilv ning eksporditi joonestamise jaoks .e57 ja .rcs faili formaadid.



Joonis 25. Kahest punktipilvest koosnev lõplik fassaadi punktipilv, ülemine aeromöödistusest saadud katuse punktipilv ja alumine maapealsest möödistamisest saadud fassaadi punktipilv

3.5 Andmetöötlemise tulemused

Andmetöötlemise väljundiks loodi lõpuks iga korruse kohta värviline punktipilv (Joonis 26).



Joonis 26. Kokku pandud punktipilved, üleval välise vaatega punktipilv ja all siseruumide punktipilv

Saadud punktipilvede abil saadi hakata joonestama 2D plaane. Plaanide jaoks tähtsad ruumigeomeetria ja hoone inventar (uksed, aknad, wc potid, kraanikausid jms) olid lõplikest punktipilvedest selgesti arusaadavad ja kättesaadavad. Plaanide joonestamiseks kasutati punktipilvedest tehtud lõikeid (Joonis 27).



Joonis 27. Näidis A-hoone esimese korruse kohta tehtud punktipilve lõige pealtvaates

3.6 Plaanide koostamine

2D plaanid koostati punktipilvede alusel AutoCad tarkvaras. Plaanide koostati vastavalt Exact Geomark 2D joonestamise juhendile. Joonestamiseks kasutati punktipilvedest tehtud lõikeid. Joonestamiseks tehti lõige punktipilve põrandapinnast 1,2 meetri kõrguselt, kust hakati joonestama vajalikke detaile. Juhul kui mingi tähtis element ei olnud sellelt kõrguselt nähtav siis võeti uus lõige kõrgemast või madalamast ruumi osast. Kõik elemendid pidid olema null kõrgusel ja elementide mõõtmed ümardati sentimeetrini. [29]

Hoone konstruktsioonid on peaaegu alati mõnevõrra kaldus, kõverad ja muud moodi geomeetriliselt ebatäpsed. Absoluutse täpsuse saavutamine ei ole antud juhul mõistlik ja asjakohane. Maksimaalsed vead punktipilve ja joonise vahel võisid olla järgnevad [29]:

- seina nurkade, sammaste ja talade maksimaalne erinevus ± 10 mm;
- pindadel erinevus (põrandad, laed, seinad) maksimaalne erinevus ± 25 mm;
- vanade ja/või korrastamata struktuuride korral (näiteks katusekonstruktsioonid) ± 50 mm.

Elementide nagu näiteks uste ja akende puhul kasutati ümardatud mõõte, nagu näiteks: 900, 950, 1000 jne. Juhul kui tegelik ukse- või aknaava asukoht ei vasta ümardatud suurusele siis muudeti ümardatud suurst 20 millimeetri võrra tegelikkuse poole. Uste puhul lisaks kui ukseava mõõte pole näha, näiteks õhukeste seinte puhul, siis joonistatakse uks vastavalt tema kitsamale osale. Ukse paksuseks sellisel juhul pannakse 50 millimeetrit. Treppide joonestamisel korruste plaanidel ja lõigete plaanidel joonistatakse vastavalt trepi välisserva profiilile. [29]

Plaanidel märgitakse kõrguspunktid, nagu näiteks: põrandakõrgus, laekõrgus, talakõrgus, aknalaua kõrgus ja akna ülemise osa kõrgus. Lisaks märgitakse igasse ruumi ruumipindala, ruumi number ja ruumi otstarbest tulenev ruuminimi. [29]

Kokku tehti Takahuhdin koolimaja A-hoone kohta 30 joonist, kuhu kuulusid korruseplaanid (Lisa 1), fassaadi vaated (Lisa 2) ja hoone lõike plaanid (Lisa 3). Lõplikud failid edastati tellijale *.dwg* ja *.pdf* failiformaadis eelnevalt määratud projekti lõplikul kuupäeval, ehk 16. detsembril.

KOKKUVÕTE

Käesolevas lõputöös on antud ülevaade Soomes Tampere linnas asuva Takahuhdin kooli inventariseerimisest, erinevate laserskaneerimise tehnoloogiate ja fotogramm-meetria abil.

Lõputöö esimeses osas käsitletakse hoonete inventariseerimise põhimõtteid. Tutvustatakse erinevaid GNSS, laserskaneerimis ja fotogramm-meetria mõõtmismeetodeid ning analüüsitakse nende täpsusnõudeid ja võimalikke vigade allikaid.

Töö teises peatükis käsitletakse projekti praktilise osa läbiviimist. Luuakse ülevaade objektist, projekti lähteülesandest ja tööde planeerimisest. Tuuakse välja kuidas toimus mõõdistusvõrgu rajamine, erinevad laserskaneerimis ja fotogramm-meetrilised mõõdistustööd ja mis instrumente kasutati tööde läbiviimiseks.

Lõputöö kolmandas ja viimases osas käsitletakse välitööde järgset andmetöötlust ja hinnatakse saadud tulemusi. Käsitletakse erinevates programmides punktipilvede kokku panemist, plaanide joonestamist, andmetöötlusest saadud väljundeid ja tulemusi.

Projekt kestis kokku kaks kuud, millest viis päeva oli planeeritud välitööle, nädal aega andmetöötlusele ja ülejäänud aeg joonestamisele. Ajakavas peeti kinni terve projekti vältel ning tulemused anti kliendile üle kokkulepitud kuupäevaks. Saadud tulemused vastasid kliendi soovitud nõuetele.

SUMMARY

The following thesis *Geodetic Inventory of the Building* objective is to provide an overview of building surveying using the mobile and terrestrial laser scanning methods plus the arial photogrammetric method. When a building needs reconstruction or just to renew the plans then detailed information about the building is needed. This information is usually provided by floor plans, various facade views and different cross-sections of the object. These plans can be created after a thorough survey and data processing. The object for the following thesis was Takahuhdin school building located in Tampere, Finland.

The thesis is divided into three parts, the first being a theoretical overview of building surveying, the second covering the fieldwork that was conducted and the third about data processing including results.

The first chapter explains the principles of building surveying and what are the possibilities to carry out such work. Followed by an overview of various GNSS, laser scanning and photogrammetry measurement methods including analysis of their accuracy requirements and possible sources of errors. Also, principles and accuracy requirements of creating a measuring network inside and outside of the building is presented.

The second chapter of the thesis is based on the practical part of the work. The practical part gives an overview of the object, explains given task, how the work was planned out and field work itself. Also, this chapter introduces different instruments that were used and the work process. RTC360 was used to measure facades, NavVis VLX was used to measure inside the building and DJI Phantom 4 Pro v2.0 was used to measure roofs. Measurements from inside of the building were registered with target based registration and the outside measurements were done by using both point cloud overlapping and target registration. GNSS measurement method was used to establish the measuring network alongside with a total station. Total station was also used get the measured point coordinates into Finland's nation coordinate and height system.

The third and final part of the thesis covers data processing after the field work and evaluates the obtained results. A description of assembling point clouds, drawing 2D plans, final outputs and results with different programs are provided.

In conclusion, this thesis gives an overview on how different measuring methods can be used for building surveying and the process followed to make floor plans, facade views and cross-sections from point clouds.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Sirkel&Mall Geodeesia, „Sirkel&Mall,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://smageodeesia.ee/hoonete-inventariseerimine-ehk-moodistamine/>. [Kasutatud 20 märts 2023].
- [2] I. Odras, „Tartu, Puistee tn 80 hoone inventariseerimine, tehnilise seisukorra hinnang ja hoone konstruktsioonide rekonstrueerimisprojekt,“ Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2022, p. 108.
- [3] A. Surva, „ERR-i vana raadiomaja laserskaneerimine,“ Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2015, p. 56.
- [4] N. Upadhyay, „Basics of Photogrammetry,“ GIS Resources, [Võrgumaterjal]. Available: https://gisresources.com/basic-of-photogrammetry_2/. [Kasutatud 22 märts 2023].
- [5] European Union Agency for the Space Programme, „EUSPA,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-gnss>. [Kasutatud 20 märts 2023].
- [6] A. Rüdja ja J. Sander, „Globaalne asukohamääramine,“ Tallinn, 2013, p. 285.
- [7] Eesti Entsüklopeedia, „Eesti Entsüklopeedia,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://entsyklopeedia.ee/artikkel/geodeetiline_alus2. [Kasutatud 22 märts 2023].
- [8] R. Ranne, Geodeesia alused, Loengukonspekt, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2022.
- [9] Riigi Teataja, „Ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise kord,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/12861144>. [Kasutatud 25 märts 2023].
- [10] S. Mäeots, „Solna Centrum-i inventariseerimine 3D laserskaneerimise tehnoloogia abil,“ Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2018, p. 50.
- [11] K. Julge, „Laserskaneerimine ehitiste ja looduslike pinnavormide mõõdistamisel ning tulemuste modelleerimine,“ Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2018, p. 146.
- [12] T. Mill, Ehitiste mõõdistamine I, Loengukonspekt, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2023.
- [13] Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF, „Guidelines on Laser Scanning in plant design,“ Magdeburg, Michael Schenk, 2015.
- [14] Y. Reshetyuk, „Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners,“ Stockholm, 2006, p. 152.
- [15] N. Liba, Fotogramm-meetria, Loengukonspekt, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2023.

- [16] J. Resev, „UAV fotogramm-meetria kasutamine hoone välisgeomeetria ja deformatsioonide mõõdistamisel Tallinna Lennusadama näitel,“ Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2019, p. 99.
- [17] Google LLC, „Google Earth,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://earth.google.com/web>. [Kasutatud 14 märts 2023].
- [18] Geosystems Eesti OÜ, „Leica Geosystems,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://leicaestonia.ee/tooted/rtc360/>. [Kasutatud 4 aprill 2023].
- [19] NavVis, „NavVis,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://docs.navvis.com/mapping/v2.16/en/html/overview_vlx.html. [Kasutatud 4 aprill 2023].
- [20] A. Nüchter, K. Lingemann ja J. Hertzberg, „6D SLAM - 3D mapping outdoor environments,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/46194840_6D_SLAM_-_3D_mapping_outdoor_environments. [Kasutatud 11 aprill 2023].
- [21] NavVis, „The most accurate wearable mobile mapping device on the market,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.navvis.com/ppc-campaign/features>. [Kasutatud 4 aprill 2023].
- [22] NavVis, „NavVis VLX 2nd generation mobile mapping system,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.navvis.com/resources/specifications/navvis-vlx>. [Kasutatud 4 aprill 2023].
- [23] Xpert Survey Equipment, „Xpert Survey Equipment,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://totalstations.co/leica-viva-ts15-imaging-total-station/>. [Kasutatud 8 aprill 2023].
- [24] Droon.ee, „Droon.ee,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://droon.ee/toode/phantom-4-pro-2/>. [Kasutatud 8 aprill 2023].
- [25] EXACT Geomark, Mõõtmise juhend v2, Tallinn, 2020, p. 11.
- [26] NavVis, „Welcome to NavVis Support,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://support.navvis.com/>. [Kasutatud 10 aprill 2023].
- [27] EXACT Geomark, Andmetöötamise juhend v1.2, Tallinn, 2016, p. 2.
- [28] EXACT Geomark, Agisoft manual, Tallinn, 2020, p. 10.
- [29] EXACT Geomark, 2D drafting specification, Tallinn, 2016, p. 9.

LISAD

Lisa 1. Joonestatud korruse plaan

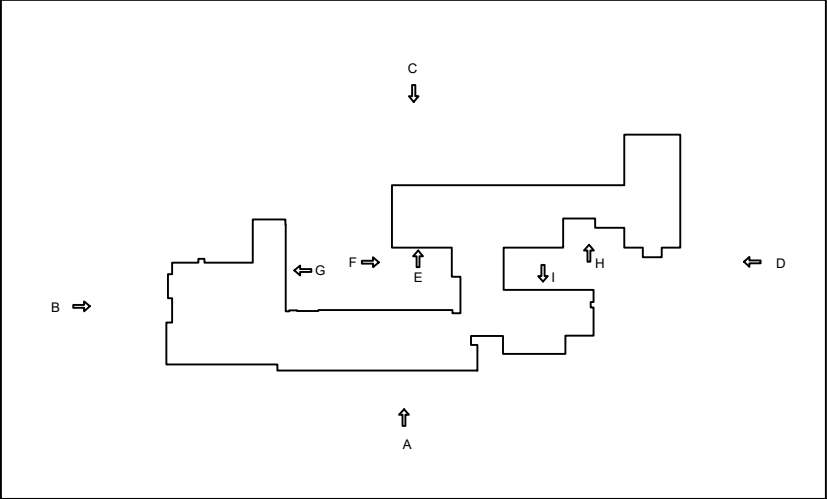
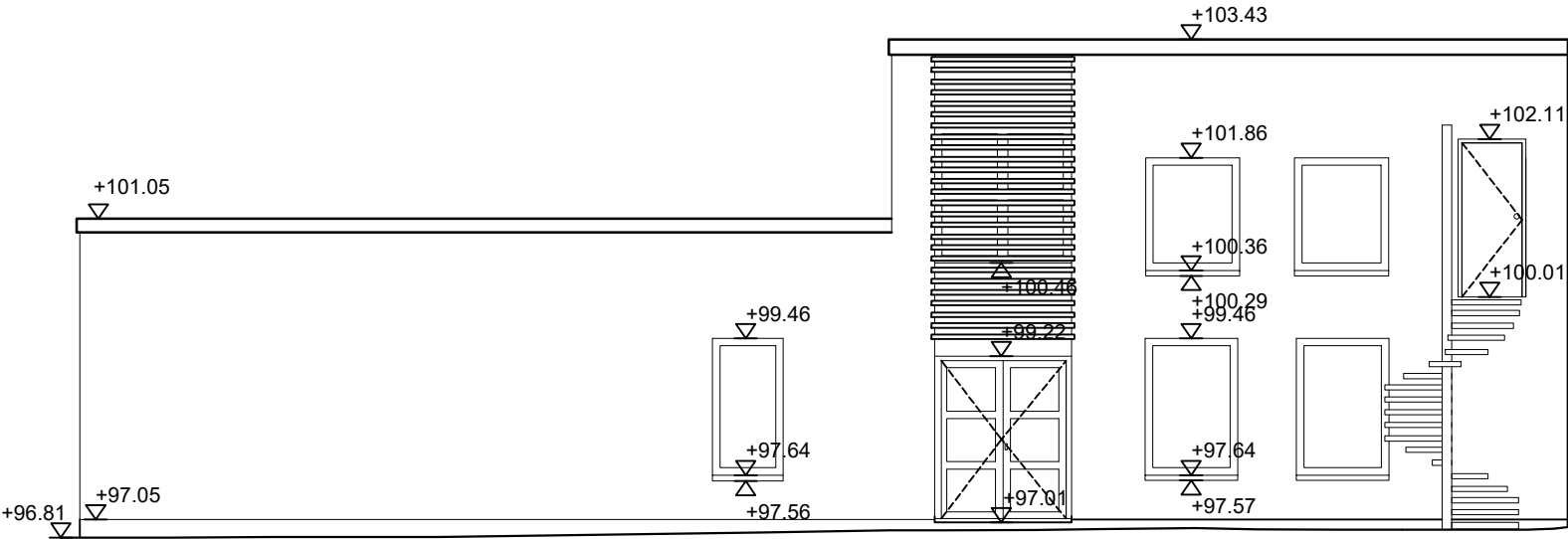
Lisa 2. Joonestatud fassaadi vaade

Lisa 3. Joonestatud hoone lõige

Lisa 1. Joonestatud korruse plaan

Lisa 2. Joonestatud fassaadi vaade

Julkisivu E

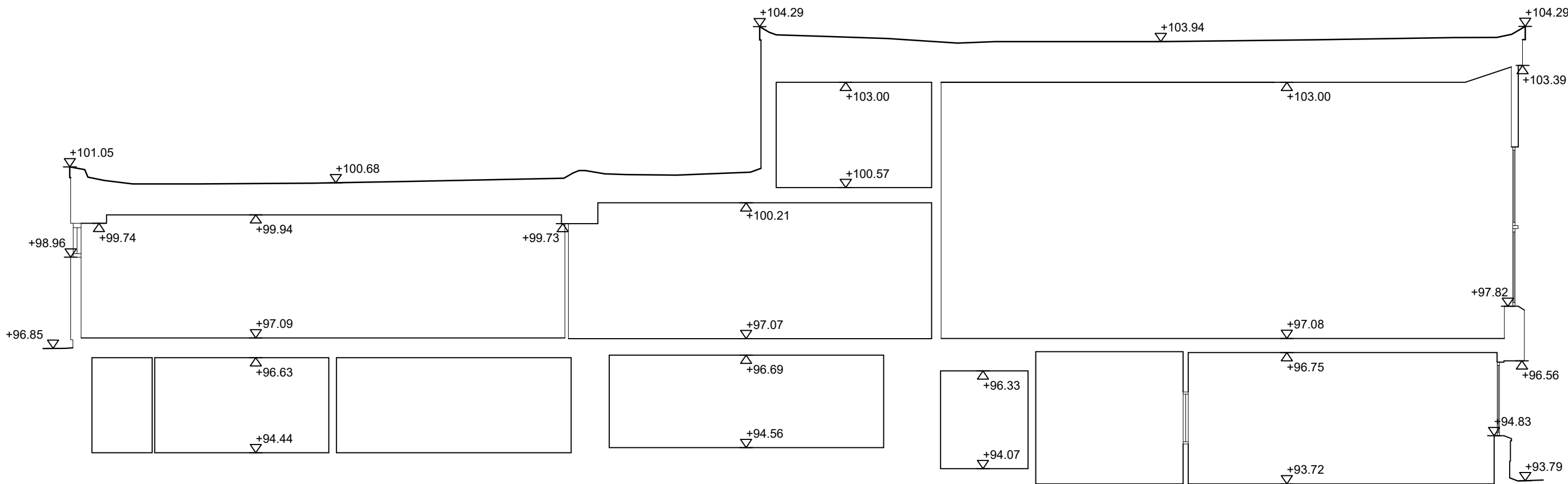


 TALLINNA TEHNIKAKÕRGGKOL		Hoone geodeetiline inventariseerimine		
Koostas: Martin Nõgu		Joonise nimetus Joonestatud fassaadi vaade		
Juhendas: Tarvo Mäli				
Juhendas:		Joonise nr 2	Töö nr	Õpperühm: KRG2019
TALLINN 26.04.2023		Skala 1:100	Leht: 2	Leht: 3

 Passion for precision			KIRJ No.		MUUTOS		TEKNY	PVM
JUSSILANSUJ 7 04360 TUUSULA, FINLAND www.teamexact.com TEL: +358-10-6170 300 FAX: +358-10-6170 319			Koulurakennus A ja Messukylän kirjasto Hanhenmäenkatu2, 33560 Tampere Julkisivu E					
			MITTAK 1:100					
			MITANNUT		PIIRI	TARK SL		
PVM	KOORDIN.		KORKEUS.		TYÖNRO		PIIR NRO	REV
16.12.2022	Erillis		N2000		P2022045			

Lisa 3. Joonestatud hoone lõige

Leikkaus 1-1



Hoone geodeetiline inventariseerimine



JUSSLANSUU 7
04380 TUUSULA, FINLAND
www.teamexact.com

TEL: +358-10-6170 300
FAX: +358-10-6170 319

Koulurakennus A ja
Messukylän kirjasto
Hanhenmäenkatu2, 33560 Tampere
Leikkaus 1-1

MITTAK 1:100

Koostas: Martin Nõgu

Joonise nimetus Joonestatud hoone lõige

Juhendas: Tarvo Mill

Joonise nr 3

Tõõ nr

Õpperühm: KRG2019

TALLINN 26.04.2023

Skala 1:100

Lehti: 3

Lehti: 3

MITANNUT

PIIRT

TARK

PVM

KOORDINAT

KORKEUS

16.12.2022

Erillis

N2000

TYONRO

P2022045

PIIR NRO

REV