



Aivar Surva

ERR-I VANA RAADIOMAJA LASERSKANEERIMINE

LÕPUTÖÖ

Ehitusteaduskond
Rakendusgeodeesia eriala

Tallinn 2015

Mina, Aivar Surva, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teoste on viidatud õiguspäraselt.

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

Lõputöö autor: A.Surva

(allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood 110820565

Õpperühm GI-81

Lõputöö vastab sellele püstitatud kehtivatele nõuetele ja tingimustele.

Juhendaja: T. Mill

(Allkiri ja allkirjastamise kuupäev)

Kaitsmisele lubatud "....."..... 2015a

Ehitusteaduskonna dekaan Martti Kiisa

(Allkiri)

Ehitusteaduskond

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja: Aivar Surva

Üliõpilase kood: 110820565

Õpperühm: GI 81

Eriala: Rakendusgeodeesia (kood: 1824)

Lõputöö teema: ERR-i Vana Raadiomaja Laserskaneerimine

Lähteandmed töö koostamiseks:

Töö lähteülesanne

Töö koosseis, lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kirjeldada hoonete mõõdistamist ning erinevaid hoonete mõõdistamismeetodeid.
2. Anda ülevaade 3D skanneritest, nende mõõtmistäpsusest ning veallikatest.
3. Kirjeldada antud hoone näitel laserskaneerimisprotsessi ning sellele järgnenud andmetöötlust.

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:

Seletuskiri peab kajastama lahendamisele kuuluvaid küsimusi, maht ca 40 lk. Töö graafilise materjali moodustavad: joonised, fotod, lõiked, vaated, plaanid.

Lõputöö konsultandid:

Konsultandi nimi	Valdkond	Allkiri	Kuupäev

Lõputöö juhendaja:

T. Mill
(nimi)

(allkiri)

(kuupäev)

Lõpetaja:

A. Surva
(nimi)

(allkiri)

(kuupäev)

Kinnitaja:

Martti Kiisa
Ehitusteaduskonna dekaan

(allkiri)

(kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud:

Lõputöö esitamise tähtaeg:

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1. HOONETE MÕÕDISTAMINE.....	8
1.1. Mõõdistustehnoloogiad	8
2. MÕÕDISTUSKÄIGUD.....	11
2.1. Hooneväline mõõdistuskäik	12
2.2. Hoonesisene mõõdistuskäik	13
2.3. Mõõdistuskäikude tasandamine.....	14
2.3.1. Plaanilise ja kõrgusliku mõõdistusvõrgu täpsusnõuded.....	16
3. 3D SKANNERID.....	18
3.1. Valguskiirgusskannerid	18
3.1.1. Valguskiirgusskanneri ülesehitus.....	18
3.2. Faasinihke skanner	20
3.3. Laserimpulss-skanner	21
3.4. Laserskannerite tähised.....	22
3.5. Laserskaneerimise täpsus ja veaallikad	23
3.5.1. Instrumendist tulenevad vead ja täpsus.....	23
3.5.2. Keskkonnast tulenevad vead	24
3.5.3. Mõõdetavast pinnast tulenevad vead.....	24
3.5.4. Andmetöötlusega seotud vead.....	24
3.5.5. Laserkiirest tingitud vead	25
4. ANDMETÖÖTLUS	27
4.1. Punktipilvede registreerimine.....	27
4.1.1. Tähiste abil registreerimine	27
4.1.2. Registreerimine ühiste osade järgi	28
5. VANA RAADIOMAJA MÕÕDISTAMINE.....	29
5.1. Objekti asukoht ja kirjeldus	30
5.2. Mõõdistustöödel kasutatud instrumendid.....	30

5.2.1. Faro Focus 3D S 120	30
5.2.2. Topcon GPT-9003A	31
5.3. Ettevalmistus	32
5.4. Hoone sidumine riikliku koordinaatsüsteemiga	33
5.5. Objektil laserskanneriga mõõdistamine.....	35
5.5.1. Hoone väljast mõõdistamine	35
5.5.2. Siseruumide mõõdistamine	36
5.5.3. Katuse ja pööningu mõõdistus	38
6. PUNKTIPILVE TÖÖTLUS.....	39
6.1. Tööde järjekord.....	39
6.2. Punkt pilvede registreerimine.....	39
6.3. Punkt pilve puhastamine, hõrendamine.....	41
6.4. Plaanide, lõigete, vaadete koostamine.....	42
7. TEOSTATUD TÖÖDE ANALÜÜS.....	43
KOKKUVÕTE.....	45
SUMMARY	46
VIIDATUD ALLIKAD.....	47
LISAD	49
Lisa 1. III korruse plaan.....	50
Lisa 2. Keldri plaan	51
Lisa 3. Pööningu plaan	52
Lisa 4. Fassaad, vaade lõunast	53
Lisa 5. Fassaad, vaade põhjast	54
Lisa 6. Lõige 2-2	55
Lisa 7. Lõige 3-3	56

SISSEJUHATUS

Hoonete ehitus, renoveerimine ning ümberprojekteerimine nõuab hoone kohta teatud infot. Selle info kuvamiseks on erinevaid meetodeid, nendeks võivad olla plaanid, vaated, lõiked, punktipilved, 3D mudelid jms. Nende kõigi koostamiseks on vajalik koguda objektist väliandmeid, teisisõnu ruumiandmeid, ning lähtuvalt tööde sisust ja nõutavast täpsusest on võimalik kasutada andmete kogumiseks erinevaid instrumente.

Üheks võimalikuks meetodiks hoonete mõõdistamiseks, väliandmete kogumiseks, on maapealne (terrestriline) laserskaneerimine. Laserskaneerimine on leidnud viimastel aastatel järjest rohkem kasutust ning muutunud populaarsemaks, tänu laserskannerite tehniliste omaduste pidevale arengule. Viimane on kaasa toonud vajaduse saada mõõdetavast objektist detailsemat kujutist ajaliselt kiiremini kui muude meetoditega mõõdistades. Et laserskaneerimine on kiirelt arenev tehnoloogia, on olemas erinevaid laserskannerite tüüpe ning tootjaid, sama kehtib punktipilve andmetöötlusprogrammide kohta.

Käesolev töö käsitleb hoonete mõõdistamist laserskaneerimismeetodil.

Töö sisu on jaotatud teoreetiliseks ja praktiliseks osaks. Teoreetilises osas on seletatud hoonete mõõdistamist üldisemalt, kirjeldatud erinevate mõõdistusinstrumentide kasutusvõimalusi ning võrdlust laserskaneerimisega. Samuti on selgitatud hoonesiseseid ja hooneväliseid mõõdistuskäike, nende rajamist ja tasandusmeetodeid. Teooria peatüki põhiosa moodustab laserskannerite iseloomustus, kus kirjeldatakse kahte peamist valguskiirgusskanneri tüüpi - faasinihke- ning laserimpulss-skannerit - nende ülesehitust ning mõõtmistäpsusega seonduvaid asjaolusid ja mõõdistamisel tekkivaid veaallikaid.

Töö praktiline pool hõlmab laserskaneerimist, kus mõõdistusobjektiks on Kreuzwaldi tn 14 asuv hoone, nn. vana raadiomaja. Välitööde kirjeldamine sisaldab tööde ettevalmistust, hoone sidumist riikliku koordinaatsüsteemiga, mõõdistusel kasutatud instrumente, välis- ja siseruumide laserskaneerimist ning tähistega kasutamise seonduvat.

Lisaks on kirjeldatud mõõtmistöödele järgnevat andmetöötlust, kus keskendutakse punktipilvede registreerimisele, puhastamisele ning plaanide, lõigete ja vaadete koostamisele. Lõpetuseks on teostatud mõõdistustööde üldisem analüüs, kus on esitatud autoripoolne empiiriline hinnang laserskaneerimise tehnoloogiale hoonete mõõdistamisel. Samuti on välja toodud traditsioonilise tahhümeetrilise mõõdistuse ja laserskaneerimise võrdlus, tuginedes eelnevalt TKTK-s tahhümeetrilist mõõdistust käsitlevale lõputööle.

1. HOONETE MÕÕDISTAMINE

Hoonete mõõdistamist tehakse eelkõige vanematele ehitistele, mille kohta ei eksisteeri õigeid, reaalsusele vastavaid plaane, lõikeid, vaateid või kui olemasolev teave ehitise välis- ning siseruumide kohta on puudulik. Milliseid andmeid teatud ehitise kohta vaja on, selgitab tavaliselt tellija. Kuna hoonete mõõdistamine kuulub ehitusgeodeetilise uurimistööde hulka, siis MKM-i (Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium) Ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise korrast kehtivad hoonete mõõdistusele mõõdistusvõrgu ning situatsiooni mõõdistamise täpsusnõuded, samuti dokumenteerimise ja vormistamise kohta on ette antud sätted, mida tuleb järgida [1].

Andmete saamiseks teostatakse erinevaid mõõdistustöid, milleks võivad olla fassaadi mõõdistamine, hoone gabariitide määramine, 3D mudeldamine, plaanide koostamine vms. ning sellest ka sõltub, millist mõõtmismeetodit ning instrumente kasutada.

Saadud mõõdistustulemusi kasutatakse [2, p. 3]:

- ehitusprojekteerimiseks;
- kasutusloa saamiseks;
- hoone sisekujunduseks;
- kinnistu haldamiseks;
- arhitektuuriliseks projekteerimiseks;
- mitmesuguste hoonega seotud otsuste aluseks;
- vananenud või olukorrale mittevastavate plaanide uuendamiseks;
- kütte ja ventilatsiooni projekteerimiseks.

1.1. Mõõdistustehnoloogiad

Hoone ruumide põhimõõtmete, laiuste ja pikkuste saamiseks võib kasutada ruletti või valguskaugusmõõturit [2, p. 4]. Rulette on mugav kasutada hoone gabariitide mõõdistuseks ning sobivad nii 5 m, 10 m kui ka 20 m ruletid [3, p. 146].

Juhul kui hoone ruumide põhiplaanid koostatakse pikkuste mõõtmise kaudu, iga korrus eraldi, siis see on teostatav, kuid korruste omavaheline sidumine ei ole sel puhul võimalik. Samuti eri korrustel olevate konstruktsioonide omavaheline asend ei ole siis määratud. Mõõtmistulemusi võib kanda olemasolevatele ehitise joonistele. Kui vahepeal on ehitises tehtud mõningaid ümberehitisi, siis tuleb need muudatused kanda plaanile. [2, p. 3]

Et saada mõõdistusel korruste omavaheline siduvus ja konstruktsiooni elementide omavaheline asend, siis mõõdetakse iga korrus ühtses koordinaatide süsteemis. Sellist mõõdistamist saab teha kas ristjoonte meetodil või polaarkoordinaatides. Mõõdistamistulemused esitatakse koordinaatidena ja on võimalik iga korruse plaan arvutis välja joonistada. [2]

Mõõdistamine võib olla tehtud kas plaaniliste koordinaatide süsteemis ning kõrgus eraldi või otse kolmemõõtmelises süsteemis. Esimese mõõdistamissüsteemi juures tehakse algul mõõtmised korruse põhiplaani koostamiseks ja korruseid mõõdetakse eraldi nivelleerimisega. Kolmemõõtmelise süsteemi puhul mõõdistatakse seinte kõik kolm koordinaati korraga, sellist mõõtmist võimaldavad elektrontahhümeeter ja laserskanner. Andmete arvutisse tõstmisel võib hiljem neile lisada veel mitmesuguseid andmeid ehitise materjali, seisukorra, viimistluse jne. kohta. [2]

Fassaadide ja aknaavade mõõtmeid saab määrata lindi ja ripplae abil, kuid meetodi miinuseks on ajakulu ja riskantne töö. Üheks variandiks on teha mõõtmisi fotogramm-meetria abil, kus ühele statiivile, spetsiaalse alusega, asetatakse digikaamera ja laserkaugusmõõtja. Samale alusele asetamise mõte tuleb sellest, et saada teada kaugus mõõdetavast objektist kaamera optilise tsentrini. Kaugus objektiivini leitakse triangulatsiooni printsiibil. Sellele järgnevalt on võimalik välja arvutada pildi mõõtkava ning pikslite omavaheline kaugus. Selle süsteemi täpsuseks loetakse 10m kauguse peale alla 11 mm ning üle 10 m kaugusel alla 55 mm viga. [4]

Võimalik on kasutada fotogramm-meetrilist süsteemi ka ilma laserkaugusmõõtjata, kus statiivile paigutatakse ainult fotokaamera. Tarkvara vastava süsteemi kasutamiseks on pidevalt arenev ning pakub seega alternatiivi teistele mõõtmismeetoditele. Üldist täpsushinnangut ei saa selle süsteemi puhul anda, kuna see sõltub suuresti fotokaamera kvaliteedist, tehtud piltide kvaliteedist ning pilditöötluse tarkvara funktsionaalsusest. Kallimate kaamerate puhul on aga täpsus lühemate vahemaade korral võrreldav lindiga mõõtmisega. [5]

Võib öelda, et hoonete mõõdistusel on kõige rohkem kasutusel elektrontahhümeeter. Seda seetõttu, et igas geodeesia ettevõttes on see enim-kasutatavaks joone- ja nurgamõõdu instrumendiks ning

sellega mõõdistamine on geodeedile igapäevane tegevus. Tahhümeetri eelis osade instrumentide ees on objekti mõõdistamine puutevabalt ning võrreldes laserskanneriga on võimalik üksikute mõõdetud punktide asukohta valida. Tahhümeetriga seinä nurka mõõtes toimub viseerimine täpselt nurka, laserskanneriga määratakse seinä nurga asukoht hiljem andmetöötluse ajal.

Hoonete mõõdistamine laserskanneriga annab kõige rohkem informatsiooni objekti kohta, võrreldes teiste meetoditega. Kuna laserskanner on võimeline mõõdistama pinna punktide tihedusega umbes 1 mm, siis selle tulemusena saadakse objektist väga detailne kujutis. Keerulisema fassaadiga või nt. ümarvõlve omavat ehitist on seega laserskanneriga mõistlikum mõõdistada, tahhümeetriga oleks see pea võimatu. Tänapäeva skannerid suudavad mõõta umbes ~ 1 000 000 punkti sekundis ning seda kuni 6 km raadiuselt (nt. RIEGL VZ-6000), tavapärase töö raadius on siiski 10 – 100 m. Et saadav info hulk on suur, siis keeruliseks teebki laserskaneerimise puhul just vajaliku info välja juurimine ja selle kuvamine plaanide, vaadete, lõigete vms. näol. Erinevalt tahhümeetrist ei saa skanneri puhul valida, millist punkti täpselt on vaja mõõta, vaid mõõdetakse kogu laseri vaatevälja sisse jäävad objektid.

Laserskanneri puuduseks võrreldes teiste mõõdistustehnoloogiatega on tema tundlikkus ilmastiku oludele. Eriti suurt rolli mängib niiskustase, just faasinihke skannerite puhul. Punkt pilve müratase võib olla suurenenud, kui laseri peegel on niiske või kui mõõdetakse vihma käes, seda olenevalt laserskanneri tüübist. Vihmapiisad tekitavad laserkiire murdumise, ehk tekib refraktsioon ning punkt mõõdetakse tegelikust valesse asukohta.

2. MÕÕDISTUSKÄIGUD

Mõõdistuskäik on oma olemuselt sarnane mõõdistamisvõrguga. MKM-i Ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise korra järgi on mõõdistamisvõrk mõõdistatava maa-ala plaanilis-kõrguslikuks sidumiseks rajatud, riikliku või kohaliku geodeetilise võrguga seotud madalama astme geodeetiline võrk [1]. Mõõdistusvõrgud koosnevad kindlatest koordineeritud punktidest. On olemas ehitusvõrgud, kohalikud ja üleriiklikud geodeetilised võrgud ning tihendusvõrgud. Kõige täpsemini on koordineeritud üleriiklik geodeetiliste punktide võrgustik, mille punktidelt on edasi rajatud tihendusvõrgu punktid. Mõõdistusvõrgu eesmärgiks on maa-ala plaani koostamiseks vajalike tugipunktide saamine, mille suhtes on võimalik määrata objektide asend ja situatsiooni elemendid [6, p. 239]. Madalama astme mõõdistuskäigud tuginevad mõõdistamisvõrgu sõlmpunktidele [1]. Mõõdistusvõrgu punktide tihedus, hulk ja paigutus sõltub maa-alast ning koostatava plaani mõõtkavast, samuti kasutatavatest instrumentidest ja nende täpsusest [6, p. 240]. Võrgu punktide rajamisel on tarvis arvestada punktide asendi nõutava täpsusega ning tööde ratsionaalse ja majanduslikult põhjendatud korraldusega [6, p. 240]. Ehitusvõrk saab olla rajatud nii riiklikus, kui ka lokaalses koordinaatsüsteemis. Ehitusvõrgu punktid tähistatakse tavaliselt asfaldinaeltega, helkurkleepsudega, maasse löödud armatuuridega või võib ka kasutada markeriga joonistatud riste.

Selleks, et objektil teostada mõõtmisi ühes kindlas koordinaatsüsteemis tuleb luua mõõdistuskäik. Mõõdistuskäigu punktid võib siduda riigi geodeetilise põhivõrgu punktidega, kohaliku geodeetilise võrgu punktidega või võib ka tekitada suvalise koordinaatide süsteemiga mõõdistuskäigu. Mõõdistuskäigu punktid valitakse sedasi, et neilt oleks hiljem võimalikult palju situatsiooni korrigeerimiseks näha ning ei oleks tarvis teha lisaks vabasid seisupunkte. Samuti tuleb arvestada punktide säilivusega. Mõõdistuskäike võib olla erinevat tüüpi: kinnine käik, lähtekülgedeta käik ning lähtekülgedega käik. Nende käikude järgi on võimalik teha erinevaid geodeetilisi töid, topograafilisi mõõtmisi, projektpunktide väljamärgimisi, punktide koordineerimist ning hoonete mõõdistamist. Hoonete mõõdistamise puhul luuakse tavaliselt kinnine käik ümber hoone ning hoone sisesed käigud seotakse hoonevälise käiguga. [7, p. 10]

2.1. Hooneväline mõõdistuskäik

Hooneväline mõõdistuskäik rajatakse ümber hoone, tavaliselt kinnise käiguna. See käik peab olema rajatud sedasi, et käigu punktidelt oleks võimalik teha vabu seisupunkte hoone sisse ning oleks olemas nähtavus ka hoone ülemistele korrustele. Samuti peavad käigu küljed jääma hoone seinte lähedusse. Hooneväline mõõdistuskäik seotakse riiklike geodeetiliste punktidega, eraldi sidumiskäigu abil. Hoone ülemiste korruste paremaks mõõdistuseks paigutatakse punktid hoonest 1 - 1,5 hoone kõrguse kaugusele. Et hooneid, mida mõõdistatakse, on tavaliselt ümbermõõdult 50 – 150 m, tulevad ka käigu küljed ümber hoone lühikesed, tavaliselt umbes 20 m pikkused. Sellest tulenevalt on vaja instrument tsentreerida käigu punktile täpselt ning naaberpunktile viseerimine peab olema korrektselt tehtud. Kõrguse võib võtta nii riikliku geodeetilise mõõdistusvõrgu punktidele kui ka reeperitelt. Kindluse mõttes tuleks rajada objekti vahetusse lähedusse 1-2 reeperit lisaks, mis oleksid seotud riikliku põhivõrgu reeperitega. Reeperitele tuleb kõrgus määrata nivelliiriga. Mõõdistuskäigu punktide kohta tuleks koostada asukoha skeem, millel oleks kuvatud sidemed punktini, kaugus mõnest kanalisatsioonikaevust, valgustist, üksikust puust vms. [2, p. 5]

Hooneväliste mõõdistuskäikude rajamisel kasutatakse enamasti elektrontahhümeetrit. Märgitud punktide koordinaatide leidmisel tuleb kasutada täisvõtetega mõõdistamist, et tagada suurim instrumendi täpsus. Kui instrument on passi järgi nurgamõõdutäpsusega 5" vastavalt DIN 18723 standardile, siis see tähendab seda, et kui teha kaks täisvõtet, siis saadakse nurka mõõta viie sekundi täpsusega [8]. Kui hoonet hakatakse mõõdistama laserskanneriga ning tarvis on kasutada koordinaatsüsteemi, mis on seotud riikliku koordinaatsüsteemiga, siis sel puhul saab kasutada tahhümeetriga määratud kindelpunkte. Juhul kui laserskanneriga ei saa eelnevalt koordineeritud punkte kasutada, halva nähtavuse tõttu või liiga suurest vahemaast tingitud laserkiire suure langemismurra tõttu, tuleks mõõdistuskäigu punktidele tekitada hoone seinale tähistele abil alusvõrgu tihendus. Tihendust saab lahendada elektrontahhümeetri abil, luues vaba seisupunkt kindelpunktidele ning seejärel koordineerida seinale paigutatud tähistele. Teisalt, osad laserskannerid, nagu Leica Scanstation C10, oleks võimelised sellist probleemi ka ilma elektrontahhümeetrita lahendama. Need instrumendid võimaldavad teha objektile orienteerimist kindelpunktide järgi, saada seisupunktidele koordinaadid teatud süsteemis ning anda tähistele kindlad koordinaadid. Edasi saaks toimuda objektile mõõtmine juba nende samade koordineeritud tähistele abil.

Laserskanner kasutab erinevates jaamades skaneeritud punktipilvede sidumispunktidenähtavuse tähistele. Millist tähist täpselt kasutada hooneväliste mõõdistuskäigu jaoks sõltub paljuski hoone fassaadist. Kerge on kasutada paberist tähistele, kuna neid annab kahepoolse teibi või muu kinnitustahhümeetriga

pea igale seinale, ükskõik mis kõrgusele kinnitada. Kui hoonevälisel pinnal leidub metallist osi, siis leiavad head rakendust ka magnetaluusele paigaldatud tähised. Tähisteid tuleb paigutada nii palju, et ühest jaamast mõttes oleks nähtavus vähemalt kolmele tähisele korraga, et hiljem oleks võimalik punktipilvede sidumine, ehk registreerimine.

2.2. Hoonesisene mõõdistuskäik

Hoonesisese mõõdistuskäigu rajamisel lähtutakse põhimõttest, et käigu punktidest oleks võimalik teha enamus vajalikest mõõtmistest. Mõõdistuskäigud tuleb rajada igale korrusele, piki koridore ja punktid pannakse tavaliselt ukse avade kohale. Käigu otsmistelt punktidele peab olema nähtavus hoonevälisele mõõdistuskäigule, et saaks toimuda käikude sidumine. Mõõdistuse parema tulemuse, täpsuse ja ka kontrolli saavutamiseks oleks hea, kui nähtavus oleks mitmele hoonevälise käigu punktile korraga. Mõõdistuskäigud hoone sees hõlmavad endas mitmeid ühe või kahe küljega rippuvaid käike. Kuna hoone ruumid võivad olla keeruka ehitusega, siis rippuvate käikude hulk sõltub just nähtavusest loodud hoonesisese käigu punktidele igasse ruumi. Rippuvaid käike tuleks võimalusel vältida, kuna selle otsapunkti asendiviga võib olla 4-5 korda suurem välise mõõdistuskäigu punktide asendiveast. Vea suurus sõltub rippuva käigu külgede pikkusest ja nurgamõõdu täpsusest. Sisemise käigu punktide suurim asendiviga on käigu keskel, kui on tegemist kinnise käiguga. Viga jääb enamasti 3-4 korda suuremaks kui välise võrgupunkti asendiviga. Et vea suurust vähendada, tuleks käikude rajamisel mitte kasutada väga pikki käike. Vea vähendamiseks võib kasutada ka redutseerimiskäike, mis rajatakse mõõdistuskäigu otspunktide vahele nii, et selle küljed läheksid üle mitme mõõdistuskäigu punkti. Sisemise mõõdistuskäigu punktid märgitakse markeriga või kasutatakse kleeperiba peale märkimist. Puidust põranda puhul saab kasutada peeneid naelu, betoonist põranda puhul saab puurida põrandasse auke. [2, p. 6]

Laserskanneriga hoonete mõõdistamisel on siseruumide käikude loomine veidi teise iseloomuga kui klassikaline tahhümeetria mõõdistamine. Kehtivad samad reeglid hoonesisese käigu sidumisega hoonevälisega ning rippuvate käikude minimaalne kasutus. Käigupunktide valik ja nende hulk on teine. Käigupunktide märkimiseks kasutatakse tähisteid, kas spetsiaalseid laseri tähisteid või pabertähisteid, kui instrument võimaldab, saab kasutada ka naelasid. Kasutada võib ka sfäärilise kujuga tähisteid, mis võivad olla nii magnetaluusega kui ka ilma. Sfäärilise kujuga tähistena võib kasutada ka laste mängu jalgpalli või muud taolist, peaasi, et see oleks säiliv, püsiv ning seda oleks hiljem võimalik punktipilve pealt eristada. Tähiste valik sõltub hoone ruumide ja neis kasutatud materjalide iseärasusest. Iga skaneerimisjaama põhi kriteeriumiks on nähtavus vähemalt kolmele tähisele korraga, et saaks toimuda hiljem punktipilve sidumine. Tähiste asukoha valik ning nende

säilivus mõõdistuse ajal ei ole nii suure tähtsusega kui tahhümeetrilise mõõdistuse puhul, kuna tavaliselt saadakse kogu info ruumi kohta ühe mõõdistusega kätte. Tahhümeetrilise mõõdistusega võib tekkida moment, kus hiljem jooniste kokkupanekul selgub, et mõni ruumi nurk, pind, aknaava vms. on jäänud mõõdistamata, laserskaneerija puhul on see harvem nähtus.

Hoonesisese magistraalkäigu mõõdistamine laserskaneerimise puhul toimub koos ruumide mõõdistusega, s.t et käigu ja ruumide mõõdistus toimub jooksvalt, ruumist-ruumi ning käik jääb juba iseenesest punkt pilve sisse. Tähisted tuleb paigutada ruumi avade vastas olevate seinte külge. Seega üks skaneerimisjaam pannakse ukse ava juurde, nii et on nähtavus koridoris olevatele tähistele ja ruumi paigutatud tähistele ning teine jaam ruumi sisse, kust on nähtavus ruumi tähistele ja vastasseina külge paigutatud tähistele. Tavaliselt kui ühes ruumis on mõõdistus tehtud, võetakse sealt tähisted ära. Mööda koridori paigaldatud tähisted jäävad kohale, kuni on tehtud mõõdistus kogu korruse vältel. Ruumi ja koridori paigaldatud tähistele ning jaamade asukoha kohta koostatakse skeem, kus hoone põhiplaani peale märgitakse jaama asukoht, tema number ning tähistele asukohad märgitakse sümbolitega. Sedaviisi ülesmääramist tuleks rakendada igal korrusel.

2.3. Mõõdistuskäikude tasandamine

Kõik geodeetilised mõõtmised sisaldavad endas teatud vigu, see on paratamatu. Vead jaotatakse oma iseloomult kolme gruppi [7, p. 22]:

- Jämedad vead, mis tekivad hooletuse ja mõõtmismetoodika mittekorrektse täitmise tõttu;
- Süstemaatilised vead, mis muudavad mõõtmistulemust mingis kindlas suunas;
- Juhuslikud vead, mis tekivad paratamatult olenemata mõõtmismetoodika korrektsest järgimisest.

Mõõdetud suurused ei võrdu täpsete teoreetiliste väärtustega, nt. viisnurga puhul, kus on mõõdetud kõik sisenurgad, peaks teoreetiline nurkade summa olema võrdne 540° , kuid praktiline tulemus on alati midagi muud, olenemata kui täpse instrumendiga on mõõtmine toimunud. Sisenurkade summa leidmise valem kinnise käigu puhul on järgnev (1)

$$\Sigma_{\beta_{teor}} = (n - 2)180^\circ, \quad (1)$$

kus $\Sigma_{\beta_{teor}}$ – nurkade teoreetiline summa;
 n – polügooni nurkade arv.

Sidumatus leitakse, kui sisenurkade summast lahutada teoreetiline summa (2)

$$f_{\beta} = \Sigma_{\beta pr} - \Sigma_{\beta teor}, \quad (2)$$

kus $\Sigma_{\beta teor}$ – nurkade teoreetiline summa;
 $\Sigma_{\beta pr}$ – nurkade tegelik, praktiline summa;
 f_{β} – nurgaline sidumatus.

Lubatud nurgaline sulgemisviga on arvutatav järgneva valemiga (3) [7, p. 56]

$$f_{\beta lub} = \pm 2m_{\beta}\sqrt{n}, \quad (3)$$

kus m_{β} – nurgamõõdu keskmine ruutviga;
 n – polügooni nurkade arv.

Mõõdistuste tasandamise kohapealt on võimalik vähendada süstemaatilisi ja juhuslikke vigu, kuid jämedaid vigu ei parandata hilisema tasandamise teel, need tuleb asendada kordusmõõtmistega. Süstemaatilised vead tekivad enamasti siis, kui instrument, millega mõõdetakse, ei ole justeeritud, kuid vead võivad tekkida ka vales mõõtmismeetodist või kasutades nt. prisma konstandina valet suurust. Seega mõõtmistulemuste tasandamine tähendab just juhuslike vigade laiali jaotamist mõõdetud punktide hulgas. Põhiülesanne on tulemustele sellise parandi leidmine, mis võimaldaks elimineerida koostatud võrrandite süsteemis leitud vabaliikmed. [7, p. 22], [6, p. 269-270]

Kuna juhuslikud vead ei jagune mõõdetud punktidele proportsionaalselt, siis tuleb mõõdistuskäikude tasandamisel kasutada kõrgemaid matemaatilisi valemeid kui lihtsalt kokku liidetud sulgemisvea praktiline summa jaotada võrdsete osadena mõõtmispunktide vahel ära.

Mõned põhilisemad mõõdistuskäikude ning muude geodeetiliste tööde tasandamise meetodid on [9]:

- Bowditchi ehk kompassi meetod – üks varasemaid ja sagedasemini kasutatavaid tasandusviise. Selle meetodi puhul eeldatakse, et joonepikkused ja nurgad mõjutavad juhusliku vea suurust samaväärselt ning joonepikkuste vead on võrdväärsed joonepikkuste ruutude vigadega. Sellest tulenevalt on kaalud sama suurusega ning parandid on sõltuvuses käigu joonepikkusest. Seega mida pikem käigu joon, seda suurem viga.
- Crandalli meetod – 1901. a loodud meetod Charles L. Crandalli poolt. Tulenes tolle aja joonemõõdu instrumentide eripärast. Crandall arvas, et joonepikkuste mõõtmise juhuslikud vead on alati suuremad kui nurkade omad. Seega tasandusarvutuse puhul nurgad ei ole

sõltuvuses joonepikkustest, ehk nurgad tasandatakse võrdselt ja jooned kaalutud keskmise meetodil.

- Tuttle-i meetod – jäljendab vähimruutude meetodit, kuid on vähem keeruka ülesehitusega, seega on selle meetodi kasutamine võimalik ka kalkulaatori abiga välitööde käigus. See meetod tomib hästi kinnise käigu arvutusel, kuid rippuva käigu puhul võivad tulla valed tulemused. Samuti kui käik hõlmab mitut kindelpunkti, siis Tuttle-i meetodil ei anna tasandamine õigeid tulemusi.
- Vähimruutude meetod – selle meetodiga saab kõige tõenäolisema tulemuse. Vajab andmete arvutisse programmeerimist, et tulemuseni jõuda, see on ka üks miinus võrreldes teiste meetoditega, kuna mõõtmisvead tulevad välja alles kontoris andmete töötamise ajal. Vähimruutude meetodi jaoks on loodud korrelaatidega maatriksi mudel arvutis kasutamiseks, mispuhul geodeedil ei ole muud ülesannet, kui andmete sisse kandmine ning programm tasandab käigu ise ära, näidates seejuures ka iga punkti hälvet eraldi.

Millist tasandusmeetodit tuleks kasutada sõltub nõutavast võrgule seatud täpsusest ning kasutatud instrumentidest, kindelpunktide arvust, rippuvate punktide arvust jne. Tasandusmeetodit mõjutab ka teadmine, millised tulemused on eeldatavalt suurema juhusliku veaga, kas nurgad, joonepikkused või on mõlemad samaväärsed.

2.3.1. Plaanilise ja kõrgusliku mõõdistusvõrgu täpsusnõuded

MKM-i Ehitusgeodeetiliste uurimistöde tegemise korrast [1] on ette antud, millise täpsusega tuleb rajada tahhümeetriline käik. Plaanilise võrgustiku puhul leitakse käigu tasandamisel nõuetele vastavus järgneva valemi abil (4)

$$\frac{f_s}{\sum l} = \frac{\sqrt{fx^2 + fy^2}}{\sum l} \leq \frac{1}{10\,000}, \quad (4)$$

kus f_s – käigu absoluutne jooneline sulgemisviga;
 fx – x-teljeline koordinaatjuurdekasvude sidumatus;
 fy – y-teljeline koordinaatjuurdekasvude sidumatus;
 $\sum l$ – käigu joonepikkuste summa.

Käigu absoluutne jooneline sulgemisviga leitakse järgneva valemiga (5)

$$f_s = \sqrt{fx^2 + fy^2}, \quad (5)$$

Kõrgusliku võrgu tasandamisel on samuti MKM-i Ehitusgeodeetiliste uurimistöde tegemise korrast [1] ette antud valem lubatud sulgemisvea suuruse leidmiseks tehnilise nivelleerimiskäigu puhul (6)

$$f_{h\ tub} = \pm 50mm\sqrt{l}, \quad (6)$$

kus l – käigu pikkus kilomeetrites.

3. 3D SKANNERID

3D skannerid jagunevad passiiv- ja aktiivskanneriteks, terrestrilisteks ehk maapealseteks ja aero laserskanneriteks ning objekti puudutavateks ja puutevabadeks. Skanner võib olla mobiilne, ehk liikuv või statsionaarne. Aktiivskanner erineb passiivi omast selle poolest, et eritab ise valguskiigust, passiiv registreerib vaid olemasolevat. 3D skanneri mõõdistuse tulemusena saadakse mõõdetavast objektist punktipilv, millest on hiljem võimalik arvutiprogrammide abiga koostada 3D mudel või teha erinevaid analüüse, nt. uurida objekti deformatsioone või leida hoone sees ruumide kubatuur jne. Puutevabad skannerid on sarnased fotokaameratega, kuna mõõdistatakse seda, mis jääb vaatevälja sisse. Erinevus seisneb selles, et fotokaamerad jäädvustavad pinna värve, skannerid aga kaugust iga mõõdetud punktini ja seda kolme dimensiooniliselt. Enamasti tehakse objektile mõõtmised mitmest seisust, et kokku saada teviklik pilt objekti kohta. [10]

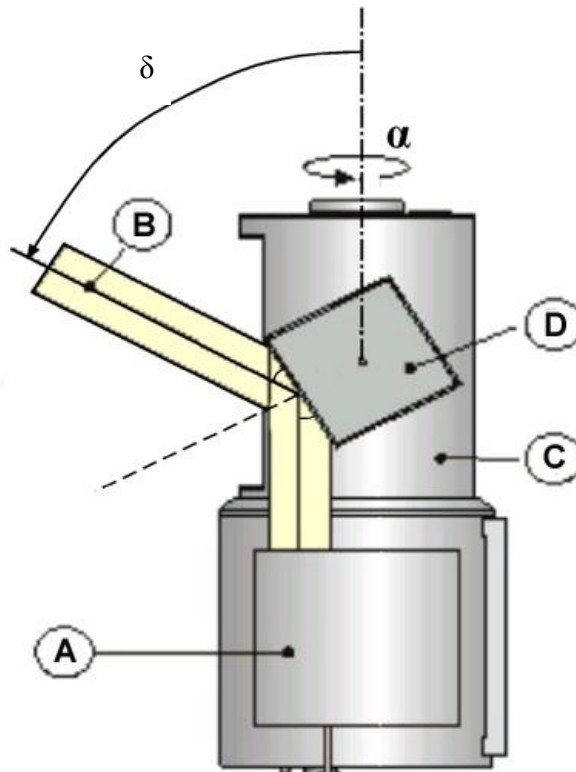
3.1. Valguskiirgusskannerid

Valguskiirgusskannerid jagunevad oma töö meetodilt kaheks, valguse levimise kiiruse abil (TOF – inglise keelest *time of flight*) töötavad skannerid ja faasinihke skannerid (PB – inglise keelest *phase based*) [11]. Skanneri tööpõhimõte seisneb selles, et väljastatakse signaal laseri näol objektile ning sealt tagasi peegeldunud kiirelt kogutakse erinevaid andmeid [10]. Nii faasinihke kui ka valguse levimise kiiruse abil töötavad skannerid leiavad oma erinevast ehitusest hoolimata mõõdetud punktile x, y ja z koordinaadi ning signaali intensiivsuse väärtuse I , olenevalt instrumendist kas monokromaatse või RGB värvikoodina. Kui skanneril on olemas eraldi fotokaamera, siis antakse punktile ka RGB kood.

3.1.1. Valguskiirgusskanneri ülesehitus

Terrestrilised statsionaarsed laserskannerid leiavad mõõdistatud punktile horisontaalnurga, vertikaalnurga ning punkti kauguse skannerist. Skanner väljastab koherentse valguslaine elektroonilisest saatjast (Joonis 1, A), mis tabab suurel kiirusel pöörlevat peeglit (Joonis 1, D). Peegli pinnalt peegelduva valguskiire vertikaalnurk δ (Joonis 1, δ) registreeritakse. Kui ühe peegli

täispöörde pealt on kõik punktid kogutud, muudab skanner horisontaalnurka α (Joonis 1, α) väga väikese liigutuse võrra, pöörates skanneri liikuvat ülaosa (Joonis 1, C) ning algab uus vertikaalnurkade registreerimine teatud horisontaalnurga peal. Kui instrument on teinud mõõtmised terves horisontaalringi ulatuses, saadakse kokku punktipilv, kus igal punktil on polaarkoordinaadid α , δ nurkade näol ning tasapinnani mõõdetud kaugus l . [12]



Joonis 1. Laserskanneri ülesehitus. A – elektrooniline saatja, B – väljuv laserkiir, C – skanneri ülaosa, D – pöörlev peegel, δ – laserkiire vertikaalnurk, α – horisontaalnurk [12]

Nende kolme muutuja, horisontaalnurga α , laserkiire vertikaalnurga δ ja mõõdetud kauguse l mõõtmise täpsus, koos mõõtmise kiiruse ning skaneerija väikseima ja suurima vaatevälja ulatuse määramisega, moodustab kokku instrumendi karakteristika, ehk omadused ja kvaliteedi. [12]

Laserskanneriga punktile määratud koordinaadid leitakse järgneva valemiga (7) [13]

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cos \alpha \cos \delta \\ l \sin \alpha \cos \delta \\ l \sin \delta \end{bmatrix} \quad (7)$$

kus x – määratud x-koordinaat;

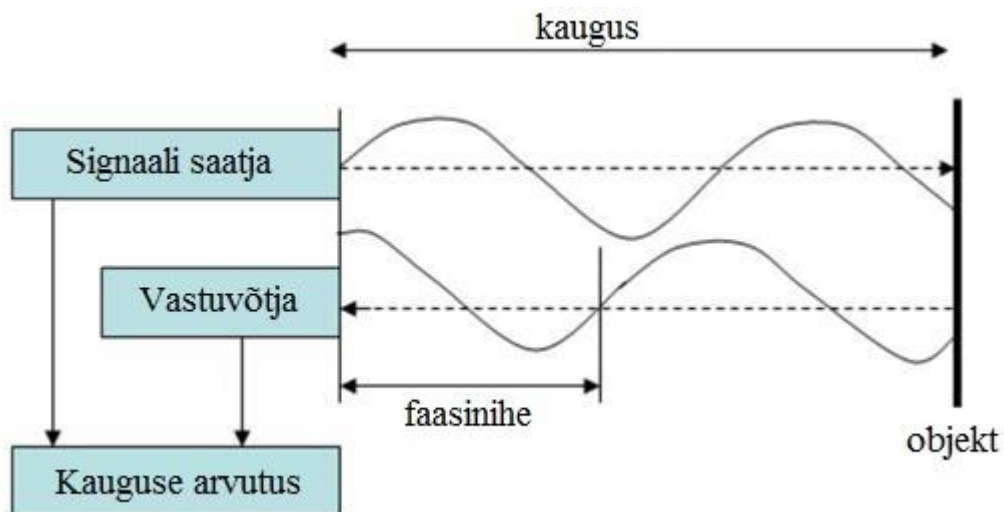
y – määratud y-koordinaat;

- z – määratud z-koordinaat;
- l – kaugus instrumendist mõõdetud pinnani;
- α – instrumendist väljuva laserkiire horisontaalnurk;
- δ – instrumendist väljuva laserkiire vertikaalnurk.

Instrumendi väikseim nurgamuut koos lasertäpi suurusega moodustab kokku instrumendi eraldusvõime. Eraldusvõime tähendab kasutaja seisukohast võimet eristada punktipilves väikseid objekte. Oletame, et skaneeritakse ühelt ja samalt kauguselt 10 x 10 cm pinda, siis kõrge eraldusvõime puhul saaksime sellele pinnale mõõta 200 punkti, madalama puhul 50. [14]

3.2. Faasinihke skanner

Faasinihkeskannerid kasutavad kauguse määramiseks instrumendist välja saadetud laserkiire faasi võrdlemist objektilt sensorisse tagasi peegeldunud laserkiire faasiga (Joonis 2). Kuna laserkiire ühele võnkele kulunud aeg on teada, saadakse kätte kaugus instrumendist mõõdetud objektini. [15]



Joonis 2. Faasinihke skanneri tööõhimõte. Kauguse leidmine faaside võrdlemisel [15]

Kauguse leidmiseks kasutatakse valemit (8) [15]

$$l = \frac{(N\lambda + d)}{2}, \quad (8)$$

- kus N – lainepikkuste arv laserkiire edasi-tagasi liikumisel;
- λ – lainepikkus;
- d – faasinihke suurus.

Võrreldes laserimpulss-skanneritega on faasinihkeskanneritel suurem mõõdistuskiirus. Faasinihke skannerid suudavad mõõta umbes 1 000 000 (nt. Faro Focus 3D) ning laserimpulss-skanner umbes 20 korda vähem (nt. Leica Scanstation C10) punkti sekundis. Faasinihke skanner mõõdistab punkte kiiremini, kuna väljasaadetud kiire ajal toimub juba uue kiire väljasaatmine, kuna mõõdistamine toimub püsilaseriga (inglise keeles *continuous wave*), laserkiire naasmine tuvastatakse hiljem. Samas laserimpulss-skannerite mõõtmise kaugus on tunduvalt suurem kui faasinihke omadel, osade instrumentide puhul ulatub see mitme kilomeetrini, kuid faasinihke skanneri mõõtmiskaugus jääb mõnesaja meetri sisse. Seetõttu on faasinihke skannerid kasutusel enamasti siseruumide mõõdistusel, kuid see ei välista hoone väljast mõõtmist. [16, p. 8], [15]

3.3. Laserimpulss-skanner

Valguse levimise kiiruse abil töötavad skannerid saavad punkti kauguse kätte lasersignaali levimise aja järgi. Instrument väljastab signaali ning tagasituleva signaali aeg jagatakse kahega, kuna laserkiir teeb edasi-tagasi käigu. Kuna valguse levimise kiirus on teada, siis kauguse leidmise valem on järgnev (9) [10]

$$l = \frac{(ct)}{n2}, \quad (9)$$

kus c – valguse levimise kiirus (299 792 458 m/s);

t – kulunud aeg;

l – kaugus;

n – keskkonna parand. Sõltub õhutemperatuurist, õhuniiskusest, kõrgusest merepinnast jne.

Täpsus, millega kaugus leitakse, sõltub skanneri aja mõõtmise täpsusest. 1 mm täpsus punktile saadakse, kui aega on võimalik määrata 3,3 pikosekundilise täpsusega. [10]

Laserimpulss-skannereid kasutatakse enim maastike, tunnelite ja suurte hoonete mõõdistusel, kus on oluline ühest seisust koguda informatsiooni võimalikult suure ala kohta. Väljas mõõtmise puhul on suurimaks vea allikaks faasinihke skannerite puhul vihmapiisad ja lumi, kuna laserkiir peegeldub neilt osakestelt nende väiksusest hoolimata. [15]

3.4. Laserskannerite tähised

Tähiseid kasutatakse laserskaneerimisel punktipilvede ühendamiseks. Samuti tähised võivad olla hoonevälise ja hoonesiseste käikude kindelpunktideks. Tähised võib jagada kahte rühma, ruumilised ja lamedapinnalised. Tähised võivad olla spetsiaalse hoidiku küljes ning lisaks magnetlusega (Foto 1, A), (Foto 1, C). Spetsiaalsed tähiste hoidikud on liigutatavad nii vertikaalkui horisontaalsuunaliselt ning võivad olla ka sau külge kinnitatavad (Foto 1, B). Lamedapinnaliste alla kuuluvad veel must-valged pabertähised (Foto 1, D), mis on oma ehituselt kõige lihtsamad ning neid on võimalik ka ise valmistada. Laserskanneri tootja Riegl kasutab erinevalt teistest tootjatest ka silindrikujulisi tähiseid (Foto 1, E).

Enim kasutataksegi lamedapinnalisi tähiseid. Nende üheks probleemiks on keskkoha identifitseerimine, tulenevalt suurtel kaugustel mõõtmisest või suurema kui 45° langemisnurgast. Sfääriliste puhul on keskkoha selgemini tuvastatav, olenemata millise nurga all neid mõõdetakse ning sobivad paremini punktipilvede sidumiseks, kui lamedad. Tähised tuleks sisse mõõta alati suurima eraldusvõimega, et keskmise punkti koordinaadid oleks võimalikult täpselt välja arvutatavad. [13]

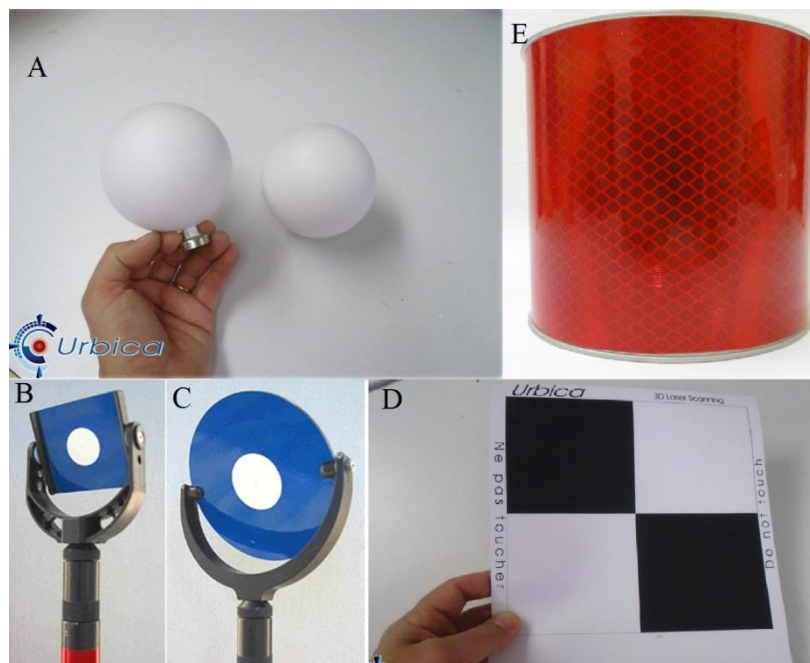


Foto 1. Erinevad tähiste tüübid. A – sfääriline magnetlusele tähis, B – lame 3x3-tolline ruudukujuline tähis sau küljes, C – lame 6-tolline ümärtähis magnetlusele, D – pabertähis, E – 10x10cm silindrikujuline tähis [17], [18], [19]

Tähiste kasutamine võimaldab erinevatest skaneerimisjaamadest tehtud punktipilved omavahel siduda, transformeerida ühtsesse koordinaatsüsteemi ehk registreerida. Seetõttu tähised ei tohi mõõtmistööde ajal paigast liikuda ning peavad olema nähtavad erinevatest seisudest, et säilitada kindel koordinaatide süsteem. Ühtsesse koordinaatide süsteemi viimiseks peavad kahest eri seisust näha olema vähemalt 3 ühist tähist, et saada arvutada 6 transformatsiooni parameetrit. Parameetriteks on 3 teljelist, nihkevektorit, Δx , Δy ja Δz ning 3 telgede pöördenurga parameetrit ω , ϕ , κ , vastavateks pööreteks ümber x, y ning z telje. Tähistid peavad olema paigutatud ka erinevatele kõrgustele ning mitte ühte veergu. [13]

3.5. Laserskaneerimise täpsus ja veallikad

Laserskannerid on oma ehituselt kapriissed ning mõõtmistulemusi mõjutavaid tegureid on mitmeid. Vea suurus mõõtmistel tuleb kokku instrumendi, mõõdetava objekti kuju ning materjali, keskkonna tingimuste, mõõdistaja ning koordinaatide sidumise ja andmetöötluse vigadest.

Laserskaneerimise, kui ka muude mõõtmistehnoloogiate puhul, saab rääkida mõõtmise õigsusest (inglise keeles *accuracy*), mida kirjeldab mõõtmistulemuste absoluutne lähedus tõelisele väärtusele ning täpsusest (inglise keeles *precision*), mida kirjeldab mõõtmisseeriade kokkusobivuse määr, mis sõltub keskkonnatingimustest, instrumendi kvaliteedist ning mõõdistaja oskustest. [20]

3.5.1. Instrumendist tulenevad vead ja täpsus

Instrumentaalsed vead on tootja poolt ette antud, kuigi nende tegelik suurus selgub mõõtmise käigus, konkreetse instrumendi puhul ning teiste instrumentidega võrdlemise teel. Instrumendi mõõtmistäpsust mõjutavad instrumendis pöörlev peegel, teljeliste kompensatorite, digitaalse kompassi ning sisseehitatud GPS süsteemi olemasolu, samuti instrumendi nurgamõõdu ja kauguse määramise täpsus.

Nurgamõõdu täpsust mõjutab asjaolu, kui väikse sammu võrra instrument horisontaalteljel pöörleb. Vertikaalnurk saadakse pöörleva peegli asendi kaudu, horisontaalnurk saadakse esimese nurgaga risti mehhaanilise telje pööramise kaudu. Viga koordinaatide arvutamises tekib nende kahe telje vahelisest täisnurga veast. Kauguste mõõtmisel kuni 100 m jääb kaugusmõõtmise täpsus umbes ± 5 mm sisse. Kauguse mõõtmise täpsus muutub instrumentidel koos vahemaade suurenemisega lineaarselt. [16], [11], [14]

Eraldusvõime näitab punktide tihedust teatud määrdistusalal. Tänu suurele eraldusvõimele on võimalik eristada väiksemaid objekti osi, määrata hoone nurkade asukohta täpsemini ning saada detailsemat pilti objektist. Eraldusvõime omadused tulevad instrumendi väikseimast horisontaalnurga suuna muutusest ning laserkiire täpi suuruselt. Enamus skanneritel on võimalus valida, millise eraldusvõimega mõõtmist teostada. [14]

3.5.2. Keskkonnast tulenevad vead

Keskkonnatingimustest mõjutavad mõõtmisi õhuniiskus, sademed, vibratsioon ning õhutemperatuur. Laserskannerite tootjad annavad oma instrumentidele nominaal töötemperatuuri vahemiku, see jääb tavaliselt null kraadist kuni pluss 45 kraadini. Osad instrumendid on võimelised töötama ka miinuskraadiga, nt. Leica HDS 7000 kuni -10 külmakraadi. Sellise temperatuuri juures mõõtmiseks on tootja poolt valmistatud spetsiaalne sooja hoidev ümbris. Üldiselt siiski miinuskraadidega saadakse väiksema täpsusega tulemusi, kuna esiteks pöörleva peegli peale võib tekkida kondensatsioon ning teiseks instrumendi mehaanilised osad töötavad külmaga teisel kiirusel. [16], [11], [14]

3.5.3. Mõõdetavast pinnast tulenevad vead

Laserskaneerimise määrdistuskvaliteeti mõjutab objekti kuju ja selle materjal. Objekti pinna värvusest oleneb kui kaugelt punkt määrdetakse. On teada, et heledamad pinnad peegeldavad laserkiirt suurema tugevusega kui tumedad pinnad ning läikivad pinnad mõjutavad laserkiirt kõige rohkem. Lääkivust mõjutab ka pinna niiskustase. Kui suurt viga teatud pind laserile avaldab sõltub suuresti laseri tüübist, millise lainepikkusega laseriga on tegemist. Määrdmist mõjutab ka mõõdetava pinna temperatuur, mida kuumem on pind seda väiksem on lasersignaali ja müra vahetõrd (SNR – inglise keeles *signal to noise ratio*). Vea suuruse määramiseks on võimalik paigaldada mõõdetavale pinnale kontrolliks pabertähiseid ning hiljem andmetöötluse ajal on punktipilvest näha, kui suur punkti kauguse erinevus on nende kahe materjali vahel. [14], [13]

3.5.4. Andmetöötlusega seotud vead

Objekti laserskaneerides võib instrument olla orienteeritud kindelpunktide järgi või suvalises süsteemis. Sellest tulenevalt on ka hilisem punktipilve kokkupanek nende kahe meetodi puhul erinev. Kindlas süsteemis mõõtes ei pea olema erinevatest seisudest määrdetud punktipilvedel suurt kattuvust, suvalises süsteemis mõõtes peab aga hilisema pilve registreerimisprotsessi tõttu hoolikalt laserskanneri asukohta valida, samuti tähiste paigutust. Vead kuvatakse punktipilve töötlemise

tarkvaras. Nendeks on puntipilves olev müra, erinevatest seisudest mõõdetud tähiste omavahelise asetuse vead, pindade tekitamise vead jms. Müra eemaldamiseks tehakse punktivilves puhastamine ning hõrendamine, mida programm võimaldab teha automaatselt, kuid seda võib ka teha manuaalselt, nii saadakse tavaliselt parem lõpptulemus. Üldiselt hõrendamine vähendab punktide arvu mõõdetud objekti kohta mitmekümne protsendi võrra.

3.5.5. Laserkiirest tingitud vead

Laserkiire omaduse kirjeldamisel on üheks osaks laserkiire talje. Instrumendist väljudes laserkiire diameeter esialgu kahaneb ning hiljem laieneb. Laserkiire laienemist kutsutakse laserkiire divergentsiks. Kahanemine toimub üldiselt mõni meeter pärast instrumendist väljumist, kuid osade instrumentide, nagu Leica HDS 2500 ja Leica HDS 3000 puhul saavutatakse laserkiire väikseim diameeter alles 25 m kaugusel instrumendist. Laserkiire divergents on väljendatav valemiga (10) [13]

$$w(l) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\pi w_0^2}\right)^2}, \quad (10)$$

kus $w(l)$ – laserkiire raadius kaugusel l ;
 w_0 – laserkiire väikseim diameeter;
 λ – laserkiire lainepikkus.

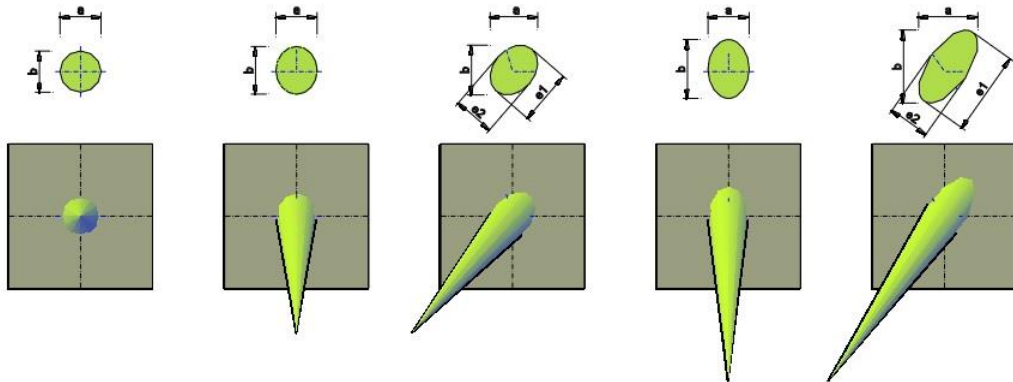
On teada, et mida väiksem on laserkiire talje, seda suurem on hilisem laienemine. Sellest tulenevalt on pinnale saadetud laserkiire täpil ka oma suurus teatud kaugusel. Laserkiire täpi suurus mõjutab laserkiire pooldumist objekti servale mõõtmisel. Kiir võib tabada objekti serva sedasi, et üks osa kiirest peegeldub objekti pinnalt, teine osa taustpinnalt, niiviisi saadakse vale kauguse mõõt. Laserkiire täpi suurust teatud kaugusel on võimalik leida lihtsustatud valemiga (11) [13]

$$D_l = 2l \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \approx l\gamma, \quad (11)$$

kus D_l – laserkiire diameeter kindlal kaugusel;
 γ – divergentsi nurk.

Laserkiire langemisnurk mõjutab mõõtmistulemusi oluliselt. Mida suurem nurk, seda rohkem müra tekib ka punktivilve. Laserkiire täpp nurga all mõõtes on ovaalne (Joonis 3), mitte ringikujuline,

seega saadakse kauguse mõõtmisel teatud viga, kuna instrument võib registreerida punkti ovaali äärtesse või keskele. [21]

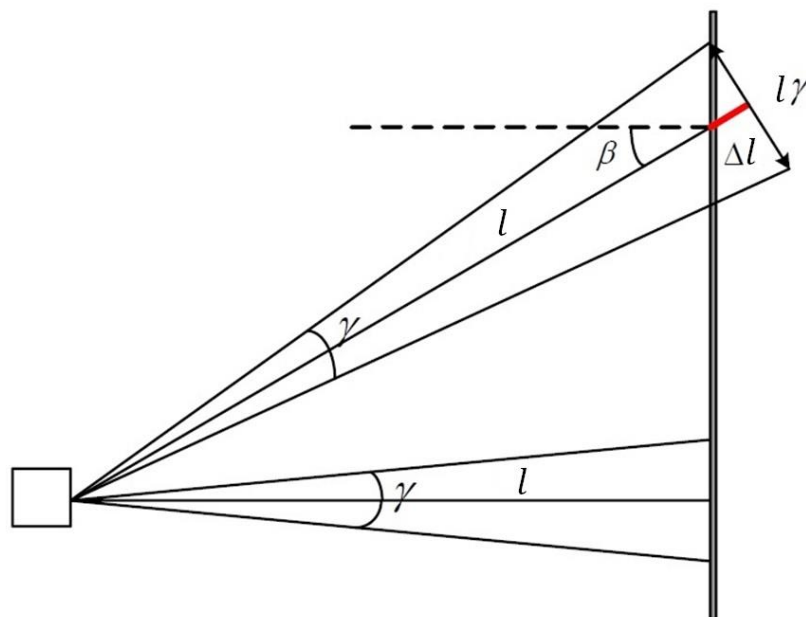


Joonis 3. Langemisnurgast tingitud lasertäpi kuju [22]

Divergentsi ja langemisnurga viga kokku kauguse määramisel (Joonis 4) saab väljendada järgneva valemiga (12) [13]

$$\Delta l = \frac{l_\gamma}{2} \tan \beta, \quad (12)$$

- kus l – mõõdetud kaugus;
 γ – divergentsi nurk;
 β – langemisnurk.



Joonis 4. Kauguse määramise viga [13]

4. ANDMETÖÖTLUS

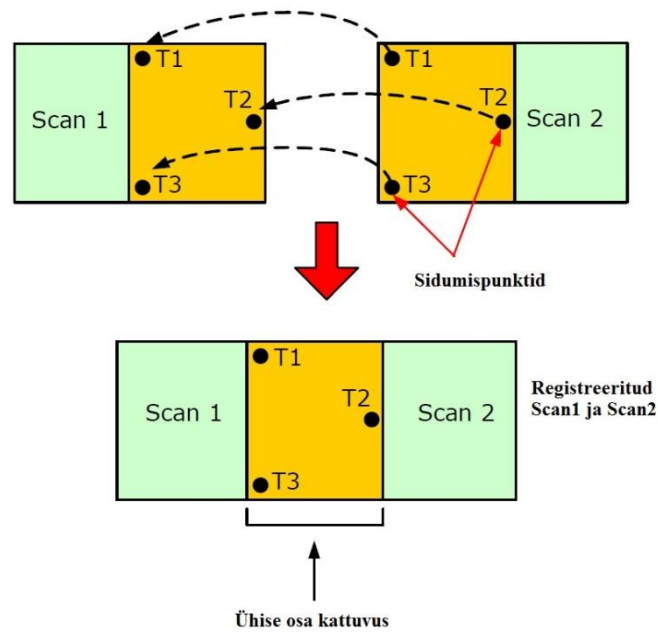
Andmete töötlemiseks kasutatakse andmetöötlustarkvara. Välismaine kirjandus kasutab sellise iseloomuga tarkvara nimetamiseks lihtsustatult sõna CAD, mis tuleb ingliskeelsetest sõnadest *computer-aided design* ning tõlgituna tähendab arvuti abil jooniste tegemist. Laserskanneriga mõõdistatud punktipilvede töötlemiseks on olemas erinevaid CAD programme. Osad, mis on välja arendatud kindlate instrumentide tootjate poolt, nt. Faro Scene (Faro Technologies UK Ltd), Leica Cyclone (Leica Geosystems), ning teised, mis on universaalsemad, nt. Autodesk Revit (Autodesk Inc), Bentley Descartes (Bentley Systems Inc), 3D Reshaper (Technodigit), kus osad võimaldavad punktipilvede modelleerimist, kuid samas pilve kokkupanek ei anna nii täpseid tulemusi kui laserskannerite tootjate tarkvarad. Programmide erinevus tuleb sellest, kuidas punktipilve seest tähiseid tuvastatakse, millised on müra eemaldamise võimalused, kuidas toimub punktipilvede liitmine, kuidas tehakse tasandamist mitmest seisust mõõdetud punktipilvede ühendamisel jne.

Andmetöötlus on vajalik laserskaneerimise andmete korrektseks koordineerimiseks ning tasandamiseks. Andmetöötluse osadeks on mõõdistusandmete sidumine, registreerimine, registreerimistulemuste hindamine, mõõdistusandmete puhastamine, hõrendamine, mudeldamine jms. [15, p. 68]

4.1. Punktipilvede registreerimine

4.1.1. Tähiste abil registreerimine

See on punktipilvede siirdamiseks kõige levinum viis. Erinevatest jaamadest skaneeritud punktipilved peavad sisaldama vähemalt kolme ühist tähist, mis peavad olema asetatud mitte ühte veergu ja ritta (Joonis 5). Tähisteid, mida kasutatakse punktipilvede ühendamiseks, kutsutakse sidumispunktideks. Tähistele koordinaatide leidmine, sellest tulenevalt ka punktipilvede omavaheline sobitamine, tehakse vähimruutude meetodil. Et laserskanneriga ei ole punktide suunamine võimalik, tuleb tähiste mõõtmisel kasutada suure eraldusvõimega režiimi, et tähise keskkoha oleks parem eristada. Mõõdetud punktide tihedus pinnal mõjutab tähise keskkoha välja arvutamist oluliselt. [13]



Joonis 5. Tähiste abil registreerimine [13]

4.1.2. Registreerimine ühiste osade järgi

Juhul kui tähiste paigutamine mõõdetava pinna külge ei ole võimalik, puudub ligipääs, siis skaneerida on võimalik ka tähiseid kasutamata. Registreerimisel on siis sidumispunktidenä kasutusel punktipilvede ühised osad, hoone nurgad, aknad jms. Ühiseid osi on võimalik hiljem andmetöötluse ajal punktipilve sees ise ära määrata. Selle meetodi puuduseks eelneva meetodi ees on [13]:

- ühiste osade subjektiivne valik, ehk on vaja eristada hästi mõõdetud pind halvast (nt. suurema langemisnurgaga mõõdetud osad);
- mõõdetud punktid pinnal on erinevatest jaamadest mõõdetuna eri täpsusega, tulenevalt laserkiire divergentsist.

5. VANA RAADIOMAJA MÕÕDISTAMINE

Mõõdistamist oli tarvis teha Kreutzwaldi 14 hoonele, ehk vanale raadiomajale (Foto 2). Selles hoones plaanitakse vundament lahti kaevata, paigaldada niiskustõkked ning ümberehitada kogu maja küte ja ventilatsioon, ehk teisiõnu oli tegemist renoveerimis- ning juurdeehitustöödega. Tööde kirjeldus nägi ette hoonest vaadete, lõigete, punkt pilve ning kõikidest korrustest plaanide koostamist (vt. lisad). Punkt pilves pidi punktide tihedus pinnal jääma ≤ 2 cm piiridesse. Töö tellijaks oli arhitektuuri ja inseneribüroo AS Amhold.



Foto 2. Vana Raadiomaja [23]

5.1. Objekti asukoht ja kirjeldus

Vana raadiomaja asub Tallinnas, kesklinna linnaosas, aadressiga Kreutzwaldi 14 ning katastriüksuse tunnusega 78401:113:0850. Hoone valmis 1949/1950 aastal. Hoone põhiosa on 5-korruseline ning olemas on ka keldrikorrus ning katusealune osa. Katusealune osa hõlmab endas hoone ventilatsioonisüsteemi ning keldrikorrusel asub lisaks muudele ruumidele veel pommivarjend. Vana raadiomaja on ühendatud uue raadiomajaga, mille liitekohta koridori all asuvad ERRi garaažid. Raadiomaja on stalinistliku stiiliga kivihoone, siseruumid on peamiselt väiksemat tüüpi kabinetid, kuid leidub ka suuremaid, nagu esimese stuudio helisalvestusruum. Hoonel on kolm sissepääsu, kaks sisehoovis ning üks, peasissepääs, Kreutzwaldi tänava pool.

5.2. Mõõdistustöödel kasutatud instrumendid

5.2.1. Faro Focus 3D S 120

Hoone laserskaneerimine nii seest kui väljast toimus Faro Focus 3D S 120 laserskanneriga (Foto 3).



Foto 3. Faro Focus 3D laserskanner [24]

Mõned tehnilised näitajad selle instrumendi kohta on [25]:

- faasinihke skanner;
- omab elektroonilist kompassi, mille abil on hilisem punktipilve registreerimine hõlpsam ning lisaks saavad jaamadest tehtud skaneerimised ligikaudse orienteerituse;

- omab kõrguse sensorit, mille abil on nt. mitmekorruselise hoone mõõdistamisel võimalik hiljem kergemini eristada, mitmendal korrusel teatud jaam asus;
- omab kaheteljelist kompensaatorit, tööpiirkonnaga $\pm 5^\circ$, täpsusega $0,015^\circ$;
- nominaalne tööraadius 0,6 - 120 m;
- mõõdistamise kiirus sõltuvalt programmist: 122 000, 144 000, 488 000 või 976 000 punkti sekundis;
- integreeritud 70 megapiksline fotokaamera;
- instrumendi kaal: 5 kg;
- nurgaline mõõdistamise täpsus nominaallangemisnurga puhul 10 m peal 0,6 mm ning 25 m peal 0,95 mm, seda juhul kui skaneeritav pind võimaldab 90% laserkiire tagasipeegeldust. 10% puhul on näitajad vastavalt 1,2 mm ja 2,2 mm.
- kauguse määramise täpsus, tulenevalt süstemaatilise veast, on 10 - 25 m peal ± 2 mm
- instrumendi vaateväli on 360° horisontaalteljel ja 305° vertikaalteljel;
- väikseim nurgamuut on $0,009^\circ$ horisontaal- ja vertikaalteljel, s.t. kokku on võimalik saada 40 960 punkti ühe täispöörde peale, 10 m pealt saavutatakse ca 0,15 cm punktide tihedus;
- laserkiire lainepikkus 905 nm;
- laserkiire divergents keskmiselt $0,0108^\circ$;
- lasertäpi suurus instrumendist väljudes on 3 mm, vastavalt 10 m peal oleks täpi suurus 4,8 mm;
- töötemperatuuri vahemik $5^\circ - 40^\circ\text{C}$.

5.2.2. Topcon GPT-9003A

Hoone koordinaatide sidumine riikliku geodeetilise võrguga toimus Topcon GPT-9003A elektrontahhümeetriga (Foto 4).



Foto 4. Topcon GPT-9003A elektrontahhümeeter [26]

Topcon GPT-9003A tehnilised näitajad [27]:

- nurgamõõdutäpsus 3" (DIN 18723 järgi) [8];
- väikseim nurgamuut 1/5";
- kaheteljeline kompensaator, tööpiirkonnaga $\pm 6'$;
- prismaga mõõtes tööraadius maksimaalselt 5 km, prismata mõõtes kuni 2 km;
- kauguse määramise täpsus prismaga $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} * l)$, prismata $\pm (10 \text{ mm} + 10 \text{ ppm} * l)$
- omab automaatset prisma jälitamissüsteemi.

5.3. Ettevalmistus

Kui töö lähteülesanne oli teada, tuli objektile kohale minna, et uurida võimalikke mõõdistamisnüansse. Vana raadiomaja kohta olid olemas vanad plaanid, mis prinditi välja esmaseks objekti külastuseks. Plaanide olemasolu vähendas tunduvalt objektil tehtavate mõõtmistööde ajakulu, kuna polnud tarvis ise hoone ruumide kohta skeeme koostada. Objekti ruume uurimas käies saadi teada, et paljud plaanil kuvatud osad ei kattunud tegeliku olukorraga. Vahepeal oli toimunud juurdeehitusi ning osad ruumid olid ka kaduma läinud.

Plaanide ning objekti külastuse järgi sai anda esmase hinnangu töö mahule ning orienteeruval tööle kuluvale ajale. Et paljud ruumid olid lukus või ka eraldi valve all, siis pandi paika objektipoolne

isik, kes mõõtmiste ajal võimaldas igasse ruumi sissepääsu. Samuti oli selle isiku roll objekti vara valvamine, kuna ruumides leidis palju väärtuslikku helitehnikat ning vanu rahvusringhäälingu erinevaid salvestusmaterjale.

Esmane külastus oli vajalik ka vana raadiomaja töötajatele, et nad oleksid kursis, kes ning mis põhjusel hakkab hoones mõõdistustöid tegema. Pandi paika orienteeruvad kellaajad, millal siseruumides mõõtmised hakkavad toimuma. Samuti määrati objektile kaks brigaadi, päevane, mis tegeles sisemõõtmistega ning õhtune, mis tegi mõõtmisi hoone välisosast.

5.4. Hoone sidumine riikliku koordinaatsüsteemiga

Vana raadiomaja Kreutzwaldi tänavapoolses küljes olid olemas 2 seinapolügonomeetria punkti numbritega 611 ning 6111. Üle tee asuval Kreutzwaldi 15 hoone küljes oli olemas seinapolügonomeetria punkt numbriga 6112. Nende kolme punkti järgi toimus raadiomaja seintele paigutatud tähiste koordineerimine. See oli vajalik hilisemal andmetöötlusel tehtava punktipilve transformeerimise jaoks L-Est 97 koordinaatsüsteemi.

Tähised olid kahe sissepääsu juurde paigutatud, ühed sisehoovi sissepääsu (Joonis 7) ning teised peasissekäigu (Joonis 6) juurde, 3 tähist kummagi ukse juurde. Nende asetus oli valitud selle järgi, et hiljem oleks võimalik laserskanneriga uste juurest mõõtes näha ka hoone sisse paigutatud tähiseid, et hilisem punktipilvede ühendamine oleks võimalik ning kanduks edasi ühtne koordinaatsüsteem. Samuti tähised asetati erinevatele kõrgustele ning mitte samasse veergu.



Joonis 6. Peasissekäigu tähiste asetus



Joonis 7. Sisehoovi sissekäigu tähiste asetus

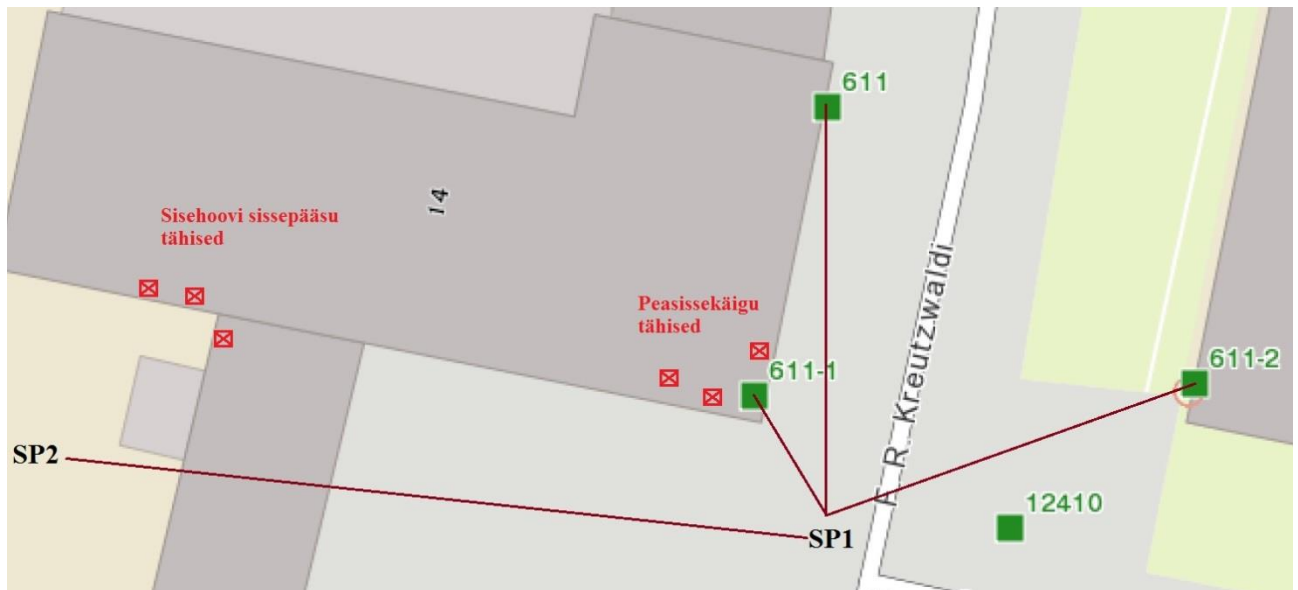
Protsess algas elektrontahhümeetri asukoha valikust. Esimene seisupunkt valiti selle järgi, et oleks nähtavus kõikidele polügonomeetria punktidele, peasissekäigu kõikidele tähistele ning järgmisele seisupunktile. Kaasas oli kaks statiivi, üks instrumendi jaoks ning teine oli koos prismaga, mida kasutati edasivisete puhul. Teine seisupunkt pandigi selle prismat hoidva statiiviga paika, see asetati raadiomaja sisehoovi, nii et säilis nähtavus esimesele seisupunktile.

Esimesel seisupunktil tehti orienteerimine polügonomeetria punktide järgi, miniprisma abil. Kõik punktid mõõdeti instrumenti kahe täisvõttega. Pärast orienteerimist võeti kõrgus veel eraldi polügonomeetria punktilt 611. Edasi toimus peasissekäigu tähiste ning järgmise jaama sissemõõtmine, kahe täisvõttega jällegi. Siis viidi instrument järgmisele statiivile, kus orienteerimine nüüd käis kindelpunktil seismise järgi. Suund võeti esimeselt seisupunktilt, olles asetanud sinna statiivile nüüd prisma. Olles instrumendi orienteerinud, toimus sisehoovi sissepääsu juurde paigutatud kolme tähise koordineerimine, kõik punktid mõõdeti kahe täisvõttega.

Et tekkinud hooneväline mõõdistuskäik hõlmas endas kahte seisupunkti, siis ei toimunud eraldi hilisemat mõõdistuskäigu tasandamist. Kohapeal instrumenti orienteerides jälgiti instrumendi ekraanilt kuvatud vigasid, vead ei tohtinud ületada 2 mm. Esimesel seisupunktil oli ainuke viga x-teljel 1 mm ning teisel seisupunktil näitas z ja y-telg 1 mm viga.

Joonis 8 on skeem selle kohta, kuidas toimus objektile tähiste viimine riiklikku koordinaatsüsteemi. SP1 ja SP2 tähistavad seisupunkte, punased jooned on tõmmatud näitamaks instrumendi

orienteerimist kindelpunktide järgi. SP1 ja SP2 vahel oli nähtavus, kuna sealt kus joon „hoonet lõikab“ asus autode sissepääs hoovi.



Joonis 8. Hoonevälise mõõdistuskäigu skeem (Maa-ameti geodeetiliste punktide andmebaasi kaart)

5.5. Objektil laserskanneriga mõõdistamine

Hoone siseruumide kui ka väljast mõõtmine teostati Faro Focus 3D laserskanneriga. Et instrumendiga oli võimalik kasutada erinevaid mõõtmisrežiime, siis pandi paika, et kõik välimõõtmised tehakse režiimil 48 miljonit, hoone ruumid 11 miljonit ning koridorid 28 miljonit punkti jaama kohta. See tulenes sellest, et oleks saavutatud punktide tihedus pinnal ≤ 2 cm.

Konkreetses laserskanneri ülesseadmise protsess erines klassikalisest elektrontahhümeetri omast. Esiteks oli instrumendiga kaasas olev tootjapoolne statiiv eriline, instrumendi kinnituskruvi asemel oli eraldi lukustusmehhanism. Teiseks ei tehtud jaamades instrumendi orienteerimist, kuna kõikidest seisudest teostati mõõtmised suvalises koordinaatsüsteemis. Kolmandaks instrumendi loodimine nõudis geodeedilt väiksemat täpsust, kuna instrumendi kaheteljeline kompensator on tööpiirkonnaga $\pm 5^\circ$. Sellest tulenevalt piirduti instrumendi horisonteerimisel statiivil oleva ümarvesiloega.

5.5.1. Hoone väljast mõõdistamine

Jaamade asukoha valik oli hoone väljast ja seest mõõtes erinev, kuna siseruumides kasutati punktipilvede registreerimiseks pabertähiseid, väljast mõõtes punktipilvede ühiseid kattuvaid

osaid. Seega väljast mõõtes tehti hoonele ring peale, kus instrumendi kaugus hoonest ning jaamade omavaheline kaugus jäi umbes 20 - 30 m sisse (Joonis 9). Selline kaugus oli vajalik, et hoone ülemise osa mõõdistamisel laserkiire langemisnurk ei oleks liialt suur. Koordinaatide sidumine toimus andmetöötlaste käigus eelnevalt koordineeritud uste juurde paigutatud 6 tähise abil.



Joonis 9. Laserskanneri asukoha näide hoone väljast mõõtes. Kindelpunktid tähistavad asukohti

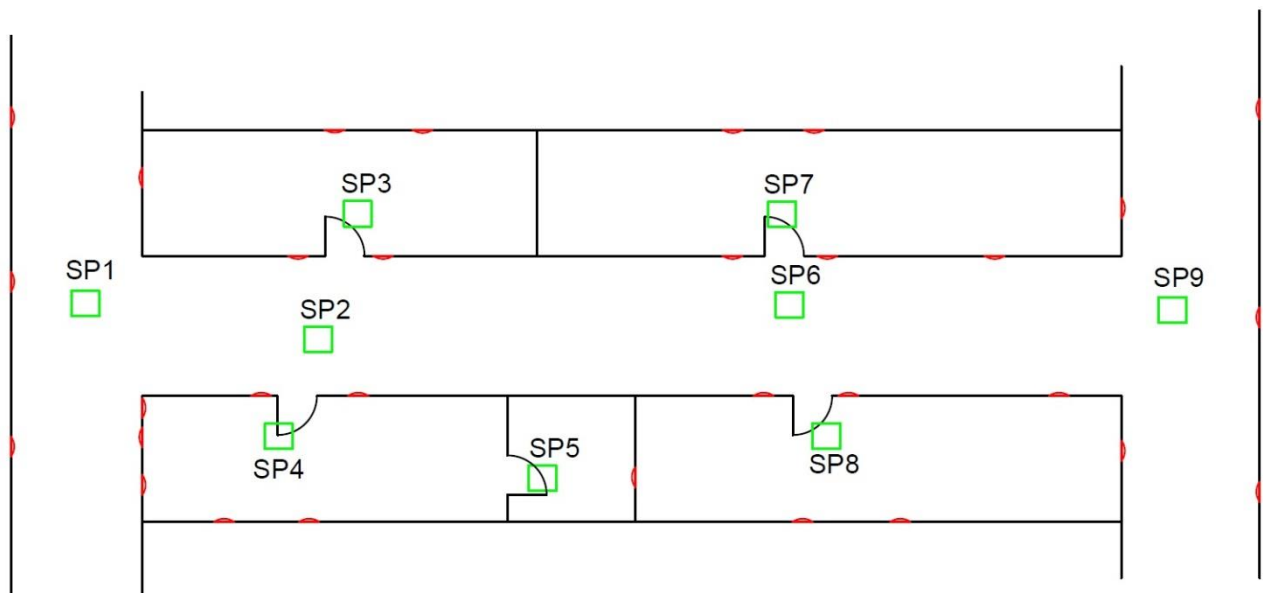
Kui hoone väljas loodi elektrontahhümeetriga mõõdistuskäik polügonomeetriapunktidest, siis hoone siseosas tekkinud mõõdistuskäikudele ei toimunud eraldi tähistele elektrontahhümeetriga koordineerimist. Toetuti laserskanneriga mõõdetule, kuna tähised jäid nii öelda automaatselt punktipilve sisse.

5.5.2. Siseruumide mõõdistamine

Siseruumide mõõdistamisel kasutati vanu olemasolevaid hoone korruste plaane. Nende peale toimus jaamade ning pabertähiste asukoha märkimine töö käigus. Mõõdistamine käis kahe geodeediga, kus üks tegeles instrumendi ülespaneku ja mahavõtmisega ning teine paigutas ruumidesse tähiseid ning tegi plaanile märkmeid.

Kõikides siseruumides kasutati punktipilvede ühendamiseks pabertähiseid, 10 cm, 15 cm ja 30 cm diameetriga. Tähistähe suuruse erinevuse tingis mõõdetava pinna ja skanneri vaheline vahemaa, mida

kaugemal oli pind, seda suuremat tähist kasutati. Tähisted paigaldati esmalt mõõdetava osa koridori seintele, kust algas mõõtmine. Nende asukohaks said ruumide uste vastas olevad seinad ning tähiseid paigutati ka uste kõrvale ja ülesse. Siinpuhul kasutati 10 cm ja 15 cm tähiseid. Samuti pandi koridori otste seintesse suurema diameetriga tähiseid. Mõõtmist alustati koridori algusest, siis liiguti edasi, kuni jõuti esimese ruumi ukseavani. Seejärel paigutati 2 - 3 tähist ruumi sisse, arvestusega, et oleks nähtavus ka ruumi vastas oleva seina tähistele. Teostati mõõtmine ukseava juurest ning siis ruumi seest. Kui ruum oli keeruka kujuga, tuli selles teha mitu mõõtmist. Kui ruum mõõdetud, võeti sealt tähised ära. Sedasi käidi läbi kogu koridor ning selles asuvad ruumid. Joonis 10 on näitlikult kujutatud siseruumide mõõtmist, koos tähiste ning laserskanerimisjaamade paigutusega.



Joonis 10. Siseruumide mõõtmise näidisjoonis. SP – seisupunkt koos järjekorra numbriga, punasega on märgitud tähised, rohelised kastid näitavad laserskanneri asukohta

Hoone siseruumide mõõdistamisel olid osad tähisted statsionaarsed kuni mõõdistustööde lõpuni. Seda seetõttu, et säiliks kontrolli ning lisamõõtmiste võimalus, juhul kui hilisema punktipilve kokkupaneku ajal oleks ilmnenud probleeme. Need tähisted olid paigutatud enamasti treppide ning otsaseinte juurde. Pikemate koridoride keskmised tähisted võeti tavaliselt pärast seal toimunud mõõdistust ära.

Sisemõõtmine seoti välisega kahe sissepääsu juurde paigutatud 6 tähise abil.

5.5.3. Katuse ja pööningu mõõdistus

Lisaks objekti siseruumide mõõdistamisele tehti laserskaneerimine ka pööningul ning katusel. Pööningul oli nähtavus enamasti hea, kuna seal asusid valgustid ning olid olemas ka osad aknad, kust paistis valgust, nii et mõõdistamisega seal probleeme ei tekkinud. Katuse pealt oli vaja teostada mõõtmisi, et saada kätte katuse kõrgus. Selle mõõdistamine oli riskantne, kuna osades kohtades pidi laserskanneri asetama kaldkatuse peale. Juhul kui mõõdistaja pidi ise katusele ronima, siis kinnitati ta traksid ja nõõri abil objekti külge, et elimineerida katuselt allakukkumise oht.

6. PUNKTIPIILVE TÖÖTLUS

6.1. Tööde järjekord

Laserskaneerimistöode mahukam osa oli mõõdistusandmete töötlemine. Pärast igat objektil oldud päeva tõmmati väliandmed instrumendist kontoris olevasse arvutisse. Et igas skaneerimisjaamas tehtud mõõtmised oli oma koordinaatsüsteemiga, siis tuli luua ühtne punktipilv. Kui kõik punktid olid ühtsesse projekti sisse viidud, sai hakata tegelema registreerimisprotsessiga, ehk siirdamisega. Pärast seda tegeleti punktipilve puhastamise ja hõrendamisega. Registreerimine toimus enne puhastust, et ei läheks kaduma ühiseid kattuvaid punktipilve osi ning ei peaks ühte ja sama ebavajalikku osa mitu korda eemaldama. Puhastatud ühisest punktipilvest sai edasi teha plaane, lõikeid ning vaateid.

6.2. Punktipilvede registreerimine

Punktipilvede registreerimisel kasutati Faro Scene andmetöötlusprogrammi. Esmalt teostati pilve kokkupanek korruste kaupa, kus iga korruse jaoks loodi uus projekti fail. Tõmmati programmi sisse kõik korrusel tehtud laserskaneerimised. Et sisemõõdistamisel kasutati tähisteid, siis programmis tuli ära määrata tähiste asukohad pilve sees, kõikidest laserskaneerimisjaamadest eraldi. Kõigepealt kasutati automaatset tähiste tuvastamist ning tuvastamata jäänud tähisted tuli hiljem manuaalselt ära märkida. Pärast seda sai andmetöötlusprogrammis teostada pilvede siirdamist, kasutades selleks vastavat režiimi, „target based“.

Kui korruste kaupa punktipilvede kokkupanek oli tehtud, siis keerati korrused omavahel kokku tuginedes trepikodades mõõdetud tähistele, kasutades sama režiimi nagu eelnevalt.

Hoone väljast mõõdetud punktipilvedel kasutati nende kokkukeeramiseks ühiseid osasid. Esmalt loodi programmis uus projekt ning sisse tõmmati kõik hoone väljas tehtud mõõtmised. Ühiste kattuvate osade järgi teostati registreerimine teistmoodi kui korrustel, kasutades režiimi „cloud to cloud“.

Nii tähiste kui ühiste osade kattuvuse järgi registreerimisel sai valida erinevaid parameetreid, mille alusel punktipilved omavahel liidetakse ning määrata ära täpsusnõuded. Tähiste abil registreerimisel kuvas programm pilvede kokkukeeramisel tähiste asukoha vigu, jälgiti, et keskmine viga ei ületaks 0,005 m, mis on programmis juba vaikimisi valikuks (Foto 5). Juhul kui vead olid osade tähiste puhul suuremad, siis sai need registreerimisprotsessist eemaldada ning tugineda punktipilves paremini määratletud tähistele. Suuremate vigade põhjustajateks olid enamasti laserkiire langemisnurgast või vahemaast tingitud, nii et tähiste keskkoha ei saadud piisava täpsusega määratleda.

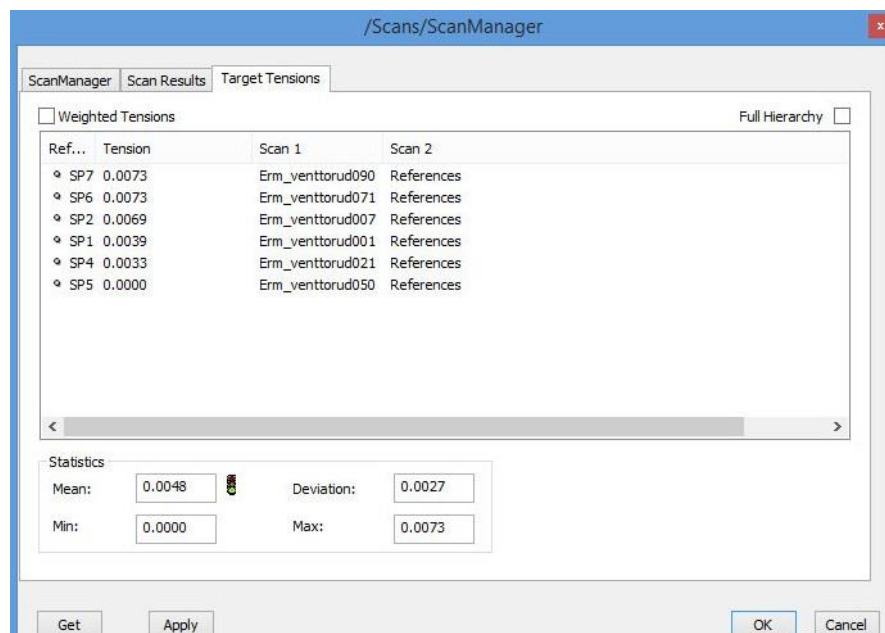


Foto 5. Faro Scene programmis vigade kuvamine

Punktipilvede registreerimisel tuli alati teostatud töö visuaalselt üle vaadata, jälgida ega programm polnud kuskil nähtavalt valesid osasid omavahel ühendanud.

Kui väline ja sisemine punktipilv olid registreeritud, tuli need omavahel kokku viia. Seda tehti hoone sissepääsude juurde paigutatud ning siseruumides asunud tähiste kaudu.

Faro scene programmis on eraldi koht punktide koordineerimiseks referentssüsteemi abil. Kuna hoone seoti riikliku koordinaatsüsteemiga tahhümeetri abil kasutades selleks 6 tähist, siis nende abil keerati punktipilv ühtsesse süsteemi. Eelnevalt kokkupandud punktipilv tuli lukustada, et see protsess oleks teostatav. Tähiste koordinaadid sisestati tekstifaili, kus määrati punkti nimi, x, y koordinaadid ja kõrgus ning viidi programmi sisse.

6.3. Punktipilve puhastamine, hõrendamine

Kui kogu hoone punktipilv oli registreeritud ja pööratud õigesse koordinaatsüsteemi sai hakata tegelema puhastuse ning hõrendamisega. Punktipilve puhastusel eemaldatai liikuvad objektid, peegeldused ning hoonest välja jäävad osad. Alles jäeti hoones mõõdistatud riulid, toolid, kapid jms, et hiljem plaanide koostamisel oleks aru saada, millega on tegemist, muidu oleksid nende kohtade peale jäänud tühjad augud.

Puhastamise kriteeriumid ning selle ulatus tulevad sõltuvalt tellijapoolsest ülesandest. Kui on vaja ainult puhast põrandapinda, siis eemaldatakse sellelt kõik üleliigne. Antud mõõdistuse puhul ei olnud tarvis ruumide siseosas eemaldada hoone konstruktsiooni mitte kuuluvad osad.

Hõrendamine teostati selliselt, et punktide tihedus pinnal jääks 2 cm sisse. Faro andmetöötlus programmis sai hõrendamist teha punktipilve välja eksportimisel (Foto 6). Määrati ära mitmes punktide veerg ning rida eksportida, nii et hiljem oleks punktide tihedus ülesandele vastav. Teostatud töö salvestati .ptx või .pts formaati, et hiljem saaks seda avada erinevate programmidega.

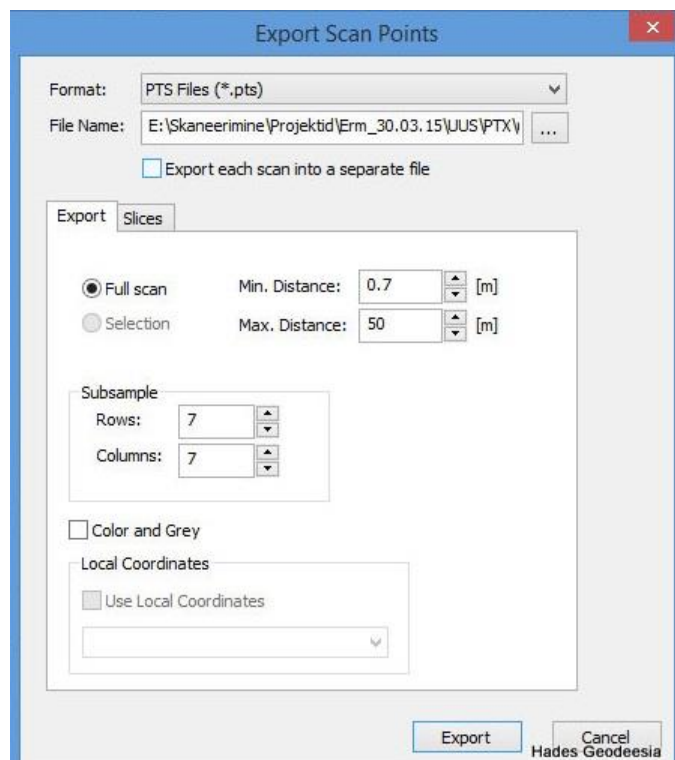


Foto 6. Punktide hõrendamine Faro Scene programmi abil

6.4. Plaanide, lõigete, vaadete koostamine

Plaanid, lõiked ja vaated koostati Revit structure tarkvaraga. Enamasti kasutatakse seda mudeldamiseks, kuid head võimalused on ka 2D plaanide, lõigete jms tegemiseks.

Programmi sisselaetud vana raadiomaja punktipilvest tehti uus andmebaas .rcs ja .rcp formaadis. Vastavate osade kontuuride kuvamiseks tuli manuaalselt üle joonistada seinte, uste, treppide, liftide, akende ja kõige muu asukoht. Sedasi käidi üle kõik korrused, nende plaanide koostamiseks, hoone välisosa, vaadete koostamiseks jne. Plaanidel märgiti ära lae, põranda ja talade kõrgused, lõigete teljed ning hoones olnud osad nagu rõdu, sein, trepp ja uks pandi eraldi kihtidesse ja erivärvi. Vaadetel märgiti ära akende, uste, katuse, korstnate, treppide kõrgused ning suurema detailsusega oli välja joonistatud fassaadi kuju. Lõigete puhul lisaks kõrguste märkimisele, sai kuvada informatsiooni pööningu talade, treppide käsipuude jms. konstruktsioonile. Tellijale prinditi joonistatud osad 1:200 mõõtkavas ning anti ka failid .dwg formaadis.

7. TEOSTATUD TÖÖDE ANALÜÜS

Objektile tehtud laserskaneerimistöodel ei tulnud ette suuremaid takistusi. Tähiste paigutamisega ning jaamade asukoha valikuga objektile saadi hakkama, seda tõestas hilisem punktipilvede kokkupanek. Faro laserskanner sobis etteantud lähteülesande lahendamiseks hästi, kuna nõutud punktide tihedus pinnal sai saavutatud ning kogu hoone sai mõõdetud ca 10 tööpäevaga. Hilisemaid lisamõõtmisi objektile ei olnud tarvis teha. Andmetöötluse osas oli probleeme tähiste automaatse tuvastamisega, paljude asukohta pidi ise määrama. Punktipilvede registreerimisel leiti osade tähiste puhul suuremaid vigu, kuid neid oli võimalik mitte kaasata ning ikkagi leida piisavalt ühiseid osasid, et pilved omavahel ühendada.

Punktipilvede töötlemiseks mõeldud programmid kasutavad tasandamiseks oma algoritme, mille sisuline pool on kasutajale nähtamatu. Parameetreid saab küll muuta ning vead kuvatakse, kuid see käib programmi siseselt, automaatselt.

Juhul kui tellija ei oleks nõudnud hoonest punktipilve, siis oleks saanud sama töö ära teha ka elektrontahhümeetriga, kuid võrreldes eelnevalt TKTK-s tehtud lõputöödega, mis olid kirjutatud hoonete mõõdistamise kohta elektrontahhümeetriga, nt. L. Ehrenpreis „Hoonete Mõõdistamine Sõjatehase „Arsenal“ Näitel“ (2014), leidub laserskaneerimismeetodi puhul vähem komplikatsioone. Võrreldes tahhümeetrist mõõdistamist laserskaneerimistöodega raadiomaja baasil, saab välja tuua mõned skaneerimist soosivad asjaolud:

- 1) vana raadiomaja fassaad on kuigivõrd keeruka ehitusega, elektrontahhümeetriga mõõtes oleks see tähendanud kõikidele hoone stiilile omapäraste kaunistuselementide eraldi mõõdistamist. Siit tuleb lisa ajakulu ning eksimuse võimalus: instrumendi ülespanek; orienteerimine; hoone detailide tähtsamate punktide mõõdistamine, nende leidmine arvestades hilisemat plaanide koostamist; punktidele suunamise viga; punktide nimetus;
- 2) siseruumide mõõdistamisel jälgimine, et kõik detailid saaksid mõõdetud kehtib mõlema meetodi puhul. Iga akna, ukse, tala nurk tuleb tahhümeetriga mõõtes mõõtjal endal üles otsida. Laserskaneerimise puhul tuleb garanteerida nähtavus instrumendist mõõdetava pinnani, eraldi punktidele suunamist ei toimu;

- 3) nähtavus – laserskanner otseselt ei vaja punktide mõõtmiseks valgust. Hoone väljast mõõtmine saab toimuda ka õhtutundidel, hämaras;
- 4) hoonesisese mõõdistuskäigu rajamine – tahhümeetriga tuleb luua eraldi käigud, et saada teha mõõtmisi hoone seest. Laserskanneriga mõõtes on mõõdistuskäigu punktideks tähised, need mõõdetakse mõõdistustööde käigus jooksvalt. Et laserskaneerimisel saavutatakse suurem detailsus, andmete paljususe tõttu, siis on ühiseid osasid, pindasid lihtsam leida, mille järgi mõõdistatud punktid omavahel siduda.

KOKKUVÕTE

Lõputöös on kirjeldatud hoonete mõõdistamist laserskaneerimismeetodil. Välja on toodud erinevad mõõdistustehnoloogiad, nende kasutusvõimalused ning võrreldud neid laserskaneerimisega. Mõõdistuskäikude teoreetiline osa kirjeldab lisaks klassikalisele lähenemisele antud mõõdistuse puhul rakendatud teooriat, ehk mille poolest üks erineb teisest.

3D skannerite peatükis on kirjeldatud valguskiirgusskannerite ülesehitust detailsemalt, kus on välja toodud mõõtmisega seotud probleemid ning veallikad. Laserskanneriga mõõtmisel punktide asukoha määramise teooriat on käsitletud. On ära kasutatud ning konteksti viidud laserskanneritele omaseid mõisteid, nagu langemisnurk, laserkiire divergents, divergentsi nurk ning nendega kaasas käivad valemid.

Töö praktilises osas on läbi käidud kogu objekti mõõdistuse protsess. Alustatud on objekti kirjeldamisest, kus tuuakse välja mõõdistamise lähteülesanne ning tööde ettevalmistus. Teostatud mõõdistustöödel kasutatud instrumendid on ära nimetatud ning antud nende tootjapoolsed spetsifikatsioonid. Esimese osa moodustavad hoonesisesed ning välised laserskaneerimistööd, kus lisaks seletavale tekstile on teostatud mõõdistamise mõistmiseks abiks joonised. Teise osa moodustab andmetöötlus, kus käsitlust leiab punktipilvede registreerimine ühiste osade ning tähiste kaudu, punktipilve puhastus ning selle nõuded ja hõrendamine. Punktipilve töötamise osa lõpus on plaanide, lõigete ja vaadete koostamise lühiülevaade.

Hoone mõõdistamine laserskaneerimismeetodil pakub head alternatiivi tahhümeetrilisele mõõdistusele, tänu skanneri instrumentaalsete omaduste pidevale arengule. Punktipilve töötamise programmid võimaldavad registreerimist ühiste osade ning tähiste abil üha rohkem automatiseeritult, mis tähendab tööde tegemisel ajakulu ning inimliku eksimise võimalikkuse vähenemist. Võrreldes tahhümeetrilise mõõdistusega on laserskaneerimisel palju eeliseid, mis soosivad selle kasutust hoonete mõõdistamisel.

SUMMARY

Laser scanning of the Estonian Public Broadcasting's old building.

When a building needs renovation or a project for new construction then detailed information about the object is needed. This information is usually given in a form of plans, 3D models, various views from different angles of the building, etc. These can be created after a thorough survey of the building has been done. Depending on the desired outcome and accuracy of measurements, different surveying techniques and instruments can be used.

This thesis is about carrying out a building survey using the laser scanning method. The first paragraph explains different methods that can be used to measure buildings and provides a short comparison with laser scanning. Followed by a paragraph of traverses and their adjustment techniques and an insight into how traverses can be measured while using a laser scanner. The major theoretical part of this paper is dedicated to 3D scanners, their build, accuracy and error related issues. A more comprehensive analysis is given on time of flight and phase based laser scanners and their targets.

The practical part of this paper gives an overview of the object and the process followed to make plans, views and cross-sections from point clouds. Faro Focus 3D laser scanner was used for making point clouds of the building. Measurements from the inside of the building were taken with target based registration, the outside measurement was done by using registration with point cloud overlapping. A total station was used to get the measured point coordinates into Estonia's national L-Est 97 system, by coordinating paper targets that were placed outside the building from known points.

In conclusion, this thesis gives an overview of the problems that occurred and the problems that were avoided during the laser scanning process and point cloud data manipulation, also gives a brief valuation of this method by comparing the method to tacheometry.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Riigi Teataja Lisa, 71, 1231, Ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise kord, 2007.
- [2] R. Näppi, Hoonete mõõdistamine, 2008, Loengukonspekt.
- [3] J. Randjärv, Geodeesia I osa. Tartu: Geoprof-R, 2006, vol. I, 226 lk.
- [4] C. Ordóñez, J. Martínez, and P. Arias, "Measuring building façades with a low-cost close-range photogrammetry system," *Automation in Construction*, vol. 19, no. 6, pp. 742–749, oktoober 2010.
- [5] F. Dai and M. Lu, "Assessing the Accuracy of Applying Photogrammetry to Take Geometric Measurements on Building Products," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 136, no. 2, pp. 242–250, veebruar 2010.
- [6] J. Randjärv, Geodeesia I osa. Tartu: Geoprof-R, 2006, vol. II, 170 lk.
- [7] R. Ranne, Geodeesia alused. Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2006, vol. II, 76 lk.
- [8] H. Jürgenson, "Mõned standardid ja uued tehnoloogiad elektrontahhümeetrias," *Geodeet*, pp. 34-37, 2005.
- [9] W. Sprinsky, "Transverse Adjustment for Observations from Modern Survey Instrumentation," *Journal of Surveying Engineering*, vol. 113, no. 2, pp. 70-81, juuni 1987.
- [10] Wikipedia, the free encyclopedia. [Online]. http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner
- [11] T. Mill, Terrestriline laserskaneerimine, 2007, loengumaterjal.
- [12] A. Haring, E. Vozikis, K. Kraus G. Vozikis, *Laser Scanning: A New Method for Recording and Documentation in Archaeology*, mai 22-27, 2004.
- [13] Y. Reshetyuk, *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*, 2009.
- [14] A. Marbs W. Boehler, "Investigating Laser Scanner Accuracy," *i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology*, Saksamaa, 2003.
- [15] S. Aule, *Mittestandardse kujuga ehitiste laserskaneerimine ja punktipilve põhjal modelleerimine TTÜ veetorni näitel: Magistritöö*, 2014.
- [16] J. Armston, J. Muir, N. Goodwin, D. Culvenor, P. Puschel, M. Nystrom, K. Johansen G.

- Newnham, "Evaluation of terrestrial laser scanners for measuring vegetation structure," 2012.
- [17] Leica-Geosystems. Targets for the Leica ScanStation C10 and HDS6200. [Online]. http://hds.leica-geosystems.com/en/Targets_19143.htm
- [18] UNAVCO. UNAVCO. [Online]. <http://facility.unavco.org/kb/questions/794/Cylindrical+Target+%28Red%29>
- [19] The 3D Laser Survey Urbica. Frequently asked questions. [Online]. http://www.urbica.net/en/06_support/laser-survey_faq.php
- [20] T. Mill, Hoonete mõõdistamine, Laserskaneerimine, 2014, loengumaterjal.
- [21] R. Lindenbergh, M. Menenti, P. Teunissen S. Soudarissanane, "Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 66, no. 4, pp. 389–399, juuli 2011.
- [22] B. Van Genechten, Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications, 2008.
- [23] Marek Pedask. Delfi. [Online]. <http://pilt.delfi.ee/album/205411/?view=blog&page=9>
- [24] Hydronav Services. Hydronav. [Online]. <http://www.hydronav.com/product.php?catId=143>
- [25] FARO. North American Survey Supply. [Online]. <http://www.nasurvey.com/wp-content/uploads/2012/03/Faro-Focus3D-Tech-Sheet.pdf>
- [26] Constructionequipro. Constructionequipro. [Online]. <http://constructionequipro.com/total-stations-accessories/68-topcon-gpt-9003a-3-robotic-total-station.html>
- [27] Topcon Europe Positioning B.V. ToppTopo. [Online]. <http://www.blinken.no/dokumenter/pdf/topcon/Leaflet%20GPT9000A-A4-euro-final.pdf>

LISAD

Lisa 1. III korruse plaan

Lisa 2. Keldri plaan

Lisa 3. Pööningu plaan

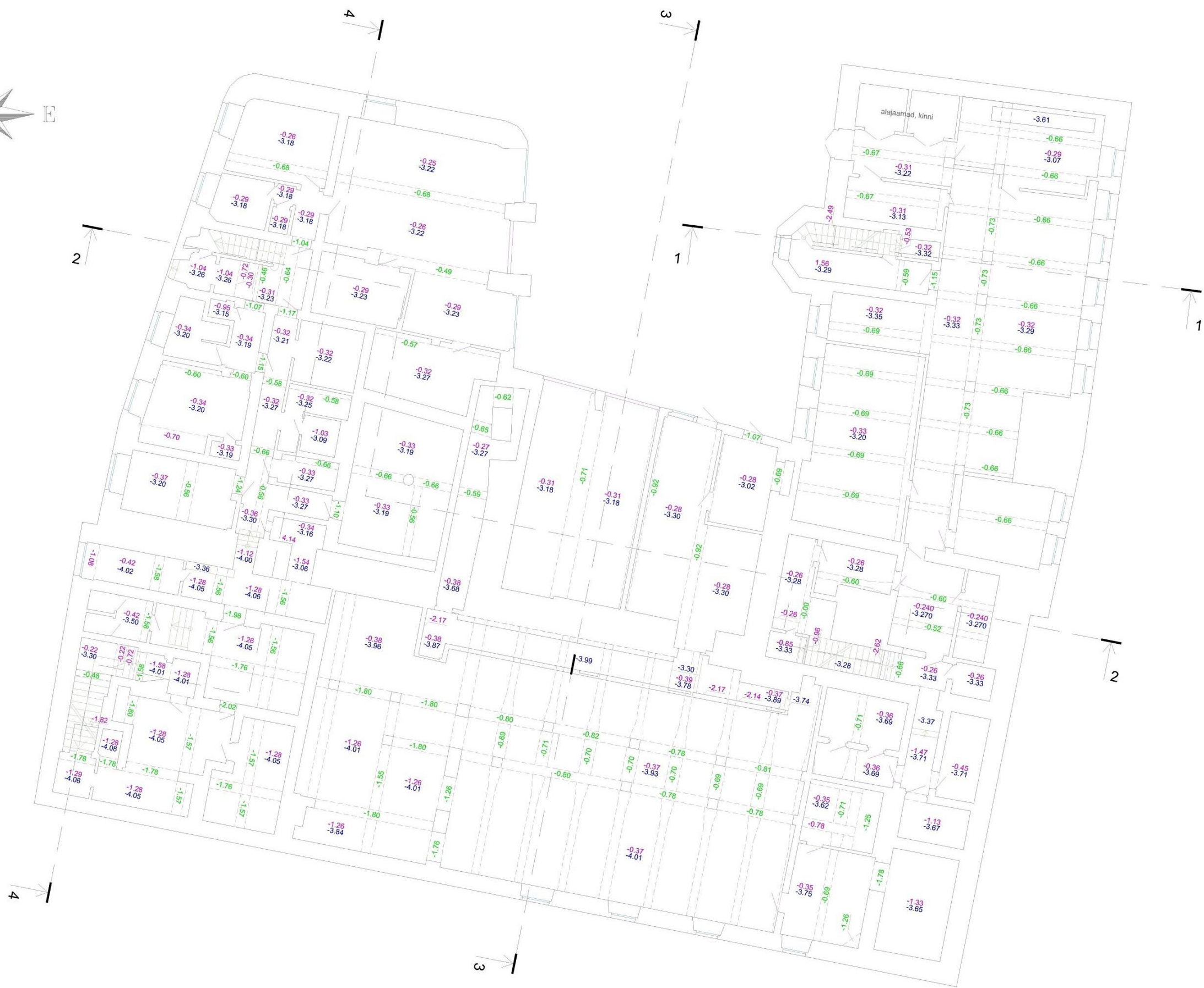
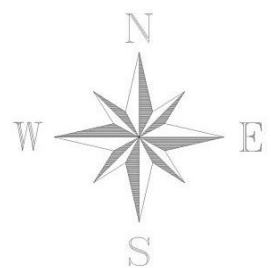
Lisa 4. Fassaad, vaade lõunast

Lisa 5. Fassaad, vaade põhjast

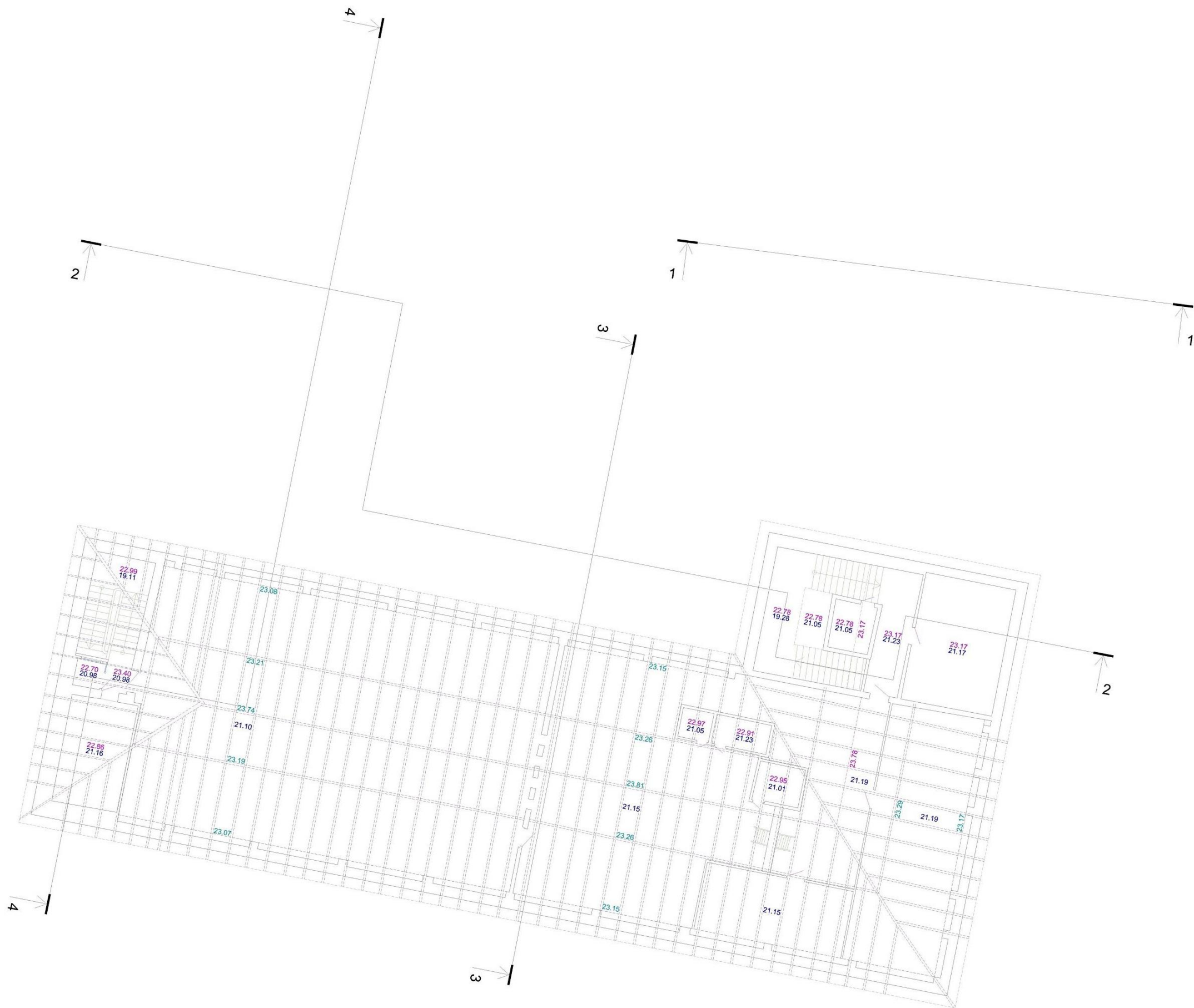
Lisa 6. Lõige 2-2

Lisa 7. Lõige 3-3

Lisa 2. Keldri plaan



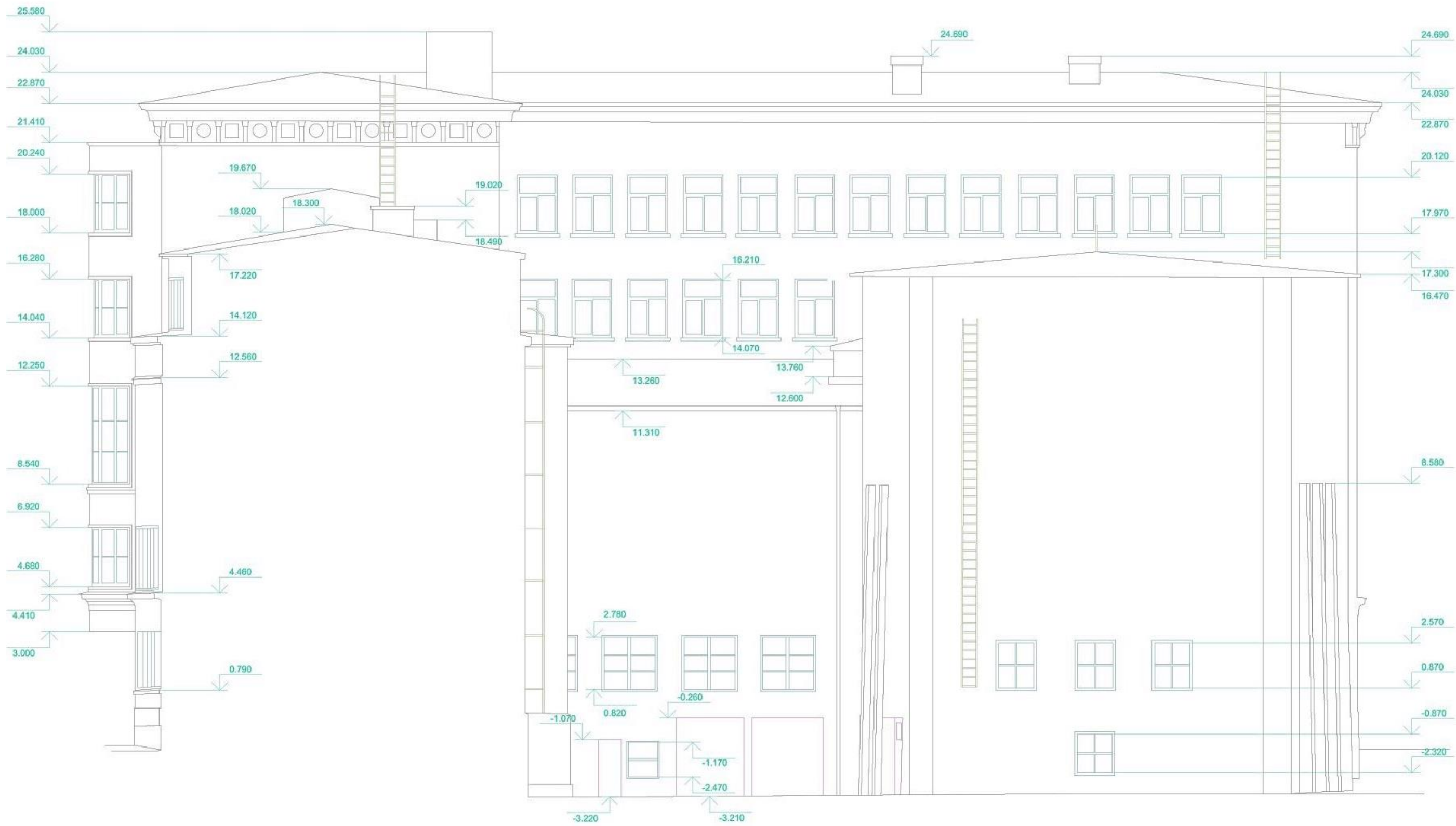
Lisa 3. Pööningu plaan



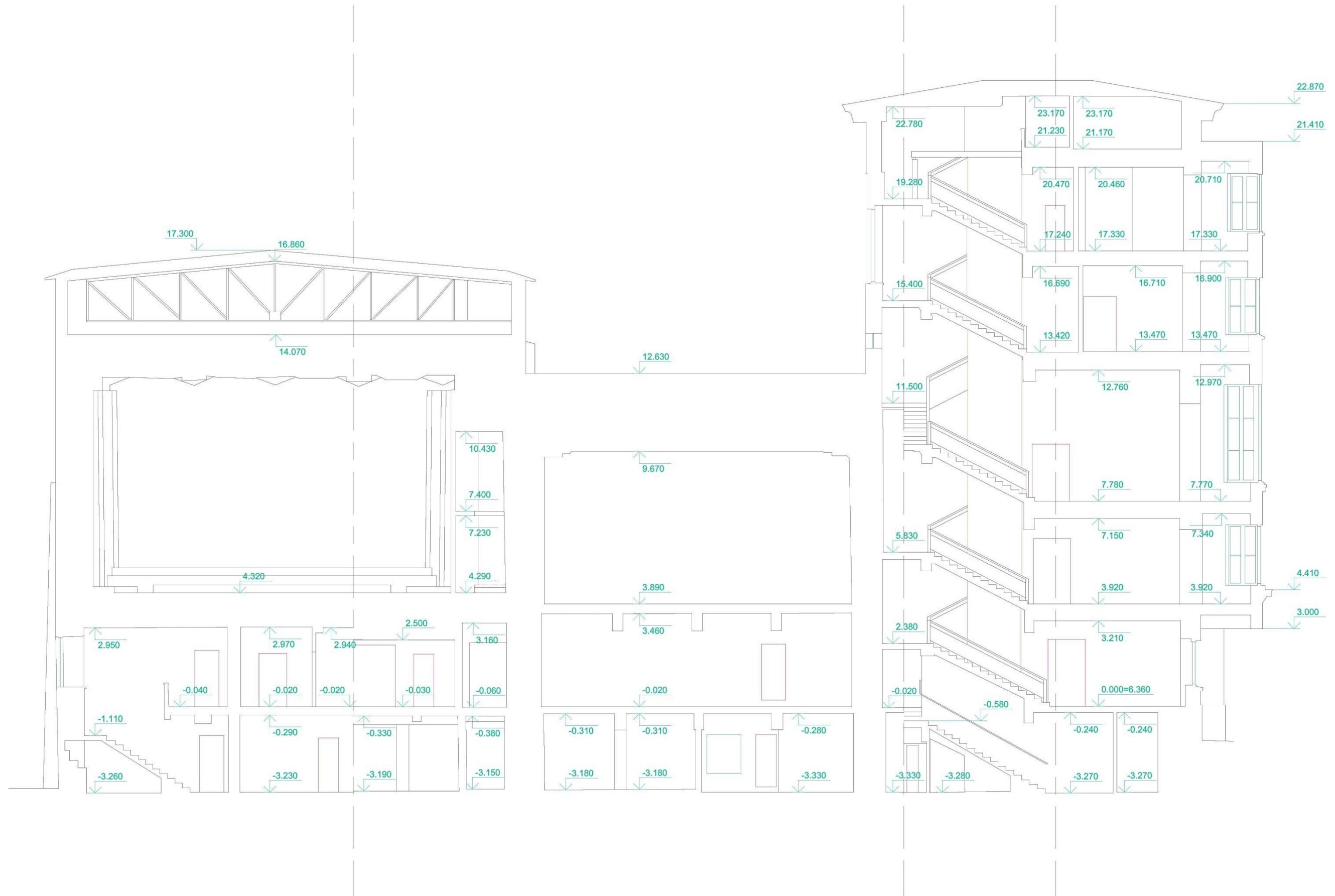
Lisa 4. Fassaad, vaade lõunast



Lisa 5. Fassaad, vaade põhjast



Lisa 6. Lõige 2-2



Lisa 7. Lõige 3-3

