



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

SILDKRAANATEE LASERSKANNERIGA MÕÕDISTAMISE TÄPSUSE APROBEERIMINE

PRECISION EVALUATION OF CRANE RAILS CONTROL MEASUREMENTS BY TERRESTRIAL LASER SCANNING

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Emil Haljend

Üliõpilaskood 176493 EAXM

Juhendaja: MSc Vello Kala
MSc Sander Varbla

Tallinn, 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 2020.

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2020.

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2020.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Emil Haljend, üliõpilaskood 176493 EAXM
Õppekava, peeriala: Ehitusgeodeesia, EAXM
Juhendaja: MSc Vello Kala
Juhendaja: MSc Sander Varbla

Lõputöö teema: SILDKRAANATEE LASERSKANNERIGA MÕÕDISTAMISE TÄPSUSE
APROBEERIMINE

PRECISION EVALUATION OF CRANE RAILS CONTROL MEASUREMENTS BY
TERRESTRIAL LASER SCANNING

Töö keel: eesti keel Lõputöö esitamise tähtaeg: „.....“ 2020 a

Üliõpilane: Emil Haljend „.....“ 2020 a
/allkiri/

Juhendaja: MSc Vello Kala „.....“
2020 a /allkiri/

Juhendaja: MSc Sander varbla „.....“
2020 a /allkiri/

SISUKORD

SISUKORD.....	4
JOONISTE LOETELU	6
TABELITE LOETELU	7
TÖÖS KASUTATUD LÜHENDITE LOETELU.....	8
SISSEJUHATUS	9
1. KRAANATEED	11
1.1 Kraanateede tutvustus.....	11
1.2 Sildkraanatee montaaž	14
1.3 Geodeetilised tööd sildkraanateedel.....	15
1.3.1 Ohtutusnõuded	16
1.3.2 Sildkraanatee mõõdistusmeetodid	16
1.3.3 Varasemad uuringud.....	18
2. TLS MEETODIL SILDKRAANATEE MÕÕDISTAMISE PROBLEEMI FORMULEERIMINE ..	
.....	21
3. LASERSKANEERIMISE OLEMUS	22
3.1 Terrestriline laserskaneerimine (TLS).....	22
3.1.1 Laserimpulss-skanner	23
3.2 Laserskanneri kiire langemisnurga mõju täpsusele	23
4. MAGISTRITÖÖS KASUTATUD SEADMED	25
4.1 Elektrontahhümeeter Trimble S5.....	25
4.2 Laserskanner Leica C10.....	26
4.3 Korvtõstuk Genie Z 45/25 RT J	28
5. LÕPUTÖÖ ANDMETÖÖTLUSES KASUTATUD MÕÕDISTUSE KIRJELDUS	30
5.1 Uuritav objekt.....	30
5.2 Alusvõrgu loomine.....	31
5.3 Mõõdistuse välitöö ettevalmistus	33
5.4 Tahhümeetrilise mõõdistuse kirjeldus	34
5.5 TLS mõõdistuse kirjeldus.....	37

5.6	Töös kasutatud korvtöstukiga töötamise ohutusnõuded.....	39
5.7	Täpsusnõuded.....	40
6	MÕÕDISTUSANDMETE TÖÖTLEMINE	43
6.1	Tahhümeetrilise mõõdistuse andmetöötlus	43
6.2	Leica Cyclone.....	43
6.3	Autodesk ReCap 2019.....	45
6.4	AutoCad Civil 3D 2018	45
7	TÖÖ TULEMUSTE ANALÜÜS.....	47
7.1	TLS ja tahhümeetrilise mõõtmiste plaanilised hälbed	47
7.2	TLS ja tahhümeetriliste mõõtmiste kõrguslikud hälbed	49
7.3	Mõõtmiste täpsushinnang	50
7.4	Ettepanekud töö tulemuste parandamiseks.....	52
	KOKKUVÕTE	56
	SUMMARY.....	58
	KASUTATUD KIRJANDUS	60
	LISA	63
	Lisa 1 Ülevaade tänapäevastest kraanateede mõõdistusvankritest	63
	L1.1 Konecranes mõõdistusvanker.....	63
	L1.2 Artis mõõdistusvanker.....	63

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1 Pukk-kraana [2]	12
Joonis 1.2 Tornkraana [4].....	12
Joonis 1.3 Portaalkraana [3]	13
Joonis 1.4 Rippkraana [6].....	13
Joonis 1.5 Sildkraana ja selle osad [modifitseeritud 5]	14
Joonis 1.6 Sildkraanateede tahhümeetrilisel mõõdistamisel kasutatud prisma-süsteem [22].....	19
Joonis 1.7 Riegl VZ-400 laserskanneriga mõõdetud punktipilv [22]	20
Joonis 3.1 Laserimpulss-skanneri tööpõhimõtte [16].	23
Joonis 3.2 Laserkiire langemisnurk	24
Joonis 4.1 Tahhümeetrilistel mõõdistustel kasutatud Trimble ActiveTrack 360° prisma [30].....	26
Joonis 4.2 A4 suurusel alusvõrgu tihenduspunkti tähistatud punktide kindlustamiseks hoone seinale.....	27
Joonis 4.3 Leica C10 vaatevälja ulatus [26]	27
Joonis 4.4 Elektrontahhümeeter Trimble S5 ja korvtõstuk Genie Z 45/25 RT J tagaplaanil	29
Joonis 5.1 Väimelas olev ehitusjärgus sildkraanatee,.....	30
Joonis 5.2 Alusvõrgu rajamise skeem.	32
Joonis 5.3 Kraanatee elektrontahhümeetriga mõõdistamise mõõdistusskeem.	33
Joonis 5.4 Instrumendi kinnitusrakis	35
Joonis 5.5 Rakisele kinnitatud elektrontahhümeeter talal	36
Joonis 5.6 Laserskanneri seisupunktide ja kindelpunktide skeem. ed.....	38
Joonis 5.7 Laserskanner rakisele kinnitatuna.....	39
Joonis 5.8 Kahe kraanarelsi liitekoht, mis vajab reguleerimist	41
Joonis 6.1 Georefereeritud punktipilv puhastamata kujul	44
Joonis 6.2 Georefereeritud mudelist puhastatud kraanatee relsid.....	45
Joonis 6.3 Punktipilvest välja joonestatud relsi külge	46
Joonis 7.1 Skeem laserskanneri ja tahhümeetriga mõõdetud plaanilistest hälvetest projekt teljest.	48
Joonis 7.2 Skeem laserskanneri ja tahhümeetriga mõõdetud kõrguslikest hälvetest suhtelise nullkõrguse suhtes.	50
Joonis 7.3 Leica Cyclone programmiga tehtud pilt A relsi andmemudelist.....	53
Joonis 7.4 Laserskanneri seisupunktide astetus relsil.....	54
Joonis L1 Firma Conecranes mõõdistusvanker 360° prisma-reflektoriga [1].....	63
Joonis L2 Süsteemi ARTIS mõõdistusvanker [7].....	64

TABELITE LOETELU

Tabel 4.1 Elektrontahhümeetri Trimble S5 ja laserskanneri Leica C10 peamised tehnilised spetsifikatsioonid	25
Tabel 5.1 Tellija poolt antud kraanatee täpsuste tabel (ISO 12488-1)	42
Tabel 7.1 Tahhümeetri ja TLS plaanilised hälbed ja mõõtmistulemuste vahed	47
Tabel 7.2 Tahhümeetri ja TLS kõrguslikud hälbed ja telgede suhtelised vahed lähtekõrguse suhtes.....	49
Tabel 7.3 Täpsushinnang isetäpsete mõõtmiste järgi.....	51
Tabel 7.4 Täpsushinnang võrdtäpsete mõõtmiste järgi	52

TÖÖS KASUTATUD LÜHENDITE LOETELU

2D, 3D – (2-, 3-dimensional) kahe-, kolmemõõtmeline;

AT360 – Trimble ActiveTrack 360 prisma;

DR (direct reflex) – otsene peegeldus;

EH2000 - Eestis kasutusel olev kõrgussüsteem;

GOST – Venemaa riiklik standard;

ISO - rahvusvaheline standardiorganisatsioon;

KRV – keskmine ruutviga;

Lambert-Est-97 – Eestis kasutusel olev kaardiprojektsioon;

N - njuuton, jõu mõõtühik SI-süsteemis;

ppm (parts per million) – üks miljondik (1/1 000 000) osa;

SD (Standard Deviation) – standardhälve;

SNiP – ehitusnormid ja -reeglid, mida kasutati endises NSV Liidus;

TLS (Terrestrial Laser Scanning) – terrestriline laserskaneerimine;

TOF (Time-of-Flight) - objekti kaugus arvutatakse signaali edasi tagasi liikumiseks kuluva aja põhjal.

SISSEJUHATUS

Sildkraanateede mõõdistamine on nõudlik ülesanne, mille peamine keerukus seisneb kõrgustes töötamises. Seetõttu on töö tegemine ohtlik ning ohutusnõudeid järgides ka aeganõudev. Tänapäeval tehakse taolisi töid reeglina elektrontahhümeetriga, mis eeldab, et mõõtja peab reflektoriga kõik punktid füüsiliselt läbi käima. Elektrontahhümeetril on olemas ka lasertäpiga mõõtmise võimalus. Siiski pole antud ülesande puhul mõistlik lasertäpiga mõõtmist kasutada, kuna seda on ebasoodsates oludes keeruline täpselt mõõtmist vajavasse punkti suunata. Vajaliku täpsuse saavutamine nõuab ideaalseid tingimusi; näiteks ei pruugi laserkiir peegelduda liiga suure nurga all tagasi. Kui laserskanner mõõdab lasertäpi meetodil palju punkte ühte alasse, millest saab mõõdistatava pinna detailselt välja joonestada, siis elektrontahhümeetri laserkiirega mõõdetakse punkte ükshaaval.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks ongi võrrelda sildkraanatee mõõdistustulemuste erinevusi elektrontahhümeetria ja laserskaneerimise vahel. Viimast on kraanateede mõõdistamiseks vähe uuritud. Kui varasemates uuringutes on laserskanneriga mõõdetud relsist kõrgemal või samal kõrgusel olevalt tasapinnalt, siis selles töös mõõdistati relsile asetatud rakiselt. Mõõtmisi tehti neljast erinevast jaamast – mõlemal relsil kaks jaama. Optimaalse tulemuse saamiseks asusid jaamad relsi esimesel ja teisel kolmandikul.

Skanneriga mõõdistamisel pole geodeedil vaja mõõdistatava punkti asukohas füüsiliselt viibida. Instrument skaneerib vajaliku piirkonna ning koostab detailse punkt pilve, millest saab välja joonestada vajaminevad kraanatee relsid. Kuna punkt pilv seotakse ehituse koordinaatsüsteemiga, on võimalik leida relsi telgedele kõrguslikud ning plaanilised hälbed projektikohase telje suhtes.

Uuritud kraanatee mõõdistati elektrontahhümeetriga Trimble S5 ja laserskanneriga Leica C10. Kahe meetodi erinevuste põhjal antakse laserskaneerimisele täpsushinnang ning analüüsitakse, kas seda on tulemuslik rakendada sildkraanateede mõõdistamistel.

Magistritöö katseline osa teostati objektil, mis asub Võrumaal, Võru vallas, Väimela alevikus. Uuritav objekt kujutas endast ehitusjärgus tööstushoonet, kuhu püstitati neli sildkraanateed. Tööde tegemise hetkel oli rajatavas hoones paika pandud kraanateede jaoks mõeldud I-talad, mille peale olid keevitatud ristküliklõikega relsid.

Magistritöö kirjeldav osa koosneb seitsmest peatükist. Esimeses peatükis kirjeldatakse erinevaid kraanateid, tutvustatakse sildkraanatee montaaži töid ja mõõdistamise meetodeid, tutvustatakse ohutusnõudeid ning tehakse ülevaade varasemast samalaadsest uurimustööst. Teises peatükis formuleeritakse magistritöö põhiprobleem. Kolmandas peatükis kirjeldatakse laserskaneerimise põhimõtteid. Neljandas peatükis esitatakse töös kasutatud instrumente ja mehhanisme. Viies peatükk keskendub välitöödele: antakse ülevaade katseobjektile tehtud töödest ning ohutus- ja täpsusnõuetest. Kuuendas peatükis keskendutakse andmetöötlusele. Viimases peatükis analüüsitakse töös saadud andmeid ja antakse neile täpsushinnang.

Töö autor soovib tänu avaldada OÜ Maamõõdu ja Arhitektuuribüroo geodeet Ülo Haljendile, kelle abil leiti katseobjekt, ning kes abistas ja juhendas tahhümeetriliste mõõtmiste läbi viimist. Laserskaneerimise andmetöötluse osas tänab magistrant saadud konsultatsioonide eest PhD Tarvo Milli ja PhD Kalev Julget ning insener Martti Putnikut. Autor tänab juhendajaid Vello Kala ja Sander Varblat meeldiva koostöö eest. Töös kasutatud laserskanner Leica ScanStation C10 ja litsentseeritud tarkvara Leica Cyclone on soetatud Eesti teaduse infrastruktuuride teekaardi objekti „Eesti Keskkonnaobservatoorium“ (finantseerimisallikas 3.2.0304.11-0395, projekt AR12019) poolt eraldatud vahenditest. Töös kasutatud elektrontahhümeeter Trimble S5 kuulub OÜ Maamõõdu ja Arhitektuuribüroole.

1. KRAANATEED

Käesolevas peatükis antakse ülevaade erinevatest kraanateedest, kahest sildkraanateede montaaži meetodist, geodeetilistest moodsustest sildkraanateedel, ohutusnõuetest ning varasemalt tehtud uuringutest.

1.1 Kraanateede tutvustus

Mitmesugustel tööstus-, transpordi- ja ehitusaladel kasutatakse suurte raskuste tõstmiseks kraanasid – tõstemasinaid, mis on ettenähtud raskuste vertikaalseks tõstmiseks ja nende horisontaalseks ümberpaigutamiseks. Raskuste ulatuslikumaks ümberpaigutamiseks on tarvis, et kraana liiguks piki rööbasteed. Rööbasteede asendi järgi võib kraanasid jaotada kaheks suureks liigiks:

- maapealse rööbasteega kraanad: pukk-kraanad (vt joonis 1.1) ja selle ümber laadimissillad välistel laoplatesidel; tornkraanad ehitustel (vt joonis 1.2); portaalkraanad sadamates (vt joonis 1.3);
- maa kohal asetseva rööbasteega kraanad: rippkraanad (vt joonis 1.4) tehaste tsehhides kuni 5 t raskuste tõstmiseks; sildkraanad (vt joonis 1.5) lahtistel kraanaestakaadidel ja tehaste tsehhides.



Joonis 1.1 Pukk-kraana [2]



Joonis 1.2 Tornkraana [4]



Joonis 1.3 Portaalkraana [3]

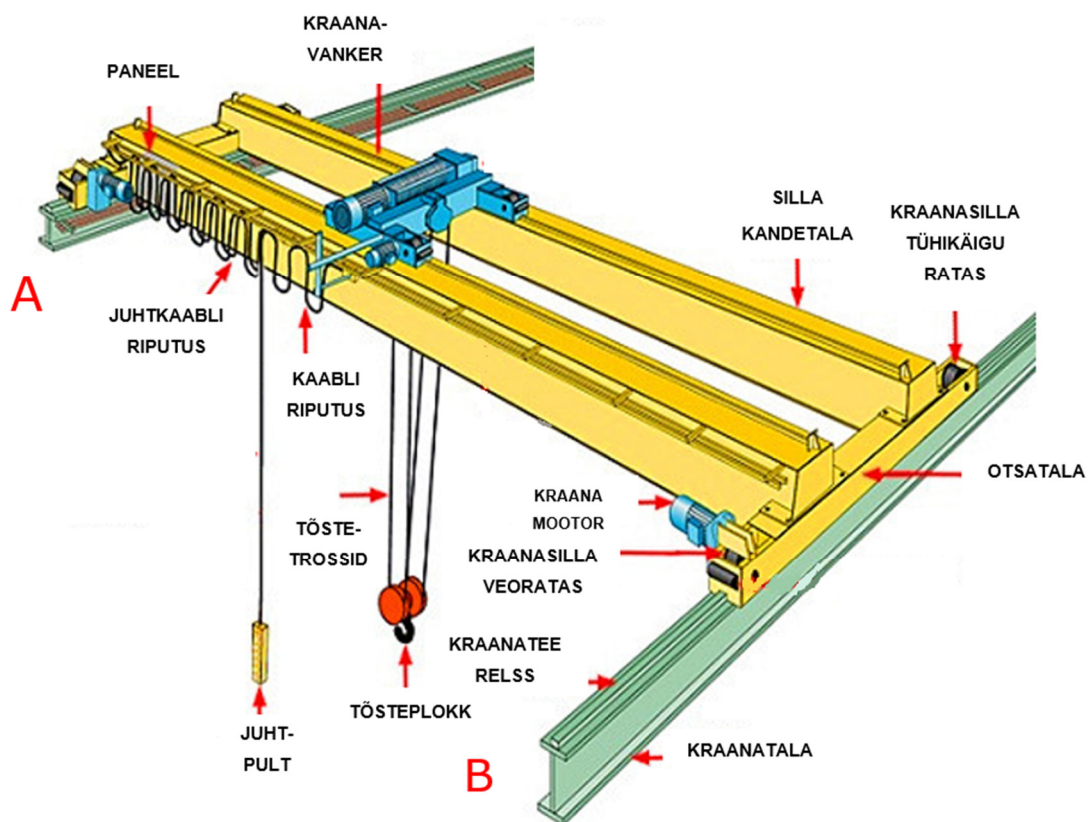


Joonis 1.4 Rippkraana [6]

Järgnevalt vaadeldakse üksikasjalikumalt sildkraanasid, mille kraanatee moodsustamist on käsitletud käesolevas magistritöös.

Sildkraanasid valmistatakse üldjuhul tõstejõuga 1...500 t ja löövi laiusega 4...42 m [8]. Sildkraanat defineeritakse vastavalt [21] järgmiselt: kraanataladele kinnitatud rööpaid mööda liikuvast fermist (sillast) ja sellel liikuvast lastihaardeseadisega vintsivankrist koosnev kraana. Sildkraanasid kasutatakse mitmesuguste lastide tõstmiseks,

langetamiseks ja rõhtsihis teisaldamiseks peamiselt suurte tööstusettevõtete mehaanika-, kooste-, valu-, jt. tsehhides ning lahtistel laoplatsidel.



Joonis 1.5 Sildkraana ja selle osad [modifitseeritud 5]

Sildkraanateede relsid toetuvad üldjuhul metallist või raudbetoonist kraanataladele, mis omakorda toetuvad ehitise kandepostidele. Välistel estakaadidel on kraanatalad enamasti laiendatud ja välised servad varustatud reelinguga. Tsehhide raudbetoonist kraanatalad on üldjuhul 60 cm laiused, metalltalad aga 30 cm laiused ja kitsamad. Kraanarelssidena kasutatakse raudteerelsse, spetsiaalseid kraanarelsse ja ruudu- või ristkülikukujulise ristlõikega teraslatte.

1.2 Sildkraanate montaaž

Sildkraanade paigalduseks kasutavad ehitajad erinevaid paigalduskeeme. Paigaldusmeetodid olenevad sellest, kas kraanate relsid keevitatakse kandetaladele tehases või ehitusobjektidel.

Antud töös keskendutakse juhtumile, kus ehitajate poolt kasutatud paigaldusmeetodil on relsid keevitatud kandetaladele valmistajatehases. Sellise paigaldusmeetodi puhul

märgib geodeet kraanatalade kandekonstruktsioonidele A ja B kandetala servad (vt joonis 1.5) ning koostab mahamärkimise joonise. Geodeedi poolt märgitud punktide alusel toimub kraanatee paigaldus ja hilisem rihtimine. Selle paigaldusmeetodi puudused on järgmised:

- relsside paigaldamisel koos taladega võimenduvad talade transpordil ja paigaldusel tekkivad talade deformatsioonid ja kõrvalekalded projektist;
- relsse peab rihtima koos kraanatalaga;
- tala pingutamisel talidega tekivad pinged, mis kantakse edasi kandekonstruktsiooni. Kraana eksploatatsiooni käigus võivad pinged relsi tolerantsist välja viia;
- relsse saab rihtida tugipostide kohalt;
- geodeetiliste tööde kulud on suuremad.

Teisel väljatoodud paigaldusmeetodil keevitatakse tehases relss ainult kraanatalale A. Kraanatala B peale keevitatakse relss ehitusobjektile pärast kraanatala A paigaldust. Meetodi eelised võrreldes esimese paigaldusmeetodiga:

- geodeedil tuleb välja märkida ainult kraanatee A;
- võttes aluseks eelnevalt kokku monteeritud kraanarelsi A, paigaldavad ehitajad laserkaugusmõõtja abil kraanatala B ja relsi;
- pole tarvis rihtida talasid, vaid ainult kraanatee B relssi;
- talad ei jää pingesse;
- paigaldustäpsus relsside vahel jääb lubatud piiridesse.

1.3 Geodeetilised tööd sildkraanateedel

Sildkraana on tsehhisese transpordi peamine tagaja, mistõttu on äärmiselt tähtis selle häireteta ja avariideta töö. Kuivõrd sildkraana sõidab kõrgel tootmis-tsehhi lae all, on selle rööbasteelt mahasõit äärmiselt tõsine avarii ning halvab terve tootmisprotsessi pikaks ajaks. Seega on sildkraanatee geodeetilised kontrollmõõtmised väga olulised.

Põhilised rööbaste vead, mis põhjustavad relsside kulumist, on nende vahekauguse vead ja erinevad kõrgused tee ristlõikes, mida reeglina kontrollitakse tänapäeval vastavalt ISO 12488-1 nõuetele (varasemalt SNiP 3.03.01-87). Relsside vertikaalsusest ja kraanarataste ühtselt suunast oleneb samuti relsside kulumine, kuid neid näitajaid üldjuhul geodeetiliselt ei kontrollita.

Kraanatee vastavust eelpoolmainitud parameetritele kontrollitakse [19]:

- tee vastuvõtmisel peale selle valmimist;
- perioodiliselt eksploatatsiooni jooksul;
- peale tee rekonstrueerimist;
- peale avariisid.

1.3.1 Ohtutusnõuded

Igal ehitusobjektil on peatöövõtja poolt paika pandud ohutusnõuded – näiteks tuleb kanda turvasaapaid, kiivrit ja ohuvesti. Kõrgustes töötamine on ohtlik ning sellele rakenduvad lisanduvad ohutusnõuded. Meedias on kajastatud mitmeid näiteid, kuidas kõrgustes töötamise ajal pole töölised täitnud ohutusnõudeid, mille tagajärjel on juhtunud traagilisi õnnetusi, mis on lõppenud kas inimese surma või tõsiste vigastustega. Töötervishoiu ja tööohutuse ehituse seaduse §5 punkti 11 kohaselt loetakse ohtlikuks tööks tööd, millega kaasneb töötaja kõrgustest kukkumise oht.

Ehitusobjektide ohutusnõudeid on karmistatud, mis on tingitud tehnika arengust ja seaduste tänapäevaseks kohandamisest. Lisaks on ettenähtud trahvid ohutuseeskirjade mitte täitmise eest, mis sunnib töötajaid neid nõudeid hoolsamini täitma. Kui vanasti oli kombeks tõstuki puudumisel sildkraanatee mõõdistamisel mööda sildkraanatee tala turnida, siis tänapäeval seda enam teha ei või. Käesolevas töös kasutatud korvtõstukiga töötamise ohutusnõuded on toodud jaotises 5.6.

1.3.2 Sildkraanatee mõõdistusmeetodid

Sildkraanatee mõõdistamise võib jaotada plaaniliseks ja kõrguslikuks. Kõrguslik mõõdistamine toimus varem põhiliselt täpse nivelleerimise abil, kusjuures möödunud sajandil paigutati nivelliir ligikaudu tee keskpaika; lugemid tehti lati mustalt ja punaselt poolelt. Seejuures saadud kõrguste vahe ei tohtinud erineda üle 3 mm. Kõrgused määrati suhteliselt tee kõige kõrgema punkti suhtes iga 3 meetri järel (kuna kandepostid asetsesid reeglina 6 m järel, siis määrati kõrgused iga posti juures ja postide vahelkohas). Hiljem, sajandi lõpul, paigutati nivelliir sageli tee diagonaalsetesse otstesse ja relsi kõrgused saadi nivelliiri kummagi asendi keskmisena. Viimane meetod pidi elimineerima nivelliiri põhitingimuse (vaatekiire kõrvalekalle horisontaalpinnast) jääkvea.

Plaanilisel mõõdistamisel tsentreeriti teodoliit kraanatee ühes otsas relsi keskele, suunati tee teise otsa relsi keskele ja võeti lugemid vertikaalniidi järgi horisontaalasendis sentimeeterjaotistega nurgiklatilt. Nii määrati relsi hälbed eelmainitud kahte punkti ühendava baasjoone suhtes. Järgnevalt märgiti baasjoone kummastki punktist ortogonaalselt baasjoonele relsside telgede vaheline projektkaugus. Märkimiseks kasutati kompareeritud terasruletti, mida pingutati 100 N jõuga ning määratavat kaugust parandati ühendatud temperatuuri/kompareerimisparandiga ja loogaparandiga. Saadud punktide vahelise baasjoone suhtes määrati analoogiliselt teise relsi hälbed. Kuivõrd kumbki baasjoon ei pruukinud olla projekttelje kohal, kasutati tulemuste optimeerimisarvutust, mis põhines vähimruutude meetodil [18].

Mõõtmismeetodi täpsus ja töökiirus ei jäänud palju alla tänapäeva instrumentidega saavutatavale, kuid tõsiseks probleemiks oli puudulik tööohutus (geodeedid ja instrumendid pidid viibima kitsal talal ~6 m kõrgusel maapinnast). Ohutuse tagamiseks oli vajalik kasutusele võtta ebamugavad abinõud (ohutustross ja traksid). Tehti katseid ka mõõdistusvankriga, mille külge oli kinnitatud horisontaalne latt ning mida tõmmati edasi trossiga [8]. See välistas vajaduse liikuda kraanataladel. Viimane meetod laialdast levikut aga ei leidnud. Ilmselt asjaolu tõttu, et toleaegetes majandustingimustes oli keerukas lasta taolist mõõdistusvankrit valmistada. Ülevaated tänapäeval kasutatavatest mõõdistusvankritest on toodud Lisas 1.

Kinnistes tsehhides, kus puudus tuuletõmbus, määrati relsi hälbeid selle kohal asetseva teljemärkide vahele pingutatud traadi suhtes. Juhendaja lektor V. Kala andmetel tehti eelmise sajandi kaheksakümnendatel aastatel Tartu Ehitustrustis vähemalt üks selline katse. Hälbed traadist määrati võrdlemisi primitiivselt - hariliku ripploodi abil. Kirjanduses on andmeid ka peegel-loodi kohta, millega oli võimalik suuremat täpsust saavutada [8]. Peegel-loodi põhimõte seisneb kahe paralleelselt teineteise külge teatud kaugusel kinnitatud klaaspinna kasutamises, millest alumine on teljemärgiga peegelpind ja ülemise (läbipaistva) küljes on skaala, mille nulljoon vastab teljemärgile. Seade asetatakse teljemärgiga relsi teljele ning sätitakse vesiloodi abil horisontaalseks. Seejärel nihutab vaateleja oma pead sel viisil, et temast allpool olev traat ühtib visuaalselt oma peegelkujutisega. Nüüd saab traadi kujutise järgi võtta hälbe lugemi skaalalt. Meetod ei võitnud populaarsust, sest oli tülikas kasutada ja tööohutuse nõuetekohasust oli raske tagada.

Tööohutuse olukord muutus mõnevõrra paremaks, kui mõõdistusbaasid moodustati tsehhi põrandal (maapinnal) ja kasutati horisontaalse latiga põiknivelleerimist. Sellest hoolimata pidi latihoidja liikuma kraanataladel.

Elektrontahhümeetrise ilmudes jäi ohutustehnika olukord peaaegu endiseks, sest geodeedi abilise pidi ikkagi asetama reflektorit relsile (kummalegi poole relssi plaaniliste hälvete leidmiseks ja relsi peale kõrguste saamiseks), liikudes samal ajal kraanatalal. Pealegi oli instrumendi kahesuunaline sihtimine reflektorile aeglasem kui ühesuunaline sihtimine latile. Loomulikult, kui töö tellija varustas geodeedi töstukiga, millega abilise töusis ohutult kraanateeni, oli tööhutus tagatud, aga see-eest kulus palju aega töstukiga liikumiseks. Mõningatel juhtudel oli see kahjuks ainus võimalus, näiteks kui kraanatala oli nii kitsas, et sellel üldse liikuma ei mahtunud.

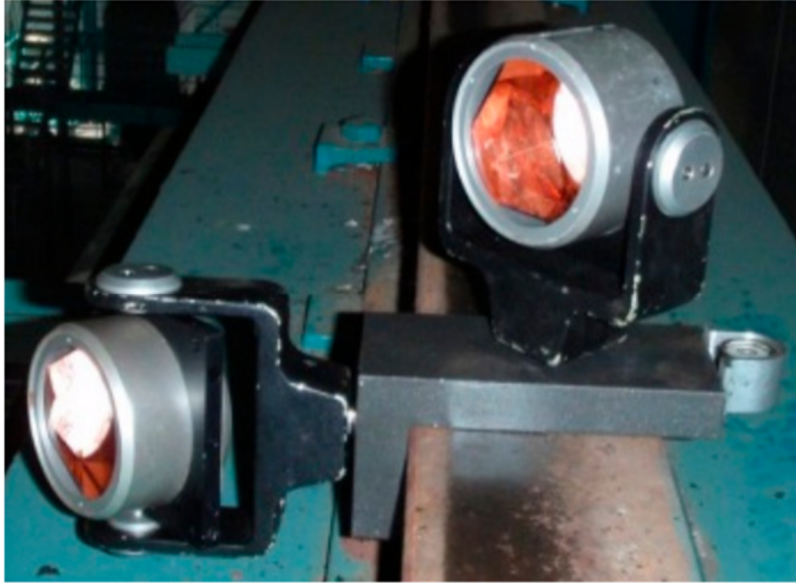
Tööhutus paranes, kui ilmusid täpse laserkaugusmõõturiga elektrontahhümeetrid, mis võimaldasid kraanarelsse mõõdistada tsehhi põrandalt. Alati ei aidanud needki, sest kui kraanarelsina kasutati ristküliklõikega teraslatte, polnud need tsehhi põrandalt nähtavad.

Uueks suunaks sildkraanateede mõõdistamisel on laserskannerid, mida pole nimetatud tööliigil seni piisavalt katsetatud ja kuhu töö autor püüab käesolevaga oma osapanuse anda.

1.3.3 Varasemad uuringud

Terrestrilise laserskaneerimise (TLS) meetodil on sildkraanateed varasemalt uuritud Sloveenia Ljubljana Ülikoolis [22]. Töös jagati kahe erineva sildkraanatee relsid erinevateks profiilideks, millest tehti tasapinnad. Mõõdistati kahte sildkraanateed.

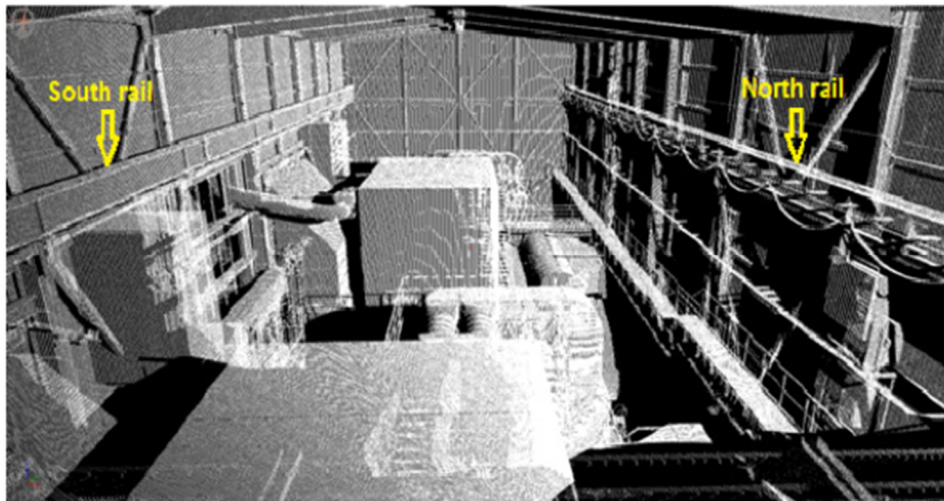
Esimest sildkraanateed uuriti Leica TS30 elektrontahhümeetri (tahhümeetrilisteks mõõdistusteks) ja Leica MS50 hübriidtahhümeetriga (TLS mõõdistuseks). Esimese sildkraanatee pikkus oli 73,00 meetrit ja relsside telgede vahe 13,10 meetrit. Eesmärgiks oli võrrelda sildkraanatee hübriidtahhümeetri TLS mõõdistust ja elektrontahhümeetri tahhümeetrilist mõõdistust. Tahhümeetrilised mõõdistused tehti ühest seisupunktist, et välistada geodeetilisele alusvõrgule orienteerumisel tekkivaid vigu. Mõõtmiseks kasutati kahte täpset prisma, mis olid asetatud spetsiaalsele rakisele (vt joonis 1.6), millega mõõdeti relsi kindlatesse asukohtadesse punktid. Mõlemale relsile tehti 35 mõõtmist, iga mõõtmine 1,80 m tagant. Igas punktis mõõdeti kaks korda mõlemale prismale ning võeti keskmine väärtus. Täpsusehinnanguks arvutati standardhälve iga mõõdetud punkti kohta.



Joonis 1.6 Sildkraanateede tahhümeetrilisel mõõdistamisel kasutatud prismsüsteem [22]

Laserskaneerimise mõõtmised tehti kahest jaamast, mis asusid mõlema relsi ühes otsas. Ühtlase punktipilve tiheduse saamiseks mõõdeti mõlemad relsid 16 erineva sektorina. Enne iga sektori mõõtmist määrati instrumendile mõõdistusnurk, mille ulatuses mõõta, ja skaneerimistihedus, mis oli sõltuv mõõdistuskaugusest. Andmetöötluste jaoks jaotati punktipilved 61 võrdseks lõiguks, mis olid 1 m pikkused [22].

Teine uuritud sildkraanatee oli 55,40 meetrit pikk ja relsi telgede vahekaugus 19,30 meetrit. Mõõtmine viidi läbi Riegl VZ-400 terrestrilise laserskanneriga. Teise sildkraanatee mõõtmise eesmärk oli uurida punktipilve tiheduse mõju täpsusele. Skaneerimine toimus ühest kindlast seisupunktist, mis oli asetatud sildkraana silla keskele. Jaama valik tagas sobiva nähtavuse mõlemale relsile. Relsid mõõdeti ühe mõõtmisega, millest kõige kaugemasse relsi otsa mõõdeti 0,02 m tihedusega punktid. Seega jaamale lähedal olevad relsi pinnad on suure tihedusega punktipilved, aga mida kaugemale skannerist, seda hõredamaks punktipilv muutub, kuid siiski piisavaks, et leida relsi pind [22].



Joonis 1.7 Riegl VZ-400 laserskanneriga mõõdetud punktipilv [22]

Uuringute tulemustest selgus, et TLS meetod on sobiv kuni 100 meetri pikkuse, tasase ja sirge kraanatee relsi mõõtmiseks. Piisava tihedusega punktipilve saamiseks tuleks jälgida, et skaneerimise nurk (vt joonis 3.2) ei muutuks laserkiire ja mõõdistatava objekti vahel liiga suureks. Skaneeritud punktide tihedus ei mõjuta mõõdistustäpsust, kui relsi külgedest ja pealispinnast modelleerida tasapinnad. Ainus tähelepanek on, et igal lõigul peaks olema piisavalt punkte, et nendest moodustada tasapind. Kuna ruutristlõikega relss on suhteliselt väike detail, võib relsi kaugemasse punkti mõõtmisel tekkida punktipilves anomaaliaid, mis võivad mõjutada mõõtmiste täpsust. TLS ja tahhümeetriliste mõõdistuste horisontaalsed ja vertikaalsed erinevused on peaaegu võrdväärased, tahhümeetriliste mõõdistuste tulemused erinevad TLS mõõdistustest 0,2 mm [22].

2. TLS MEETODIL SILDKRAANATEE MÕÕDISTAMISE PROBLEEMI FORMULEERIMINE

Kraanatee mõõdistamist tahhümeetrilisel meetodil on raske sooritada, kuna tänapäeva ohutusnõuded keelavad kraanatee taladel liikumise ilma selleks ettenähtud ohutus abinõusid (üldjuhul ohutustrossi ja ohutustrakse) kasutamata. Ohutusvahendid on aga ebamugavad, mistõttu on mõõdistamiseks vaja tõstukit. Lisaks tõstuki hankimisele, on töö raskendatud, kui samal ajal teostatakse objektile ehitustöid ning kõikidesse vajalikesse punktidesse ei pääse tõstukiga ligi. Näiteks, kui elektrikaablite paigaldamiseks on kaevikud kaevatud. Kraanatee relsi mõõdistamise hõlbustamiseks ja tõstukiga ehitusplatsil liikumise vältimiseks katsetati käesolevas töös sildkraanatee relsi teostusmõõdistust terrestrilisel laserskaneerimise (TLS) meetodil.

Probleem TLS mõõdistusel on see, kui laserskanneri kiire langemisnurk mõõdistatavale pinnale (vt joonis 3.2) läheb liiga suureks ja tekkinud punktiplek jääb liiga hõredaks. Sellisel juhul ei anna mõõdistustulemus vajalikku täpsust, et terve kraanatee pikkuses oleks relsi servad eristatavad. Probleemi lahenduseks paigaldatakse laserskanner otse relsile ja mõõtmised tehakse neljast erinevast seisupunktist. Saadud tulemusi võrreldakse elektrontahhümeetriga tehtud mõõdistustega, mille põhjal antakse TLS-le täpsushinnang.

3. LASERSKANEERIMISE OLEMUS

Projekteerimisel on 3D jooniste vajadus suurenenud, mis eeldab, et muutuvad ka mõõtevahendid ja -meetodid. Laserskannerid leiavad järjest rohkem kasutust, kuna nendega saab lühikese aja jooksul mõõta väga palju punkte. Nende kasutuse kasvule aitavad kaasa arvutite ja erinevate tarkvarade areng, mis muudab laserskannerid paremini kättesaadavateks. Peamiselt kasutatakse laserskannerit 3D jooniste modelleerimiseks, deformatsioonide uuringute, seire ja analüüsi jaoks vajalike andmete kogumiseks [13].

3D skannerid on sarnased kaameratele. Nagu ka kaameratel, on neil koonusekujuline vaateväli ja nad saavad informatsiooni nende vaatevälja jäävatelt pindadelt. Kui kaamera kogub pildistatavalt objektilt värvi ja heleduse informatsiooni, siis 3D skanner jäädvustab mõõdetava objekti geomeetria. Skanneriga mõõdetud „pildil“ kujutab iga mõõtpunkt kaugust skannerist ning baasjoone ja horisontaalpinna vahelist nurka (vt joonis 3.1). Nende tingimuste tulemusena on võimalik igale mõõdetud punktile määrata 3D asukoht [14]. Laserskaneerimine jaotub peamiselt kolmeks erinevaks osaks [15]:

- terestriiline laserskaneerimine (TLS) – mõõtmine toimub staatilisest mõõtmisjaamast;
- aerolaserskaneerimine – mõõtmine toimub õhusõidukilt;
- mobiilne laserskaneerimine – mõõtmine toimub liikuvalt maapealselt platvormilt.

3.1 Terestriiline laserskaneerimine (TLS)

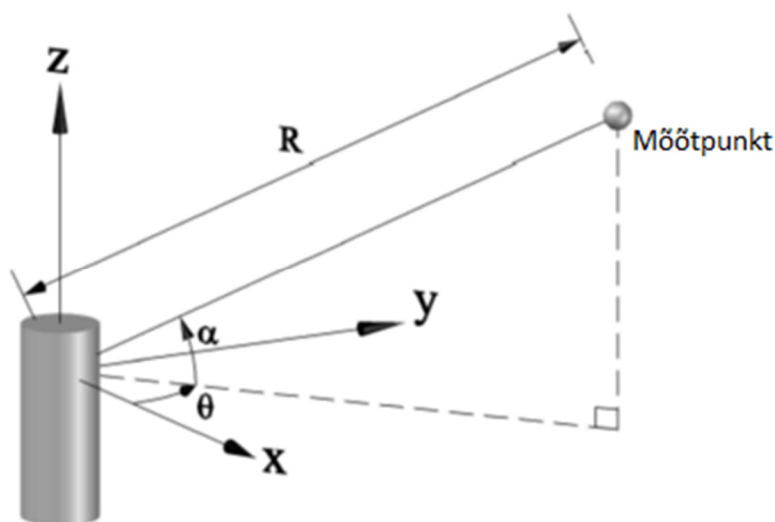
TLS-st võib sooritada kahel meetodil [17]:

- laserimpulss-skanner – mõõdab kaugust signaali edasi-tagasi liikumiseks kuluva aja mõõtmise põhimõttel;
- faasinihkeskanner – aja mõõtmise asemel mõõdetakse faasinihet.

Faasinihkeskannereid kasutatakse enamasti väiksemate objektide mõõtmisel, kuna neil on väiksem mõõteulatus. Nende eeliseks on suurem mõõdetud punktide arv ühes sekundis. Laserimpulss-skannereid kasutatakse suurematel objektidel, kuna nendega on võimalik kaugemale mõõta. Miinuseks on väiksem mõõdistuskiirus (teisisõnu, faasinihkeskanneritega võrreldava andmetiheduse saamiseks peab kauem mõõtma) [17]. Käesolevas töös kasutati ainult laserimpulss-skannerit, mille tööpõhimõtte kohta antakse järgnevalt lühiülevaade.

3.1.1 Laserimpulss-skanner

TOF (Time-of-Flight) tähendab, et objekti kaugus arvutatakse signaali edasi-tagasi liikumiseks kuluva aja põhjal. TOF skannerite puhul saadetakse instrumendist välja kiir ja kui see peegeldub objektist instrumendi tagasi, arvutab instrument selleks kulunud aja põhjal mõõtpunkti kauguse. Skanner mõõdab mõõtpunkte ühtlaselt horisontaal- ja vertikaaltelgedele. Punkte mõõdetakse optilise peegli keerlemise abil. Peegli pinnalt emiteeritakse laserkiir mõõtpunktini, millelt peegeldub kiir tagasi laserskannerisse. Mõõdetud kauguse R ning nurkade α ja θ abil määratakse igale mõõdetud punktile sfäärilised koordinaadid, millest instrumendi tarkvara arvutab automaatselt x -, y -, z -ristkoordinaadid (vt joonis 3.1) [16].



Joonis 3.1 Laserimpulss-skanneri tööpõhimõte [16]. Tähistus: R – kaugus, α – vertikaalnurk, θ – horisontaalne suund

Punkti kaugus arvutatakse lihtsustatud valemiga (3-1) [16]:

$$R = \frac{c \cdot t}{2}, \quad (3-1)$$

kus R on kaugus mõõdistava objektini, c on valguse levimise kiirus (3×10^8 m/s) ja t on laserkiire edasi-tagasi liikumise aeg [16].

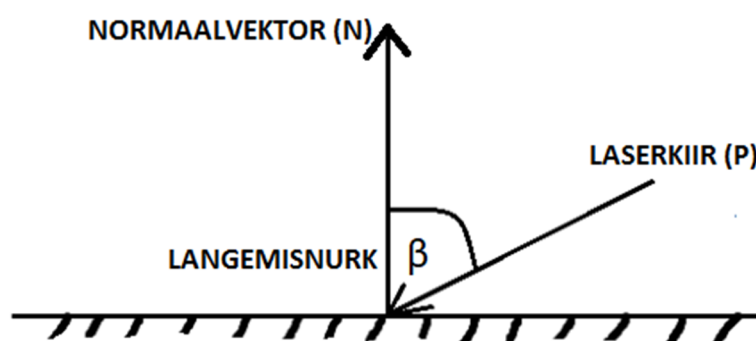
3.2 Laserskanneri kiire langemisnurga mõju täpsusele

Laserskanneri kiire täpsust mõjutab laserskannerist tagasipeegelduva kiire ja mõõdetava objekti vaheline nurk ehk langemisnurk (vt joonis 3.2). Suurema

langemisnurga puhul on suurem tõenäosus, et mõõtmiste viga on suurem, mis võib tekitada suurema punktide hajuvuse [28]. Kuna käesolevas töös mõõdeti laserskanneriga sildkraanatee relsi pealt, muutub langemisnurga mõju punktipilve täpsusele oluliseks. Langemisnurka saab arvutada valemiga (3-2) [31]:

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{PN}{|PN|} \right), \quad (3-2)$$

kus β tähistab langemisnurka, P on laserkiire vektor skannerist pinnani ja N on normaalvektor [31]. Valemis (3-2) olevad tähised on kantud joonisele 3.2.



Joonis 3.2 Laserkiire langemisnurk

Varasemalt TTÜ-s S. Saariku poolt kaitstud magistritöös [27] uuriti käesolevas töös kasutatud Leica C10 langemisnurka. Uurimiseks kasutati Leica 3-tollist plaatreflektorit, mida mõõdeti Leica C10 laserskanneriga erinevate langemisnurkade ja kauguste tagant. Tööst [27] selgus, et sellisel meetodil mõõtes peaks võimalusel vältima suuremaid langemisnurki kui 60 kraadi. Töö tulemustes on toodud, et 10,2 m kaugusele mõõtes on 60 kraadise langemisnurga puhul viga -4,0 mm, 20,1 m puhul -3,0 mm ja 30,3 m puhul 0 mm [27]. Töös uuriti ka elektrontahhümeetrite laserkiire langemisnurga mõju. Näiteks Trimble S6 puhul 60 kraadise nurga all plaatreflektorile mõõtes saadi 10,2 m-le mõõtes -11,5 mm, 20,1 m puhul -12,0 mm ja 30,3 m puhul -10,0 mm [27].

Käesolevas töös on langemisnurga mõju oluline, kuna instrumendid kinnitatakse mõõtmisteks sildkraanatee I-talale. Eelnevas lõigus nimetatud uuringu põhjal saab välistada tahhümeetrilisel mõõdistusel ilma prismata mõõtmised, sest relsi pinna ja elektrontahhümeetri vaheline nurk jääb liiga suureks. Laserskanneri kohta saadud tulemused näitavad, et suur langemisnurk võib mõjutada mõõtmistulemuste täpsust.

4. MAGISTRITÖÖS KASUTATUD SEADMED

Käesolevas peatükis kirjeldatakse magistritöös kasutatud instrumente. Mõõdistusteks kasutati Trimble S5 elektrontahhümeetri ja Leica C10 laserskannerit. Lisaks mõõdistusinstrumentidele kasutati magistritöös korvtõstukit Genie Z 45/25 RT J. Renditud korvtõstuk kuulub ettevõttele Cramo Estonia AS.

4.1 Elektrontahhümeeter Trimble S5

Magistritöös kasutati kraanatee teostusmõõdistuseks elektrontahhümeetri Trimble S5 (vt joonis 4.4). Mõõdistuste põhjal koostati teostusjoonis, mis esitati ehitajatele paranduste tegemiseks (koostatud teostusjoonis võeti aluseks laserskanneri täpsuse hindamiseks). Olulisemad elektrontahhümeetri Trimble S5 tehnilised spetsifikatsioonid on toodud tabelis 4.1 [10].

Tabel 4.1 Elektrontahhümeetri Trimble S5 ja laserskanneri Leica C10 peamised tehnilised spetsifikatsioonid

Elektrontahhümeeter Trimble S5	Laserskanner Leica C10
nurga mõõtmise täpsus 2" (2 täisvõttega)	horisontaal- ja vertikaal nurga määramise üksikmõõtmise täpsus 12"
joone mõõtmise täpsus prismale 2 mm + 2 ppm	kaugus üksikmõõtmise täpsus 4 mm
kaheteljeline kompensaator täpsusega 0,3"	kompensaatori tööulatus 5' ja täpsus 1,5"
kaal 5,5 kg	kaal ilma akudeta 13 kg, koos kahe sisemise akuga 13,8 kg
	2D asukoha üksikmõõtmise täpsus 6 mm

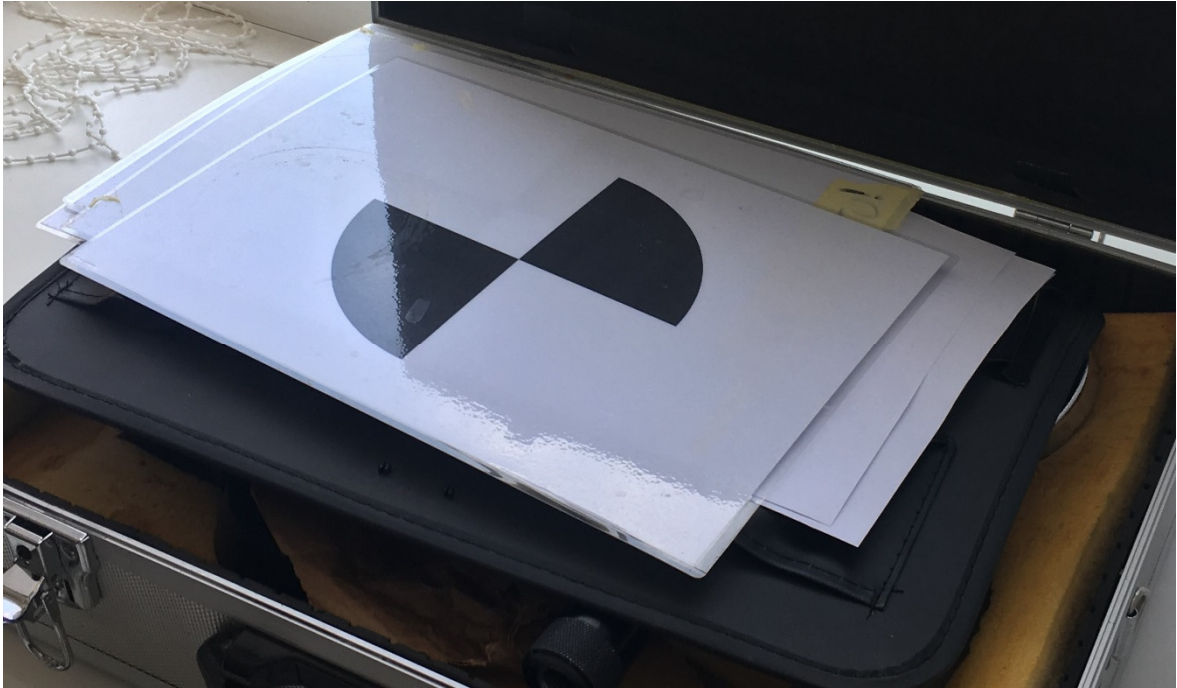
Elektrontahhümeetri komplekti kuulusid Trimble TSC3 väliarvuti koos Trimble ActiveTrack 360° prismaga (vt joonis 4.1), mida kasutati töö kiiremaks ja mugavamaks muutmiseks.



Joonis 4.1 Tahhümeetritelistel mõõdistustel kasutatud Trimble ActiveTrack 360° prisma [30]

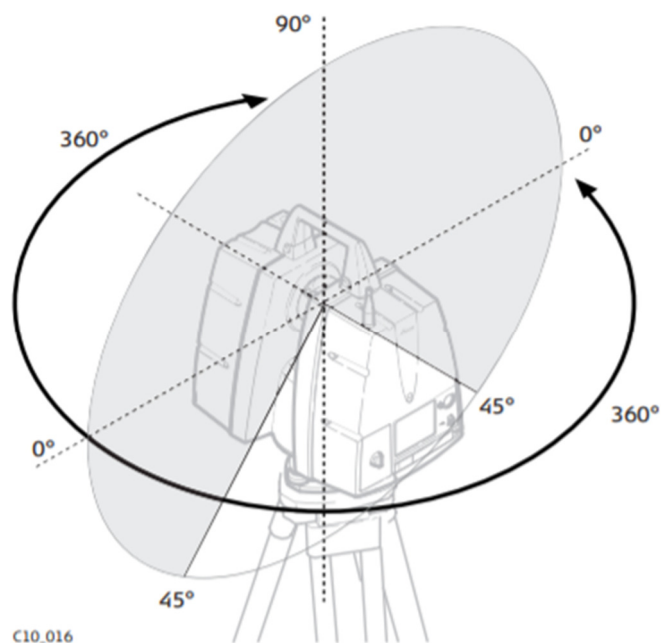
4.2 Laserskanner Leica C10

Magistritöös kasutati impulss-laserskannerit Leica C10 (vt joonis 5.7), mis suudab mõõdistada 50 000 punkti sekundis kuni 300 meetri kaugusele. Laserskanneril on sisseehitatud kaamera ja kaheteljeline kompensaator. Kasutatud laserskanneri komplektist puudub väliarvuti, mis muudab lae all oleva kraanatee mõõtmise keeruliseks, kuna geodeedil on vaja näha skanneri küljes olevat ekraani. Laserskanneri Leica C10 peamised tehnilised spetsifikatsioonid on toodud tabelis 4.1 [11]. Laserskanneri orienteerimiseks kasutati lamineeritud must-valgeid tähiseid, mis on prinditud A4 paberile (vt joonis 4.2).



Joonis 4.2 A4 suuruses alusvõrgu tihenduspunkti tähised punktide kindlustamiseks hoone seinale

Laserskanneri miinuseks on see, et sellega mõõtes jääb punktipilves skanneri seisupunkti ringikujuline andmetühik, mille raadius on võrdne instrumendi pöörlemisteljel asuva sensori kõrgusega maapinnast. Instrumendi vaatevälja jäämine sensori horisontaalpinnast allapoole 45° tingib punktipilve andmetühiku. Leica C10 pöörleva skaneerimisesensori vaateväljaks on tootja poolt antud $360^\circ \times 270^\circ$ [26] (vt joonis 4.3).



Joonis 4.3 Leica C10 vaatevälja ulatus [26]

4.3 Korvtõstuk Genie Z 45/25 RT J

Tõstuki kasutamine oli vajalik, kuna mõõdetav objekt asus umbes 9 meetri kõrgusel. Tõstuki organiseeris mõõtmisteks objektijuht. Korvtõstukiga oli võimalik sõita poomid nii üleval kui all asendis. Kõrgustes ja tõstukiga töötamise ohutusnõuete kokkuvõte on järgmises jaotises.

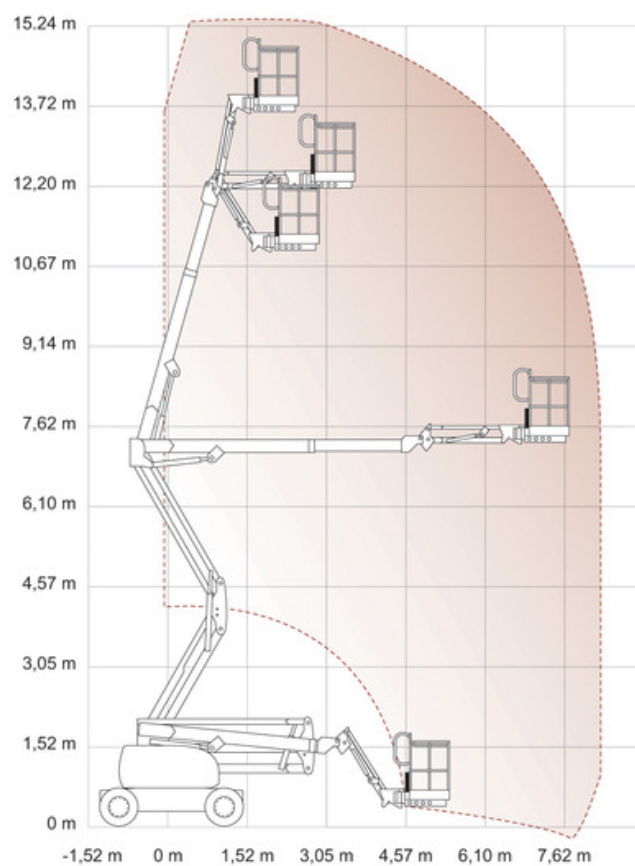


Joonis 4.4 Elektrontahhümeeter Trimble S5 ja korvtõstuk Genie Z 45/25 RT J tagaplaanil. Fotol on näha ka uurimise all olevat kraanateed ja hoone ehitusjärku

Peamised korvtõstuki Genie Z 45/25 RT J (vt joonis 4.4) tehnilised spetsifikatsioonid on: [12]

- mass 6123 kg;
- platvormi laius 1,83 m ja kõrgus 0,76 m;
- maksimaalne töökõrgus 15,86 m;
- töötada võib maksimaalselt 2 inimest;
- platvormi kandevõime 227 kg;
- sõidukiirus, poomid tõstetud 1,08 km/h;
- sõidukiirus, kokkupandud asendis 7,2 km/h;
- pöördeplatvormi pööramine 355°;
- platvormi pööramine 160°.

Tõstuki liikumisulatus on esitatud joonisel 4.5.



Joonis 4.5 korvtõstuki Genie Z 45/25 RT J liikumisulatus [12]

5. LÕPUTÖÖ ANDMETÖÖTLUSES KASUTATUD MÕÕDISTUSE KIRJELDUS

Välitöö koosnes kolmest etapist. Esimene etapp oli alusvõrgu loomine tahhümeetrilise ja TLS mõõdistamise jaoks. Teine etapp oli tahhümeetriline mõõdistamine ja kolmas TLS mõõdistamine. Mõõtmised viidi läbi 23. augustil 2019. aastal. Mõõtmistel osales peale magistritöö koostaja veel OÜ Maamõõdu ja Arhitektuuribüroo geodeet (tase 6) Ülo Haljend.

5.1 Uuritav objekt

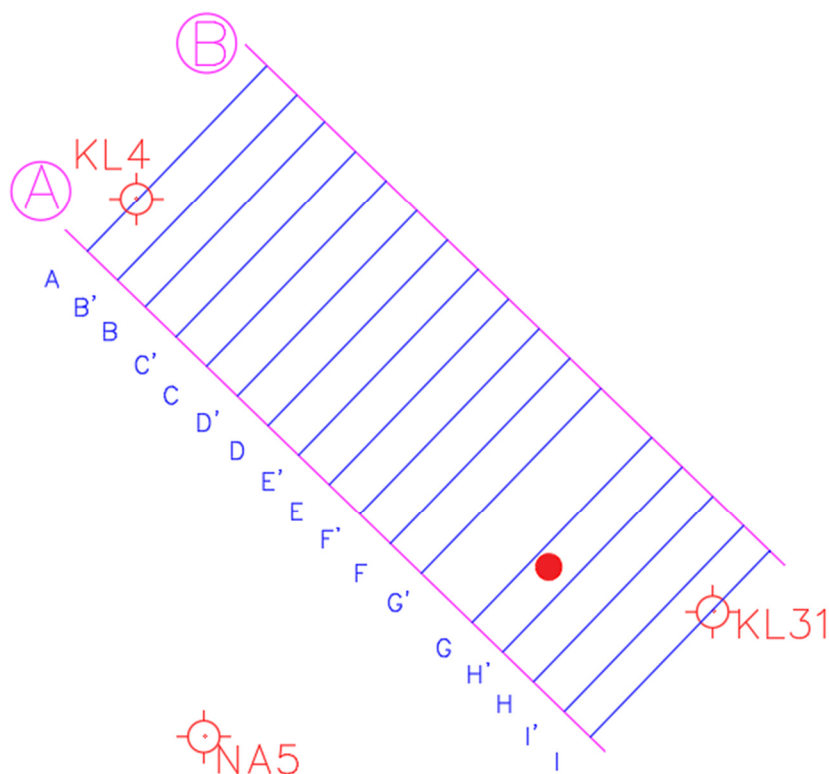
Magistritöös uuritav sildkraana asub Võrumaal, Väimela alevikus. Mõõtmiste ajal oli hoone veel ehitusjärgus. Hoonesse planeeriti rajada 4 uut sildkraanateed, millest ühe kohta tehti peale tahhümeetrilise mõõdistuse ka TLS mõõdistus (vt joonis 5.1). Uuritava kraanatee pikkus on 49,80 meetrit ja relsi telgede vaheline laius 18,18 meetrit. Teostusmõõdistuse hetkel oli kraanateel olemas mõlemad I-talad, millele oli keevitatud ristküliklõikega relss mõõtmetega 25x60 mm. Tahhümeetrilise mõõdistuse eesmärgiks oli teostada objekti kohta teostusjoonis, mille abil saaks välja selgitada, kas kraanatee relsi horisontaalsed ja vertikaalsed hälbed vastavad projekteeritud tolerantsidele.



Joonis 5.1 Väimelas olev ehitusjärgus sildkraanatee, mille talad on foto vasakul ja paremal äärel

5.2 Alusvõrgu loomine

Ehitusalusvõrk on rajatud riiklikus koordinaat- ja kõrgussüsteemis, vastavalt Lambert-Est-97 ning EH2000. Kõigil objektidel tehtud tahhümeetrilistel mõõdistustel oli valitud mõõtkava 1,00, et vältida Lambert-Est projektsioonist tekkivaid mõõtkava vigu. Objekt oli riiklikus koordinaat- ja kõrgussüsteemis, kuna tellija nõudis nii. Kraanatee mõõdistamise hõlbustamiseks oli vaja täiendada ehitusalusvõrku lisapunktidega. Lisapunktide rajamiseks orienteeriti elektrontahhümeeter vastulõigete meetodil objektile olemasolevatelt alusvõrgu punktidele KL4, VV3 ja NA3 (vt joonis 5.2). KL4 oli tähistatud reflektorkleepsuga hoone seinale, VV3 oli samuti reflektorkleeps, mis oli kinnitatud hoonest väljapoole jääva rajatise seinale ja NA5 tähiseks oli betooninael, mis oli paigaldatud hoone betoonist vundamenti. KL31 oli reflektorkleeps hoone seinal. Seda märki kasutati tahhümeetri seisupunkti kontrolliks enne ja pärast mõõtmiste tegemist. Seinamärkide mõõtmiseks kasutati Trimble S5 laserkaugusmõõturit tavaprisma režiimis. Tavaprisma režiimi kõrguseks ja prismakonstandiks oli määratud 0 mm. Laserkaugusmõõturiga mõõtes lülitati välja prisma automaatlukustussüsteem. Betoonnaelale mõõdeti AT360 prismaga (vt joonis 4.1), mille konstandiks on 22 mm.

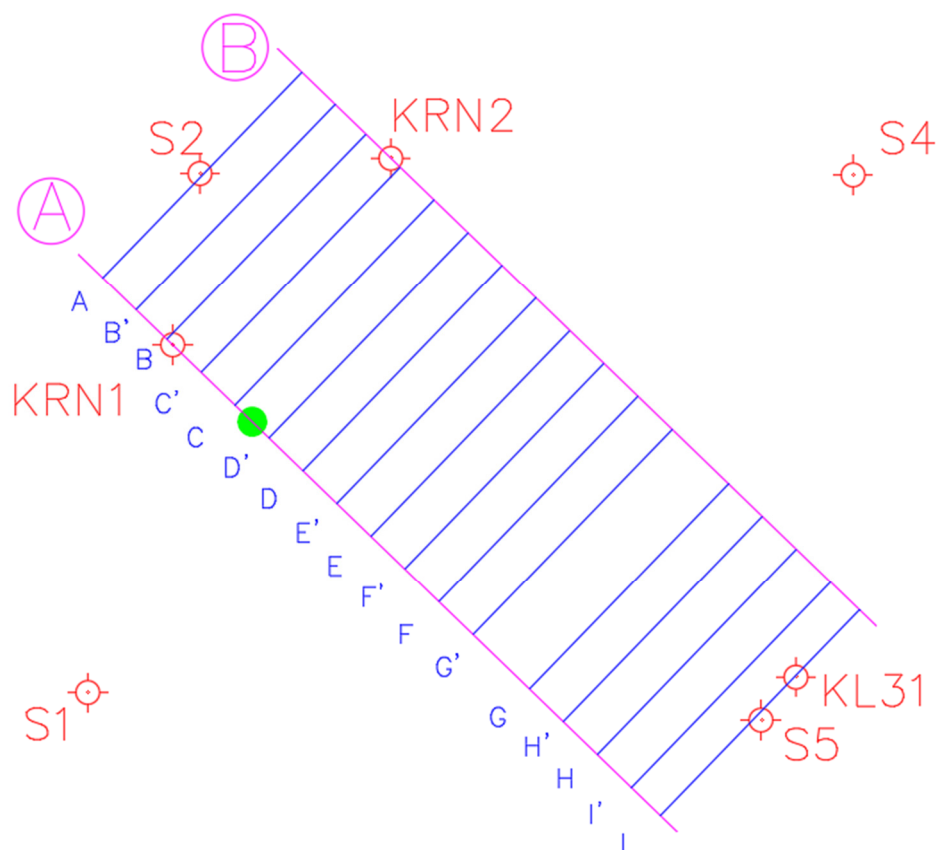


Joonis 5.2 Alusvõrgu rajamise skeem. KL4, KL31, VV3 on reflektorkleepsud ja NA5 betooninael. Joonisel olevast tahhümeetri seisupunktist (punane täpp) rajati joonisel 5.4 olevad mõõdistusvõrgu punktid. Teljed A ja B (roosalt) tähistavad kraanatee relse ning siniselt on kraanatee põikteljed

Kraanatee teostusmõõdistuse jaoks tihendati ehitusplatsi alusvõrku 6 lisapunktiga, neist 2 lisati kraanatee relsile ja 4 hoone seinale. Relsil olevad punktid tähistati markeriga ja neid punkte kasutati elektrontahhümeetri seisupunkti kontrollimise ja orienteerimise jaoks (vt joonis 5.3). Seinale paigaldati 4 must-valget A4 formaadis tähist, mida kasutati laserskanneri punktivilvede sidumiseks (vt joonis 4.2). Tähisted kinnitati seinale teibiga.

Seintele asetatud punktid mõõdeti laserkaugusmõõturiga ja relsil olevad punktid AT360 prismaga. Mõõtmised tehti polaarmetodil ja kahe täisvõttega, et veenduda mõõtmiste täpsuses. Laserkaugusmõõturiga mõõtes kasutati DR režiimi, mille kõrguseks ja prismakonstandiks on 0 mm. Joonisel 5.3 on toodud kraanateede mõõdistamiseks loodud tahhümeetri seisupunkt S1, S2, S4 ja S5 tähistavad hoone seinale kindlustatud punkte, KRN1 ja KRN2 tähistavad kraanatee relsile rajatud mõõdistusvõrgu punkte ja KL31 on hoone seinal olemasolev alusvõrgu punkt. Tahhümeetri seisupunkt loodi

vastulõigete meetodil punktide S1, KRN1 ja KRN2. KL31-te kasutati seisupunkti kontrollimiseks alusvõrgu suhtes.



Joonis 5.3 Kraanatee elektrontahhümeetriga mõõdistamise mõõdistusskeem. Punktid S1, S2, S4 ja S5 on laserskaneerimise jaoks seinalle pandud A4 suuruses must-valge ringiga märgid, KRN1 ja KRN2 on kraanatee relsile markeriga märgitud alusvõrgu punktid ja KL31 on olemasoleva alusvõrgu punkt. Teljed A ja B (roosalt) tähistavad kraanatee relse ning siniselt on kraanatee põikteljed. Tahhümeetri seisupunkt on tähistatud rohelise täpiga

5.3 Mõõdistuse välitöö ettevalmistus

Enne välitöö teostamist tuleb alati teha ettevalmistusi:

- leppida töö tellijaga kokku millal ja kuidas on objektile ligipääs tagatud;
- koostada tellija poolt esitatud mõõdistamise ja mahamärgimise lähteülesanne;
- projektmaterjaliga tutvumine, selle süstematiseerimine ja kasutatavasse koordinaatsüsteemi viimine;
- vajaliku mõõdistusvarustuse ja abitehnika hankimine tellija poolt etteantud täpsusnõuete tagamiseks.

Antud töö ettevalmistuseks tehti järgmist. Esiteks seoti kraanatee projekt koordinaatsüsteemiga hoone ehitustelgede kaudu ja koostati kraanateest .dxf formaadis projektifail, mis sisestati väliarvutisse. Kraanatee mahamärgimiseks koostati järgnevalt AutoCad'is kraanatee alustala punktifail, mis sisaldas kraanatee telgede koordinaate (tehti selleks, et saaks vajadusel välitöö ajal kontrollida kraanatee hälbeid). Hästi planeeritud kameraaltöö lihtsustab oluliselt märkimis- ja mõõdistustöid ehitusplatsil ning võimaldab anda esialgseid hinnanguid ehituskonstruksioonide paigaldustäpsusele. Tahhümeetrilise mõõdistuse planeerimiseks ja ettevalmistamiseks kulus kameraaltingimustes üks tööpäev.

5.4 Tahhümeetrilise mõõdistuse kirjeldus

Tahhümeetrilisel mõõtmisel võivad täpsust mõjutada inimtekkelised ja instrumendist põhjustatud vead. Kõige suurema tõenäosusega tekivad inimtekkelised vead antud töö puhul prisma loodis hoidmisest. Inimtekkelistest vigadest võivad esineda veel tahhümeetri halvasti paigaldamisest tingitud vead, st kui tahhümeeter peaks nihkuma teise asendisse peale seisupunkti tsentreerimist. Antud juhul tuleks tahhümeeter uuesti orienteerida ja kontrollida eelnevalt tehtud mõõdistusi. Instrumentaalseid vigu töö tegijad ei kontrollinud, kuna elektrontahhümeeter S5 ja AT360 prisma, mida kasutati lõputöö mõõtmistel, oli enne mõõdistust kontrollitud Trimble maaletooja Geosoft OÜ spetsialistide poolt selleks ettenähtud laboris.

Töös uuritav kraanatee mõõdeti ühest seisust. Selleks, et elektrontahhümeetri vaatenurk ja prisma vaheline vertikaalnurk liiga suureks ei läheks ning mõõtmised saaks sooritada nii, et tõstuki korv prisma ja elektrontahhümeetri vaateväljale ette ei jääks, kinnitati tahhümeeter relsile. Relsile kinnitamiseks konstrueeriti koos välitöö juhendajaga vineerplaadist rakis (vt joonis 5.4), millele kinnitati treeger, et lihtsustada instrumendi kinnitamist ja loodimist. Rakis kinnitati I-tala külge pitskruvidega.



Joonis 5.4 Instrumendi kinnitusrakis

Peale rakise paigaldust ja selle kontrollimist, (selleks, et ta oleks stabiilselt relsi küljes kinni ega saaks paigalt liikuda) kinnitati treegerile elektrontahhümeeter (vt joonis 5.5). Elektrontahhümeetri loodimisel kontrolliti, et elektrooniline lood ei võbiseks, kui talale midagi vastu läheb. Kontrollimiseks raputati tala, mille tulemusel oli näha, et lood kõikus korraks mõne sekundi võrra, aga seejärel taastas oma algse asendi.



Joonis 5.5 Rakisele kinnitatud elektrontahhümeeter talal

Peale tala stabiilsuse kontrolli orienteeriti elektrontahhümeeter vastulõigete meetodil, kus kasutati kahte varasemalt taladele viidud alusvõrgu punkti ja ühte seinale kindlustatud punkti. Veendumaks punktide õigsuses, tehti kontrollmõõtmine ka olemasolevale alusvõrgu punktile KL31 (vt joonis 5.3).

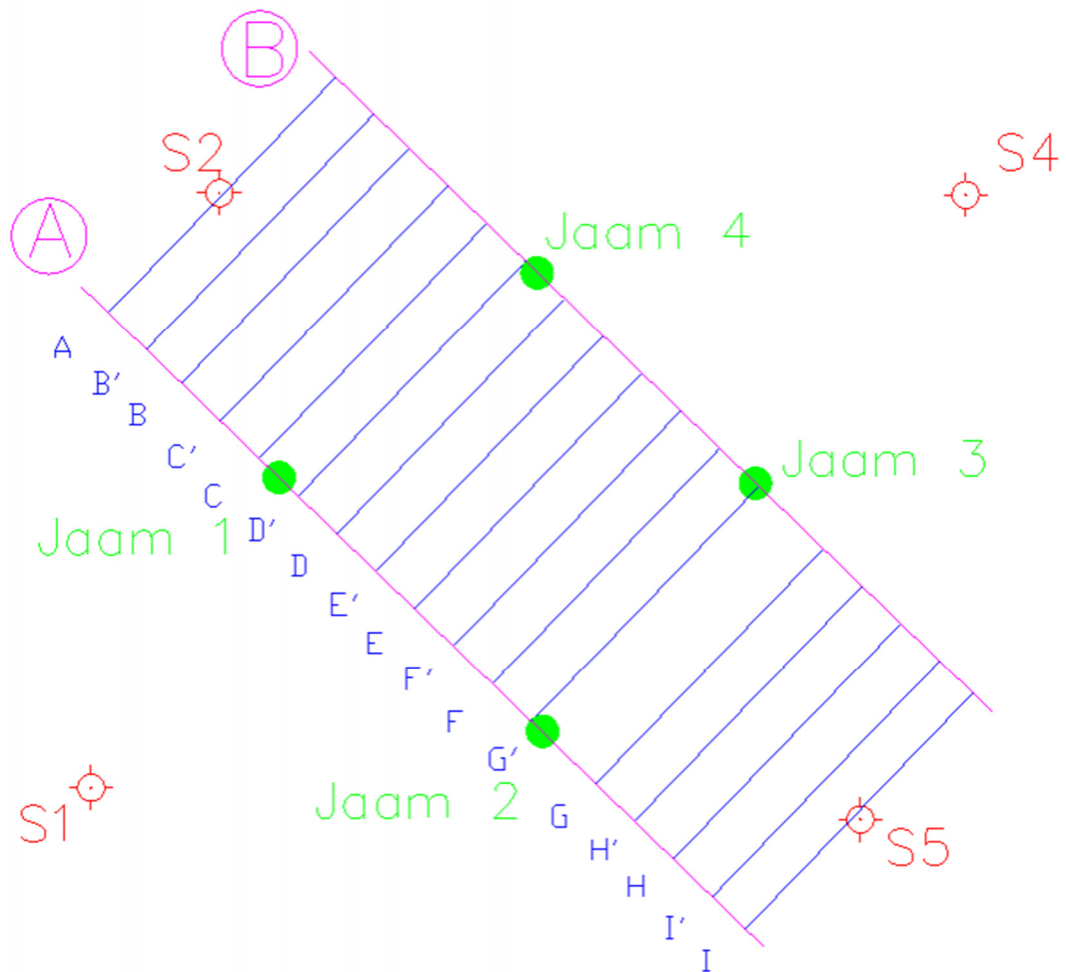
Kraanatee relse mõõdeti tee põiktelgedel. Mõõtmispunktide valikul järgiti reeglit, et punktid mõõdistatakse mõlema relsi puhul samalt ristsirgelt. Selle tagamiseks kasutati mõõdulinti ja eelnevalt ettevalmistatud algandmete faili. Relsi ristlõike pealispinna telje määramiseks kasutati nihkkaliibrit. Mõõdistuspunkt tähistati veekindla markeriga kraanatala telje mõõdistamiseks ja edaspidiseks reguleerimiseks. Kokku mõõdistati mõlemale relsile 17 relsi teljepunkti. Tahhümeetrilise mõõtmise instrumendi stabiilsuse hindamiseks tehti kontrollmõõdistus ühele mõõdistamisvõrgu kontrollpunktile KRN2 (vt joonise 5.3). Kontrollmõõdistused viidi läbi mõõdistuse alguses ja lõpus.

Tahhümeetrilisele mõõdistusele kulus 5 tundi. Mõõdistusaeg kulus peamiselt tõstukiga ühest punktist teise liikumisele ning ohutusnõuete järgimisele. Raskendatavateks

asjaoludeks olid ebatasane pinnas, samaaegselt toimuvad kaeve- ja pinnase planeerimistööd ning ehitusplatsile ladustatud materjalid. Parim aeg mõõdistuste tegemiseks on peale tööpäeva lõppemist või puhkepäeviti, kuna siis on objektidel mõõtmise segavaid faktoreid vähem. Seda tuleks edaspidiste mõõtmiste planeerimisel arvesse võtta.

5.5 TLS mõõdistuse kirjeldus

Kraana tee laserskaneerimiseks kasutati kokku nelja jaama, mis asetsesid kraanatee relsil. Neist 2 jaama olid A relsil ja 2 B relsil (vt joonis 5.6). Nelja jaama eesmärk oli see, et laserskanneri ja relsi vaheline nurk ei muutuks liiga suureks. Kui laserskanner on asetatud ühele relsile, mõõdab see ka vastasoleva relsi äärele, et tekiks tihedam punktide ülekate. Laserskanner asetati relsile sama platvormiga, mida kasutati tahhümeetrilisel mõõdistusel (vt joonis 5.7).



Joonis 5.6 Laserskanneri seisupunktide ja kindelpunktide skeem. S1, S2, S4 ja S5 on laserskaneerimise jaoks seinale pandud A4 suuruses must-valge ringiga märgid. Joonisel on toodud laserskaneerimisjaamade asukohad (roheline täpp). Teljed A ja B (roosalt) tähistavad kraanatee relse ning siniselt on kraanatee põikteljed

Kuna kasutatud laserskanneri puhul on vaja punktile orienteerimiseks näha tema paremal küljel olevat ekraani, oli igast seisust võimalik kasutada orienteerimiseks ainult kolme seinal olevat alusvõrgu punkti. Laserskaneerimisel prooviti erinevaid ruumilisi lahutavusi, milleks olid 5x5 mm, mis võttis aega 7 minutit, 4x4 mm, mis võttis 11 minutit, 3,5x3,5 mm, milleks kulus 13 minutit ja 3x3 mm, mille jaoks läks 19 minutit. Kõikides jaamades oli kauguseks määratud 35 m, mis defineerib distantsi kus saavutatakse määratud ruumiline lahutatavus. Enne määratud distantsini jõudmist mõõdab skanner tihedamalt ja peale ette antud vahemaa ületamist hõredamalt. Kauguse määramine mõjutab peale punkt pilve tiheduse veel mõõtmisteks kuluvat aega. Jaamadest tehtud laserskanneri ruumilised lahutavused varieerusid, kuna kellaaeg oli hiline ja väljas läks pimedaks, mis komplitseeris seinal asetsevate alusvõrgu

punktide nägemise. Laserskaneerimiseks kulus 1 tund ja 45 minutit. Pool sellest ajast kulus instrumendi orienteerimisele ja tõstukiga ühest punktist teise liikumisele.



Joonis 5.7 Laserskanner rakisele kinnitatuna

5.6 Töös kasutatud korvtõstukiga töötamise ohutusnõuded

Töös kasutatud korvtõstukil on olemas kasutusjuhend, mis tuli enne kasutama asumist läbi töötada. Lisaks juhendile tegi objektile olev tõstukijuht koolituse, kuidas seda kasutada. Peale liikumiseks vajaliku juhtpuldi tutvustuse, räägiti üle tähtsamad ohutusnõuded, mida järgida. Mõningaid ohutusnõuete näiteid korvtõstuki Genie Z 45/25 RT J-ga töötamisel: [12]

- Alati kasutada turvarakmeid. Rakmete küljes olev tross tuleb kinnitada tõstuki platvormil oleva kinnituse külge. Lisaks tuleb järgida ka tööandja, töökoha ja riigiasutuste kehtestatud määrusi, mis käivad isikukaitsevarustuse kasutamise kohta. Nendeks on näiteks kiivri ja turvasaabaste kandmine.
- Mitte ületada platvormi maksimaalset kandevõimet ega inimeste arvu. Nende ületamisel on oht, et tõstuk võib ümber kukkuda.

- Jälgida masina all oleva pinnase tugevust. Seade võib vajuda kaldu, kui see asub liiga pehmel pinnasel, mis võib põhjustada ümber kukkumise.
- Sõita tasasel pinnal.
- Mitte istuda, ronida ega seista platvormi kaitsepiiretel.
- Platvormi liigutamisel vaadata ega töökohas pole ülalpool olevaid takistusi või muid võimalikke ohte.
- Tõstetud platvormilt mitte alla ronida.
- Olla ettevaatlik platvormi kaitsepiirdest kinni hoidmisel, et vältida käe jäämist platvormi ja mingi muu objekti vahele.
- Enne kasutamist teha masinale kasutuseelne ülevaatus. Näiteks kontrollida rehvirõhku, lekete esinemist, lüliteid jms.
- Platvormile minna või sellelt maha tulla võib ainult siis, kui masin on kokkupandud asendis ja platvorm on maapinnal.
- Hoida platvormi pind prahist puhas, et vältida komistamise ohtu.

5.7 Täpsusnõuded

Kraanateede täpsusnõuded on ette antud valmistajatehase poolt. Täpsusnõuded sõltuvad kraanatee konstruktsioonist, sildest, liikumiskiirusest, kraana tõstejõust ja tee eksploatatsiooni ajast. Erilist tähelepanu tuleb pöörata kahe kraanarelsi liitekohtadele. Relsside üleminek peab olema sujuv; asendilised ja kõrguslikud hälbed peavad jääma 1 mm sisse. Joonisel 5.8 on näidatud reguleerimist vajavat liitekohta. Tellijapoolne nõue oli, et teostusjoonise järgi peab monteerijatel olema võimalik kraanateed rihtida tolerantside tagamiseks. Geodeet peab optimeerima kraanatee telje selliselt ja näitama reguleerimise suunad monteerijatele, nii et kraanatee vastaks tolerantsinõuetele ka tugipostide vahekohtades, kust kraanateed reguleerida pole võimalik.



Joonis 5.8 Kahe kraanarelsi liitekoht, mis vajab reguleerimist

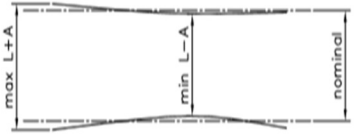
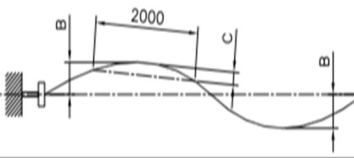
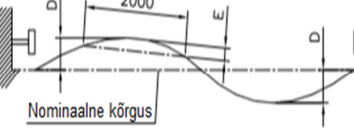
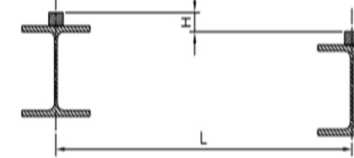
Möödistatava kraanatee puhul oli peatöövõtja andnud ehitajale tabelis 5.1 ette nähtud tolerantsid. Antud kraanatee puhul nõuti teise klassi tolerantsi nõuete täitmist. Teise klassi puhul võib üle 16 meetri laiuse kraanatee relsside vahekauguse viga olla maksimaalselt +/- 15 mm ja alla 16 meetrise kraanatee puhul +/- 5 mm. Ühel ristsirgel olevate relsside kõrguste erinevus võib olla +/- 10 mm. Kraanatootja poolt ehitajatele antud telgede vahe täpsusnõuded on +/- 6 mm.

Käesolevas töös uuriti 18,18 meetri laiust kraanateed, seega tuleb lubatud vea arvutamiseks kasutada tabelis 5.1 olevat valemit (5-1):

$$A=[Y+0,25(18,18-16)]=5,5mm, \quad (5-1)$$

Kus, A – lubatud viga, Y = 5 (ette antud täpsusklassi 2. konstant), arvutuse tulemuse ümardame 6 mm-ks, sama lubatud vea suuruse andis kraanatootja ehitajatele.

Tabel 5.1 Tellija poolt antud kraanatee täpsuste tabel (ISO 12488-1)

	Joonis	ISO 12488-1 tolerantsid		
		Klass I	Klass II	Klass III
Sille		$L \leq 16 \text{ m}$, $A = 3 \text{ mm}$	$L \leq 16 \text{ m}$, $A = 5 \text{ mm}$	$L \leq 16 \text{ m}$, $A = 8 \text{ mm}$
		$L > 16 \text{ m}$: $A = [Y+0.25(L[m]-16)] \text{ mm}$		
		$Y = 3$ $\text{max } A = 10 \text{ mm}$	$Y = 5$ $\text{max } A = 15 \text{ mm}$	$Y = 8$ $\text{max } A = 20 \text{ mm}$
Sirgjoonelisus (plaaniliselt)		$B \leq 5 \text{ mm}$ $C \leq 1 \text{ mm}$	$B \leq 10 \text{ mm}$ $C \leq 1 \text{ mm}$	$B \leq 20 \text{ mm}$ $C \leq 2 \text{ mm}$
Kõrguskasvud piki relssi		$D \leq 5 \text{ mm}$ $E \leq 1 \text{ mm}$	$D \leq 10 \text{ mm}$ $E \leq 2 \text{ mm}$	$D \leq 20 \text{ mm}$ $E \leq 4 \text{ mm}$
Relsside vaheline kõrguskasv		$H[\text{mm}] \leq 0.5 \times L[\text{m}]$ $\text{max } H = 5 \text{ mm}$	$H[\text{mm}] \leq L[\text{m}]$ $\text{max } H = 10 \text{ mm}$	$H[\text{mm}] \leq 2 \times L[\text{m}]$ $\text{max } H = 20 \text{ mm}$

Kraanatee mõõdistamise plaanilised ja kõrguslikud geodeetilised lubatud vead saame arvutada ehituslikest lubatud vigadest. Plaaniliste vigade Δp puhul, kuna tee sildel on tegemist kahe relsi asendiga, siis jagame ühe relsi geodeetilise vea $\sqrt{2}$ -ga. Seega asendi määramise lubatav viga oleks:

$$\Delta p = \frac{6 \times 0,4}{\sqrt{2}} = \pm 1,7 \text{ mm} \quad (5-2)$$

Kõrguslik geodeetilise mõõdistuse lubatud viga Δk on:

$$\Delta k = 10 \times 0,4 = \pm 4,0 \text{ mm} \quad (5-3)$$

Saadud veaväärtusi võrreldakse hilisemas töös täpsushinnangu arvutustest saadud KRV-ga, mille põhjal analüüsitakse, kas TLS sobib kasutamiseks mõõdistamismeetodil nagu käesolevas töös tehti. Täpsushinnangu aluseks võetakse tahhümeetrilised mõõdistused. Täpsushinnang arvutatakse kahel eeldusel, et:

- tahhümeetrilised mõõtmised on täpsemad kui TLS mõõtmised;
- tahhümeetrilised ja TLS mõõdistused on võrdtäpsed.

6 MÕÖDISTUSANDMETE TÖÖTLEMINE

Selles peatükis käsitletakse tahhümeetrilise mõõtmise andmetöötlust, TLS punktipilvede georefereerimist ja nende töötlemist. Tööks kasutati programme Leica Cyclone, AutoCad Civil 3D 2018, Autodesk ReCap 2019, AutoCad 2007+geodeedi lisarakendusi.

6.1 Tahhümeetrilise mõõdistuse andmetöötlus

Mõõdistusandmed on seotud projektiga hoone põhitelgede ja mõõdistusvõrgu kaudu. Teostusjoonise tegemiseks kasutati AutoCad 2007 ja sinna juurde käivad geodeetiliste töödega seonduvaid rakendusi. Andmete sisestamiseks eraldi andmeid töödelda pole tarvis. Andmed kuvatakse ekraanile ja teostusjoonisele 0,1 mm täpsusega, vormistusel ümardatakse 1 mm täpsuseks. Kui mõõdistused erinevatel relssidel pole tehtud täpselt ristsirgel, tuleks konstrueerida mõõdistatud punktist ristsirge relsi teljega ja võrrelda relsipaari kahe ristsirgele lähima mõõdistuse andmeid. Joonisele tuleb kanda keskmine erinevus. Mõõdistustäpsus oleneb alusvõrgust ja kogu kraanatee mõõdistamise seisude arvust. Antud töö puhul oli planeeritud mõõdistus teostada ühest seisupunktist, mida ka tehti. Ühe kraanatee teostusjoonise tegemiseks kulus ligikaudselt kolm tundi.

6.2 Leica Cyclone

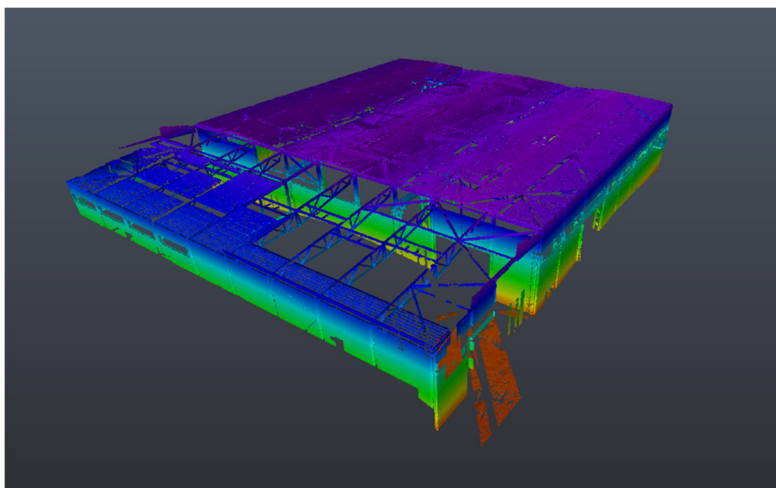
TLS mõõdistuse andmetöötluse esimeses etapis kasutati Leica Cyclone tarkvara. Programmi rakendati punktipilve georefereerimiseks, koordineerimiseks, puhastamiseks ning faili laiendi muutmiseks sellisele kujule, et seda saaks kasutada ka teistes programmides.

TLS mõõtmised tehti neljast erinevast seisupunktist. Laserskanner tekitab igast mõõdetud seisupunktist eraldi punktipilve. Punktipilvede omavaheliseks ühildamiseks tuleb igast mõõtmisjaamast skaneerida vähemalt kaks mõõdistusvõrgu tähist. Mida rohkem tähiseid skaneeritakse, seda kindlam on tulemus. Kui igast jaamast on skaneeritud piisavalt teiste jaamadega ühilduvaid tähiseid, saab tekkinud punktipilved omavahel georefereerida. Georefereerimine algab skaneerimisjaamade ja tähiste sisestamisest programmi. Enne nende sisestamist tuleb programmi märkida, et mõõtmistel on kasutatud A4 paberile trükitud kahemõõtmelisi tähiseid. Enne georefereerima asumist peab sisestama ka tähiste koordinaadid, sest hiljem neid lisada

pole võimalik. Tähiste failis peavad olema samasugused tähiste nimed nagu skaneerimisel neile määrati.

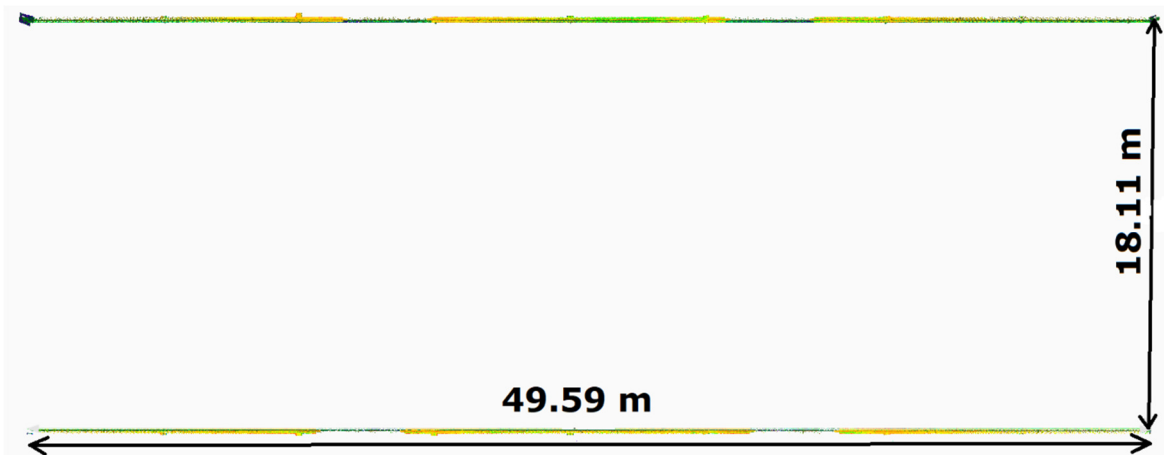
Selleks, et sildkraanatee oleks kogu ehitusega rajatud samas koordinaadistikus, oli sildkraanatee mõõdetud tahhümeetriliselt samas süsteemis. Sellel põhjusel georefereeriti ka punktipilv parema võrdlusmomendi saamiseks samasse süsteemi.

Georefereeritud punktipilvega töötamiseks kasutatakse Cyclone *Modelspace* rakendust. *Modelspace* võimaldab luua mitmeid eraldiseisvaid andmemudeleid. Soovitatav on originaalmudel alles jätta ja sellest koopia teha. *Modelspace*'i rakenduses saab töötada erinevate vaadetega. Näiteks kustutada kõik hoonetega seonduv ja jätta alles ainult maapind või vastupidi [23]. Hoone puhastamata andmemudelil on näha kõik punktid, mis neljast mõõtmisjaamast skaneeriti (vt joonis 6.1).



Joonis 6.1 Georefereeritud punktipilv puhastamata kujul

Puhastamise eesmärgiks on eemaldada mõõtmisel tekkinud jämedad vead ning andmetöötamiseks ebavajalikud osad. Kuna uurimistöö eesmärgiks on uurida sildkraanatee relsse, puhastati andmemudel sellisele kujule, et alles jäi ainult sildkraanatee relss ja I-tala ülemine osa. Lisaks aitab punktipilve puhastamine muuta faili andmemahtu väiksemaks. Käesolevas töös mõõdetud originaalpunktipilve faili suurus oli 1200 MB, millest puhastatud kujul jäi alles 6 MB. Puhastatud punktipilvel on hõreda andmestikuna näha relsi keskel olevad kohad (vt joonis 6.2 ja joonis 7.3). Nendes kohtades olid laserskanneri mõõdistusjaamad. Kui üksikseisuna on jaamades tühjad kohad, siis sellise mõõtmise puhul on punktid sinna mõõdetud vastasrelsilt paiknevast jaamast.



Joonis 6.2 Georefereeritud mudelist puhastatud kraanatee relsid

Kraanatee relsi kõrguste uurimiseks puhastati punktipilv sellisele kujule, et alles jääks vaid relsi pealmine pind. Sedasi sai veelgi vähendada punktipilve andmemahutu, mis võimaldas edasises andmetöötles vaheprogrammi kasutamata punktipilvest saadud punktid importida AutoCad Civil'isse. Kõige eelnevalt kirjeldatud tegemiseks kulus ligikaudu 1,5 tundi.

6.3 Autodesk ReCap 2019

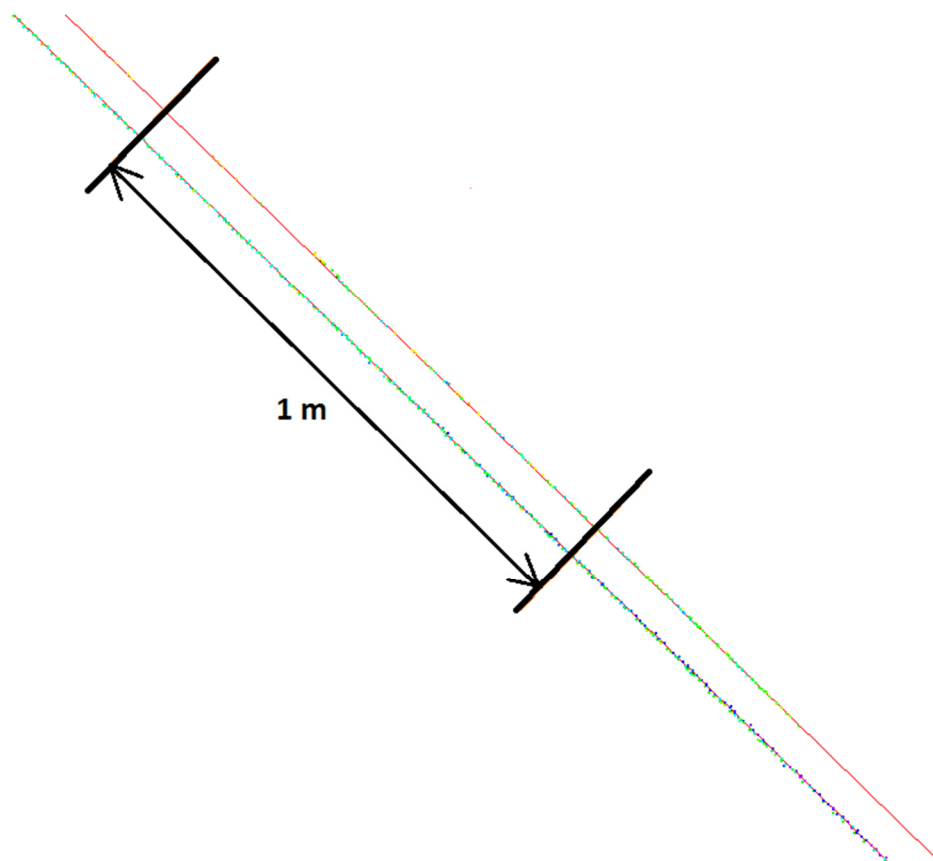
AutoDesk ReCap on 3D modelleerimise programm. Käesolevas töös kasutati Autodesk ReCapi Leica Cyclon'ist saadud punktipilve kohandamiseks .rcp laiendiks, eesmärgiga muuta punktipilv AutoCad Civilis paremini töödeldavaks. Varem Leica Cyclones puhastatud punktipilv võimaldas selles programmis töö järgmiseks etapiks ette valmistada 15 minutiga.

6.4 AutoCad Civil 3D 2018

AutoCad Civil 3D 2018 programmi võeti referentsandmetena AutoDesk ReCapiga tehtud punktipilv. Relsi telje leidmiseks lõigati esimese sammuna punktipilvest *crop* käsklust kasutades välja üks relss. Väljalõigatud relsi külje saamiseks keerati joonis vertikaalsuunda. Selline punktipilve asend võimaldas välja lõigata relsi alumise osa selliselt kõrguselt, et ei jääks näha eksitavad relsi keevituskohtasid. Kuna ristlõikega relss on pealt kumer, lõigati välja relsi pealmine osa selliselt kõrguselt, et jääks alles ainult relsi külg.

Järgmise sammuna lisati sildkraanatee projektifailist joonisele relsi projektitelg, millele lisati *array* käsklust kasutades iga meetri tagant üks ristlõige, mis hõlbustaks

punktipilvest relsi külje joonestamist. Relsi külje välja joonestamiseks kasutati *polyline* käsklust, mida tehti kolm korda. Joonestamisel tekkivate vigade vähendamiseks võeti kolmest *polyline*'st keskmine väärtus. Sildkraanatee projektist oli teada relsi laius, mille abil sai *offset* käsklust kasutades leida relsi telje. Kuna kohati oli punktipilves mõõdetud kogu relss siis *offset* käskluse abil lisati joonisele teine relsi külg, mida kasutati külje välja joonestamise kontrollimiseks (vt joonis 6.3). Kõike eelnevat korrati ka teise relsi puhul.



Joonis 6.3 Punktipilvest välja joonestatud relsi külg ning *offset* käsklusega lisatud relsi teine külg. Välja joonestatud külge pole jooniselt hästi näha, kuna see jääb punktipilve punktide alla. Punased jooned tähistavad relsi külgi, must on relsi projektteljega risti olevad abijooned, mis on üksteisest 1 meetri kaugusel. Värvilised täpid on punktipilve punktid

Punkti kõrguste saamiseks imporditi AutoCad Civilisse ainult relsi pealmise pinna punkte sisaldav punktifail. Järgnevalt märgiti joonisele tahhümeetrilise määrdistuse punktide asukohad. Laserskaneerimise kõrgused võeti tahhümeetrilise määrdistuse punktide asukohtadele tehtud 0,2 mm raadiuse ringi seest. Ringide sees olevatelt määrdpunktidelt määrati mediaan kõrgus. Saadud TLS määrdistuse kõrgustest arvutati hälbed suhtelisest nullkõrgusest, mida analüüsitakse jaotises 7.2. Joonisel 6.2 nähtavale andmestikule saadi joonis kahe tunniga ja joonisel 6.3 nähtav andmestik ühe tunniga.

7 TÖÖ TULEMUSTE ANALÜÜS

Antud peatükis kirjeldatakse TLS ja tahhümeetrilise mõõdistuse plaanilisi ja kõrguslikke hälbeid ning antakse mõõtmistele täpsushinnang, mida analüüsitakse ISO 4463-1 ja ISO 12488-1 standardite põhjal. Peatükis esitatakse autoripoolsed ettepanekud tulevikutööde tulemuste parandamiseks.

7.1 TLS ja tahhümeetrilise mõõtmiste plaanilised hälbed

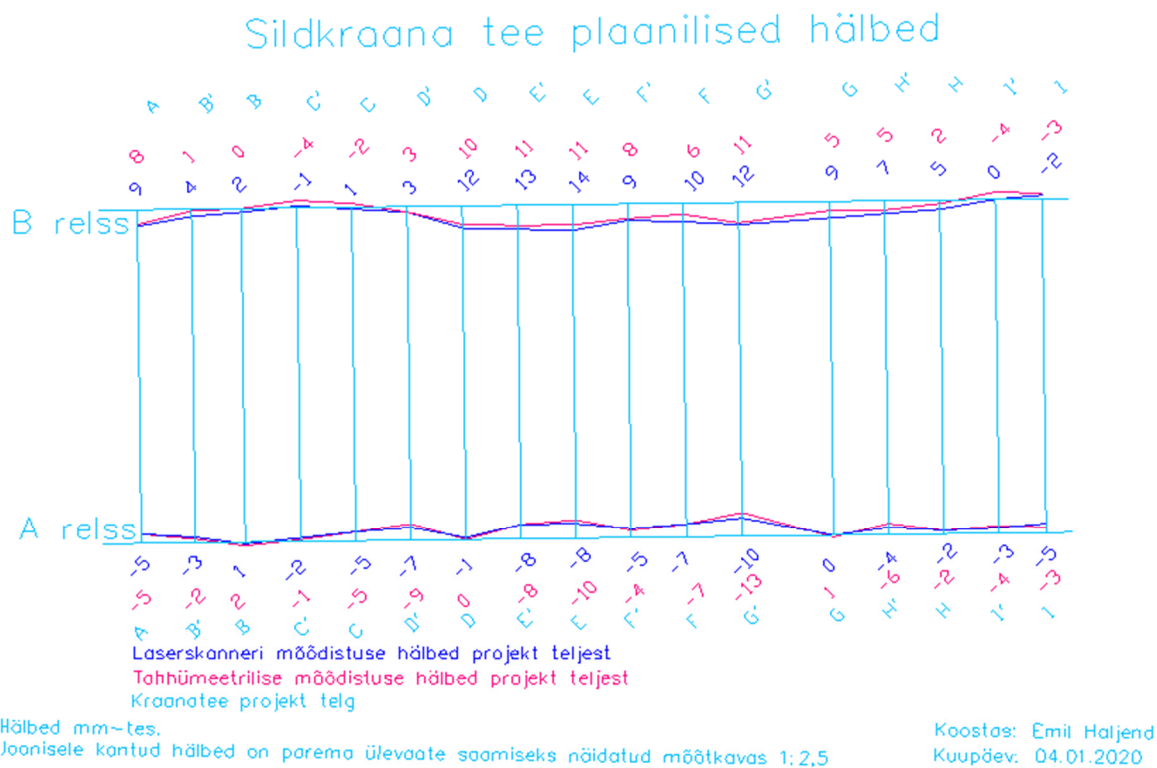
Parema võrdluse saamiseks võrreldi TLS ja tahhümeetrilise meetodiga saadud punkte täpselt samades kohtades. Võrdluse aluseks võeti projektis olev kraanatee telg. Hälbed projektist lisati joonisele millimeetri täpsusega. Parema ülevaate saamiseks näidati plaanile kantud hälbed mõõtkavas 1:2,5. Hälbed on kohati lubatust suuremad, kuid kuna sildkraanatee oli veel ehitusjärgus, oli ehitajatel võimalik peale mõõdistustöid parandusi teha.

Tabel 7.1 Tahhümeetri ja TLS plaanilised hälbed ja mõõtmistulemuste vahed

Risttelg	Tahhümeeter		Laserskanner		A relss	B relss
	A relss (Ad ^T)	B relss (Bd ^T)	A relss (Ad ^S)	B relss (Bd ^S)	Ad ^T - Ad ^S	Bd ^T - Bd ^S
I	-3	-3	-5	-2	2	-1
I'	-4	-4	-3	0	-1	-4
H	-2	2	-2	5	0	-3
H'	-6	5	-4	7	-2	-2
G	1	5	0	9	1	-4
G'	-13	11	-10	12	-3	-1
F	-7	6	-7	10	0	-4
F'	-4	8	-5	9	1	-1
E	-10	11	-8	14	-2	-3
E'	-8	11	-8	13	0	-2
D	0	10	-1	12	1	-2
D'	-9	3	-7	3	-2	0
C	-5	-2	-5	1	0	-3
C'	-1	-4	-2	-1	1	-3
B	2	0	1	2	1	-2
B'	-2	1	-3	4	1	-3
A	-5	8	-5	9	0	-1
Keskmine (mm)	-4.47	4.00	-4.35	6.29	-0.12	-2.29
SD (mm)	3.94	5.22	2.95	5.04	1.37	1.18

Joonisel 7.1 on välja toodud TLS ja tahhümeetri põikhälbed projektist. Laserskanneriga mõõdetud põikhälbed jäävad A relsi puhul vahemikku +1 mm kuni -10

mm ja B relsi puhul +14 mm kuni -2 mm. Tahhümeetriga mõõdetud põikhälbed jäävad A relsi puhul vahemikku +2 mm kuni -13 mm ning B relsi puhul +11 mm kuni -4 mm. Tahhümeetrilise ja laserskanneri mõõdistuse omavahelised suurimad vahed on A relsil G' ristteljel ja B relsil F, G ja I' risttelgedel. A relsi suurimad tahhümeetrilise ja laserskanneri mõõtmistulemuste vahed jäävad risttelgedele, mille peal oli laserskanneri jaam. Nimelt laserskanneri seisupunkti jääb ringikujuline hõre andmestik, kuhu punktid mõõdeti vastasrelsilt. B relsi puhul olid laserskanneri erinevused A relsist suuremad, kuna laserskanneri jaamast 4 ja 3 (vt joonis 5.6) tehti kõige väiksema ruumilise lahutavusega vastavalt 5x5 mm ja 4x4 mm mõõtmised (mõõtmiskaugus 35m), mis tingib kõige hõredama punktipilve. Tabelis 7.1 on toodud ka standardhälbed, mis näitavad punktide hajuvust. A relsi puhul on laserskanneri hajuvus 2,95 mm ja tahhümeetril 3,94 mm. B relsi puhul on hajuvus tahhümeetrilisel mõõdistusel 5,22 mm ja laserskanneri puhul 5,04 mm, mis on peaaegu võrdsed. Laserskaneerimise tulemusena on relsid projektikohasemad (sirguse seisukohalt) kui tahhümeetriliste mõõdistamiste järgi, aga samas on telgede vaheline kaugus laserskaneerimise järgi suurem. Ka see võib olla tingitud sellest, et skaneerimisel tekib punktipilv, millest saab optimaalseima tulemuse võtta. Tahhümeetri ja laserskanneri omavahelised suhtelised hajuvused on A relsi puhul 1.37 mm ja B relsi puhul 1.18 mm.



Joonis 7.1 Skeem laserskanneri ja tahhümeetriga mõõdetud plaanilistest hälvetest projekt teljest. A ja B tähistavad relssi, helesinine kraanatee projekti telge, roosa tahhümeetrit ja sinine laserskannerit

7.2 TLS ja tahhümeetriliste mõõtmiste kõrguslikud hälbed

Kraanatee kõrguslikuks aluseks võeti tahhümeetrilisel mõõdistusel saadud kõige väiksema hälbega punkt. Selle punkti kõrguseks oli 87,550 m, mis on ühtlasi ka projektis ettenähtud EH2000 süsteemis kraanatee relsi kõrgus. Sildkraanatee suhteline nullkõrgus asus B relsi C ristteljel. Hälbed kanti joonisele millimeetrini ümardatuna. Lisaks arvatati kahe relsi telgede vahelised suhtelised kõrgused.

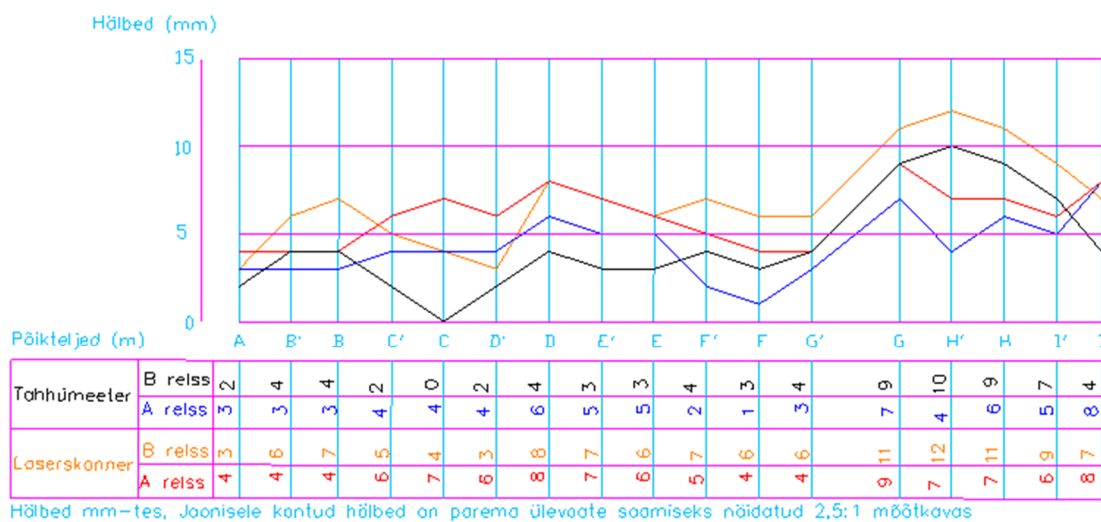
Tabel 7.2 Tahhümeetri ja TLS kõrguslikud hälbed ja telgede suhtelised vahed lähtekõrguse suhtes

Risttelg	Tahhümeeter			Laserskanner			A relss	B relss
	A relss (Ad ^T)	B relss (Bd ^T)	suhteline vahe	A relss (Ad ^S)	B relss (Bd ^S)	suhteline vahe	Ad ^T - Ad ^S	Bd ^T - Bd ^S
I	8	4	4	8	7	1	0	-3
I'	5	7	2	6	9	3	-1	-2
H	6	9	3	7	11	4	-1	-2
H'	4	10	6	7	12	5	-3	-2
G	7	9	2	9	11	2	-2	-2
G'	3	4	1	4	6	2	-1	-2
F	1	3	2	4	6	2	-3	-3
F'	2	4	2	5	7	2	-3	-3
E	5	3	2	6	6	0	-1	-3
E'	5	3	2	7	7	0	-2	-4
D	6	4	2	8	8	0	-2	-4
D'	4	2	2	6	3	3	-2	-1
C	4	0	4	7	4	3	-3	-4
C'	4	2	2	6	5	1	-2	-3
B	3	4	1	4	7	3	-1	-3
B'	3	4	1	4	6	2	-1	-2
A	3	2	1	4	3	1	-1	-1
Keskmine (mm)	4.29	4.35	2.29	6.00	6.94	2.00	-1.71	-2.59
SD (mm)	1.74	2.70	1.27	1.57	2.55	1.37	0.89	0.91

Suhtelised telgede vahelised hälbed erinevad kahe mõõtmismeetodi vahel kuni 3 mm. Kõige suurem erinevus on I teljel, mis võib olla tingitud asjaolust, et laserskanneri seisust 1 (vt joonis 5.6) mõõdetud punktipilve tihedus oli B relsi I telje juures kõige hõredam. Keskmine suhteline vahe on tahhümeetriliselt saadud tulemustel 2,29 mm ja TLS mõõdistusel 2,00 mm. Tahhümeetri A relsi keskmine erinevus suhtelisest nullkõrgusest on 4,29 mm ja B relsi keskmine erinevus 4,35 mm. Laserskanneri mõõtmise A relsi keskmine erinevus suhtelisest nullkõrgusest on 6,00 mm ja B relsi erinevus 6,94 mm. Laserskanneriga mõõdetud kõrgused on tahhümeetriga mõõdetud kõrgustest mõlema relsi kõigil risttelgedel kõrgemal, va A relsi I ristteljel, kus mõõtmiste vahe on 0. Joonisel 7.2 on näha, et laserskanneri ja tahhümeetri vahel on konstante

nihe. Mõõtmiste kõrguslik vahe võib tuleneda laserskanneri orienteerimisest alusvõrgu punktidele või prisma kõrguse määramisest. A relsil on kõige suurem mõõtmiste omavaheline erinevus 3 mm ja B relsil 4 mm. Tahhümeetrilise mõõdistusel vastas projektkõrgusele üks punkt, mis asub C ristteljel. Suhteliste vahede standardhälbed tahhümeetriliste mõõdistuste puhul on 0,1 mm väiksemad laserskanneri mõõdetud suhtelistest vahedest. Kõrguslikud standardhälbed on mõlema mõõtmismeetodi puhul peaaegu sarnased. Tahhümeetri ja laserskanneri omavahelised suhtelised hajuvused on A relsi puhul 0,89 mm ja B relsi puhul 0,91 mm.

Sildkraana tee kõrguslik pikiprofiil



Hälbed mm-tes, Joonisele kantud hälbed on parema ülevaate saamiseks näidatud 2,5:1 mõõtkavas

Koostas: Emil Holjend
Kuupäev: 04.01.2020

Joonis 7.2 Skeem laserskanneri ja tahhümeetri mõõdetud kõrguslikest hälvetest suhtelise nullkõrguse suhtes. Eraldi on välja toodud laserskanneri ja tahhümeetri A ja B relsid erinevate värvidega; must – tahhümeetri mõõdetud B relss; sinine – tahhümeetri mõõdetud A relss, oranž laserskanneri mõõdetud B relss; punane – laserskanneri mõõdetud A relss. Joonisel on hälbed parema ülevaate saamiseks näidatud mõõtkavas 2,5:1

7.3 Mõõtmiste täpsushinnang

Tahhümeetriliste mõõdistuste hälbed projektelje suhtes on väiksemad (vt tabel 7.1 ja tabel 7.2). Seega esialgse täpsushinnangu arvutamisel eeldatakse, et tahhümeetrilised mõõdistused on laserskanneri mõõdistustest täpsemad. Kuna AT360 prisma vead pole selles töös mõõdetud joonte pikkuste puhul suured, võib eeldada, et selle prisma

kasutamisel võib lugeda tahhümeetriga sooritatud mõõtmised täpseteks ning täpsushinnangu andmiseks kasutatakse valemit (7-1):

$$m = \sqrt{\frac{\overline{\Delta^2}}{n}}, \quad (7-1)$$

kus, $\Delta = \delta^T - \delta^S$. Selles valemis on δ^T - elektrontahhümeetriga mõõdetud hälve relsi projektteiljest ja δ^S - skanneriga mõõdetud hälve relsi projektteiljest, n tähistab mõõtmispaaride arv.

Tabel 7.3 Täpsushinnang isetäpsete mõõtmiste järgi

Täpsushinnang		
	plaanilised hälbed	kõrguslikud hälbed
A relss KRV	1.37	1.93
B relss KRV	2.58	2.74
Kogu KRV	2.07	2.37

Valemit (7-1) kasutati plaaniliste ja kõrguslike mõõtmiste täpsushinnangu andmiseks, kusjuures eeldati, et mõõtmised elektrontahhümeetriga olid täpsemad. Plaaniliseks täpsushinnanguks saadi A relsi puhul KRV 1,37 mm ja B relsi puhul KRV 2,58 mm. Võib eeldada, et B relsi puhul tekkis suurem viga, kuna mõõdeti väiksema ruumilise lahutavusega. A ja B relsi kogu KRV-ks saadi 2,07 mm.

Kõrguslike isetäpsete mõõtmiste täpsushinnangu KRV-ks saadi A relsil 1,93 mm ja B relsil 2.74 mm. Eeldatakse, et B relsi suuremad vead tekkisid samadel põhjustel nagu plaaniliste vigade puhul. A ja B relsi kogu KRV-ks saadi 2.37 mm.

Kuna aga puuduvad kindlad andmed, et elektrontahhümeeter on tegelikult täpsem, võib eeldada, et mõõtmised olid võrdtäpsed. Sellisel juhul kasutatakse täpsushinnanguks võrdtäpsete kaksimõõtmiste vahesid valemiga (7-2):

$$m = \sqrt{\frac{\overline{d^2}}{2n}}, \quad (7-2)$$

kus, $d = \delta^T - \delta^S$. Siin δ^T - elektrontahhümeetriga mõõdetud hälve relsi projektteiljest ja δ^S - skanneriga mõõdetud hälve relsi projektteiljest, n mõõtmispaaride arv, mis tuleb korrutada kahega.

Tabel 7.4 Täpsushinnang võrdtäpsete mõõtmiste järgi

Võrdtäpsete mõõtmiste täpsushinnang		
	plaanilised hälbed	kõrguslikud hälbed
A relss KRV	0.97	1.36
B relss KRV	1.82	1.94
Kogu KRV	1.48	1.70

Valemit kasutati plaanilise ja kõrgusliku võrdtäpsete mõõtmiste täpsushinnangu andmiseks. Plaaniliseks täpsushinnanguks saadi A relsi puhul KRV 0,97 mm ja B relsi puhul KRV 1,82 mm. A ja B relsi kogu KRV-ks saadi 1,48 mm. Kõrgusliku võrdtäpsete mõõtmiste täpsushinnangu KRV-ks saadi A relsil 1,36 mm ja B relsil 1,94 mm. A ja B relsi kogu KRV-ks saadi 1,70 mm.

ISO 4463-1 näeb ette maksimaalseks lubatud veaks 2,5-kordse KRV. Sellisel juhul ületavad lubatud vigade maksimumi ka võrdtäpsete mõõtmisena saadud tulemused, mis tähendab, et sellisel meetodil laserskanneriga objekti mõõtes ületavad vead lubatud normatiive. Võrdtäpsete plaaniliste vigade puhul on maksimaalne viga 3,70 mm ja kõrguslikult 4,25 mm. Plaanilised vead ületatakse sellel juhul 2 mm-ga ja kõrguslikud vead 0,25 mm-ga. Viimase suuruse võib lugeda tühiseks. Tulemustest järeldatakse, et sellise mõõtmismeetodi puhul laserskanneriga mõõtes ei saavutata plaanilist vajaliku mõõtmistäpsust, kuid kraanatee kõrguste mõõdistamiseks selline mõõtmismeetod sobib.

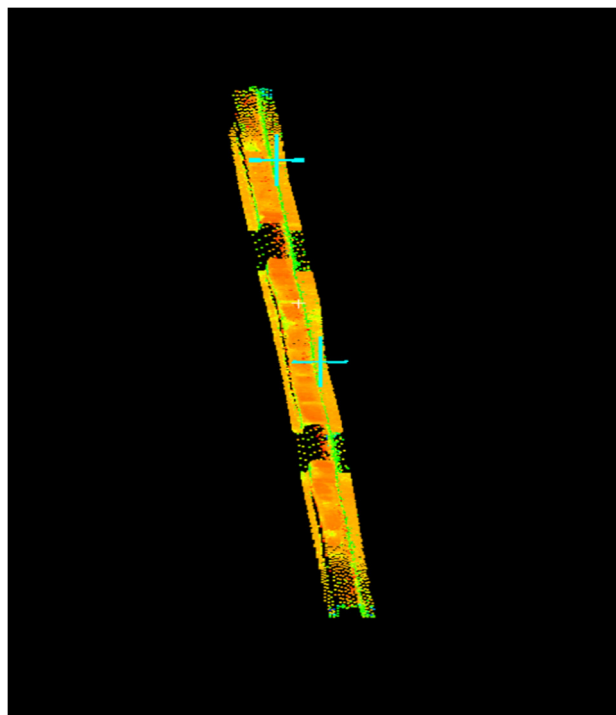
7.4 Ettepanekud töö tulemuste parandamiseks

Magistritöö koostajal on laserskanneriga mõõdistustel ja selle andmestiku töötlusel vähe kogemusi. Antud töö oli esimene kord, kui töö koostajal oli võimalik teha iseseisvalt laserskanneriga mõõdistusteid. Lisaks puudus laserskanneriga mõõtmise kogemus ka tahhümeetrilise mõõdistuse välitöö juhendajal. Töö koostaja eeldab, et rohkemate kogemuste puhul oleks võimalik saada paremad mõõdistustulemused. Järgnevas alapeatükis analüüsitakse, kuidas võiks olla võimalik töös tekkinud olukordades mõõtmistulemusi parandada.

Laserskaneerimisel oleks võinud kasutada mõõtmistel suuremat tihedust ja mõõtmised teha sektoriliselt piki relssi, et saavutada relsi otstesse suurem punktipilve tihedus. Samuti oleks pidanud sektoriliselt mõõtma vastasrelsile, seejuures ära määrama skaneerimise nurga, vältimaks üleliigset punktipilve müra. Sektori valikul võib

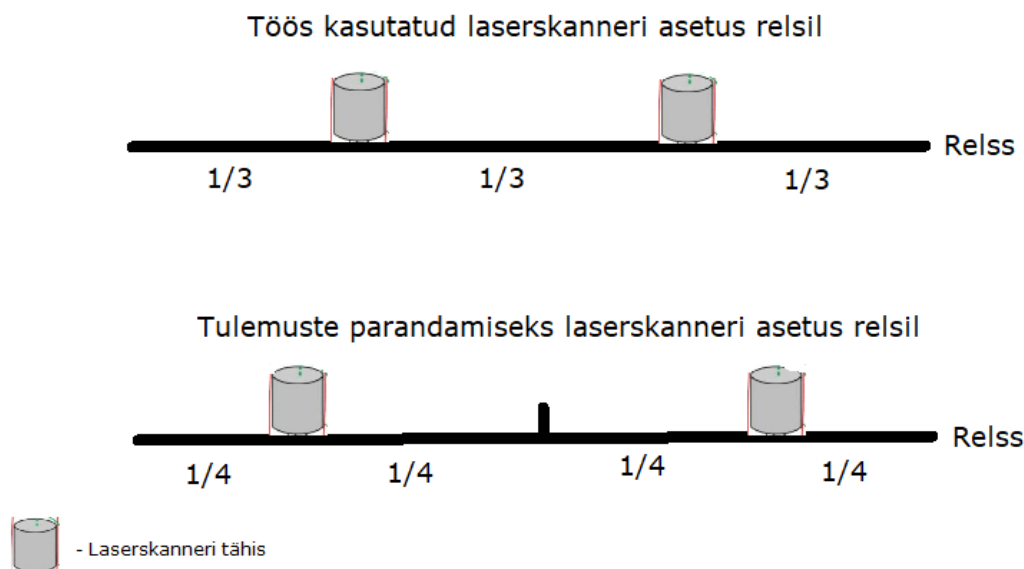
probleemiks olla laserskanneri sektorile asetamine. Kuna töid tehakse tsehhi lae all töstukikorvis, ei pruugi olla võimalik korvist sellisel viisil välja küünitada, et suunata laserskanner täpselt valitud sektorile. Juhul, kui selline variant õnnestuks, saanuks mõõtmised kiiremini tehtud ning mõõtmistel kasutada suuremat ruumilist lahutatavust ja määrata suurem mõõtkaugus. Skaneerimise ruumilise lahutatavuse valimisel tuleks arvestada mõõtmiseks kuluva ajaga. Mida suuremat punktitihedust soovitakse, seda rohkem aega mõõtmistele kulub. Antud töö puhul on oluline valida kraanatee parameetritele sobiv mõõtkaugus. Sellisel meetodil väheneks ka punktipilve puhastamisele kuluv aeg.

Relsi otsade mõõtmisel muutus laserikiire langemisnurk liiga suureks (89 kraadi), mis tingis sellesse osasse hõreda punktipilve (vt joonis 7.3). Hõredast punktipilvest oli keeruline täpselt relsi serva eristada, mis võib mõjutada tahhümeetri ja laserskanneri mõõdistuste vahelise täpsuse analüüsimist.



Joonis 7.3 Leica Cyclone programmiga tehtud pilt A relsi andmemudelist

Joonisel 7.3 on näha hõredamat andmestikku laserskanneri seisupunktis. Punktid, mis selles alas on mõõdetud, on saadud vastasrelsilt mõõtes. Kahe seisu vaheline ala on mõõdetud tihedamalt kui relsi otsad, kuna sinna tekib mõlemast seisust mõõtmiste ülekate. Tulemuse parandamiseks võiks proovida liigutada laserskanneri seisupunkte relsi otste suunas (vt joonis 7.4), misjuhul tekiks relsi keskele mõlemast seisupunktist punktide ülekate ning relsi servad saaks tihedamalt skaneeritud.



Joonis 7.4 Laserskanneri seisupunktide asetused relsil. Relss on jaotatud esimesel juhul $1/3$ sektoriteks ja teisel juhul $1/4$ sektoriteks

Laserskanerimise punktipilve tihedust saaks parandada kõrgema platvormi ehitamisega. Sellisel juhul tuleks arvestada skannerile mittenähtava ala suurenemisega (ala raadius on võrdne skanneri prisma kõrgusega alusest). Töös kasutatud laserskanner on oma kaalult suhteliselt raske instrument, mistõttu tuleks enne platvormi kõrgemaks ehitamist selle kandevõimet testida ning platvormi kinnistussüsteemi paremini läbi mõelda. Mõõdistuse hetkel oli laserskanneri telg relsist 35 cm kõrgemal. Selliselt kõrguselt mõõtes sai vastasrelsi pealmisele pinnale mõõta vaid mõned üksikud kõrgused (vt joonis 7.3). Kõrgemalt mõõtes muutuks skaneerimise ja mõõdistatava pinna nurk sobivamaks, mis aitaks vastasrelsi servale ja pealmisele pinnale mõõta tihedama punktipilve.

Antud töös on detailsus väga oluline. Kui punktipilvest oleks relsi külje paremini eristatav, saaks selle täpsemini välja joonestada. Relsi külje välja joonestamisel kujul, nagu andmetöötluse 6.4 peatükis kirjeldati, tuleb jätta joonisele alles ainult punktipilv ja meetrite vahede eristamise jaoks loodud ristlõiked projekt teljest. Juhul, kui joonisel on avatud veel muud kihid, võib see hakata mõjutama punktipilvest laserskanneri külje joonestamist.

Tahhümeetrilisel mõõdistusel oleks pidanud igat mõõtmist tegema kahe täisvõttega, et välistada inimtekkelised vead. Peamiselt saaks vältida prisma loodi hoidmisel tekkivaid eksimusi. Vead võisid tahhümeetrilisel mõõdistusel tekkida veel nihkkaliiberiga relsi telje määramisel, 0,3 mm-lise markeri otsa täpsusest või prisma teraviku asetamisest

selle ristile. Nihkkaliibriga relsi telje määramise viga ei ületa 0,5 mm, mis võib aga siiski mõjutada mõõtmistäpsust. Nihkkaliibri vea vähendamiseks tehti mahamärgitud punktile mõõtmisi kaks korda, pöörates kaliibrit 180°.

KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärgiks oli hinnata laserskanneri sobilikkust ja täpsust sildkraanatee mõõdistamisel. Katseobjekt, mida töös uuriti, oli ehitusjärgus tehas, kuhu planeeriti ehitada neli sildkraanateed. Sildkraanateedele teostati tahhümeetrilised teostusmõõdistused ning seejärel valiti välja üks sildkraanatee, mida laserskanneriga mõõtes uurida. Kuna sildkraanateest kõrgemat objekti rajatavas tsehhis polnud, tuli töö tegijal ja välitöö juhendajal improviseerida ning luua selline alus, mille abil sai instrumendi relsile asetada.

Selleks, et viia hilisemas andmetöötles Leica C10 laserskanneriga ja Trimble S5 elektrontahhümeetriga mõõdetud andmed ühte süsteemi, rajati enne sildkraanatee mõõtmisi Trimble S5-ga hoones olevast ehitusalusvõrgust täiendavad alusvõrgu punktid. Kaks neist märgiti kraanatee relsile ja neli hoone seintele, millest viimased olid laserskaneerimise alusvõrgu jaoks.

Tahhümeetrilised mõõdistused tehti kraanatee relsile asetatud raketiselt. Terve kraanatee mõõdeti ühest seisupunktist. Laserskanneriga viidi mõõtmised läbi neljast seisupunktist. Kuna laserskanneri telg oli kraanatee relsist vaid 35 cm kõrgemal, tekib relsi otstesse punkte hõredalt ning laserskanner ei näe enda all olevat 45° ala. Sellisel viisil saab relsil A olevast seisupunktist mõõta relsil B olevasse seisupunkti, et jääks näha üks relsi külg ja vastupidi. Laserskanneriga mõõdeti igast seisupunktist erineva ruumilise lahutavusega, mis ei olnud hea lahendus, kuna see mõjutas mõõdistustäpsust. Tahhümeetrilistele mõõtmistele kulus ligikaudu kolm korda rohkem aega kui laserskanneriga läbi viidud mõõtmistele.

Tahhümeetrilise mõõdistuse andmetöötlus viidi läbi AutoCad 2007 programmiga, kus kasutati geodeedi lisarakendusi. Laserskanneri andmetöötlus teostati kolme erineva programmiga. Punkt pilved georefereeriti ja puhastati Leica Cyclone'ga. AutoDesk ReCap 2019'ga konverteeriti Cyclone'st saadud punktifail AutoCad Civil 3D jaoks .rcp laiendiks. Järgnevalt joonestati punkt pilvest relsi üks külg. Kuna relsi laius oli teada, sai välja joonestatud küljest arvutada laserskanneriga mõõdistatud relsi telje asendi. Relsi projektiteljest ja mõõdetud teljest sai teada plaanilised laserskanneri ja tahhümeetrilise mõõdistuste hälbed. Kõrguslike hälvete saamiseks võeti tahhümeetrilise mõõdistuse kõige madalam punkt. Laserskaneerimise kõrgused võeti tahhümeetrilise mõõdistuse punktide asukohtadele tehtud 0,2 mm raadiuse ringi seest, millest arvutati teiste tahhümeetriliste ja laserskanneriga saadud samades punktides olevad suhtelised kõrgused ja nende erinevused.

Saadud tulemusi analüüsi ja nende põhjal anti mõõdistustele täpsushinnang. Varasemalt kasutati SniP 3.03.01-87 esitatud täpsusnõudeid: relsside vahelised kauguse erinevused projektist +/- 10 mm, mis tingib geodeetiliste mõõdistuste maksimaalseks lubatud veaks 4 mm. Käesoleval juhul võeti mõõdistuste täpsushinnangu aluseks ISO 12488-1 täpsusklass II nõuded. Need nõuded olid mõeldud ehitustäpsusele. Geodeetilise täpsuse nõuete saamiseks korrutati need, vastavalt GOST 26433.0-85 nõudega, 0,4-ga. Seega geodeetiliste tööde lubatud plaanilised vead töös analüüsitava sildkraanateel on +/- 1,7 mm ja kõrguslikud vead +/- 4,0 mm.

Kuna meil puuduvad kindlad andmed, et elektrontahhümeeter on täpsem, siis kasutati mõõtmistäpsuse hinnangul võrdtäpsete kaksikmõõtmiste vahede meetodit. Võrdtäpsete meetodi puhul oli B relsi KRV suurem kui A relsi oma. Plaaniliselt oli kogu KRV 1,48 mm ja kõrguslikult 1,70 mm. Plaaniliste vigade puhul on maksimaalne viga 3,70 mm ning kõrguslikult 4,25 mm. Plaaniliste maksimaalne viga on 2,00 mm suurem kui ISO 12488-1 lubab, aga kõrguslikult ületab maksimaalne viga ainult 0,25 mm ISO 12488-1 alusel arvutatud geodeetilise vea, kusjuures viimane hälve on tühine. Saadud tulemuste põhjal ei vasta TLS mõõdistuste maksimaalne plaaniline viga ISO-12488-1 kriteeriumidele, Laplace funktsiooni alusel tõenäosusega 0,25.

Sildkraanateede puhul nõutakse väga suurt mõõdistustäpsust, mida on raske saavutada. Kui käesolevas töös uuritud sildkraanatee plaaniline maksimaalne lubatud geodeetiline viga oli 1,70 mm, siis KRV võib olla 0,68 mm. Seega näib, et tänapäeval on võimalik nõutavat täpsust saavutada ainult eksperimentaalse Artise süsteemiga (vt jaotist Lisa L1.2). Vastavalt ISO 12488-1 määratakse täpsusklassid tee maksimaalse läbisõidu järgi. II klassi puhul on see 10 000 – 50 000 km ja III klassi puhul kuni 10 000 km. Täpsuse alandamine toob kaasa ainult tee võimaliku läbisõidu vähenemise, mis võib põhjustada vaid kraanatee tihedama kontrollmõõdistuse vajaduse.

Välitöödeks ehk ühe sildkraanatee tahhümeetrilisteks mõõdistusteks kulus 5 tundi ja laserskaneerimiseks 1 tund ja 45 minutit. Andmetöötlusele kulus tahhümeetrilisel mõõdistusel ligikaudu 3 tundi ja laserskanneri puhul 4 tundi ja 45 minutit. Laserskanneri mõõdistuse andmetöötlusele kulunud aja sisse arvestatakse Leica Cyclone'ga, AutoCad Civil 3d'ga ja AutoDesk ReCapi'ga tehtud tööd. Kulunud aja sisse ei arvestatud andmetöötluse erinevate meetodite väljatöötamiseks kulunud aega. Laserskanneriga tehtud töö puhul on võimalik ajakulu vähendada nii mõõtmistel kui ka andmetöötlusel, sest tööd alustades polnud autor varem laserskanneriga iseseisvalt mõõtmisi teinud. Mõõtmiste läbiviimiseks läbis magistritöö autor Leica C10 kiirkoolituse, mille käigus tutvustati, kuidas antud instrumenti kasutada.

SUMMARY

The aim was to evaluate the precision of terrestrial laser scanning (TLS) for measuring bridge crane rails. Thus, in a factory under construction a bridge crane was measured with Leica C10 laser scanner and Trimble S5 total station.

The existing construction geodetic network was complemented with 6 new points with tachymetric measurements. Two of these were marked on crane rails (both had one) and four on the factory walls. For a better comparison of the results, the same network points were used to coordinate both the tachymetric and TLS measurements of the crane rails.

Tachymetric measurements were conducted from a single station. On the contrary, the TLS measurements were performed from 4 stations for a better point cloud coverage – both rails had two stations. Note that all the stations (both the total station and laser scanner) were on the crane rail beams. A specially made platform was used to attach the instruments.

Data processing of the tachymetric survey was done with AutoCad 2007. Leica Cyclone, AutoDesk ReCap and AutoCad Civil 3D were used to process point cloud of the laser scanner. Latter was processed to the stage from which was possible to draw the sides of both crane rails. From these the axes of the rails were calculated. Axes from both the tachymetric and TLS measurements were then compared at the same point to the project axes resulting in horizontal discrepancies. To obtain height measurement of the TLS (at the same points where horizontal measurements were compared), median height was taken at the rail centre (within a circle with a radius of 0,2 mm) from the point cloud. These measurements along with the ones of tachymetric survey were then compared to the project to obtain vertical discrepancies.

After data analysis an accuracy estimate was calculated for the TLS survey. As the two measuring methods were considered equally precise, the equal precision double measurement difference calculation method was used to evaluate the TLS measurements. Root mean square error (RMSE) of the horizontal measurements was estimated at 1,70 mm and vertical 1,48 mm. ISO 4463-1 standard was then used to calculate the maximum allowed error (this means that RMSE must be multiplied with 2,5). Accordingly, the maximum horizontal error was estimated to be 4,25 mm and vertical 3,70 mm. However, according to the class II requirements of the standard, the maximum allowed horizontal error is +/- 4,00 mm and vertical +/- 1,70 mm. Therefore,

the maximum horizontal error is 0,25 mm and vertical 2,00 mm larger than ISO 12488-1 allowed geodetical measurement error. The results thus show that the TLS measurements were not accurate enough to meet the class II criteria of the standard.

According to the ISO 12488-1, the maximum mileage of the bridge crane determines the rail surveying accuracy. For class II it is 10 000 – 50 000 km and for class III it is 10 000 km. Decrease in accuracy means only that the crane rails need more frequent control measurements.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „Konecranes,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.konecranesusa.com/sites/default/files/download/railqsurvey_040211_e.pdf [Kasutatud 26.11.2019]
- [2] „AIMIX GROUP CO., LTD,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ellsengantrycrane.com/40-ton-gantry-crane/> [Kasutatud 26.11.2019]
- [3] „Focus Technology Co., ItD,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://herculescrane.en.made-in-china.com/product/pKrmZMhCEscn/China-Hot-Sale-Customized-Shipyard-Portal-Crane-Price.html> [Kasutatud 26.11.2019]
- [4] „Indiamart,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.indiamart.com/proddetail/tower-cranes-2970364948.html> [Kasutatud 26.11.2019]
- [5] Pilt sildkraanateest [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.pinterest.ca/pin/606297168562913987/> [Kasutatud 26.11.2019]
- [6] „Konecranes,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.konecranesusa.com/underhung-overhead-cranes> [Kasutatud 26.11.2019]
- [7] D. Dennig jt. Comprehensive and Highly Accurate Measurements of Crane Runways, Profiles and Fastenings, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/1118> [Kasutatud 26.11.2019]
- [8] V. Ganšin, I. Repalov. Geodezičeskie raboty pri stroitelstve i ekspluatacij podkranovyh putei. (Geodeetilised tööd kraanateede ehitamisel ja ekspluatatsioonil), Moskva, kirjastus Nedra, 1972.
- [9] ISO 12488-1 Cranes- Tolerances for wheels and travel and traversing tracks. Part 1. General. (Kraanad. Rataste ja piki- ning pöikliikumisteede tolerantsid).
- [10] „Geosoft,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.geosoft.ee/tooted/trimble-s5> [Kasutatud 07.11.2019]
- [11] „Leica-geosystems,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/ScanStation%20C10/brochures-datasheet/Leica_ScanStation_C10_DS_en.pdf [Kasutatud 07.11.2019]
- [12] „Cramo,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.cramo.ee/et/category/tosteseadmed_korvtostukid-diisel/product/korvtostuk--xt--lava--14m-diisel-iseliikuv-geniez4525jrt [Kasutatud 07.11.2019]
- [13] R. M. Alkan, G. Kardsidag. Analysis of The Accuracy of Terrestrial Laser Scanning Measurements, Rooma, 2012. Saadaval:

https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2012/papers/ts07a/TS07A_alkan_6097.pdf [Kasutatud 22.11.2019]

[14] M. A. B. Ebrahim. 3D Laser Scanners' Techniques Overview, Saudi Arabia Kuningriik, 2015. Saadaval:

<https://pdfs.semanticscholar.org/1565/dbd5fae9b785989a41d849248f3500c83628.pdf> [Kasutatud 22.11.2019]

[15] K. Julge. Laser Scanning of Built Environment and Landforms with Spatial Modelling Applications, Tallinn: Doktoritöö, TTÜ Kirjastus, 2017.

[16] L. Truong-Hong, D. F. Laefer. Application of Terrestrial Laser Scanner in Bridge Inspection: Review and an Opportunity, Spain, 2014. Saadaval:

https://www.researchgate.net/publication/280085119_Application_of_Terrestrial_Laser_Scanner_in_Bridge_Inspection_Review_and_an_Opportunity [Kasutatud 26.11.2019]

[17] S. Aule. Mittestandardse kujuga ehitiste laserskaneerimine ja punktipilve põhjal modelleerimine TTÜ veetorni näitel, Tallinn: Magistritöö, TTÜ Kirjastus, 2014.

[18] V. Kala. Ehitusgeodeesia. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2008.

[19] L. Kovanič jt. Geodetic surveying of crane trail space relations.// Acta Montanistica Slovaca (2010).

[20] SNiP 3.03.01-87 Nesuščie i ograždajuščie konstrukcij. (Kande- ja piirdekonstruktsioonid). Renoveeritud 2007.a.

[21] Tehnikaleksikon. Tallinn, kirjastus Valgus, 1981.

[22] K. Kregar, T. Ambrožic, A. Marjetic, G. Stebe. Control Measurements of Crane Rails Performed by Terrestrial Laser Scanning, Slovenia, University of Ljubljana, 2017. Saadaval:

https://www.researchgate.net/publication/318654026_Control_Measurements_of_Crane_Rails_Performed_by_Terrestrial_Laser_Scanning [Kasutatud 26.11.2019]

[23] S. Talvik. Laserskanneri andmetöötlus Cyclone programmis. TTÜ geodeesia õppetool, 2012.

[24] „Leica Geosystems AG,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone> [Kasutatud 02.12.2019]

[25] „Autodesk Inc,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.autodesk.com/products/recap/overview> [Kasutatud 02.12.2019]

[26] „SCCS the Survey Equipment Company,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://kb.sccsurvey.co.uk/download/138/leica-c5-c10/2194/leica-scanstation-c10-c5-user-manual.pdf> [Kasutatud 03.01.2019]

[27] S. Saarik. Elektrontahhümeetrite ja laserskanneri kaugusmõõtu täpsuse hindamine, Tallinn: Magistritöö, TTÜ Kirjastus, 2014.

- [28] K. Uueküla. Terrestrilise laserskaneerimise andmete baasil loodud 3D mudelite kvaliteedi analüüs, Tallinn: Magistritöö, TTÜ Kirjastus, 2014.
- [29] GOST 26433.0-85, Cistima obespetšenija totšnosti geometritšeskih parametrov v stroitestve. Pravila vöpolnenija ismereni. Obštšie položenija.
- [30] „BuildingPoint Florida,“ [Vörgumaterjal]. Saadaval:
<http://buildingpointflorida.com/active-targets-do-they-really-help/> Kasutatud 14.01.2019]
- [31] S. Soudarissanane, R. Lindenbergh, M. Menenti, P. Teunissen. Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points, Holland, Delft University of Technology, 2009. Saadaval:
https://www.researchgate.net/publication/41057714_Incidence_angle_influence_on_the_quality_of_terrestrial_laser_scanning_points [Kasutatud 04.01.2019]

LISA

Lisa 1 Ülevaade tänapäevastest kraanateede mõõdistusvankritest

L1.1 Konecranes mõõdistusvanker

Perspektiivseks suunaks võib olla veel raadio abil juhitavate mõõdistusvankrite kasutamine. Näiteks firma Conecranes rakendab sellist 360° prismareflekoriga varustatud vankrit RailQ™ (vt joonis L1). Mõõdistusinstrument (täpne digiteodoliit või elektrontahhümeeter) tuleb tsentreerida kraanatee telje ühte otsa ja orienteerida teljepunktile teises otsas, nii et ülesminekust siin ikkagi pääsu ei ole.

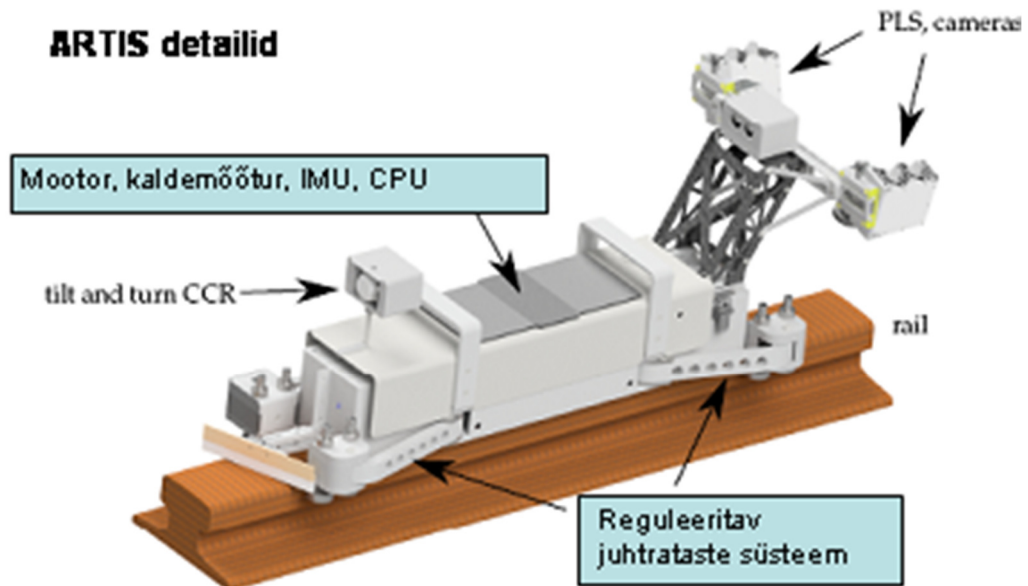


Joonis L1 Firma Conecranes raadio teel juhitav mõõdistusvanker 360° prisma-reflektoriga [1]

L1.2 Artis mõõdistusvanker

Hannoveri Leibnitzi Ülikooli Geodeesia Instituudis on välja töötatud mõõdistussüsteem ARTIS (*Advanced Railtrack Inspection System*), mis kasutab samuti kraanarelsil liikuvat automaatjuhtimisega (WiFi või ZigBee ühendus) mõõdistusvankrit, mis on varustatud kaldemõõtmisega, inertsiaalse mõõtmismooduliga, 2 odomeetriga, pööratava prismareflekoriga, 2 pöikprofiili laserskanneriga ja 2 kaameraga. Juhtrataste vahemaa on distantselt reguleeritav. Süsteemi komplekti kuulub veel sülearvuti ja elektrontahhümeeter või lasertracker [7]

Viimane süsteem (vt joonis L2) on oma iseloomult täiuslik, kuid esialgu piirab selle kasutamist kõrge hind, seda enam, et tänapäeval on mõõdistamist vajavate kraanateede hulk tunduvalt vähenenud [7].



PLS – põikprofili laserskanner; CPU – protsessor; IMU – Inertsiaalne mõõtmismoodul; CCR - reflektor

Joonis L2 Süsteemi ARTIS mõõdistusvanker [7]