

**TAL  
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**MAA-ALUSTE TEHNOVÕRKUDE  
TEOSTUSMÕÕDISTAMINE MADALA  
HINNAKLASSI LIDAR SENSORIGA**

**As-built surveying of underground utility networks  
using a low-cost LiDAR sensor**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Angelina Jerjomina

Üliõpilaskood 192681 EATI

Juhendaja: PhD Sander Varbla

Tallinn 2024

# 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.

"....." ..... 20.....

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Angelina Jerjomina

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Maa-aluste tehnovõrkude teostusmöödistamine madala hinnaklassi LiDAR sensoriga“,

mille juhendaja on Sander Varbla,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loominguulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.



# SISUKORD

Eessõna .....	7
Lühendite loetelu .....	8
Jooniste loetelu .....	9
Tabelite loetelu .....	12
Sissejuhatus .....	14
1. Maa-alused tehnovõrgud ja nende teostusmöödistamine.....	18
1.1. Maa-aluste tehnovõrkude liigid .....	18
1.1.1. Kanalisatsioon .....	18
1.1.1.1. Reoveekanalisisatsioon .....	18
1.1.1.2. Sademeveekanalisisatsioon .....	19
1.1.1.3. Drenaaž.....	20
1.1.2. Veevarustus .....	20
1.1.3. Elektri- ja sidesüsteemid .....	21
1.1.4. Gaasi tehnovõrk.....	22
1.1.5. Kaugkütte ja -jahutuse tehnovõrgud.....	23
1.2. Maa-aluste tehnovõrkude paigaldamise meetodid ja täpsusnõuded .....	25
1.2.1. Reovee- ja sademeveekanalisisatsiooni paigaldamise meetodid ja nõuded .....	25
1.2.2. Veevarustuse välisvõrgu paigaldamise meetodid ja nõuded .....	30
1.2.2.1. Tallinna Vesi täpsusnõuded torustike ja kaevude paigaldamisel.....	31
1.2.3. Hoonevälise kaablikaitse paigaldamise meetodid ja nõuded .....	31
1.2.4. Gaasi tehnovõrgu paigaldamise meetodid ja nõuded.....	32
1.2.5. Kaugkütte ja -jahutuse tehnovõrkude paigaldamise meetodid ja nõuded .....	32
1.2.6. Transpordiameti nõuded tehnovõrgu ehitustegevusele teemaal .....	34
1.3. Maa-aluste tehnovõrkude teostusmöödistuste täpsusele esitatavad nõuded .....	35
1.4. Maa-aluste tehnovõrkude igapäevaselt kasutatavad teostusmöödistuste metoodikad .....	35
1.5. Maa-aluste tehnovõrkude teostusdokumentatsioon .....	38
2. Maa-aluste tehnovõrkude teostusmöödistuse probleemi formuleerimine .....	40
3. Eksperimentaalmetoodika seadmete olemus .....	42
3.1. LiDAR seadmete olemus .....	42
3.2. GNSS seadmete olemus .....	43
4. Magistritöös kasutatud meetodid ja seadmed .....	45
4.1. Katsetuste olemus .....	45
4.2. Katsetatud seadmed ja tarkvarad .....	49
4.3. Madala hinnaklassi LiDAR sensori möödistuse metoodika ja andmekorje .....	52
4.3.1. Sisetingsimustes läbiviidud katsetused .....	53

4.3.2. Välitingimustes läbiviidud katsetused.....	55
4.3.3. Valideerimisandmete korje .....	57
4.4. Andmete järeltötluse kirjeldus .....	61
5. Katsetuste tulemused ja analüüs.....	68
5.1. Sisetingimustes läbiviidud katsetuste tulemused .....	68
5.2. Välitingimustes läbiviidud katsetuste tulemused .....	75
6. Kokkuvõte.....	85
Kasutatud kirjanduse loetelu .....	88
Lisad .....	97
Lisa A – RTK-GNSS mõõdetud tähiste koordinaadid .....	97
Lisa B – Staatilise laserskaneerimise tähiste koordinaadid .....	98
Lisa C – Tehnovõrkude rist- ja pikilõiked .....	99

## EESSÕNA

Käesoleva magistritöö praktiline osa valmis koostöös ettevõttega Hades Geodeesia OÜ, mis võimaldas mõõdistusvahendite, instrumentide ja tarkvarade kasutust kõikide katsetuste vältel. Magistritöö autor tänab Silver Ausmad ja Aleksei Kupavõhi mõõdistustöödel assisteerimise eest. Magistritöö autor tänab ka ettevõtteid Kaamos Ehitus OÜ, Mardisoo OÜ ja AllSpark OÜ võimaluse eest teostada välikatsetuste mõõdistusi nende ehitusobjektidel.

Antud magistritöö on edasiarendus teadusartiklist „*Advantages of low-cost LiDAR sensors in surveying underground utility networks*“:

Jerjomina, A.; Varbla, S. (retsenseerimisel). Advantages of low-cost LiDAR sensors in surveying underground utility networks. Ajakirja Tunnelling and Underground Space Technology esitatud 30. juuli 2024.

Antud töö pälvis 2024. aasta Euroopa Geodeetide Nõukogu (*the Council of European Geodetic Surveyors*) noorte mõõdistajate konkursil bakalaureuse- ja magistritööde kategoorias 3. preemia.

## LÜHENDITE LOETELU

BIM – ehitusinfo modelleerimine (ingl *building information modeling*)

De – välisläbimõõt (PipeLife, 2009)

DN – toru nimimõõt, mis on kokkuleppeliselt täisarv ja ligikaudselt võrdne valmistamismõõtmetega millimeetrites (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2021)

EPS – vahtpolüstüreen (ingl *expanded polystyrene*)

GNSS – globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem (ingl *global navigation satellite system*)

HDPE – kõrgtihe polüetüleen

KV – keskväärtus

KRV – keskmine ruutviga

LiDAR – kaugseire laserseade, mis töötab valguspõhise kaugusmääramise printsiibil (ingl *light detection and ranging*) (VSL, s.a.)

PE - polüetüleen

PN – toru rõhuklassi tähistus

PP – polüpropüleen

PUR - vahtpolüuretaan

PVC – polüvinüülkloriid

PVC-U – plastifitseerimata polüvinüülkloriid

RC – pragunemisele vastupidav (ingl *resistant to cracking*)

RTK – n-ö reaalaaja kinemaatiline GNSS tehnoloogia, mis arvestades reaalaajalisi parandeid võimaldab suhteliselt kõrge täpsusega asukohamäärangut (ingl *real-time kinematic*)

s.a. – sel aastal

SDR – standartmõõtude suhe (ingl *standard dimension ratio*)

SG – sferoidgraafitne malm

SH – standardhälve

SLAM – tehnoloogia, mis võimaldab samaaegselt seadme positsioneerimist ning seadmega mõõdistamist (ingl *simultaneous localization and mapping*)

T - teras



## JOONISTE LOETELU

<b>Joonis 1.</b> Kanalisatsioonitoru paigaldamise kaeviku skeem. Joonis võetud PipeLife kataloogist „Reoveekanaliseerimine“, 07.08.2009. ....	25
<b>Joonis 2.</b> Magistritöö praktilise osa kulgemise ajajoon.....	45
<b>Joonis 3.</b> Fotod sisetingimuste katsetusest (a) ning välitingimuste katsetustest (b, c, d) (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	47
<b>Joonis 4.</b> Test 2 asukoha skeem Maa-ametist seisuga 14.03.2024.....	48
<b>Joonis 5.</b> Testide 3 ja 4 asukoha skeem Maa-ametist seisuga 02.03.2024. ....	48
<b>Joonis 6.</b> Test 4 käigus mõõdistatud kaevik. Siniselt on kujutatud torustiku osa, mis oli paigaldatud mõõdistusele eelneval ajal; punane osa oli paigaldatud mõõdistuse alguses. Joonisel kujutatud punktipilv on mõõdetud Scaniverse tarkvaraga (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	49
<b>Joonis 7.</b> Ülevaade testitud mõõdistustarkvaradest kõikide läbiviidud katsetuste vältel (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	52
<b>Joonis 8.</b> Test 1 mõõdistuse olukord. Numbrid tähistavad erinevate torustike konfiguratsiooni. Joonisel näidatud punktipilv oli mõõdistatud staatilise laserskanneriga, mille jaamade asukohad on kujutatud punaste punktidenä (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	53
<b>Joonis 9.</b> Test 1 kasutatud liikumise trajektoorid osa 1 (a) ning osade 2 ja 3 (b) vältel. Joonisel kujutatud punktipilv oli mõõdistatud kasutades staatilist laserskanneerimist (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	54
<b>Joonis 10.</b> Välikatsetuste skeemid. Test 2 (a), test 3 (b) ja test 4 (c) skeemidel on kujutatud RTK-GNSS meetodil mõõdistatud kindelpunktid (roosa), staatilise laserskanneerimise jaamade asetus (punane), robot-tahhümeetriga mõõdistatud kindelpunktid (sinine) ning robot-tahhümeetriga mõõdetud torustike elemendid (oranž). Rohelised jooned tähistavad jaotises 5.2 kirjeldatud lõikeid. Kõik joonisel kujutatud punktipilved mõõdistati Scaniverse tarkvaraga (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	56
<b>Joonis 11.</b> Test 2 joonelis-nurgalise vastulõike skeem (tahhümeetri seisupunkt on punaselt).....	58
<b>Joonis 12.</b> Test 3 joonelis-nurgalise vastulõike skeem (tahhümeetri seisupunkt on punaselt).....	59
<b>Joonis 13.</b> Test 4 joonelis-nurgalise vastulõike skeem (tahhümeetri seisupunkt on punaselt).....	60
<b>Joonis 14.</b> Näiteid GNSS-tähistest välikatsetuste punktipilvedest. ....	65
<b>Joonis 15.</b> Välikatsetuste punktipilvede lõigete asukohad. ....	66

<b>Joonis 16.</b> Test 1 statistilised väärtused Apple LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvede ja staatilise laserskaneerimise punktipilve erinevuste kohta (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). .....	69
<b>Joonis 17.</b> Test 1 toru nr 3 (vt Joonis 8) punktipilvede keskmised väljalõiked. Punktipilved on kujutatud siniselt, toru välisläbimõõt spetsifikatsiooni järgi (110 mm) on kujutatud musta ringjoonena ja punased ringjooned tähistavad punktipilvede järgi sobitatud välisdiameetreid (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel)....	71
<b>Joonis 18.</b> Test 1 torude punktipilvede järgi määratud keskmiste välisdiameetrite ja spetsifikatsiooni järgi ette antud välisläbimõõtude erinevused. ....	74
<b>Joonis 19.</b> Välikatsetuste standhävete hinnangud punktipilvede koordineerimise kohta (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).....	75
<b>Joonis 20.</b> Tahhümeetriliselt mõõdetud ja punktipilvedest määratud tehnovõrkude elementide koordinaatide erinevuste keskmised ruutvead (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	76
<b>Joonis 21.</b> Välikatsetuste standardhävled ja keskvaartused madala hinnaklassi LiDAR mõõdistuse ja staatilise laserskaneerimise vahel (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	77
<b>Joonis 22.</b> Välikatsetuste keskmised ruutvead madala hinnaklassi LiDAR mõõdistuse ja staatilise laserskaneerimise vahel (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	77
<b>Joonis 23.</b> Test 2 osa 2 Scaniverse (a), vGIS Scan (b) ja 3D Scanner App (c) punktipilvede erinevused staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	78
<b>Joonis 24.</b> Test 3 Scaniverse (a), vGIS Scan (b) ja 3D Scanner App (c) punktipilvede erinevused staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	79
<b>Joonis 25.</b> Test 4 Scaniverse (a), vGIS Scan (b) ja 3D Scanner App (c) punktipilvede erinevused staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	80
<b>Joonis 26.</b> Test 2 osa 2 väljavõtte staatilise laserskaneerimise (a); Scaniverse (b), vGIS Scan (c); 3D Scanner App (d) punktipilvedest (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	83
<b>Joonis C1.</b> Test 2, lõige 1-1. ....	99
<b>Joonis C2.</b> Test 2, lõige 2-2. ....	99
<b>Joonis C3.</b> Test 2, lõige 3-3. ....	100
<b>Joonis C4.</b> Test 3, lõige 1-1. ....	101
<b>Joonis C5.</b> Test 3, lõige 2-2. ....	101
<b>Joonis C6.</b> Test 3, lõige 3-3. ....	102

<b>Joonis C7.</b> Test 4, lõige 1-1.....	103
<b>Joonis C8.</b> Test 4, lõige 2-2.....	104
<b>Joonis C9.</b> Test 4, lõige 3-3.....	105

## TABELITE LOETELU

<b>Tabel 1.</b> Kaeviku minimaalne laius sõltuvalt toru nimimõõdust (DN). Väljavõte EVS-EN 1610:2015. ....	26
<b>Tabel 2.</b> Torustiku kalded olenevalt läbimõõdust. Väljavõte EVS 846:2021. ....	26
<b>Tabel 3.</b> Nõuded paigaldustäpsusele teemaale paigaldamisel (Transpordiamet, 2018-015). ....	34
<b>Tabel 4.</b> Satelliitnavigatsioonisüsteemide võrdlus. Väljavõte kodulehelt Hexagon (s.a.). ....	43
<b>Tabel 5.</b> Kasutatud skaneerimise tarkvarade põhifunktsioonid (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	50
<b>Tabel 6.</b> Staatilise skaneerimise parameetrid. ....	58
<b>Tabel 7.</b> Test 1 ReCap Pro staatilise skaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemused. ....	62
<b>Tabel 8.</b> Test 2 ReCap Pro staatilise skaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemused. ....	62
<b>Tabel 9.</b> Test 3 Faro Scene staatilise skaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemused. ....	63
<b>Tabel 10.</b> Test 4 ReCap Pro staatilise skaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemused. ....	63
<b>Tabel 11.</b> Test 1 madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvede koordineerimise standardhälbed. ....	68
<b>Tabel 12.</b> Test 1 madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilvede tiheduse protsentuaalne võrdlus staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	70
<b>Tabel 13.</b> Tahhümeetriliselt mõõdetud ja punktiilvest määratud tehnovõrkude elementide koordinaatide keskmised ruutvead. ....	76
<b>Tabel 14.</b> Välikatsetuste madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilvede tiheduse protsentuaalne võrdlus staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	82
<b>Tabel 15.</b> Kanalisatsioonitorude erinevate meetoditega tuvastatud kalded (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel). ....	84
<b>Tabel A1.</b> Test 2 RTK-GNSS meetodil mõõdetud tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid toodud L-EST97 koordinaatide süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis. ....	97
<b>Tabel A2.</b> Test 3 RTK-GNSS meetodil mõõdetud tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid toodud L-EST97 koordinaatide süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis. ....	97

<b>Tabel A3.</b> Test 4 RTK-GNSS meetodil mõõdetud tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid toodud L-EST97 koordinaatide süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis. ....	97
<b>Tabel B1.</b> Test 1 staatilise laserskaneerimise ning ka madala-hinnaklassi LiDAR sensori mõõdistuste tähiste koordinaadid. Plaanilised ja kõrguslikud koordinaadid on lokaalses süsteemis. ....	98
<b>Tabel B2.</b> Test 2 staatilise laserskaneerimise tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid on L-EST97 süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis. ....	98
<b>Tabel B3.</b> Test 3 staatilise laserskaneerimise tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid on L-EST97 süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis. ....	98
<b>Tabel B4.</b> Test 4 staatilise laserskaneerimise tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid on L-EST97 süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis. ....	98

## SISSEJUHATUS

Kanalisatsioon, vee- ja gaasivarustus, soojusvõrk ning elektri- ja sidekaablid on tehnovõrgud, ilma milleta ei saaks kaasaegne ühiskond toimida. Nende tehnovõrkude täpne dokumenteerimine on vajalik, et teostada tulevasi renoveerimis-, rekonstrueerimis- ja projekteerimistöid. Teostusdokumentatsiooni põhjal määratakse tehnovõrkudele kaitsevööndid, mis tagavad ohutuse nii inimestele kui ka ümbritsevale keskkonnale, vähendades majanduslikke kahjusid ja õnnetuste arvu. Kõige täpsem ja kvaliteetsem teostusdokumentatsioon valmib tehnovõrkude ehitustegevuse käigus või vahetult peale selle lõppemist. Maa-alused paigaldised tuleb määristada enne kaeviku sulgemist, kuna vastasel juhul kahaneb maa-aluste rajatiste asukohatäpsus. Seetõttu on sätestatud ka omavalitsuslikud või riiklikud regulatsioonid, mis näevad ette maa-aluste torustike ja kaabelliinide teostusmääristust enne kaeviku tagasitõrjumise teostamist. Tihti peale aga jäetakse regulatsioonid tähelepanuta ning selleks on mitmeid põhjuseid. Ehitusobjektidel toimuvad kõik tegevused varem paika pandud graafiku alusel ning tavapäraselt ehitustegevust ei peatata teostusmääristuste läbiviimiseks. Maa-aluste tehnovõrkude paigaldamise puhul kaeviku pikaaegne avatuna hoidmine võib takistada muude ehitustööde graafikus püsivust ning määristaja saabudes objektile on suure tõenäosusega kaevik juba suletud.

Maa-aluste tehnovõrkude uuringuid on võimalik läbi viia kinnise kaeviku puhul kasutades georadarit või/ja elektromagnetlokaatorit (metoodikate ülevaateid vt Hao jt, 2012; Su jt, 2023). Georadar on tuvastusseade, millega on võimalik saada plaanilist ning kõrguslikku infot maapinna sügavuses paiknevatest tehnovõrkudest, muudest objektidest ja rajatistest ning erinevatest pinnasekihtidest. Seadme kasutamine ja määristusandmete tõlgendamine nõuab aga eraldi väljaõpet ning suuresti on antud meetodika rajatud ka kogemustepõhiseks kasutuseks. Just andmete tõlgendamine on antud meetodikas kõige keerulisem osa, mis nõuab palju erinevate olukordade läbitöötamist ja analüüsimist. Elektromagnetlokaator on andmete tõlgendamise osas mõnevõrra lihtsam meetodika, kuid see eest mängib seadme käsitlemise oskus ja tööpõhimõtete tundmine olulist rolli määristusandmete kvaliteedis. Meetodika on kasutatav ainult voolu juhtivate torustike või kaablite tuvastamiseks. Kui tegemist on keerukate tehnovõrkude süsteemidega, kus näiteks suurlinnade tänavate alla paigaldatud torustikud on erinevate läbimõõtude ning materjalidega, torustikud on erineva otstarbega ning paiknevad erinevatel sügavustel ja lisaks põhjustavad erinevad pinnasekihtide omadused signaalide häiringut ning nõrgenemist, siis sellisel juhul võivad eelkirjeldatud määristusmeetodid olla vägagi ebatäpsed maa-aluste tehnovõrkude asukohtade määramisel (Hao jt, 2012; Siu ja Lai, 2019; Bai ja Sinfield, 2020).

Arvestades eelnimetatud asjaolusid, tugineb teostusdokumentatsioon kinnise kaeviku puhul tihtipeale hoopis tellijate või ehitajate ütlustele, visuaalselt tuvastatavatele kaeväjälgedele ning foto- ja videomaterjalile. Samas on taoline mõõdistuslähenedamine ebatäpne ja ebausaldusväärne. Kuna kaasaegseid RTK-GNSS (*real-time kinematic* – reaalaaja kinemaatiline / *global navigation satellite system* – globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem) vastuvõtjaid on suhteliselt lihtne kasutada, siis võiks lahenduseks olla ehitajate koolitamine nende seadmete kasutamisel, misjärel võiks usaldada mõõdistusandmete korje ehitajatele veel lahtise kaeviku faasis. Samas on aga üksikute punktide mõõtmismeetodid üsna lihtsasti manipuleeritavad ning sellisel juhul, jällegi suure tõenäosusega, on saadavad andmed ebausaldusväärsed.

Laserskaneerimise tehnoloogia on viimastel aastakümnetel märkimisväärselt arenenud. Tänapäeval on geodeedi töös igapäevast kasutust leidnud nii staatilise laserskaneerimise meetodika (EarthScope Consortium, s.a.; käsitletud lähemalt jaotises 1.4), mis võimaldab väga kõrge täpsusega (kuni mõni millimeeter) massandmete korjet, kui ka erinevad mobiilsed skaneerimise tehnoloogiad, nagu näiteks SLAM (*simultaneous localization and mapping* – samaaegne positsioneerimine ja mõõdistamine) tehnoloogial põhinevad käsiskannerid (Alsadik ja Karam, 2021) või LiDAR (*light detection and ranging* – valguspõhine kaugusmäärang) tehnoloogial põhinevad aeromõõdistuse meetodikad (Routescene, 2022). Alates 2020. aastast on Apple integreerinud madala hinnaklassi LiDAR sensoreid oma nutitelefonidesse ja tahvelarvutitesse (vastavalt Luetzenburg jt, 2021 ja Teppati Losè jt, 2022 uuringutele on iPhone'i ja iPad'i sensorid samad). Selline andmekorje meetodika muudab punktipilvede mõõdistamise mugavaks, kiireks ja kättesaadavaks laiale kasutajate ringile, pakkudes uusi võimalusi andmete kogumiseks ja haldamiseks. Üheks suureks eeliseks üksikute punktide mõõdistamise ees on asjaolu, et punktipilve andmeid on keeruline manipuleerida, mis muudab need andmed oluliselt usaldusväärsemateks. Apple LiDAR sensoreid on juba varasemalt katsetatud mõõdistamiseks hooneid/rajatisi (Diaz-Vilariño jt, 2022; Teppati Losè jt, 2022; Askar ja Sternberg, 2023; Teo ja Yang, 2023; Vacca, 2023), metsasid/puid (Çakir jt, 2021; Gollob jt, 2021; Bobrowski jt, 2023; Brach jt, 2023; Tatsumi jt, 2023) ning maastikku (Luetzenburg jt, 2021; Corradetti jt, 2022; Forkuo ja Borz, 2023; Monsalve jt, 2023; Burchi ja Theuerkauf, 2024). Samuti on neid sensoreid katsetatud ka näiteks kohtuekspertiisi andmete kogumiseks (Desai jt, 2021; Maiese jt, 2022; Chase ja Liscio, 2023; Kottner jt, 2023; Stevenson ja Liscio, 2024) ning muudeks spetsiifilisteks otstarveteks (Alijani jt, 2022; King jt, 2022; Paukkonen, 2023; Pluta ja Siemek, 2023; Rutkowski ja Lipecki, 2023; Tamimi ja Toth, 2023; Gentili ja Madonna, 2024; Marshall jt, 2024; Oberhofer jt, 2024).

Käesolevas magistritöös keskendutakse maa-alustele tehnovõrkudele, mille Lidar mõõdistusi autorile teadaolevalt ei ole seni veel uuritud. Samuti on suur puudus uuringutest, mis kasutaksid Apple LiDAR sensorit ulatuslike inimtekkeliste rajatiste, eriti välialade, mõõdistamiseks. Kasutades teisi madala hinnaklassi LiDAR-põhiseid sensoreid, viis Haenel jt (2022) läbi esialgsed uuringud maa-aluste tehnovõrkude kohta, näidates visuaalselt, et torustikke on võimalik punktipilvedesse jäädvustada. Eelnimetatud töö ei sisaldanud aga andmete põhjalikumat analüüsi.

Gollob jt (2021) tegid enda uuringu käigus katsetusi testimaks Apple LiDAR sensori võimekust määrata korrapärase kujuga silindriliste objektide läbimõõtu. Silindrilised kehad simuleerisid tegelikkuses puutüvesid. Mõõdistatud objektide punktipilvedesse sobitati ringjooned ning võrreldi nende mõõtmeid reaalse mõõtmega. Tuvastatud diameetrite hälbed varieerusid vahemikus 6,5 kuni 49,9 cm. Üldiselt osutus suuremate objektide mõõtmete määramine usaldusväärsemaks kui väiksemate dimensioonidega objektidel. Kuna katse eesmärgiks oli simuleerida puid, siis olid silindrilised katsekehad paigutatud püsti asendis ning skaneerimise tulemusena tekkis terviklik punktipilv katsetatavatest objektidest. Maa-aluste tehnovõrkude torustike puhul aga asetsevad torud horisontaalses asendis ning skaneerimisel jääb osa toru pinnast varjatuks. Läbimõõtude määramine selliselt on ebausaldusväärsem kui vertikaalsete torude puhul, kuna ringjoon sobitatakse ainult punktipilves nähtava toru välispinna järgi. Käesoleva magistritöö raames uuriti muuhulgas ka horisontaalsete torude välisläbimõõtude tuvastamise võimalikkust kasutades Apple madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilvi.

Arvestades kõiki eelnimetatud asjaolusid, kujunes antud magistritöö eesmärgiks hinnata Apple LiDAR sensori sobivust maa-aluste tehnovõrkude teostusmõõdistusteks, et seeläbi lahendada teostusdokumentatsiooni täpsust mõjutav probleem, kus tiheda ehitusgraafiku tõttu ei ole geodeedil võimalik jõuda mõõdistama tehnovõrke lahtise kaevikuga. Kuna uuritud mõõdistusviisid peaksid olema kasutatavad ka tehnovõrkude paigaldaja või muu ehitustöölise poolt ning samas peavad kõik mõõdistusandmed olema georeferentsed, siis luuakse ja uuritakse mõõdistusmetoodikat, kus madala hinnaklassi LiDAR sensori mõõdistuse aluseks on RTK-GNSS meetodil rajatud mõõdistuvõrk.

Käesoleva magistritöö struktuur on üles ehitatud järgmiselt: jaotis 1 kirjeldab erinevate maa-aluste tehnovõrkude liike, nende paigaldusmeetodeid, mõõdistusmeetodeid ning täpsusnõudeid; jaotis 2 seletab täpsemalt maa-aluste tehnovõrkude mõõdistamisega seonduvaid probleeme; jaotis 3 kirjeldab LiDAR ja GNSS seadmete peamisi tööpõhimõtteid; jaotis 4 kirjeldab uudse mõõdistusmetoodika loomist ja katsetamist;



jaotis 5 kirjeldab katsetuste tulemusi ning annab nendele täpsushinnangud; jaotis 6 võtab magistritöö kokku.

# **1. MAA-ALUSED TEHNOVÕRGUD JA NENDE TEOSTUSMÕÕDISTAMINE**

Käesolev jaotis kirjeldab erinevaid maa-aluste tehnovõrkude liike ja nende toimimise eesmärke, paigaldamise iseärasusi ning tüüpilisi torustike ja kaevude spetsifikatsioone. Põhjalikult kirjeldatakse maa-aluste tehnovõrkude paigaldusmeetodeid ning paigaldamisele esitatavaid täpsusnõudeid. Ehitusgeodeesia poole pealt käsitleb antud jaotis erinevaid maa-aluste tehnovõrkude teostusmõõdistamise meetodikaid ning teostusmõõdistusele esitatavaid täpsusnõudeid vastavalt Eestis kehtivatele regulatsioonidele. Viimases alajaotises kirjeldatakse ka teostudokumentatsioonile esitatavaid nõudeid.

## **1.1. Maa-aluste tehnovõrkude liigid**

### **1.1.1. Kanalisatsioon**

Järgnevates alajaotistes kirjeldatakse erinevate kanalisatsiooniliikide eesmärke ja üldiseid asjaolusid, millega tuleb arvestada kanalisatsioonide projekteerimisel ja ehitamisel selliselt, et torustike kasutusiga oleks üle viiekümne aasta ning kaevude ja muude detailide kasutusiga läheneks vähemalt neljakümnele aastale. Seejuures tuleb torustikud ehitada nii, et ressursi-, vee- ja energiatarbimine oleks võimalikult optimaalne nii ehitusel kui ka tulevasel tehnovõrgu kasutamisel. Kanalisatsioon võib olla kas iseoolne või survestatud. Survestatud kanalisatsiooni ehitamiseks tuleb kasutada pumplat eesmärgil, et juhtida hoonest eemale reo-, sade- või drenaaživesi, mida ei ole võimalik ära juhtida iseoolse kanalisatsiooni abil. Pumpla koosneb pumbast, mis käivitub automaatselt juhul, kui kogumisreservuaaris olev signalisatsioonisüsteem annab selleks märguande.

#### **1.1.1.1. Reoveekanaliseatsioon**

Reovee kanalisatsiooni ehitus eeldab kindlate põhimõtete ja reeglite järgimist, et kanalisatsioon oleks funktsionaalne ning ohutu nii hoones tegutsevatele isikutele, veevärgiga ühendatud süsteemidele ja töötajatele kui ka keskkonnale. Kanalisatsiooni projekteerimisel ja ehitamisel tuleb osata arvestada reovee kvaliteediga, temperatuuriga ja happelisusega ning osata näha ja hinnata kanalisatsiooni üleuputuse ja ummistuse ohtu. Eelnimetatud asjaolusid tuleb alati arvestada nii uue kanalisatsiooni projekteerimisel ja ehitamisel kui ka vanade kanalisatsiooni osade remonditöödel ja/või väljavahetamisel.

Üldjuhul ehitatakse reovee kanalisatsioon isevoolsena, kuid on olemas ka võimalus ehitada survekanalisatsioon; seejuures peab kanalisatsioon olema ka õhutatud. Isevolsetes torudes voolab reovesi alati toru põhjas langu suunas ning veevoolule vastupidises suunas liigub õhk, mis tagab reovee sujuva äravoolu. Reovee kanalisatsiooni äravoolu on võimalik juhtida kas omapuhastisse või ühiskanalisatsiooni. Mõlemal juhul tuleb arvestada kogu juurdevoolava reovee kohese äravooluga selliselt, et torustik oleks ka isepuhastuv. Eelnimetatud reeglid projekteerimiseks ja ehituseks on kirjeldatud täpsemalt EVS 846:2021 standardis "Hoone kanalisatsioon".

PipeLife kataloogi "Reoveekanaliseerimine" (07.08.2009) andmetel on tüüpilised torud ja liitmikud isevoelse reovee kanalisatsiooni paigaldamiseks valmistatud materjalidest PVC-U (plastifitseerimata polüvinüülkloriid) ja/või PP (polüpropüleen) ning läbimõõdudega vahemikus DN 110 – 630 mm (DN – toru nimimõõt).

Kanaliseerimise kaevud jagunevad läbimõõdude järgi. Suurused olenevad otseselt kaevu puhastamiseks kasutatavatest seadmetest, kuid määravaks võivad osutada ka ühendustorustike läbimõõdud ja asetus üksteise suhtes. Kõige tüüpilisem reovee kanalisatsioonikaev on läbimõõduga De 400/315 mm (De – välisläbimõõt), millega on võimalik ühendada torustikud läbimõõdudega DN 110-200 mm. Antud kaev koosneb põhjas asetsevast voolurennist, PP tõusutorust (De 400 mm) ning malm- või plastkaanega teleskoopitorust (De 315 mm). Kirjeldatud kaevutüüpi kasutatakse reovee kanalisatsiooni torustike kontrollimiseks ning hooldamiseks. Juhul, kui rajatakse kinnistuse reovee kanalisatsioon, siis reeglina kinnistu piirist väljaspool asuvale liitumiskaevule paigaldatakse ka kanalisatsiooni kontrolltoru läbimõõduga De 200/160 mm. Kontrolltoru põhi on valmistatud polüpropüleenist (PP), tõusutoru ning teleskoopitoru aga polüetüleenist (PE). Kontrolltoru põhja on võimalik ühendada torustikud läbimõõdudega DN 110-200 mm. Suuremate läbimõõdudega torude ühendamiseks valmistatakse eritellimuskaevud polüetüleenist (PE), mis tüüpiliselt on läbimõõdudega De 400/315 mm ja 560/500 mm, kuid samuti on kasutusel ka kaevud läbimõõdudega De 800/500 mm ja 1125/630 mm.

### **1.1.1.2. Sademeveekanaliseerimine**

Sademeveekanaliseerimise eesmärk on koguda ja juhtida eemale vihmavett katustelt, rõdult, hoone ümbrusest ja tänavatelt. Reovesi ja sadevesi peavad olema eraldatud; reovee juhtimine sademevee kanalisatsiooni on keelatud. Erinevalt reovee kanalisatsioonist ei pea sademeveekanaliseerimine olema õhutatud.

Sademeveekanaliseerimise projekteerimisel tuleb arvestada lühiajalise ja pikaajalise vihma intensiivsusega. Eelnimetatud väärtusi on võimalik arvutada, kasutades selliseid

parameetreid nagu arvutusvihma kestus minutites ja korduste arv aastas ning empiirilisi tegureid, mis sõltuvad geograafilisest asukohast. Lühiajalise vihma intensiivsusest sõltub ka katuste äravoolude kavandamine, mis on kirjeldatud standardis EVS 920.

PipeLife kataloogi "Sademeveekanaliseerimine ja ehitusdrenaaž" (07.08.2009) andmetel on tüüpilised torud ja liitmikud iseveolise sademevee paigaldamiseks valmistatud polüpropüleenist (PP) ning torude läbimõõdud varieeruvad vahemikus De 110 mm kuni De 1000 mm. Igapäevaselt kasutatakse enamasti sadeveekaevusid läbimõõdudega De 400/315 mm või De 630/500 mm, mis on valmistatud polüetüleenist (PE). Eelnimetatud mõõtudes sademeveekaevudele on võimalik teha juurdevooluühendused torudele läbimõõdudega De 110, 160 ja 200 mm. Harvemini kasutatakse ka suuremas läbimõõdus kaevusid nagu De 800/500 mm ja De 1125/630 mm. Erinevalt reoveekanaliseerimise kaevudest on võimalik sademevee kaevudele paigaldada malmist luugi asemele rest, mis viib tänavale koguneva sademevee otse kaevu.

### **1.1.1.3. Drenaaž**

Hoone, rajatise või konstruktsiooni ehitamisel tuleb arvestada pinnase geotehniliste ja hüdrogeoloogiliste andmetega. Ehitise eksploateerimise käigus võib aluspinnasesse tunginud pinnase- ja põhjavesi kahjustada tarindeid. Et hoida ära liigest veest põhjustatud kahjusid, on võimalik paigaldada drenaažisüsteem. Drenaaživett on lubatud juhtida sademeveekanaliseerimise või loodusesse, kuid reo- ja sademevett ei tohi suunata drenaaži (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2021).

PipeLife kataloogi "Sademeveekanaliseerimine ja ehitusdrenaaž" (07.08.2009) andmetel on tüüpilised torud ja liitmikud ehitusdrenaaži paigaldamiseks valmistatud polüetüleenist (PE) ning torude läbimõõdud varieeruvad vahemikus De 110 mm kuni De 400 mm. Igapäevaselt kasutatakse enamasti drenaažikaevusid läbimõõdudega De 400/315 mm või De 560/500 mm, mis on valmistatud polüetüleenist (PE), kuid samuti on võimalik kasutada kaevusid läbimõõdus De 200/160 mm, De 800/500 mm ja De 1125/630 mm.

### **1.1.2. Veevarustus**

Standardi EVS 921:2022 järgi on veevarustuse välisvõrk veevarustussüsteemi ehk veevärgi osa, mis koosneb torustikuliinidest ja on vahetult seotud pumbajaamadega ning reguleerimiseseadmetega (veetornid, veemahutid). Välisvõrgu ülesanne on vee juhtimine tarbijateni (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2022). Üks tähtsamaid aspekte veevõrgu projekteerimisel ja ehitamisel on see, et alarõhu korral oleks vee tagasivool torustikku välistatud. Selleks, et vältida alarõhku, tuleb kasutada

vastavaid meetmeid, näiteks paigaldada torustikule tagasivooluklapid või alarõhu teket ärahooldvad seadmed, näiteks antivaakumklapid. Vesi ei tohi torustikku seiskuda nii kauaks, et see hakkaks mõjuma vee kvaliteedile. Üldjuhul on veevärgi kavandatav kasutusaeg ligikaudselt 40 – 50 aastat; väiksematel seadmetel, masinatel ja pumpadel võib kasutusaeg piirneda ka 15 aastaga.

Veevärki on võimalik liigitada otstarbe järgi järgmiselt:

- joogiveevärgid,
- tootmisveevärgid,
- tuletoorjerveevärgid,
- kastmisveevärgid (parkide ja haljasalade kastmiseks),
- põllumajandusveevärgid (põllukultuuride kastmiseks).

Veevõrkude tüüpilised läbimõõdud ning materjalid on järgmised: toru materjali PE-PN 10 (PE – polüetüleen) puhul varieeruvad torude läbimõõdud vahemikus DN 32 ... 630 mm. Need on kõige tüüpilisemad torud, mida tänapäeval kasutatakse. Harvemini kasutatakse torusid materjalist PVC/k-PN 10 (PVC – polüvinüülkloriid), läbimõõdudega vahemikus DN 110 ... 315 mm; materjalist SG/k-PN 10 (SG – sferoidgrafiitne malm) läbimõõdudega vahemikus DN 100 ... 1000 mm; materjalist T/h-PN 10 (T – teras) läbimõõdudega 600 ... 1000 mm. PN 10 tähistab rõhuklassi; erandjuhtudel, näiteks tunnelites või veealusel paigaldamisel, kasutatakse ka rõhuklassi PN 16. Rõhuklassi eesliide k või h tähistab erinevaid kaitsekihte, millega toru võib olla kaetud keskkonnas mõjuvate agressiivsete olude tõttu; tüüpiliselt kasutatakse näiteks korrosioonikaitset või katoodekaitset. Torumaterjali valik sõltub pinnase ja piirkonna eritingimustest.

### **1.1.3. Elektri- ja sidesüsteemid**

Elektri- ja sidesüsteemid jagunevad tugev- ja nõrkvoolu paigaldisteks. Majandus- ja taristuministeriumi määrus nr 74 järgi (MTM määrus nr 74, 2015) nimetatakse tugevvoolu ehk elektripaigaldiseks seadmete, juhtide või tarvikute paigaldatud talitluslikke kogumeid, mida kasutatakse elektrienergia tootmiseks, edastamiseks, muundamiseks, mõõtmiseks, müügiks või tarbimiseks. Nõrkvoolupaigaldised ehk sidevõrk on seadmed ja võrgud, mille eesmärk on hoida töös teisi seadmeid, mitte kanda üle suurt energiamahu (Ehitusgiid – Elekter ja side, 2024).

Majandus- ja taristuministeriumi määrus nr 86 järgi (MTM määrus nr 86, 2015) liigitatakse elektripaigaldised kolme liiki elektrist tuleneva ohu järgi: esimesse liiki

kuuluvad kõrgendatud ohutasemega paigaldised, nagu näiteks plahvatustsoonis või suurõnnetusohuga ettevõtte ohtlikul objektil asuvad elektripaigaldised. Samuti elektripaigaldised, mis asuvad haiglas või muus ravihoones ning mis on kasutamisel patsiendiga füüsilises kontaktis. Teise liiki kuuluvad paigaldised, mis ei kategoriseeru esimese liigi alla ning samas on: enam kui kahe korteriga hoone korterivaldajate ühiskasutuses; ravihoones asuvad elektripaigaldised; madalpingepaigaldised peakaitsme nimivooluga üle 35 ampri; kõrgepingepaigaldised; hotellis, motellis, võõrastemajas, puhkekodus, külalistemajas või muus majutushoones asuvad elektripaigaldised; avalikud tänavavalgustuspaigaldised; elektrituruseaduse alusel tegutseva võrguettevõtja ja loakohustusega tootja elektripaigaldis. Kolmandasse liiki kuuluvad kõik elektripaigaldised, mis ei kategoriseeru ei esimese ega teise liigi alla ning mille peakaitsme nimivool ei ületa 35 amprit.

Üldjuhul kasutatakse elektri- ja sidekaablite paigaldamisel kaablikaitsesüsteeme. PipeLife kataloogi järgi (PipeLife – Hoonesisene- ja väline kaablikaitsesüsteem, 2023) jagunevad kaablikaitsesüsteemid kolme liiki vastavalt kaitsetorustikule mõjuvale koormusele: keskmise koormuse puhul kasutatakse kaitsetorusid tugevusnäitajatega 450 N; raske koormuse puhul – 750 N; väga raske koormuse puhul – 1250 N. Üldjuhul kasutatakse 450 N kaablikaitsesüsteemi kõrgis- ja hajaasustusega piirkondades, kus kaevetöid esineb harva. Samuti ristumisel teiste maa-aluste tehnovõrkudega ning ristumisel teedega, kui kaabli sügavus teepinnast ületab 1 m ning kõnni- ja kergliiklusteede puhul, kui kaabli sügavus teepinnast ületab 0,5 m. Kaablikaitsesüsteemi 750 N kasutatakse sagedaste kaevetööde piirkondades. Samuti ristumisel teedega, kui kaabli sügavus teepinnast on vahemikus 0,5 ja 1,0 m, sõiduteede all ning tiheda liiklusega õue- ja parkimisaladel või muudes kohtades, kus on suur mehaanilise mõju tõenäosus. Lisaks kasutatakse antud kaablikaitsesüsteemi ka õue- ja pargialadel, kui kaabli sügavus on vahemikus 0,3 kuni 0,5 m. Kaablikaitsesüsteemi 1250 N kasutatakse lennujaamade, sadamate, väga suurte koormustega laoplatside ja sõiduteede, militaarobjektide ja raudteede taristu aladel.

Kaitsetorud kaabelduste paigaldamiseks on üldjuhul välisläbimõõtudega vahemikus DN 50 mm kuni DN 160 mm ning materjaliks on tavaliselt polüetüleen (PE) või plastifitseerimata polüvinüülkloriid (PVC-U). Vastavalt projektile on aga võimalik kasutada ka suuremate läbimõõtudega kaitsetorustikke.

#### **1.1.4. Gaasi tehnovõrk**

Tarbijakaitse ja tehnilise järelevalve ameti (TTJA, s.a.) andmete järgi nimetatakse gaasipaigaldiseks gaasitorustikke, ja nendega seotud ehitiste statsionaarselt paigaldatud talituslikke süsteeme. Gaasipaigaldise osa hulka arvatakse ka sellele paigaldatud ohutus-, juhtimis-, mõõte- ja reguleerimisseadmed. Hoonevälise

gaasipaigaldise projekteerimise, rajamise või kasutamisega kaasneb alati ka kaitsevöönd. Kaitsevööndi suuruse määrab gaasipaigaldise töö rõhk, mille alusel jaotatakse gaasipaigaldised kategooriatesse A kuni D (Ehitusgiid - Gaas, 2024). Gaasipaigaldiste kategooriad jaotuvad järgmiselt (MTM määrus nr 73, 2015):

- A-kategooria – gaasipaigaldised töö rõhuga kuni 0,1 baari (kaasa arvatud)
- B-kategooria - gaasipaigaldised töö rõhuga üle 0,1 baari kuni 5 baari (kaasa arvatud)
- C-kategooria - gaasipaigaldised töö rõhuga üle 5 baari kuni 16 baari (kaasa arvatud)
- D-kategooria - gaasipaigaldised töö rõhuga üle 16 baari

A- ja B- kategooria gaasipaigaldiste kaitsevööndi ulatus mõlemal pool gaasitorustikku on 1 m välimisest toru mõõtmest ning C-kategooria puhul 2 m. D-kategooria torustikul sõltub kaitsevööndi suurus ka toru nimiläbimõõdust. Alla 200 mm nimiläbimõõduga torustiku kaitsevöönd ulatub 3 m mõlemale poole torustiku keskjoonest. 200 mm ja 500 mm nimiläbimõõduga torustiku puhul on kaitsevööndi ulatuseks 5 m torustiku keskteljest ning üle 500 mm nimiläbimõõduga torustike kaitsevööndi ulatus on 10 m keskteljest.

PipeLife kataloogi järgi (PipeLife, s.a.) on laialt kasutusel polüetüleenist (PE) gaasitorustikud, mis materjali omaduste tõttu on korrosioonile vastupidavad, kerged paigaldada, ning torustikud on siledad ja kergekaalulised. Samas on võimalik kasutada ka terasest torustikke. Üldiselt toodetakse gaasitorustikke välisläbimõõdudega vahemikus DN 32 mm kuni DN 315 mm. Torustikud välisläbimõõdust alates DN 110 mm ja suuremad ühendatakse omavahel, kasutades elektrikeevismuhve või põkk-keevismeetodit. Väiksema läbimõõduga torustikud on üldiselt rulli keeratud, ning neid on lihtne ja kiire paigaldada väheste liitekohtade ja toru hea painduvuse tõttu.

### **1.1.5. Kaugkütte ja -jahutuse tehnoloogid**

Kaugkütteseaduse järgi (KKütS, 2003) nimetatakse kaugküttesüsteemiks soojuse tootmise, jaotamise ja tarbimise tehnilist süsteemi, mille moodustavad soojuse tootmise, jaotamise ja tarbimise tehnilised vahendid ja nendega seotud ehitised. Ehitusgiidi andmete järgi (Ehitusgiid - Küte, jahutus ja ventilatsioon, 2024) on üheks kaugkütte liigiks maaküte, mis on taastuvenergiast põhinev küttesüsteem, mis koosneb maapinnas talletunud soojusenergiast koguvast kollektorist ja hoone kütmiseks vett soojendavast (põrandküte, radiaatorid) soojuspumbast. Kollektor võib olla kas

horisontaalne või vertikaalne. Horisontaalse kollektori puhul paigaldatakse maapinna sisse umbes 1 m sügavusele torustik, kuid selle meetodika toimimiseks peab hoone ümber olema palju maapinda. Üldiselt peaks 1 m<sup>2</sup> kõetava pinna kohta olema umbes 4 m<sup>2</sup> maapinda. Vertikaalne kollektor koosneb aga ühest või mitmest vertikaalsest maasoojuspuuraugust, mis ei vaja nii palju ruumi kui horisontaaltorustik, kuid see-eest tuleb puuraukude rajamisel arvestada põhjaveevaruga ning veehaaretega.

Utilitase blogi (Utilitas, 2020) seletuse järgi on kaugjahutuse mõiste erinevalt kaugküttest üsna uus ning vähem tuntud, kuid tööpõhimõtte poolest on need kaks üsna sarnased. Kui kütte puhul suunatakse majja soe vesi, mis peale soojuse ära andmist suunatakse mööda torustikku hoonest välja, siis jahutuse puhul toimub protsess täpselt vastupidiselt. Kaugjahutuse veega on võimalik jahutada näiteks ventileeritavat õhku ning kui vesi on jahutusprotsessi käigus enda külma loovutanud, siis suunatakse see tagasi kaugjahutusjaama, kus see jahutatakse uuesti maha ning protsess võib korduda. Ringleva jahutusveena kasutatakse Eestis üldiselt mere- või jõevett. Läänemere vesi omab väga suurt jahutuspotentsiaali, kuna temperatuurilt on see üsna külm ning samas soolasuse tase on suhteliselt madal. Sellise merevee kvaliteedi puhul on võimalik kasutada seda kaugjahutussüsteemides väga tõhusalt, soodsalt ning taastuvalt ning paljudele seadmetele ei ole Läänemere soolsus liigselt kahjulik. Samas kasutatakse ka tehiskütte jahutusprotsesse, mida on võimalik teostada näiteks absorptsiooniseadmetega, kus jahutus tekib läbi termokeemilise protsessi.

Vastavalt Uponor tootekataloogile (Uponor, s.a.) eksisteerib mitu erinevat konfiguratsiooni kaugkütte- ja jahutustorustikele, mis on tänapäeval enamasti eelisoleeritud. Eelisoleeritud torusüsteem võib sisaldada kas ühte toru või kahte toru korraga ühes soojusisoleeritud koorikus. Juhul, kui soojusisoleeritud koorikus paikneb üks toru, siis paigaldatakse ühte kaevikusse korraga kaks koorikut, kuna nii kaugkütte- kui ka jahutusvõrgus liigub soojuskandja kahes erinevas suunas: pealevooluna, mis liigub majja ning tagasivooluna, mis liigub majast eemale. Teise variandina saab kasutada torustiku konfiguratsiooni, kus nii pealevoolu kui ka tagasivoolu torud paiknevad ühes ja samas eelisoleeritud koorikus. Tüüpilised torude läbimõõdud üksiku eelisoleeritud toru puhul on DN 25, 32, 40, 50, 63, 75, 90 ja 110 mm. Torude DN 25 ja 32 mm puhul on soojusisoleeritud kooriku välisläbimõõduks 140 mm; torude DN 40, 50 ja 63 mm puhul – 175 mm; torude DN 75, 90 ja 110 mm puhul – 200 mm. Juhul, kui ühes soojusisoleeritud koorikus paikneb korraga kaks toru, siis on tüüpilised torude läbimõõdud DN 25 ... 63 mm. Soojusisoleeritud koorikute läbimõõdud on sellistel juhtudel: torudel DN 25 ... 40 mm – 175 mm; torudel DN 50 ja 63 – 200 mm. Jahutustorustike puhul on tavapäraselt kooriku sisse paigaldatud ka külmumismvastane kaabel, mis väldib torudes liikuva jahutusallika jäätumist talvel. Uponor tootekirjelduste

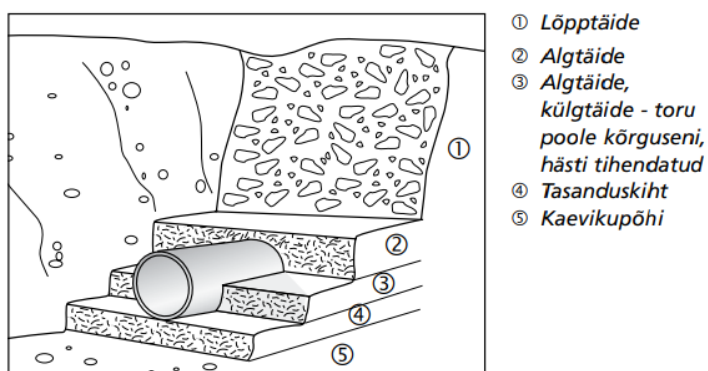


järgi on kaugkütte- ja jahutussüsteemide torustikud valmistatud ristseotud polüetüleenist (PE-Xa), kooriku sees olevaks soojusisolatsiooni materjaliks on suletud pooridega polüetüleenvaht (PE-X) ning kaitsekest on tehtud gofreeritud kõrgtihedast polüetüleenist (HDPE). Vastavalt standardile EVS-EN 13941-1 (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019+A1:2021) võib toru materjaliks olla ka teras ning soojusisolatsiooni materjaliks vahtpolüuretaan (PUR).

## 1.2. Maa-aluste tehnovõrkude paigaldamise meetodid ja täpsusnõuded

### 1.2.1. Reovee- ja sademeveekanaliseerimise paigaldamise meetodid ja nõuded

Kanaliseerimise torustiku paigaldamisel tuleb arvestada, et enamasti on torustik plastist ning selle paigaldamisel peavad maa-all olevad jõud mõjuma torustikule igalt poolt võrdse tugevusega; vastasel juhul võib torustik ebavõrdse koormuse mõjul deformeeruda või lõhkeda. PipeLife kataloogi „Reoveekanaliseerimine“ (07.08.2009) andmete kohaselt nimetatakse sellist süsteemi, kus sängituspinna ja alus on saavutanud välise koormuse suhtes maksimaalse tugevuse, mehhaaniliselt stabiilseks süsteemiks. Kaevik koosneb järgmistest osadest (vt Joonis 1): kaeviku põhi, mis on tasandatud ning puhastatud kividest; tasanduskiht, mis tavapäraselt ehitatakse liivast, kruusast või killustikust; kül- ja algtäide, mis on tavapäraselt ehitatud samast materjalist, mis tasanduskiht, kuid järgnevalt ka tihendatud; lõpptäide või teisisõnu tagasitäide, mis tavapäraselt ehitatakse mineraalsest tihendatavast pinnasest. Viimase etapina taastatakse alati kõik katendid, mis said kaeviku avamise käigus kahjustatud.



**Joonis 1.** Kanaliseerimistoru paigaldamise kaeviku skeem. Joonis võetud PipeLife kataloogist „Reoveekanaliseerimine“, 07.08.2009.

Kaevik saab olla kas toestatud või toestamata ning sellest sõltuvalt on määruses EVS-EN 1610:2015 toodud kaeviku minimaalsed laiused toru nimimõõdu suhtes. Tabel 1 kirjeldab eelnimetatud määruses toodud nõudeid. Tabelis toodud parameeter  $OD_h$  on toru horisontaalne välisläbimõõt meetrites ning  $\beta$  on toestamata kaeviku seinanurk, mõõdetuna horisontaali suhtes (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2015). Sealjuures, kui kaeviku sügavus on alla 1,00 m, siis kaevikul puudub minimaalne nõutav laius; kaevikul sügavusega 1,00 m kuni 1,75 m on kaeviku minimaalne laius sätestatud 0,80 m; sügavusega 1,75 m kuni 4,00 m – minimaalne kaeviku laius 0,90 m; üle 4,00 m sügavuse kaeviku minimaalne lubatav laius on 1,00 m. Toestamata kaevikule on esitatud ka maksimaalne lubatav sügavus, milleks on kuni 1,40 m.

**Tabel 1.** Kaeviku minimaalne laius sõltuvalt toru nimimõõdust (DN). Väljavõte EVS-EN 1610:2015.

DN	Kaeviku minimaalne laius ( $OD_h + x$ ) [m]		
	Toestatud kaevik	Toestamata kaevik	
		$\beta > 60^\circ$	$\beta \leq 60^\circ$
$\leq 225$	$OD_h + 0,40$	$OD_h + 0,40$	
$> 225$ kuni $\leq 350$	$OD_h + 0,50$	$OD_h + 0,50$	$OD_h + 0,40$
$> 350$ kuni $\leq 700$	$OD_h + 0,70$	$OD_h + 0,70$	$OD_h + 0,40$
$> 700$ kuni $\leq 1200$	$OD_h + 0,85$	$OD_h + 0,85$	$OD_h + 0,40$
$> 1200$	$OD_h + 1,00$	$OD_h + 1,00$	$OD_h + 0,40$

Torustike paigaldamine algab kas liitumispunktist või allavoolu asetsevast otsast. Tabel 2 kajastab väljavõtet EVS 846:2021 standardist, mis seab ette minimaalsed, soovituslikud ja maksimaalsed torustike kalded süsteemi tüübi ja torude läbimõõdu järgi kanalisatsiooni projekteerimisel ja ehitamisel. Juhul kui projekteeritud kanalisatsiooni kalle ületab soovitusliku kalde, tuleb seda põhjendada projektis.

**Tabel 2.** Torustiku kalded olenevalt läbimõõdust. Väljavõte EVS 846:2021.

Süsteemi tüüp	Toru nimimõõt	Lang (kalle) %		
		Min	Soovitus	Max
Reoveekanaliseerimine	DN 40	2,5	3,5	4-7
	DN 50	2,0	3,5	4-7
	DN 70	1,5	3,0	4-7
	DN 100	1,2	2,0	4-7
	DN 150	0,7	0,8	4-7
	DN 200	0,5	0,6	4-7
Sademeveekanaliseerimine	DN 70	1,2	2,5	4-7
	DN 100	1,0	2,0	4-7
	DN 150	0,6	0,8	4-7
	DN 200	0,4	0,5	4-7

Meetodeid, mis ei nõua toru paigaldamisel inimese töötamist toru sees, nimetatakse mehitamata tehnikateks. Juhitavad horisontaalsuunalised puurimismeetodid ja samal liinil asuvate torustike kaevikuteta asendamise meetodid kujutavad endast mehitamata tehnikaid, mis on seotud torude läbisurumisega (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2022). Puurimismeetodid küll ei nõua kaeviku avamist, kuid on mõjutatavad paljudest teguritest, näiteks pinnase omadustest ning seega kõrget täpsust nõudvaid torustikke ei ole võimalik paigaldada puurimismeetoditega. Järgnevad kinnise kaeviku puhul kasutatavad paigaldusmeetodid on täpsemalt kirjeldatud standardis EVS-EN 12889:2022.

Põhilised mehitamata juhitatud puurimismeetodid eelnimetatud standardi järgi on järgmised:

- Muttimine (ingl *impact moulting*) – meetodi rakendamisel kasutatakse pneumaatilist torpeedokujulist tööseadet, mida nimetatakse mutiks. Seadme sees sisalduv edasi-tagasi liikuv löögivarras lööb vastu ninakoonust, mis liigub iga löögiga edasi. Meetod on sobilik ainult väiksema läbimõõduga torude paigaldamiseks, mis ühendatakse kas koheselt muti külge ning tõmmatakse läbi samaaegselt seadme edasiliikumise või piisavalt stabiilse pinnase puhul on võimalik toru ka hiljem sissetõmmata või läbisuruda. Arvestada tuleb ka õõnsuse ava diameetri vähenemisega 5% ... 15%. Antud meetodi minimaalne paigaldatava toru välisläbimõõt on 25 mm ning maksimaalne välisläbimõõt 160 mm. Üldiselt on antud meetodiga paigaldatav lõigu pikkus vahemikus 10 kuni 30 m, kuid sõltuvalt pinnase ja põhjavee tingimustest, välisläbimõõdust ning paigaldussügavusest võib lõigu pikkus olla kuni 50 m.
- Rammimine kinnise esiootsaga toruga (ingl *pipe ramming with a pipe closed at its leading end*) – meetodi rakendamisel kasutatakse terashülssi, mis rammitakse löökvasaraga suletud otsaga pinnasesse. Terashülssi välisläbimõõt võib olla vahemikus 100 ... 160 mm ning paigaldatava lõigu pikkus kuni 30 m.
- Laiendiga varda sissesurumine (ingl *rod pushing with an expander*) – meetodi rakendamisel kasutatakse esmalt pilootvarrast, mis surutakse rammimise teel pinnasesse lähtekavikust sihtkaevikusse. Seejärel sihtkaevikus kinnitatakse varda külge laiend koos paigaldatava toruga ning tõmmatakse konstruktsioon lähtekavikusse tagasi. Paigaldatava toru välisläbimõõt võib olla vahemikus 100 ... 160 mm ning lõigu pikkus kuni 30 m.
- Toru purustamine (ingl *pipe bursting*) – meetodit rakendatakse renoveerimistehnoloogiana, mille käigus purustatakse vana toru, surudes tükid

paisumiskoonuse abil ümbritsevasse pinnasesse, moodustades ava uue toru jaoks. Samaaegselt paigaldatakse vana toru asemel sama või suurema läbimõõduga uus toru. Toru purustamisel võib uue paigaldatava toru välisläbimõõt jääda vahemikku 50 ... 1000 mm ning ehitatava lõigu pikkus võib ulatuda kuni 250 m.

- Toru väljatõmbamine (ekstraheerimine) (ingl *pipe extraction*) – meetodit rakendatakse samuti renoveerimistehnoloogiana, kus vana toru väljatõmbamisel pinnasest kasutatakse vardatõmmitsat. Samaaegselt vana toru välja tõmbamisel tõmmatakse uus survetoru asemele. Antud meetodi eelis eelmisega võrreldes on see, et vanast torust ei jää pinnasesse tükke alles. Vajadusel saab kasutada ka laiendit juhul, kui uus toru on vanast suurema läbimõõduga. Toru väljatõmbamisel ning uue toru paigaldamisel võib lubatud välisläbimõõt jääda vahemikku 20 ... 400 mm ning ehitatava lõigu pikkus võib ulatuda kuni 200 m. Ümara ristlõikega torustiku korral sätestatakse kohustuslikuks rajada lisaks ka vahepelsed kaevikud iga 20 ... 25 m järel.
- Rammimine avatud otsaga toruga (ingl *pipe ramming with an open ended pipe*) – meetodi rakendamisel kasutatakse terashülssi, mis rammitakse löökvardaga avatud otsaga pinnasesse. Peale toru paigaldamist puhastatakse torusse kogunev pinnas kas suruõhuga, survepesuga või puuritakse välja mehhaaniliselt. Minimaalne paigaldatava toru välisläbimõõt on antud meetodil 200 mm ning maksimaalne 3500 mm. Paigaldamise pikkus jääb üldjuhul vahemikku 50 ... 80 m, kuid keskmiste läbimõõtude korral teostatakse ka suuremaid vahemikke; näiteks 800 mm välisläbimõõduga ümara ristlõikega toru puhul on tüüpiline toru rajamispikkus kuni 100 m.
- Tigupuurimine (ingl *auger boring*) – meetodi rakendamisel surutakse terashülss avatud otsaga hüdraulilise tungrauaga pinnasesse, eemaldades samaaegselt torusisest pinnast mehhaaniliselt töötava teoga. Tigupuurimisega on võimalik paigaldada torustikke välisläbimõõduga vahemikus 150 ... 1200 mm ning kogupikkusega kuni 100 m.
- Vasarpuurimine/löökpuurimine (ingl *hammer drilling*) – meetodit rakendatakse peamiselt kivipinnases, kuid saab kasutada ka purdpinnases. Surutava toru ette paigaldatud löökvasar purustab pinnase löökide tulemusel ning toru sisse sattunud pinnas eemaldatakse kas mehhaaniliselt teo abil või vee või suruõhuga. Vasar-/löökpuurimisega on võimalik paigaldada torustikke välisläbimõõduga vahemikus 80 ... 800 mm ning kogupikkusega kuni 100 m.

- Toru „söömine“ (ingl *pipe eating*) – meetodit rakendatakse vana toru eemaldamisel, kasutades mikrotunnelitüüpi masinat. Seade liigub mööda olemasolevat toru, purustades selle. Väljakaevatud pinnas koos purustatud vana toruga eemaldatakse kaevikust vaakumiga, hüdrauliliselt või teo abil.

Eelnimetatud mehitamata ja juhitamata meetodite alternatiiviks on mikrotunneli meetodid, mis on juhitud toru surumise tehnikad. Mikrotunneli meetod on üheetapiline ühe läbimiga (lõikepeaga) tehnika toru või hülstoru surumiseks, kasutades surumist tungrauaga ja samal ajal pidevat pinnase eemaldamist tööpinnalt, mis on mehaaniliselt toetatud ja/või toetatud vedeliku või maapinna survega (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2022). Mikrotunnelprotsess on tsükliline, mis tähendab, et peale seda, kui üks toru on tungrauaga puuritud avasse surutud, tõmmatakse tungrauad tagasi ning teine toru paigaldatakse lähtekaevikus oma kohale ning protsessi korratakse.

Põhilised mehitamata juhitud puurimismeetodid on EVS-EN 12889:2022 standardi järgi järgmised:

- Mikrotunneli meetod teoga pinnase eemaldamiseks (ingl *microtunneling with auger spoil removal*) – Antud meetodiga on võimalik paigaldada torustikke välisläbimõõduga vahemikus 350 ... 1100 mm ning kogupikkusega vahemikus 80 ... 100 m sõltuvalt paigaldatava toru välisläbimõõdust.
- Mikrotunneli meetod puurimisseguga (ingl *slurry shield microtunneling*) – Antud meetodiga on võimalik paigaldada torustikke välisläbimõõduga vahemikus 350 ... 2500 mm ning kogupikkusega vahemikus 80 ... 600 m sõltuvalt paigaldatava toru välisläbimõõdust.
- Mikrotunneli meetod puurimisseguga ja suruõhkpadjaga – Antud meetodiga on võimalik paigaldada torustikke välisläbimõõduga vahemikus 2000 ... 4500 mm ning kogupikkusega vahemikus 500 ... 800 m sõltuvalt paigaldatava toru välisläbimõõdust.
- Mikrotunneli meetod pinnase surve tasakaaluga – Antud meetodiga on võimalik paigaldada torustikke välisläbimõõduga vahemikus 1500 ... 4500 mm ning kogupikkusega vahemikus 250 ... 800 m sõltuvalt paigaldatava toru välisläbimõõdust.
- Mikrotunneli meetod pinnase eemaldamisel muude mehaaniliste vahenditega.

- Mikrotunneli meetod, mis hõlmab toru „söömist“ (ingl *microtunneling incorporating pipe eating*).
- Piloottoruga läbisurumine (ingl *pilot pipe jacking*) – Antud meetodiga on võimalik paigaldada torustikke välisläbimõõduga vahemikus 80 ... 1600 mm ning kogupikkusega kuni 150 m.
- Sundpuurimine (ka HDD – horisontaalne sundpuurimine) (ingl *directional drilling*) – meetodi rakendamisel kasutatakse masinat, mille sees pöörleb varras ning seda edasi lükates lükatakse edasi ka puurpea, mis on üldiselt maapinna suhtes kaldus olekuga. Puurvarras on varustatud anduri, sondi ja majakaga, mida on võimalik maa alt tuvastada lokatsiooniseadmete abil ning rajada pilootava. Peale pilotava rajamist suurendatakse auku, tõmmates pöörlev puurvarras tagasi ning samaaegselt või ka hiljem paigaldatakse tekkinud avausse toru. Puurimisel tekkiv pinnas eemaldatakse. Antud meetodiga on võimalik paigaldada torustikke välisläbimõõduga vahemikus 50 ... 1200 mm ning kogupikkusega kuni 2000 m, kusjuures maksimaalne paigalduspikkus sõltub pinnase omadustest ja paigaldatava toru diameetrist.

Mehitatud tehnikad torustike kinnisel meetodil paigaldamiseks eeldavad töötajate pidevat tööd torus ja/või surumisseadmel. Ka mehitatud tehnikad jaotuvad juhivateks ja juhimatuteks.

### **1.2.2. Veevarustuse välisvõrgu paigaldamise meetodid ja nõuded**

Vastavalt standardile EVS 921:2022 „Veevarustuse välisvõrk“, lõike 10.2.4 „Kaevetööd ja torustike paigaldus“ kohaselt tuleb tööde tegemisel juhinduda standardist EVS-EN 1610, mille metoodikad on kirjeldatud käesoleva magistritöö alajaotises 1.2.1.

Vastavalt standardile EVS 921:2022 „Veevarustuse välisvõrk“, lõike 10.2.5 „Täpsusnõuded torustike ja kaevude paigaldamisel“ kohaselt lubatakse valmis ehitatud survetorustikel kõrvalekaldeid projektist, juhul kui need ei kahjusta konstruktsiooni toimivust ega torustiku harude ehitamist. Horisontaaltasapinnal lubatakse sellisel juhul maksimaalset kõrvalekallet projektist kuni 200 mm mis tahes projekteeritud punktil, milleks on siibrid, hüdrandid, käänakud, trassi telje punktid. Kõrguslikult on samade punktide lubatud kõrvalekalle  $\pm 100$  mm. Seadmekaevu nii plaaniline kui ka kõrguslik erinevus projektsega võrreldes võib samuti olla kuni  $\pm 100$  mm. Torustike paigaldamisel tuleb vältida toru saastumist seestpoolt. Veetorustikud tuleb alati paigaldada külmumispiirist sügavamale ning vajadusel soojustada.

Selleks, et kaitsta veetoru mehaaniliste vigastuste eest ja võimaldada veetoru hilisemat asendamist kinnise kaevikuga, on võimalik kasutada hülstoru (kaitsetoru). Hülstoru materjaliks on tavaliselt teras, betoon või plastmass.

### **1.2.2.1. Tallinna Vesi täpsusnõuded torustike ja kaevude paigaldamisel**

Eestis tegutsev üks suurimaid vee-ettevõtjaid Tallinna Vesi on seadnud tehnilised nõuded vee tehnovõrkude ehitamiseks (Tallinna Vesi, s.a.). Nõuete kohaselt on lubatud veevarustuse torustikud ehitada teatud kõrvalekaldega projektist juhul, kui kõrvalekalle ei tekita probleeme konstruktsiooni toimivuses. Isevolsete tehnovõrgu elementide nagu kaev või telje punkt lubatud horisontaalne kõrvalekalle projektist on kuni 200 mm; samas kaevudevaheline torustik peab kulgema sirgjooneliselt, suurima lubatud horisontaalse kõrvalekaldega 1/300 kaevuvahe kohta. Isevoolse torustiku kõrguslik kõrvalekalle projektist on lubatud ainult juhul, kui torustik täidab oma eesmärgi ning juhib kogu vee projekteeritud suunas, vältides vee seiskumist või kogunemist torustikus ja/või kaevudes.

Isevoolse peatorustiku puhul, mille projekteeritud kalle ületab 5 mm/m, on maksimaalne lubatud kalde hälve kuni 1,5 mm/m ning maksimaalne toru elementide kõrguslik kõrvalekalle on 50 mm. Projekteeritud isevoelse torustiku kaldega 3-5 mm/m suurim lubatud hälve kaldel on kuni 1,0 mm/m ja kõrguslikult kuni 30 mm. Alla 3 mm/m projekteeritud torustiku kalde tolerantsid on vastavalt 1,0 mm/m ja 20 mm.

Survetorustiku ehitamisel on sarnaselt isevoelsele torustikule lubatud kõrvalekalded projektist ainult juhul, kui need ei takista tehnovõrkude eesmärgilist toimist. Maksimaalsed horisontaalne ja kõrguslik kõrvalekalle projektist kõikidel survetorustiku elementidel on lubatud vastavalt  $\pm 200$  mm ja  $\pm 100$  mm.

### **1.2.3. Hoonevälise kaablikaitse paigaldamise meetodid ja nõuded**

PipeLife kataloog (PipeLife, Hoonesisene- ja väline kaablikaitse, 2023) selgitab kaabli paigaldamisel kaevisesse kaitsetoru korral kehtivaid nõudeid järgmiselt: kaevise põhi kivises pinnases peab olema kaetud 50 mm kuni 100 mm paksuse liiva- või kruuspadjaga. Selle peale paigutatakse kaitsetoru ning täidetakse 300 mm paksuse kihiga kivivabast pinnasest. Järgnevalt paigaldatakse kaevisesse kollane veniv hoiatuslint, mis kaetakse tagasitäitega kohapealsest pinnasest. Viimase kihina taastatakse pealiskiht olenevalt varasemast või projekteeritud katendist. Juhul, kui kaevisesse paigaldatakse kõrvuti rohkem kui 1 kaitsetoru, peab minimaalne

torudevaheline kaugus olema 70 mm, kusjuures äärmiste torude ja kaevise seinte vahekaugus peab olema minimaalselt 100 mm. Juhul, kui kaitsetorud paigaldatakse üksteise kohale mitmekihiliselt, peab iga kihi vahele jääma minimaalselt 70 mm täitepinnast. Ülemise kihi kaitsetorude pealispinna sügavus taastatud katendist võiks jääda vähemalt vahemikku 500 mm kuni 1000 mm. Täitepinnas torude ümber tuleb tihendada ning tuleb arvestada pinnase hilisema vajumisega.

Juhul, kui kaitsetorud tuleb paigaldada raudteede, tiheda liiklusega teede ning kraavide alla, saab kasutada kinnist paigaldusviisi, ehk puurimist ja läbisurumist. Kohalike teede ja sissesõiduteede alla kinnisel meetodil paigaldatavate kaitsetorude sügavus võib olla minimaalselt 700 mm, muudel juhtudel on minimaalne puurimise teel paigaldussügavus 1000 mm.

#### **1.2.4. Gaasi tehnovõrgu paigaldamise meetodid ja nõuded**

Vastavalt majandus- ja taristuministeriumi määrusele nr 87 (MTM määrus nr 87, 2015), paragrahv §12. Välistorustik, seadistatakse gaasitorustiku vähimaks paigaldussügavuseks 0,8 m. Samas on paigaldussügavust võimalik vähendada täiendavate ohutusmeetmete rakendamisega, näiteks paigaldades gaasitorustiku ümber manteltoru. Vedel- ja biogaasipaigaldise puhul peab torustiku vähim paigaldussügavus ületama pinnase külmumissügavust.

Gaasitorustiku paigaldamisel asetatakse torustikud kaevikusse ning ühendatakse omavahel kokku üldjuhul kasutades elektrikevisliitmikke või põkksulatusliidet. Gaasivõrgu ettevõttestandard GV-TS 1 (2021) järgi tuleb polüetüleen (PE) torustiku suunamuutused rajada selleks otstarbeks valmistatud liitmike abil või PE torudele omast elastsust kasutades piiratud ulatuses. Torude painutamine või kuumpainutamine mehaaniliste vahenditega on keelatud. Juhul, kui gaasitoru paigaldatakse trossiga tõmmates manteltorusse, siis ei tohi toru olla tõmbejõududega ülepingestatud. Torude kaevikusse paigaldamisel peab vältima torude paindumist või vändumist.

Gaasitorustike paigaldamisel tuleb alati paigaldada toru peale (näiteks teipides või ümber toru kerides) plastisolatsiooniga vaskaabel. Vaskaabel peab olema terviklik ning selle otsad tuuakse välja ühenduspaneelile.

#### **1.2.5. Kaugkütte ja -jahutuse tehnovõrkude paigaldamise meetodid ja nõuded**

Vastavalt Eesti Soojuspumba Liidu sisestele ühtsetele soojuspumpade paigaldusnormidele (ESPL normid, s.a.) peab maakontuuri torustik olema vastavuses standardiga EVS EN 12201 ning lisaks peab olema sertifitseeritud sõltumatu kolmanda



osapoole poolt. Pinnasekollektori toru peab olema De 40 mm PE80 / PE100 / PE100RC, surveklassiga PN10 SDR17 polüetüleentoru. PE80 ja PE100 tähistavad torude tugevusklassi: PE80 puhul on toru tõmbetugevus vahemikus 8,00 ... 9,99 Mpa; PE100 puhul on toru tõmbetugevus vahemikus 10,00 ... 11,19 MPa. Tähis RC viitab asjaolule, et toru on pragunemisele vastupidav (RC – ingl *resistant to cracking*). PN10 tähistab toru surveklassi, mis antud juhul tähendab, et toru või selle element suudab taluda rõhku kuni 10 bar. SDR on standartmõõtude suhe; toru seina paksuse suhe toru välisläbimõõtu (SDR – ingl *Standard dimension ratio*). Käesoleval juhul, kui toru välisläbimõõt on 40 mm ning SDR on 17, siis on toru seina paksus arvutatav jagades välisläbimõõtu standardmõõtude suhtega. Seega on antud näites toru seina paksus 2,35 mm. Ühe maakollektori maaküttekontuuri pikkus peab jääma kuni 450 m vahemikku. Maakontuuri paigaldussügavus on üldiselt  $1 \pm 0,2$  m ning maakütte torude omavaheline minimaalne vahekaugus peab olema  $1 \pm 0,1$  m. Juhul, kui vajatakse erilahendust, mis ei ole vastavuses antud normidega, siis tuleb see kooskõlastada projekteerijaga. Pinnasekollektori läbiviigid ja ristumised teiste tehnovõrkudega peavad olema isoleeritud ja paigaldatud kaitsehülssidesse.

Pinnasekollektorite rajamisel peavad olema täidetud järgmised nõuded: rajatava pinnasekollektori ja kinnistupiiri vahele peab jääma vähemalt 1 m vahemaad; rajatava pinnasekollektori ja ehitise või hoone vahele peab jääma vähemalt 1 m vahemaad; pinnasekollektori rajamisel muude tehnovõrkude lähedusse peab arvestama nende vahelise distantsiga vähemalt 1 m või tehnovõrgu kaitsevööndi vahemaaga; rajatava pinnasekollektori ja muude rajatiste või terrasside vahele peab jääma vähemalt 1 m vahemaad; pinnasekollektori rajamisel puude lähedusse peab arvestama vahemaaga puu rinnasümberruumi sõltuvalt, vastavalt EVS939-3:2020 standardile.

Maakütte kollektorkaevu ümbruses peavad kõik maaküttekontuuri torustikud olema isoleeritud 1,5 m ulatuses 30 mm paksuse koorikuga EPS120 (EPS – vahtpolüstüreen) või 13 mm poorkummisolatsiooniga ning kaetud kaitsehülssidega. Alates 1,5 m kaugusest peale kollektorkaevu edasised torud isoleeritakse sellise kauguseni, kuni maakontuuride horisontaalne vahekaugus on 1,0 m.

Kaugkütte- ja jahutustorustike paigaldamisel ühendatakse erinevad torud ja nende elemendid kasutades keevisliiteid. Vastavalt EVS-EN 13941-2:2019+A1:2021 standardile (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019+A1:2021) tuleb keevisest 50 mm tagapool olev ala mõlemal pool liidet hoida tolmust, mustusest, rasvast ja veest vabana. Samuti peab keevituskoht olema tuule ja vihma eest kaitstud. Juhul, kui temperatuur langeb alla 5°C ning suure õhuniiskuse korral tuleb keevisõmbluse alasid eelnevalt soojendada, et vältida kondensaadi teket. Lisaks tuleb enne keevitamist

algust sulgeda toru vähemalt üks ots korgiga, et vältida võimalikke kahjustavaid õhuliikumisi torus. Peale keevitamise lõpetamist tuleb eemaldada keevispritsmed ning puhastada pind rübust. Peale torustiku paigaldamist toimub torustiku lõplik kontroll, mis hõlmab torustiku visuaalset ülevaatus ja ehituslike andmete kogumist ning dokumenteerimist. Kui see on tehtud, siis teostatakse torustikule tagasitäide, tagades materjalide hoolika tihendamise torude ümber. Tagasitäide peab olema teostatud selliselt, et selle omadused ega tihedus ei kahjustaks torusid ja paigaldatud tehnovõrgu elemente.

### 1.2.6. Transpordiameti nõuded tehnovõrgu ehitustegevusele teemaal

Tabel 3 pärineb Transpordiameti juhendist tehnovõrkude ehitustegevuse kohta teemaal. Tabelist nähtub, et kõikidele tehnovõrkude liikidele kehtivad samad täpsusnõuded. Maksimaalne sügavuse kõrvalekalle projektist on 50 mm, kuid samas on lubatud paigaldada projekteeritud tehnovõrgud ka sügavamale juhul, kui see ei ole projektis keelatud ning ei ohusta ega kahjusta olemasolevaid maa-aluseid rajatiseid. Juhul kui paigaldatav tehnovõrk lõikub teega, siis horisontaalse paiknemise suurim lubatav kõrvalekalle projektist moodustab 300 mm ning kaugus tee konstruktsioonidest või muudest tee-elementidest peab mahtuma tolerantsi 200 mm.

**Tabel 3.** Nõuded paigaldustäpsusele teemaale paigaldamisel (Transpordiamet, 2018-015).

Lubatud hälbed projektist teemaale paigaldamisel [mm]	Kaablikanalisisatsioon, sidekaabel või elektrikaabel kuni 110 kV	Elektrikaabel 110 kV+ või gaasitorustik	Kanalisisaioonitorustik või kaugküttetorustik	Veetorustik	Maaparandussüsteemi või sademevee torustik
Sügavus tee maaüksusel	50	50	50	50	50
Horisontaalne paiknemine lõikumisel teega	300	300	300	300	300
Kaugus tee konstruktsioonidest või muudest tee-elementidest või rajatistest	200	200	200	200	200

### **1.3. Maa-aluste tehnovõrkude teostusmõõdistuste täpsusele esitatavad nõuded**

Eestis hetkel kehtivatest regulatsioonidest kõige suuremat osakaalu omab Majandus- ja Taristuministeeriumi määrus nr 34 (MTM määrus nr 34, 2016). MTM määrus nr 34, §1 defineerib teostusmõõdistamist, kui ehitamise ajal ja vahetult valmimise järel ehitise või selle osa asendi ning määruses nimetatud tehniliste andmete tuvastamist ning dokumenteerimist. §2 defineerib tehnovõrku kui maapinnal, maapõues ning õhuruumis paiknevat kütte-, veevarustus- või kanalisatsioonitorustikku või maaparandussüsteemi torustikku, elektroonilise side või elektrivõrku, nõrkvoolu-, küttegaasi- või elektripaigaldist või surveeadmestikku ja ka nende teenindamiseks vajalikke ehitisi.

MTM määrus nr 34, §8 sätestab tehnovõrgu kaevu tasapinnaliseks suurimaks lubatavaks veaks 8 cm lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes. Sama paragrahvi järgi on maa-aluse tehnovõrgu tasapinnalise asendi suurim lubatav viga lähimate mõõdistusvõrgu punktide suhtes: koordinaatpunktide (MTM määrus nr 34 järgi on koordinaatpunkt teostusmõõdistamisel tehnovõrgu ja -rajatise joonobjekti telje või punktobjekti tsentrisse mõõdetud ja objekti asukohta riiklikult kehtestatud koordinaatsüsteemis X-, Y- ja Z-koordinaatidega kirjeldav punkt) teostusmõõdistamise puhul 8 cm; trassi puhul (MTM määrus nr 34 järgi trass on olemasoleva või kavandatava joonobjekti kulgu tähistav mõtteline joon või vöönd ja nende tähistus plaanil) punktide vahel 0,25 m sirgjoonest; nõuetekohase teostusjoonise puudumisel maa-aluse tehnovõrgu tasapinnalise asendi puhul 1 m. Kõrgusliku vea osas peab kaevu uurimisel toru ja kaevu põhja kõrguste viga lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes jääma alla 3 cm + 1% toru või kaevu põhja sügavusest kaevu luugi suhtes.

MTM määrus nr 34, §33 alusel tuleb maa-aluse tehnorajatise algus-, lõpp- ja käänupunkti asukoht mõõdistada enne kaeviku sulgemist, välja arvatud juhul, kui ehitamisel avatud kaeviku tehnoloogiat ei kasutatud. Lisaks MTM määrusele topo-geodeetiliste uuringute teostamise kohta on Transpordiamet loonud juhendi „Täiendavad nõuded topo-geodeetilisele uuringule teede projekteerimisel“ (Transpordiamet, 2024), kuid antud nõuded ei käsitle teostusmõõdistamise osa.

### **1.4. Maa-aluste tehnovõrkude igapäevaselt kasutatavad teostusmõõdistuste meetodikad**

Tänapäeval kõige enamlevinumaks maa-aluste tehnovõrkude teostusmõõdistusel kasutatavaks meetodiks on tahhümeetriline mõõdistus. Antud meetodil on võimalik

möödistada värskest paigaldatud torustikku lahtise kaeviku puhul või kinnise kaeviku puhul tehnovõrkude maapealseid elemente. Kaevude olemasolul mõõdetakse kõik kaevude sees olevate torude kõrgused, kaevu põhja kõrgus, kaevu kaane kõrgus ning vajadusel muud kaevus paiknevad elemendid. Tahhümeetriga mõõdistades kasutatakse ehitusprismat. Mõõdistuse alustamiseks paigaldatakse tahhümeeter kaeviku lähedusse ning üldjuhul orienteeritakse kasutades vähemalt kolme lähtepunkti joonelis-nurgalise vastulõike meetodil. Lähtepunktidest koosnev mõõdistusvõrk peab vastama MTM määruses nr 34 esitatavatele nõuetele. Peale tahhümeetri orienteerimist on võimalik mõõdistada kõik nähtavad elemendid punkt-punkti haaval. Antud meetodi eeliseks on kõrge mõõdistustäpsus, kuid puuduseks on üsna ajamahukas tööprotsess. Tahhümeetriline mõõdistusviis sobib mõõdistustäpsuse poolest kõikide tehnovõrgu liikide mõõdistamiseks.

Tahhümeetermõõdistusest väiksema täpsusega, kuid seevastu kiirema mõõdistusajaga meetodiks on RTK-GNSS mõõdistus. Kui tahhümeetermõõdistuse täpsus, olenevalt kasutatavast tahhümeetri ja ehitusprisma mudelist ning mõõdistusvõrgust, varieerub mõne millimeetri ulatuses, siis RTK-GNSS mõõdistusviisi täpsus varieerub mõne sentimeetri ulatuses. Antud meetodil on samuti võimalik mõõdistada maa-aluseid torustikke ainult lahtise kaeviku puhul, kogudes andmeid punkt-punkti haaval. RTK-GNSS meetod ei pruugi sobida iseoolsete torustike teostusmõõdistuseks, kuna antud meetodika puhul ei ole võimalik tuvastada torude kallet piisava täpsusega. Samas aga võiks antud meetodika olla sobilik survetorustike ja kaitsetorustike mõõdistamisel.

Veel üheks tõhusaks ning tahhümeetermõõdistusega täpsuse poole pealt võrreldavaks, kuid jällegi ajamahukamaks meetodiks lahtise kaeviku teostusmõõdistamise puhul, on staatiline laserskaneerimine. Antud meetodi rakendamiseks peab kasutama tahhümeetermõõdistusega loodud mõõdistusvõrku, mis on kindlustatud tähistega. Vajalike tähiste arv sõltub mõõdistusala suurusest ja hilisemast andmetöötamise meetodikast. Staatilise laserskaneerimise puhul paigutatakse seade kas kaeviku lähedusse või kaeviku sisse arvestusega, et nähtaval on korraka vähemalt 3 tähist. Olenevalt seadme spetsifikatsioonist, mõõdistusala suurusest ning omapärast tuleb otsustada mitmest seisust skaneeringud teostatakse. Üldiselt võiks erinevate seisude vahele jääda kuni 10 m vahemaad. Staatilise laserskaneerimise mõõdistusviisi tulemusena kogutakse andmed punktipilvena, mis on eeliseks tahhümeeter- ja RTK-GNSS mõõdistusviiside ees. Samas aga peale staatilise laserskaneerimise sooritamist objektile järgneb mõõdistusandmete järeltöötlus enne teostusdokumentatsiooni koostamist. Erinevate seisude punktipilved tuleb tõsta kokku ühtsesse lõpp-punktipilve, kasutades kas igast seisust nähtavaid tähiseid (minimaalne vajalik arv seisukohta 3 tk) või mõõdistusalale iseloomulikke elemente või reljeefi, mis on kergesti tuvastatavad

erinevatest mõõdistusseisudest. Spetsiifilised laserskaneerimise andmetöötluse tarkvarad, nagu näiteks Autodesk Recap Pro, on võimelised teostama erinevate seisude punktipilvede kokku tõstmist ilma kasutaja lisa abita. Sellegi poolest, kui skaneeritud ala on ühetaoline ning iseloomulikke pindasid on vähe, siis punktipilve lõppkvaliteet võib kannatada. Kui punktipilve kõik seisud on kokku liidetud, siis määratakse punktipilves nähtavatele tähistele tahhümeetrilisel meetodil mõõdetud koordinaadid. Seejärel on punktipilv kasutuskõlblik teostusdokumentatsiooni koostamiseks. Antud meetod üldjuhul ei sobi kaevude sisemuse kaardistamiseks, kuid ülejäänud maa-aluste tehnovõrkude torustike ja elementide mõõdistuseks on staatiline laserskaneerimine üsna tõhus. Sellegipoolest, ei ole staatiline laserskaneerimine väga tihti kasutatav meetod tehnovõrkude mõõdistuses, eelistuses on siiski tahhümeeter- ja RTK-GNSS mõõdistusviisid.

Kõikide eelnimetatud mõõdistusmeetodite andmekorje põhjal on võimalik koostada maa-aluste torustike teostusdokumentatsiooni ainult sellisel juhul, kui torustikud on mõõdistatud lahtise kaeviku puhul. Kinnise kaeviku puhul on võimalik kasutada mõõdistust elektromagnetlokaatori või georadari abil. Sellegipoolest on eelnimetatuid seadmeid võimalik kasutada ainult koostöös tahhümeeter- või RTK-GNSS seadmetega. Kinnise kaeviku puhul tehnovõrkude tuvastusmeetodeid kasutades sõltub täpsus otseselt seadmeid kasutava operaatori andmete tõlgendamise oskustest. Samuti sõltub mõõdistustäpsus otseselt tehnovõrgu paigaldussügavusest ning muudest operaatorist mitte sõltuvatest oludest, näiteks kolmandate tehnovõrkude elementide poolt tekitavatest veaallikatest või ebasoodsatest pinnase omadustest.

*Ground penetrating radar systems* (GPRS, s.a.) kodulehe andmete järgi põhineb elektromagnetlokaatori tööpõhimõtte torudest ja kaablitest kiirguvatel elektromagneetilistel signaalidel. Neid signaale saab luua lokaatori saatja abil, kas suunates voolu torule või kasutades torus paikneva elektriikaabli voolu. Antud meetodiga ei ole võimalik tuvastada maa-aluseid plasttorusid, kui nende sees puudub voolu juhtiv kaabel või spetsiaalne tuvastustraad. Elektromagnetlokaator suudab tuvastada voolu juhtiva elemendi plaanilise asendi ning sügavuse maapinnast, misjärel tuleb antud maapinna punkt mõõdistada kas tahhümeetrilisel või RTK-GNSS meetodil, salvestades mõõdistusandmetesse ka tehnovõrgu sügavuse info.

Georadar on aga tehnoloogia, mis suudab anda kõrge eraldusvõimega 2D- või 3D-kujutisi maapinnast ja maapinna sees paiknevatest pinnasekihtidest ja infrastruktuuridest. Wang ja Birken kirjeldavad enda töös „*Sensing solutions for assessing and monitoring roads*“ (Wang ja Birken, 2022) georadari tööpõhimõtet järgmiselt: saateantenn kiirgab elektromagnetlaineid, mis liiguvad läbi materjali

kiirusel, mille määravad peamiselt materjali elektrilised omadused. Kui laine tabab maa-alust objekti või piirkihti kahe erinevate elektriliste omadustega materjali vahel, siis osa laine energiast peegeldub pinnale tagasi, osa energiast aga liigub edasi. Pinnale tagasi peegelduv laine püütakse kinni vastuvõtuantenniga ja salvestatakse digitaalsele salvestusseadmele hilisemaks tõlgendamiseks. Antud tehnoloogia vajab eraldi väljaõpet ja tulemuste tõlgendamise oskust. Georadari andmete positsioneerimiseks kasutatakse tahhümeetermöödistust, kus tahhümeeter jälgib reaajas georadarile kinnitatud prismat ning edastab asukohaandmed seadmesse.

## **1.5. Maa-aluste tehnovõrkude teostusdokumentatsioon**

Vastavalt MTM määrusele nr 34 (2016) peab teostusmöödistamise tegija vormistama teostusjoonise või -jooniste komplekti või asjakohasel juhul teostusmöödistamise aruande. Viimasel ajal, BIM nõuete arenguga (BIM – ehitusinfo modelleerimine, ingl *building information modeling*), hakatakse üha rohkem nõudma lisaks tehnovõrkude teostusjoonistele ka tehnovõrkude teostusmudeleid.

Üldjuhul tuleb kõikide tehnovõrkude teostusjoonistel kajastada järgmisi elemente:

- Möödistatud elementide koordinaatpunktid ja nende numbrid
- Torustiku iseloomulike elementide asukohad
- Torustiku iseloomulike punktide vahekaugused piki torustikku
- Kaevude andmed (kaevu number, mõõtmed ja materjal; maapinna, kaevu kaane ja põhja absoluutkõrgused; kaevus paiknevate torude absoluutkõrgused, läbimõõdud ja materjalid, kusjuures isevoolsel torustikul näidatakse toru põhja kõrgus ning surve- ja kaitsetorustikul – kõrgus toru peale)
- Isevolse torustiku kalded, kalde suunad ja torulõigu pikkused

Vastavalt tehnovõrgu liigile kujutatakse ka muud asjakohast infot. Teostusjooniste koostamisel kasutatakse MTM määruse nr 34 lisas 1 ja 2 (2016) toodud leppemärke ja kihijaotust ning kasutatavate värvitoonide loogika vastavalt sama määruse §19 järgi on:

- Punane (nr 1, RGB-kood 255,0,0) – teostusmöödistamise objekt
- Roheline (nr 3, RGB-kood 0,255,0) – olemasolev objekt

- Sinine (nr 5, RGB-kood 0,0,255) – demonteeritud või kasutusest välja jäetud objekt
- Violetne (nr 6, RGB-kood 255,0,255) – uus põhiobjekti maandusobjekt
- Helesinine (nr 4, RGB-kood 0,255,255) – asjakohasel juhul teisele omanikule või valdajale kuuluv samaliigiline objekt
- Kihijärgne pruun (nr 32, RGB-kood 204,101,0) – katastripiirid
- Kihijärgne must (nr 7, RGB-kood 255,255,255) – muud objektid

Teostusjooniste koostamisel järgitakse ka tehnovõrgu sidusa ühendamise nõudeid, mis on kirjeldatud MTM määruses nr 34 lisas 3 (2016). Muude teostusjooniste koostamise nõuete olemasolul, näiteks projektipõhiselt esitatud erinõuete või tehnovõrgu valdaja poolt esitatud nõuete puhul, tuleb lisaks MTM määruses nr 34 esitatud nõuetele järgida ka erinõudeid. Valminud teostusdokumentatsioon esitatakse tellijale, linna või valla geoarhiivi ning olenevalt tehnovõrgu valdajast ka muudesse GIS-süsteemidesse.

## **2. MAA-ALUSTE TEHNOVÕRKUDE TEOSTUSMÕÕDISTUSE PROBLEEMI FORMULEERIMINE**

Vastavalt 2020. aastal kaitstud magistritööle „Ebatäpsetest tehnovõrguandmetest tekkinud ressursikulu analüüs ning lahendusettepanekud teedeehituse objektidel“ (Künnapuu, 2020) selgus, et keskmiselt teostatakse teedeehituses aastas üle ühe miljoni euro väärtuses lisatöid, mis on põhjustatud ebatäpsetest tehnovõrgu ruumiandmetest. Lisaks rahalisele aspektile kaasnevad ka muud negatiivsed mõjud ühiskonnale, nagu näiteks tööde lõpetamise tähtaegade pikenedamise tõttu tekitatud ebamugavused elanikkonnale, liikluspiirangute tõttu tekitatud ligipääsetavuse ja elukeskkonna halvenemine ning negatiivne majanduslik mõju ehitustööde piirkonnas paiknevatele ettevõtetele. Uuringu autori arvates tuleneb suur osa lisatööde mahust sellest, et suur osa tehnovõrke oli rajatud perioodil, mil puudus korrektne teostusdokumentatsiooni vormistamise kord ja ühtsed mõõdistusnõuded. Sellegi poolest on autor ka arvamusel, et tänapäeva teostusjoonised pigem on vastavuses projektiga kui reaalse olukorraga ning esitatud teostusjoonistele ei teostata piisavat kontrolli.

Kogemuste põhjal võib öelda, et tänapäeva ehitussektori töömudel on rajatud võimalikult suurele raha kokkuhoiule ning tihtipeale võib juhtuda, et selle nimel kannatab tööde kvaliteet, vähemalt ehitusgeodeesia poole pealt. Korduvalt on tulnud ette olukordi, kus juba objekti hanke etapis pakutakse ehitusgeodeetiliste tööde hinda, süvenemata reaalsesse tulevaste tööde mahtu. Tihtipeale määratakse geodeetiliste tööde hind objekti kohta isegi ilma eelneva geodeedi konsultatsioonita. Seetõttu võib üsna tihti näha olukorda, kus geodeetiliste tööde hind on alapakutud ning ehitajal ei pruugi jääda üle muud võimalust, kui vähendada geodeetiliste tööde osakaalu objektile või veidi kallimate, kuid täpsemate mõõdistusmeetodite asemel kasutatakse odavamaid ja kehvema kvaliteediga andmeid tootvaid meetodeid.

Veel üheks määravaks faktoriks ehitusobjektile on teostatavate tööde graafikus püsimine. Vastavalt Eesti Statistikaameti (s.a.) andmetele oli 2023. aastal ehitusloa saanud eluruumide arv üle 5600. Lisaks eluruumide ehitusele lisanduvad veel teedeehituse ja muude rajatiste ehitusobjektid. Kutsekoja andmetel (seisuga 15.09.2024) on Eestis kutsetunnistust omavate geodeetide arv 382. Seoses suure objektide ülekaaluga ei pruugi geodeet alati jõuda ehitusobjektile mõõdistama tellijale sobilikul ajal. Rääkides tehnovõrkude ehitusega seotud probleemidest, osutub kõige suuremaks probleemiks lõppkokkuvõttes asjaolu, et geodeedi saabumisajaks objektile



on värskelt paigaldatud tehnovõrguga kaevik juba suletud. Sellisel juhul jääb geodeedile neli valikuvõimalust:

- Teostada tehnovõrkude teostusmõõdistust kasutades näiteks elektromagnetlokaatorit ning teostada kaevude uuringut. Antud mõõdistusmeetod aga sobib ainult osade juhtude puhul. Kui näiteks paigaldatud plasttorudel puudub tuvastustraata, siis on antud mõõdistusmeetod välistatud.
- Nõuda ehitajalt kaeviku taasavamist. Enamjaolt aga ehitaja ei ole nõus seda tegema.
- Teostada tehnovõrkude teostusmõõdistus vastavalt ehitaja ütlustele, kasutades sealhulgas paigaldusajal tehtud fotosid. Sellisel juhul on enamjaolt lõpptulemuseks Künnapuu (2020) poolt kirjeldatud probleem, kus teostusjoonis vastab pigem projektile kui reaalsusele.
- Keelduda kinnise kaevikuga tehnovõrkude teostusmõõdistamisest. Sellisel juhul leiab ehitaja teise geodeedi, kes on nõus teostama mõõdistust eelmises punktis kirjeldatud viisil.

Antud olukorras ei jää tihtipeale geodeedil muud võimalust, kui nõustuda vähem kvaliteetse teostusdokumentatsiooni loomisega. Selleks, et parandada antud olukorda, peab looma meetodika, mis võimaldaks paigaldatud tehnovõrgu elementide usaldusväärset mõõdistust sel staadiumil, kui kaevik on veel avatud, kuid samas peab meetod olema piisavalt lihtne, et seda saaks sooritada olukorras, kus geodeet ei pruugi ise objektile jõuda. Antud magistritöö eesmärgiks on uurida madala hinnaklassi LiDAR seadme (kuna see on kergesti/lihtsasti käsitletav ehitajale) võimekuse sobivust eelkirjeldatud probleemi lahendamiseks.

## 3. EKSPERIMENTAALMETOODIKA SEADMETE OLEMUS

### 3.1. LiDAR seadmete olemus

LiDAR (ingl *light detection and ranging*) on üks kaugseire meetoditest, millega on võimalik koguda 3D andmeid maapinna, hoonestuse, taimestiku ja muude looduslike ja tehnilike objektide kohta. Organisatsioon NEON (The National Ecological Observatory Network, 2024) tegeleb taimestiku ning metsanduse kaardistamisega kasutades just LiDAR seadmeid ning kirjeldab antud meetoodikat järgmiselt: LiDAR on aktiivne kaugseiresüsteem, kus toodetavaks energiaks on valgus, mille abiga on võimalik mõõta maapinnal olevaid objekte. LiDAR süsteemis kiirgab valgust impulssidena laser ning valgusenergia, jõudes maapinnal asuva objektini, peegeldub sealt tagasi LiDAR andurisse, kuhu see ka salvestatakse. Kaugseire süsteem mõõdab kahesuunalist reisiaega (ingl *two-way travel time*), mis kulub kiiratava valguse maapinnale ja tagasi liikumiseks. Seejärel kasutatakse seda aega läbitud vahemaa arvutamiseks.

Vastavalt Murtyioso jt (2021) artiklile on Apple arendatud ning iPad ja iPhone seadmetesse integreeritud LiDAR sensorite tehnilised andmed salastatud, kuid suure tõenäosusega on tegemist n-ö tahkis-LiDAR'iga (ingl *solid-LiDAR*) (Wang jt, 2020), mis tähendab, et sensor väldib motoriseeritud optomehaanilist laserskanneerimise seadistust, mida tavaliselt võib kohata geomaatika rakendustes (Granshaw, 2020). Apple LiDAR võib põhineda üksikfootoni laviinidiodil (ingl *single-photon avalanche diode*), mis on ühendatud laserkiirgusallikaga (Niclass jt, 2029; Tontini jt, 2020). Termin üksikfootoni laviinidiod tähistab fotodetektorite klassi, mis suudab tuvastada madala intensiivsusega signaale (kuni üksiku footonini) ja mõõta footoni saabumise aega suure ajalahutusega (mõnekümne pikosekundi täpsusega) (Meetoptics, 2024).

Apple (edaspidi kirjeldatud üldisemalt ka kui madala hinnaklassi) LiDAR sensori tööprintsip põhineb eelkirjeldatud meetoodikal. Kasutades erinevaid kolmandate osapoolte arendatud tarkvarasid võib andmekorje toimuda kahel erineval viisil, mida kirjeldab põgusalt ka Luetzenburg jt (2021). Ühe meetoodika puhul eksporditakse kogutud andmed töötlemata kujul, kuid tarkvaradel, mis seda võimaldavad on piirangud seoses punktide arvuga ning seetõttu on võimalik kasutada antud meetoodikat ainult väga väikeste alade või objektide mõõdistamisel. Teise meetodina, kasutades LiDAR sensorit andmekorje ajal liikudes, koostatakse reaajas võrk, kus sisseehitatud kolmeteljeline güroskoop toimib inertsiaal mõõteseadmena. Apple patenteeritud tarkvaraplatvorm ARKit trianguleerib võrku sisemiselt, kasutades LiDAR seadmega mõõdetud töötlemata andmete punkte. Järgnevalt punkt pilve eksportimisel kolmanda

tarkvaraga projitseeritakse uued punktid koostatud võrgule ning punktipilv eksporditakse juba töödeldud kujul. Võrgupõhiste andmekorje rakenduste kasutamine võimaldab skanneerida palju suuremaid alasid. Sellist lähenemist on rakendatud ka antud töös.

### 3.2. GNSS seadmete olemus

Euroopa Kosmose Agentuuri Navipedia (ESA Navipedia, s.a.) definitsiooni järgi on GNSS (ingl *global navigation satellite system*) standardne üldmõiste satelliitnavigatsioonisüsteemidele, mis pakuvad autonoomset globaalse kattuvusega georuumilist positsioneerimist. Enim esiletõstetud süsteemid on GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS ja IRNSS. Tabel 4 kirjeldab neid põhilisi süsteeme. Tabelis on välja toodud satelliitsüsteemide operaatorid, ala katvus, satelliitide kõrgus merepinnast ning satelliitide arv orbiidil.

**Tabel 4.** Satelliitnavigatsioonisüsteemide võrdlus. Väljavõte kodulehelt Hexagon (s.a.).

	Operaator	Katvus	Kõrgus merepinnast [km]	Satelliitide arv orbiidil
<b>GNSS</b> Ameerika Ühendriigid	Ameerika Ühendriikide kosmosevägi	Globaalne	20180	31
<b>GLONASS</b> Venemaa	Venemaa riiklik kosmoseagentuur	Globaalne	19130	24
<b>Galileo</b> Euroopa Liit	Euroopa satelliitnavigatsiooni agentuur & Euroopa kosmoseagentuur	Globaalne	23222	26
<b>BeiDou</b> Hiina	Hiina riiklik kosmoseagentuur	Globaalne	21528 & 35786	48
<b>QZSS</b> Jaapan	Jaapani aerokosmoseuuringute agentuur	Regionaalne	32000 & 40000	4
<b>IRNSS/Navic</b> India	India kosmoseuuringute organisatsioon	Regionaalne	36000	8

Selleks, et satelliidi signaali oleks võimalik kasutada asukohamääranguks, kasutatakse GNSS-vastuvõtjaid, mis töötlevad satelliitide poolt edastatavaid kosmosesignaale ja toimivad kasutajaliidesena igale globaalsele satelliitnavigatsioonisüsteemile. Kuigi üldise GNSS-vastuvõtja pakutavat teavet saab kasutada paljudes rakendustes, tugineb enamik neist vastuvõtja navigeerimislahendusele – st vastuvõtja arvatud asukohale, kiirusele ja ajale.

ESA Navipedia (s.a.) kirjeldab asukohamääramist satelliitide ja vastuvõtja abil järgmiselt: kuna satelliidid on pidevas liikumises, peab vastuvõtja pidevalt hankima ja jälgima vaateväljas olevate satelliitide signaale, et arvutada katkestuseta lahendus, nagu enamikus rakendustes nõutakse. Iga GNSS-vastuvõtja pakutav navigeerimislahendus põhineb selle kauguse arvutamisel satelliitide komplektini, eraldades saabuvate signaalide levimisaja, mis liiguvad kosmoses valguse kiirusel vastavalt satelliidi ja vastuvõtja kohalikele kelladele. See ajaline erinevus muudetakse „valekauguseks“ ehk pseudokauguseks, korrutades selle vaakumi valguse kiirusel. Pseudokaugust võib pidada väga jämedaks hinnanguks tõelise kauguse kohta satelliidi ja kasutaja vahel, ning seda tuleb korrigeerida arvestades mitmeid nähtusi, enne kui seda saab tõlgendada kui täpset mõõtmist tõelise vahemaa kohta.

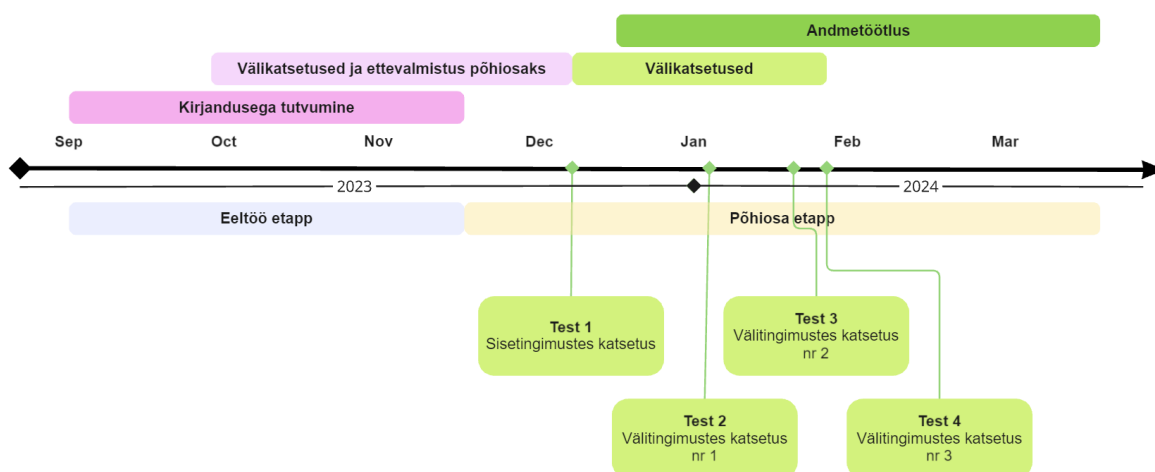
Asukohamäärangu täpsuse parandamiseks on võimalik kasutada ühendust baasjaamaga. Selle meetodi nimetuseks on RTK-GNSS. Baasjaama kasutatakse GNSS signaali ebatäpsuste parandamiseks võrreldes vastuvõtjasse jõudnud satelliitsignaali baasjaama jõudnud signaaliga. Nende erinevus kompenseeritakse kasutades parandeid, mis arvutatakse lokaalses püsijaamas. Samuti, kui püsijaam asub mõõdistusobjektile piisavalt lähedal, siis saab GNSS-vastuvõtjat ühendada otse püsijaamaga, jättes baasjaama etapi vahele.

## 4. MAGISTRITÖÖS KASUTATUD MEETODID JA SEADMED

### 4.1. Katsetuste olemus

Maa-aluste tehnovõrkude teostusmöödistamise metoodika arendus jagunes kahte suuremasse etappi, mida võiks nimetada eeltöö etapiks ning põhiosa etapiks. Eeltöö etapis tutvuti olemasoleva kirjandusega madala hinnaklassi LiDAR seadmete ja võimalike möödistustarkvarade kohta. Esimesse etappi kaasati ka objektidel välimöödistuste katsetused, kuid neid teostati ainult ühe möödistustarkvara näitel, et tutvuda üldiste võimalustega, võimalike ohtude ja vigade allikatega. Testitud tarkvaraks kujunes vGIS Scan, mida katsetati kolmel erineval ehitusobjektil uurides kõiki võimalikke parameetreid, skanneerimise mustreid ning kasutusmugavust reaalsetes ehitusobjektide oludes. Läbitöötatud kirjandusest kujunes põhiliseks näidistööks G. Vacca artikkel „3D Survey with Apple LiDAR Sensor – Test and Assessment for Architectural and Cultural Heritage“ (Vacca, 2023), kust saadi inspiratsiooni ka antud töös katsetatud tarkvarade osas.

Eeltöö etapist kujunes välja metoodika põhiosa etapp, mis oli palju struktureeritum, ning see omakorda jagunes kaheks osaks: katsetused sisetingimustes kindlates, ühesugustes oludes ning katsetused välitingimustes reaalsetel ehitusobjektidel. Eeltöö etapis valiti välja 4 tarkvara, mida sooviti katsetada nii sise- kui ka välitingimustes: Scaniverse, vGIS Scan, 3D Scanner App ja SiteScape. Põhiosa koosnes kokku neljast katsest, millest üks oli sisetingimustes läbiviidud ning ülejäänud kolm olid läbiviidud ehitusobjektidel. Kogu protsessi ajajoon on nähtav Joonisel 2.

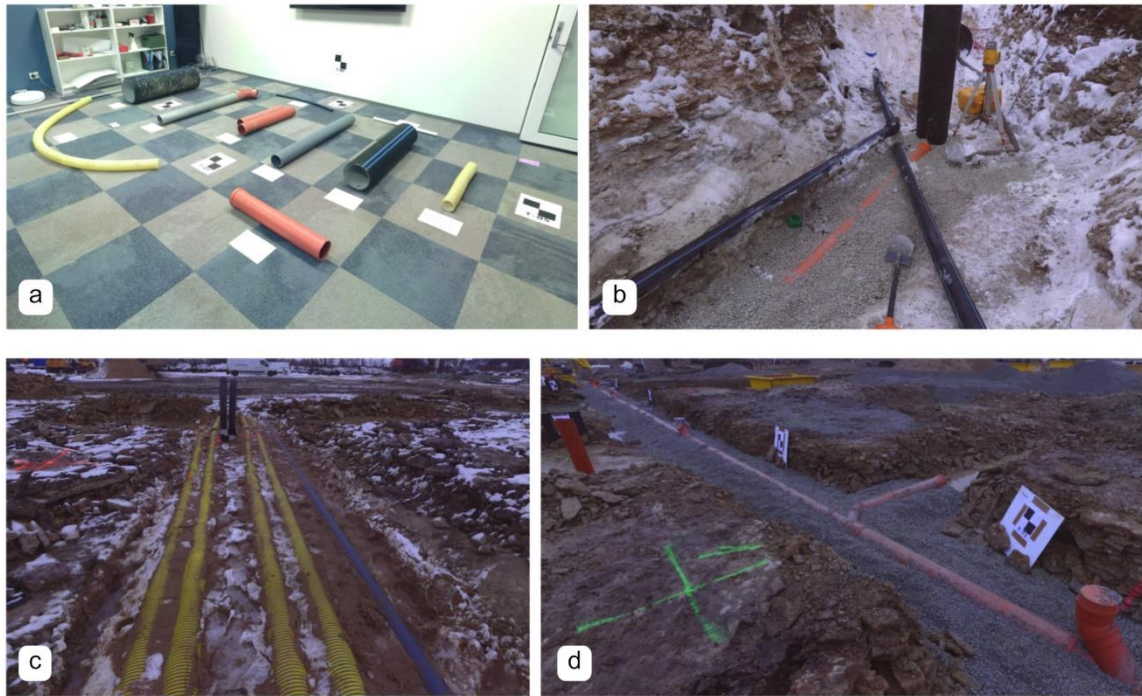


**Joonis 2.** Magistritöö praktilise osa kulgemise ajajoon.

Kuna eeltöö katsetused olulist sisulist väärtust magistritööle ei lisa, siis neid antud töös väga põhjalikult ei kirjeldata. Eeltöö etapis teostatud mõõdistused andsid töö autorile parema arusaama madala hinnaklassi LiDAR sensori olemusest ning sellega praktilisest tööst. Üheks järelduseks oli näiteks see, et kõik tulevased katsetused tuli planeerida päevase aja peale, kuna üks eeltöö katsetustest oli teostatud väljaspool tavalist tööaega, peale kella 17:00, kui valgustingimused olid üsna kehvad. Mõõdistuse läbiviimise ajal oli kohal ehitajate brigaad ning ehitusmasinatest ekskavaator, mis mingil määral valgustas lahtist kaevikut, kuid antud valgust ei olnud piisavalt, et teostada tööd mugavalt ning ohutult. Eeltöö etapi katsetuste käigus selgus ka esialgne ajaraamistik, kui kaua aega võiks üks või teine mõõdistus kesta, et kooskõlastada võimalikud mõõdistusajad ehitajatega.

Peale eeltöö etapi katsetusi töötati välja järgmine plaan põhiosa katsetusteks: esmalt tuleb uurida madala hinnaklassi LiDAR sensori võimekust sisetimingustes, stabiilsetes oludes, katsetades erinevaid mõõdistusmetoodikaid erinevat tüüpi torustike peal. Antud katsetus annaks aimdust parima liikumismustri osas välikatsetuste jaoks ning annaks üldise arusaama erinevate tarkvarade mõõdistustäpsusest erinevat tüüpi torustike mõõdistamisel. Saadud infot peaks edaspidi rakendama välikatsetuste mõõdistuste ajal, et järgmiseks saada tulemused ka ehitusobjekti oludes, kus piiratud ajast, ilmastikust, koordinaadistikuga sidumisest ja muudest ettearvatutest asjaoludest tingituna võib kannatada ka mõõdistustäpsus.

Sisetimingustes läbiviidud katsetuse (edaspidi Test 1) eesmärk oli mõõdistada erineva läbimõõdu, materjali ning otstarbega torustikke (vt Joonis 3a). Läbimõõdud varieerusid vahemikus De 32 mm ... De 315 mm ning kokku oli katsetatud 10 erinevat torustiku konfiguratsiooni. Torud asetati põrandale umbes 0,5 m vahega üksteisest, et LiDAR meetodil mõõdistatud punktipilv kujutaks igat toru eraldi elemendina ning erinevate torude mõõdistuspunktid ei seguneks omavahel ühte massi. Erandina oli üks torustiku konfiguratsioon, kus kaks ühesugust toru paigaldati täpselt üksteise kõrvale, et hinnata mõõdistusandmete segunemist ja torude eristamisvõimet. Mõõdistusala suurus oli umbes 20 m<sup>2</sup>. Kuna kõik torud olid laenatud ehitusobjektidelt, kus välitingimused olid sademerohked ning õhutemperatuur miinus kraadides, siis esmalt jäeti torud sisetimingustesse aklimatiseeruma umbes üheks ööpäevaks. Test 1 käigus oli õhutemperatuur muutumatu umbes +20...+22°C ulatuses ning katsetuse kestvus oli kokku umbes 8 tundi.



**Joonis 3.** Fotod sisetingimuste katsetusest (a) ning välitingimuste katsetustest (b, c, d) (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Järgmised kolm välikatsetust (edaspidi Test 2, 3 ja 4) viidi läbi kahel erineval ehitusobjektil. Mõõdistused toimusid tööpäeva ajal väga piiratud ajaraamistikuga, kuna mõõdistuste tõttu peatati tehnovõrkude paigaldustööd. Selliselt olid olud väga lähedased reaalsetele teostusmõõdistuste oludele, kus ehitaja peab ootama mõõdistuse teostamise järgi enne kaeviku sulgemist. Test 2 leidis aset Harju maakonnas, Tallinnas, Lasnamäe linnaosas, aadressil Suur-Paala 5 (vt Joonis 4). Antud ehitusobjekti raames toimus maa-aluste tehnovõrkude paigaldustöö ning magistritöö raames mõõdistati värskelt paigaldatud vee ja reoveekanaliseerimise torustiku lõiku (vt Joonis 3b). Mõõdistatud kaevik oli umbes 2-3 m sügav ja ca 2 m lai. Mõõdistusala suuruseks oli umbes 50 m<sup>2</sup> ning õhutemperatuur umbes -7...-5°C, ilma sademeteta.





**Joonis 4.** Test 2 asukoha skeem Maa-ametist seisuga 14.03.2024.

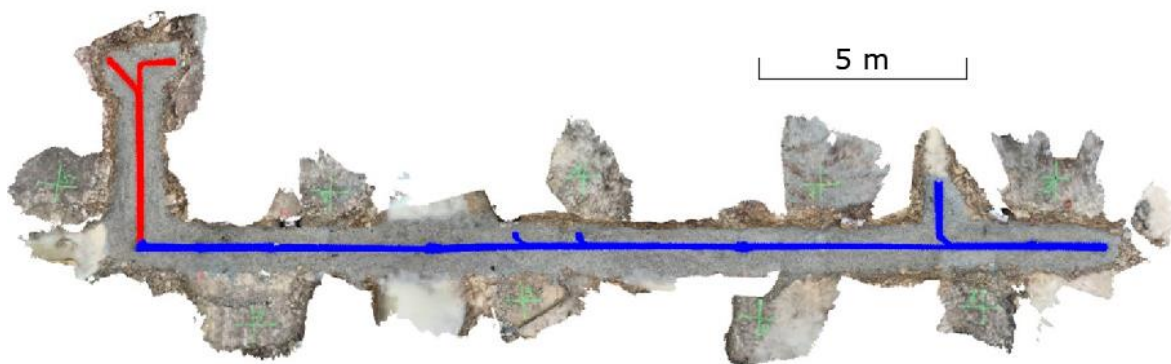
Testide 3 ja 4 asukohaks oli Harju maakond, Tallinn, Lasnamäe linnaosa, Tooma tn 2 (vt Joonis 5), kus toimus tarbesõidukite müügi- ja teeninduskeskuse ehitus, mille üheks etapiks oli ka maa-aluste tehnovõrkude ehitus. Test 3 käigus mõõdistati elektri ja sidekaablikanaliseerimised (vt Joonis 3c) ning test 4 käigus oli mõõdistusobjektiks hoonealune reoveekanaliseerimine (vt Joonis 3d). Mõlemal juhul oli kaevik ca 30-40 cm sügav, maa-alused tehnovõrgud paigaldati paepinnase sisse. Test 3 mõõdistusala suuruseks oli ca 100 m<sup>2</sup> ja test 4 ca 70 m<sup>2</sup>. Ilmastiku tingimused olid mõlemal korral sarnased, õhutemperatuur nulli lähedane ning sademeteta olud.



**Joonis 5.** Testide 3 ja 4 asukoha skeem Maa-ametist seisuga 02.03.2024.



Testide 2 ja 3 torustike m oddistused olid teostatud vahetult peale torustike paigaldamist. Test 4 m oddistuse käigus oli osa torustikust paigaldatud m oddistuse alguses, ehitusobjektist tingitud põhjustel, seega ka edaspidi kirjeldatud tulemused värskelt paigaldatud lõigu kohta näitavad madalamat täpsust. M oddistuse ajal paigaldatud kanalisatsioonitoru osa on kujutatud Joonis 6 punaselt.



**Joonis 6.** Test 4 käigus m oddistatud kaevik. Siniselt on kujutatud torustiku osa, mis oli paigaldatud m oddistusele eelneval ajal; punane osa oli paigaldatud m oddistuse alguses. Joonisel kujutatud punktipilv on m oddetud Scaniverse tarkvaraga (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

## 4.2. Katsetatud seadmed ja tarkvarad

Antud t oo raames uuriti madala-hinnaklassi LiDAR sensori võimekust, mis on sisse ehitatud kolmanda generatsiooni Apple iPad Pro seadmesse (Apple, 2024). M oddistustes katsetatud seade on iOS 16.3.1 tarkvara versiooniga ja 11-tollise laia ekraaniga. Seadme kaal on 468 g, sisemälu maht on 512 GB ning sellel on 8-tuumaga protsessor ning 8 GB muutmälu. Seade on varustatud 12 MP lainurkse ning 10 MP  ullilainurkse v arvikaamerate süsteemiga ning LiDAR sensoriga. LiDAR sensori t oop ohim otet on kirjeldatud jaotises 3.1 ning see on võimeline m oddistama kuni 5 m kaugusele j aavaid objekte nii sise- kui ka välistingimustes. Põhjalik LiDAR sensori tehniline kirjeldus on antud Luetzenburg jt (2021) ja Teppati Los e jt (2022) poolt.

Apple seadmetesse integreeritud LiDAR sensori kasutamine eeldab ka kolmanda osapoole arendatud tarkvara kasutamist. Antud t oo raames katsetati nelja erinevat tarkvara, milledeks olid Scaniverse (Scaniverse, 2023), vGIS Scan (vGIS, 2024), 3D Scanner App (3D Scanner App, 2024) ja SiteScape (SiteScape, 2024). Kõigi eelnimetatud tarkvarade puhul kasutati tasuta versioone, kuid SiteScape tasuta versioon võimaldab vaid kuni 50 m<sup>2</sup> suuruse ala skanneerimist. Kuna eesmärgiks oli teostada kõik LiDAR m oddistused iga tarkvaraga ühe skanneeringuna, mitte jagada m oddistust osadeks, siis SiteScape tarkvara tasuta versioon ei leidnud kasutust

välitingimustes katsetustel. Sellegi poolest kasutati SiteScape'i sisetingimustes katsetusel. Ka vGIS Scan ning 3D Scanner App puhul on võimalik lunastada tasuline tarkvara versioon, kuid antud töö raames piisas tasuta versioonide võimekusest.

**Tabel 5.** Kasutatud skaneerimise tarkvarade põhifunktsioonid (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Tarkvara	Litsents	Punktipilve eksportimise võimalus	Kolmnurk-mudeli eksportimise võimalus	Eksporditavate failide formaadid	Kasutatud versioon
Scaniverse	Tasuta	Jah	Jah	*.ply, *.las, ja teised	2.1.9
vGIS Scan	Tasuta või tasuline	Jah	Jah	*.ply, *.e57, ja teised	0.6 (1)
3D Scanner App	Tasuta või tasuline	Jah	Jah	*.ply, *.las, ja teised	2.1.3 (1)
SiteScape	Tasuta või tasuline	Jah	Jah	*.ply, *.e57, ja teised	1.7.14(160)R

Scaniverse tarkvara võimaldab kasutajal esmalt valida mõõdistatava ala suuruse, kas tegemist on väikse, keskmise või suure alaga. Üldiselt on väikse ala all mõeldud väiksemaid kaasaskantavaid objekte ja esemeid, keskmine ala suurus on mõeldud suuremate esemete ja objektide, näiteks mööbliesemete või sõidukite, mõõdistamiseks. Suur ala hõlmab enda all tervete ruumide või ka välitingimustes suuremate alade mõõdistust. Antud valik seadistab LiDAR sensori esialgse skanneeringu ulatuse, kuid see on muudetav ka mõõdistuse käigus. Peale skaneerimise lõpetamist tuleb valida kolme protsessimise režiimi vahel: kiir-režiim (ingl *speed mode*), mis pakub väga kiiret kuid samas ka kõige halvema resolutsiooniga protsessimist; koht-režiim (ingl *area mode*), mille puhul on lõpptulemuse kvaliteet parim, kuid protsessimise kiirus kannatab selle nimel; ning detailne-režiim (ingl *detail mode*), mis on suunatud detailsele tekstuuri loomisele mõõdistatud objektidele. Antud töö raames oli ala suuruseks valitud alati „suur“ ning skanneeringu ulatuseks oli alati 5,0 m. Protsessimine oli teostatud koht-režiimis.

Erinevalt Scaniverse tarkvarast ei võimalda vGIS Scan valida parameetreid enne skanneeringu alustamist või skanneeringu vältel. Peale mõõdistuse lõpetamist on võimalik valida nelja erineva protsessimise kvaliteedi režiimi vahel: HD, keskmine, kiire ja kohandatud. HD režiim on kõige aeglasem, kuid samas pakub kõige parema kvaliteediga lõpptulemust, samas kui kiire režiim on vastupidine – kiire protsessimine, kuid halvema kvaliteediga lõpptulemus. Keskmine režiim jääb kahe eelnimetatud režiimi vahepeale. Kõik kolm režiimi on eelseadistatud parameetritega nagu voksli suurus (ingl *voxel size*), silumine (ingl *smoothing*), lihtsustamine (ingl *simplification*) ja maksimaalne

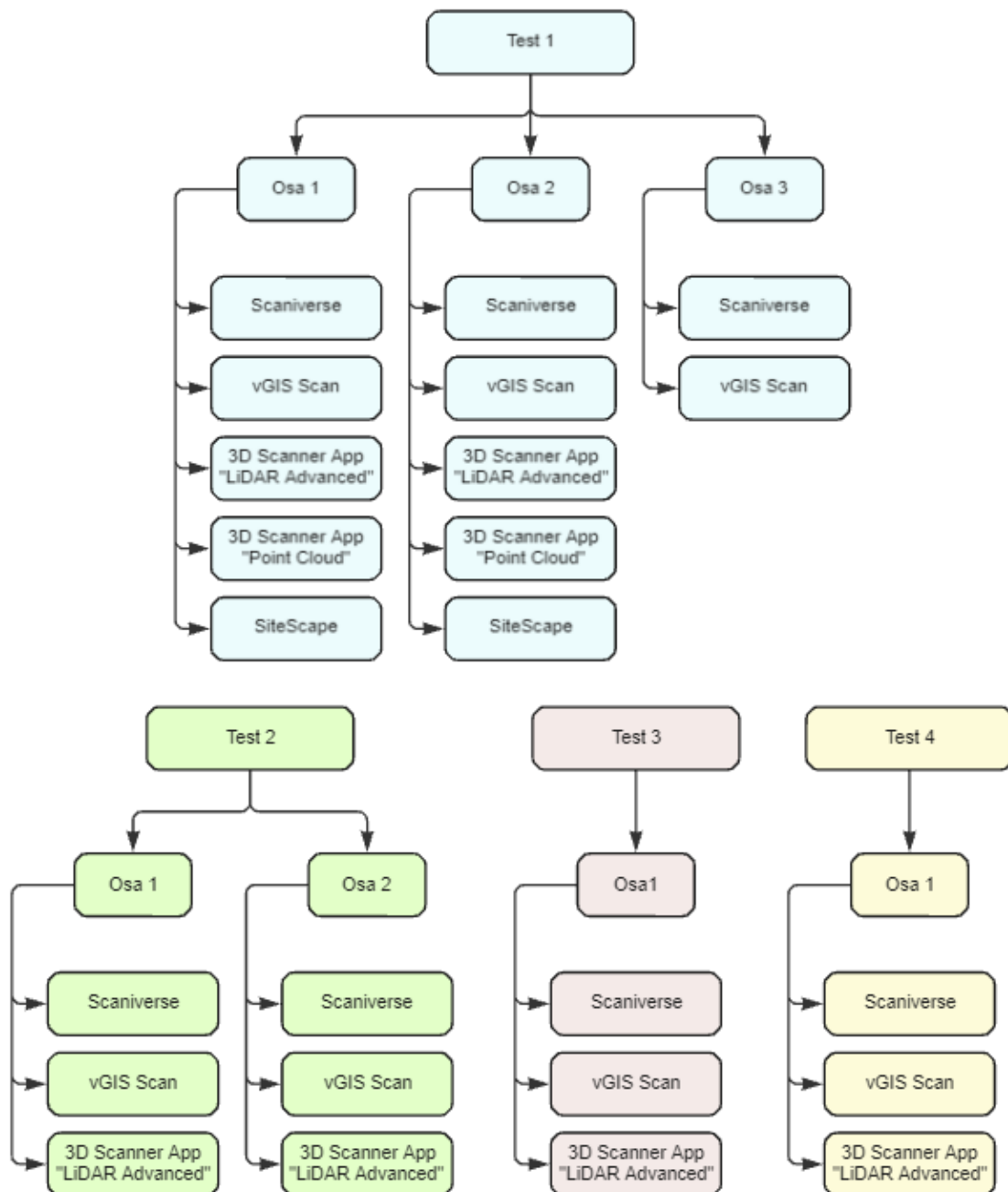
skanneeringu ulatus (ingl *maximum survey range*). Edasijõudnud kasutaja võib valida protsessimise režiimiks „kohandatud“ ning sellisel juhul on tal võimalus määrata ka kõik eelnimetatud parameetrid iseseisvalt. Vokslid määrab kui väikseid detaile skanneerimise tulemus võib sisaldada, silumine võimaldab müra välja filtreerida ning lihtsustamine määrab kui üldistatud saab töödeldud geomeetria olema. Skanneeringu protsessimist on võimalik korrata ka hiljem kasutades erinevaid parameetreid ja režiime. Antud töö raames oli režiimiks valitud „kohandatud“ ning parameetriteks valitud: vokslid 10 mm (maksimaalne võimalik 20 mm), silumine 4x (maksimaalne võimalik 8x), lihtsustamine 50% (maksimaalne võimalik 95%) ning skanneeringu ulatus protsessimisel oli maksimaalne võimalik 5,0 m.

3D Scanner App on aluseks vGIS Scan tarkvarale ning seetõttu on ka visuaal ja parameetrid sarnased eelkirjeldatule. Erinevuseks on see, et kasutajal on võimalus valida erinevate skanneerimise režiimide vahel enne skanneeringu sooritamist; antud töö raames olid katsetatud „LiDAR Advanced“ ja „Point Cloud“ valikud. „LiDAR Advanced“ võimaldab seadistada enne mõõdistuse alustamist resolutsiooni vahemikus 3 ... 50 mm; madala, keskmise või kõrge usaldusväärsuse taset (ingl *confidence*), mis määrab, millise kvaliteediga andmed säilitatakse; maskeerimist (ingl *masking*), mis võimaldab näiteks skaneerida ainult inimest või kindlat objekti tervelt mõõdistusalalt; ning skanneeringu maksimaalset ulatust (kuni 5,0 m). Peale mõõdistuse lõpetamist on protsessimise parameetrid sarnased vGIS Scan tarkvarale, ainukeseks erinevuseks on vokslid suuruse parameetri puudumine. „Point Cloud“ režiim aga ei võimalda ühegi parameetri seadistamist kasutaja poolt ei skanneeringu alguses, selle käigus ega protsessimise ajal. Antud töö raames oli „LiDAR Advanced“ võimaluse resolutsiooniks seadistatud 25 mm, usaldusväärsuse tase oli keskmine, maskeerimist ei olnud määratud ning maksimaalne skanneeringu ulatus oli 5,0 m. Protsessimise parameetrid olid samad, mis vGIS Scan tarkvara puhul.

SiteScape tarkvara võimaldab valida enne mõõdistuse algust ainult mõõdetava punktipilve tihedust ja kuvatavate punktide suurust (viimane on ainult visuaalne valik; punktipilv sellest ei muutu). Erinevalt teistest tarkvaradest puuduvad SiteScape tarkvaral protsessimise sätted. Antud töö raames oli punktipilve tihedus suurim. Oluline on siinkohal mainida, et SiteScape'i jõudluspiirangute tõttu on maksimaalne punktide arv piiratud 12 miljoni punktiga skaneeringu kohta.

### 4.3. Madala hinnaklassi LiDAR sensori mõõdistuse metoodika ja andmekorje

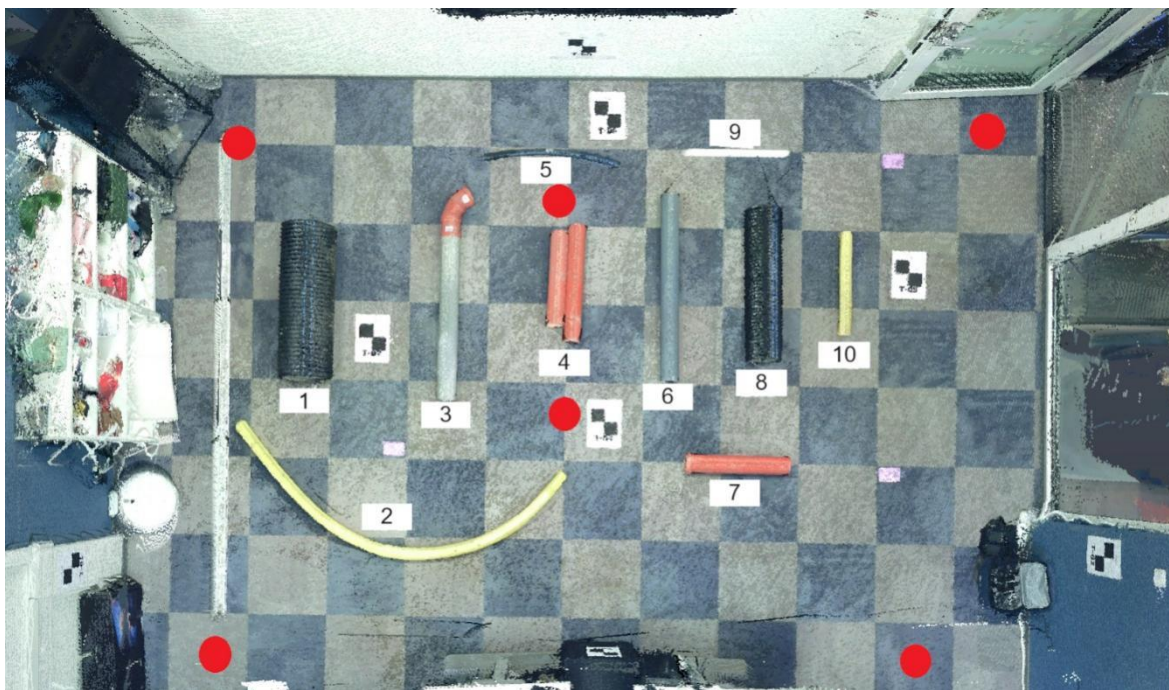
Järgnevas jaotises on kirjeldatud madala hinnaklassi LiDAR seadme mõõdistuse metoodikat nii sise- kui ka välistingimustes teostatud katsetuste kohta. Ülevaadet katsetustes testitud tarkvaradest on näidatud Joonis 7.



**Joonis 7.** Ülevaade testitud mõõdistustarkvaradest kõikide läbiviidud katsetuste vältel (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

### 4.3.1. Sisetingimustes läbiviidud katsetused

Test 1 tarvis loodi kohalik koordinaatide süsteem, mis kindlustati 8 must-valge skanneerimise tähisega. Tähised olid paigaldatud kasutades läbipaistvat teipi: 4 tähist paigaldati seintele ja ülejäänud 4 põrandale (vt Joonis 8).



**Joonis 8.** Test 1 mõõdistuse olukord. Numbrid tähistavad erinevate torustike konfiguratsiooni. Joonisel näidatud punktipilv oli mõõdistatud staatilise laserskanneriga, mille jaamade asukohad on kujutatud punaste punktidenä (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

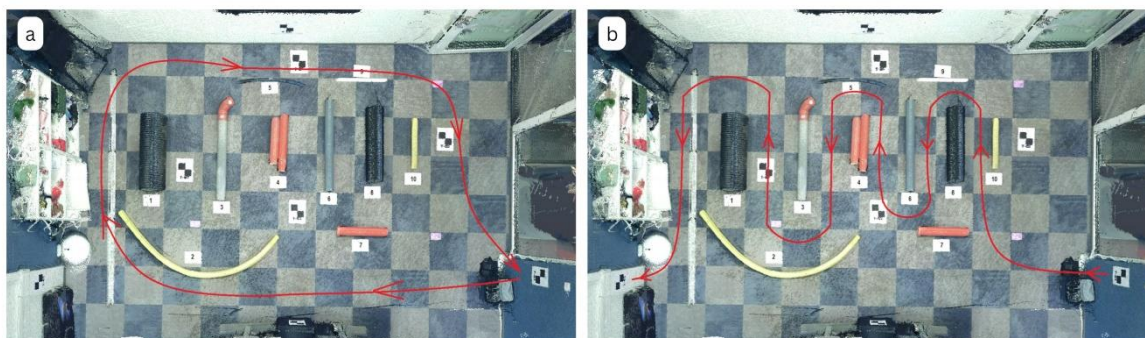
Mõõdistuses katsetatud torude ja nende elementide spetsifikatsioonid on järgnevad:

1. PP sademeveetoru RAINEO Ø315x276 SN8 must PIPELIFE
2. PE topeltseinaline kaablikaitsetoru Ø75x61 ringjäikus 750N kollane PIPELIFE
3. PP-HT Muhvtoru Ø110x107,3 S14 hall PIPELIFE + PVC NAL kaksikmuhv Ø110 + 2 x Väliskanalisatsiooni PVC põlv Ø110/15°
4. 2 x PVC-U COEX muhvtoru SN8 Ø110x106,8 PIPELIFE
5. PE100 veetoru PN16 SDR11 Ø32x29 PIPELIFE
6. PP-HT Muhvtoru Ø110x107,3 S14 hall PIPELIFE
7. PVC-U COEX muhvtoru SN8 Ø110x106,8 PIPELIFE
8. PP RAINEO sademevee- ja truubitoru SN8 Ø200x174 PIPELIFE
9. PP-HT muhvtoru Ø32x30,2 S14 valge PIPELIFE
10. PE topeltseinaline kaablikaitsetoru Ø75x61 ringjäikus 750N kollane PIPELIFE

Tähiste koordineerimiseks kasutati robot-tahhümeetrit GT-1001 (Topcon, 2016). Kõik kindelpunktid mõõdistati kahe täisvõttega. Seintel olevad tähised mõõdistati

laserkaugusmõõduri funktsiooniga; põrandal olevad tähised mõõdistati miniprismaga, mis on mõeldud kõrgtäpsete ehitusgeodeetiliste mõõdistuste tarbeks. Sama 8 tähist kasutati ka LiDAR mõõdistuste koordineerimiseks kasutades vabavaralise tarkvara CloudCompare (versioon 2.13) funktsiooni *Align* (st kuueparameetrilist vähimruutude jäika transformeerimist).

Test 1 viidi läbi kolmes osas, kus katsetati erinevaid liikumise trajektoore ning kiirust. Osa 1 liikumise trajektoor on kujutatud Joonis 9a. Liikumise kiirus oli keskmisest kiirem ning iPad'i asetus oli ligikaudselt 1,2 m põranda kohal. LiDAR sensor oli peaaegu alati suunatud mõõdistatava ala keskpunkti, välja arvatud tähiste juures. Kui liikudes ümber mõõdistusala jõuti tähiste juurde, siis suunati sensor mõneks hetkeks mõõdistusala eemale tähise suunas, et parandada punktipilve kvaliteeti kindelpunktide osas. Seejärel suunati sensor uuesti mõõdistusala suunas ning liikumine jätkus mööda kirjeldatud trajektoori. Vastavalt Teo ja Yang (2023) uuringule jääb optimaalne kaugus tähise ja iPad LiDAR sensori vahel vahemikku 1,0 ... 1,5 m. Eelnimetatud teadmist rakendati ka antud uuringus, nii sisetingimustes kui ka välistingimustes teostatud katsetuste vältel. Osa 1 katsetustel testiti kõiki eelnevalt kirjeldatud tarkvarasid (vt Joonis 7). Iga LiDAR mõõdistus kestis ligikaudselt 1 minut, kusjuures mõõdistusaeg sisaldas ka tarkvarade sisest andmekorjet piltide näol punktipilve värvimise jaoks.



**Joonis 9.** Test 1 kasutatud liikumise trajektoori osa 1 (a) ning osade 2 ja 3 (b) vältel. Joonisel kujutatud punktipilv oli mõõdistatud kasutades staatilist laserskanneerimist (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Osa 2 järgis trajektoori, mis on kujutatud Joonis 9b. Liikumise kiirus oli veidi aeglasem kui osa 1 vältel. iPad asetseb jällegi kõikide mõõdistuste vältel umbes 1,2 m kõrgusel põranda pinnast, kuid nüüd oli sensor suunatud liikumistrajektooriga sujuvalt paremale ja vasakule. Sarnaselt osa 1 mõõdistustele oli tähiste läheduses jällegi sensor suunatud lühikeseks ajaks mõõdistusala eemale, tähise poole, ning seejärel suunati sensor sujuvalt tagasi mõõdistusala peale ning jätkati mööda trajektoori liikumist. Osa 2



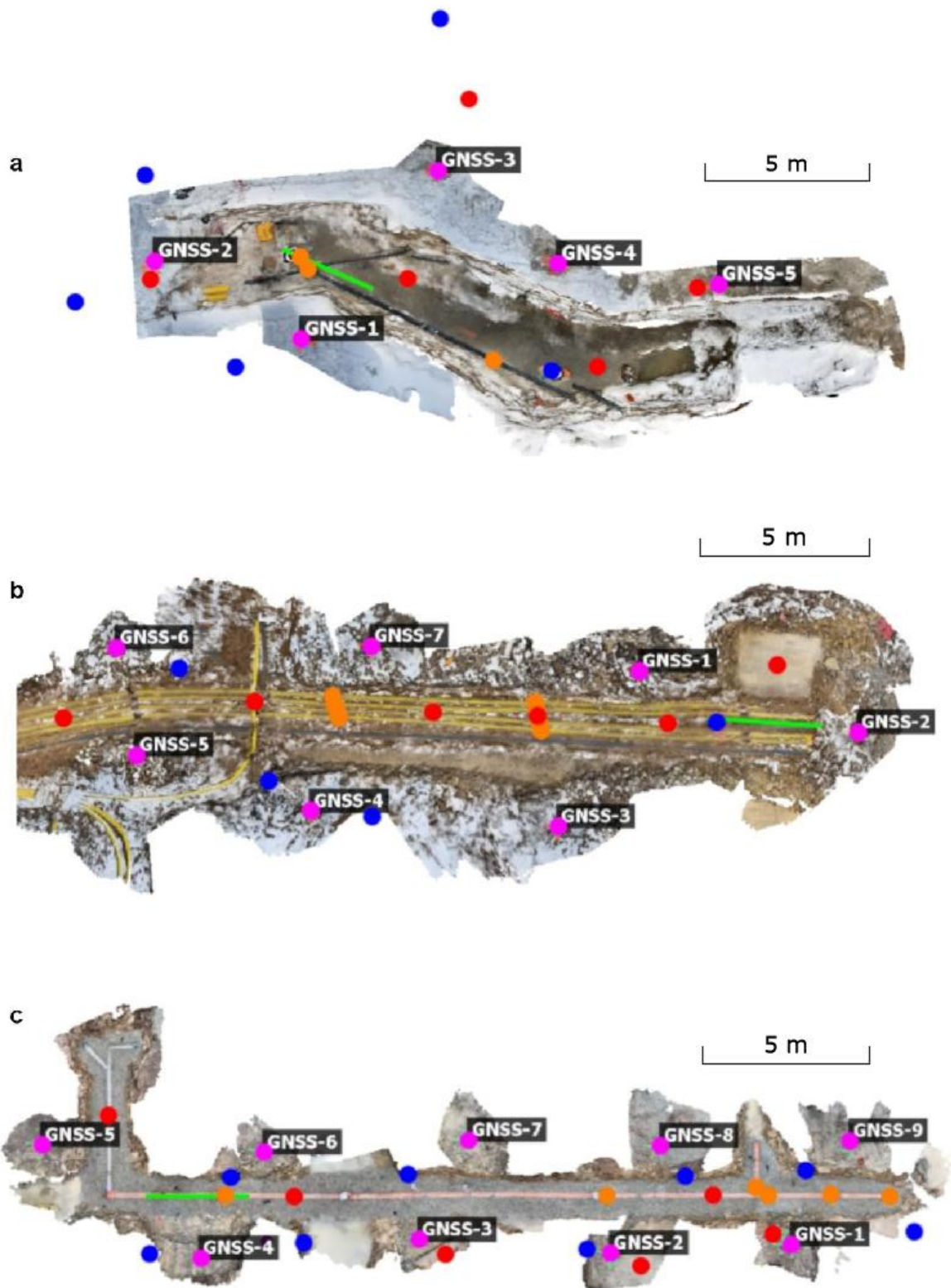
katsetuste vältel olid testitud jällegi kõik eelkirjeldatud tarkvarad (vt Joonis 7) ning iga mõõdistus kestis ligikaudselt 2-3 minutit.

Osa 3 mõõdistused sarnanesid osa 2 mõõdistustele – liikumistrajektor oli sama (vt Joonis 9b). Erinevalt osa 2 mõõdistusest oli nüüd LiDAR sensori kõrgus pörandapinnast muutuv, vastavalt torustike konfiguratsioonidele. Mõõdistus oli nüüd fokuseeritud rohkem torudele, skanneerides lisaks torude välispindadele ka torude sisepinnad. Iga osa 3 mõõdistus kestis ligikaudselt 4-5 minutit, kuna ka liikumiskiirus oli keskmisest aeglasem. Siinkohal tuleb välja tuua, et osa 3 katsetuse analüüs on terviklik ainult Scaniverse ja vGIS Scan tarkvarade puhul (vt Joonis 7). SiteScape tarkvara tasuta versiooni piirangute tõttu ei olnud võimalik teostada osa 3 mõõdistust ning hilisema andmetöötluse käigus selgus, et 3D Scanner App punktipilved ei olnud mõõdistaja poolt õigesti salvestatud ning olid seetõttu kasutuskõlbmatud.

### **4.3.2. Välietingimustes läbiviidud katsetused**

Välikatsetuste üheks eesmärgiks oli näidata, et arendatav maa-aluste tehnovõrkude mõõdistamise meetodika on potentsiaalselt teostatav ka tavaehitaja poolt, geodeedi pakutava väljaõppe ja juhistega ning madalama hinnaklassi mõõdistamiseseadmete abil. Selle hüpoteesi kontrolliks kasutati välikatsetuste läbiviimisel LiDAR mõõdistuste koordineerimise võrgu loomiseks RTK-GNSS mõõdistusmeetodit, mis on odavam ja lihtsam kasutuse poole pealt kui tahhümeeter mõõdistus. RTK-GNSS mõõdetud kindelpunktid on toodud L-EST97 koordinaatide- ja EH2000 kõrgussüsteemis. Kõrgused ellipsoidist taandati normaalkõrgusteks (vastavalt EH2000 kõrgussüsteemile) kasutades riiklikku EST-GEOID2017 (Ellmann jt, 2020) kvaasigeoidi mudelit.

Välikatsetuste kindelpunktid kindlustati maapinnale kasutades spreid värvi (vt Joonis 3d) ning seejärel mõõdistati RTK-GNSS meetodiga kasutades Sokkia GCX3 GNSS vastuvõtjat (Sokkia, 2017). Iga kindelpunkt mõõdistati kolmekordselt, kus iga mõõdistus kestis 25 epohhi 1 Hz sagedusega ning iga eelmise ja järgmise mõõdistuse vahel teostati RTK initsialiseerimine. Kolm mõõdistust keskmistati, et saada kindelpunktide lõplikud koordinaadid. Võttes arvesse mõõdistusalade kujusid ja suuruseid, paigaldati 5, 7 ja 9 kindelpunkti vastavalt testide 2, 3 ja 4 mõõdistusaladele. Lisas A toodud tabelites on esitatud test 2 (vt Tabel A1), test 3 (vt Tabel A2) ning test 4 (vt Tabel A3) RTK-GNSS meetodiga mõõdistatud tähiste koordinaadid. Kindelpunktide paiknemine valiti selliselt, et lähimate punktide vaheline kaugus ei ületaks 6 m. Joonis 10 kujutab kindelpunktide paiknemist mõõdistusaladel (vt roosat värvi punkte). LiDAR mõõdistuste punktipilvede koordineerimine toimus sarnaselt sisetalingimustes läbiviidud katsetusele, kasutades CloudCompare tarkvara.



**Joonis 10.** Välikatsetuste skeemid. Test 2 (a), test 3 (b) ja test 4 (c) skeemidel on kujutatud RTK-GNSS meetodil mõõdistatud kindelpunktid (roosa), staatilise laserskanneerimise jaamade asetus (punane), robot-tahhümeetriga mõõdistatud kindelpunktid (sinine) ning robot-tahhümeetriga mõõdetud torustike elemendid (oranž). Rohelised jooned tähistavad jaotises 5.2 kirjeldatud löikeid. Kõik joonisel kujutatud punktipilved mõõdistati Scaniverse tarkvaraga (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).



Test 2 viidi läbi kahes osas: osa 1 mõõdistus teostati väljaspool kaevikut, et uurida olukorda, kus kaevikusse sisenemine on mõõdistajale keeruline või ohtlik. Osa 2 mõõdistus teostati aga kaeviku sees. Liikumise trajektoor algas esimeses osas kindelpunkti GNSS-1 juurest ning jätkus mööda kaeviku serva liikudes teiste kindelpunktide suunas, lõpetades GNSS-5 kindelpunkti juures (vt Joonis 10a). Kaeviku mõõdistust kindelpunktist GNSS-5 edasi suunaga GNSS-1 poole ei olnud võimalik jätkata, kuna antud lõigus oli kaeviku serva ladustatud väljakaevatud pinnas, mis oli järsu kaldega ning jää ja lume olemasolu tõttu oli liikumine antud pinnase peal ebaturvaline. LiDAR mõõdistuse liikumiskiiruseks oli rahulikus tempos kõndimine ning iPad seadet hoiti umbes 1,2 m kõrgusel kaeviku servast. Enamasti oli LiDAR sensor alati suunatud mõõdistusala keskele, välja arvatud kindelpunktide juures, kus sensor suunati sujuvalt mõneks hetkeks kindelpunktile ning seejärel tagasi kaeviku poole, jätkates sujuvat liikumist mööda eelnimetatud trajektoori.

Osa 2 mõõdistuse liikumistrajektoor algas sarnaselt esimesele osale, kuid peale GNSS-5 kindelpunkti läbimist suunduti mõõdistusseadmega kaeviku põhja, kust kõnniti samas tempos läbi kuni kindelpunktini GNSS-2. Kaeviku sees oli LiDAR sensori kõrguseks samuti ligikaudu 1,2 m kaeviku põhjast, kuid nüüd oli seade suunatud sujuvalt kord paremale, kord vasakule liikumise suunast, jäädvustades kõiki tehnovõrkude elemente ja kaevikut. Kõikide mõõdistustarkvarade puhul kasutati alati sama mõõdistusmetoodikat. Iga osa 1 mõõdistus kestis ligikaudselt 2 minutit ning iga osa 2 mõõdistus kestis ligikaudselt 5 minutit.

Test 3 mõõdistusmetoodika sarnanes test 1 osa 1 mõõdistusmetoodikale. Liikumise trajektoor kulges mööda kaeviku serva ümber paigaldatud tehnovõrkude. Liikumist alustati ja lõpetati ühe ja sama kindelpunkti juures, milleks oli GNSS-1 (vt Joonis 10b). Iga mõõdistus kestis ligikaudselt 4 minutit. Test 4 mõõdistuse liikumise trajektoor aga kulges hoopis mööda kaeviku põhja, kuna kaevik oli piisavalt madal ja kitsas, et mõõdistada kõik vajalikud tehnovõrgu elemendid ainult ühes suunas liikumise ajal. Liikumist alustati kindelpunkti GNSS-1 juurest ning suunduti mööda kaeviku põhja kindelpunkti GNSS-5 suunas (vt Joonis 10c). LiDAR sensori kõrgus oli jällegi nii test 3 kui ka test 4 ajal ligikaudselt 1,2 m maapinnast. Iga test 4 mõõdistus kestis ligikaudu 2 minutit. Testide 2, 3 ja 4 mõõdistuses kasutatud tarkvarasid kirjeldab Joonis 7. Kõikide tarkvarade puhul kasutati alati sama mõõdistusmetoodikat.

### **4.3.3. Valideerimisandmete korje**

Antud töös on põhiliseks valideerimismetoodikaks staatiline laserskaneerimine kasutades FARO Focus<sup>3D</sup> X 330 laserskannerit (FARO, 2013). Eelnimetatud seadme

möödistustäpsus on 2 mm ning kordustäpsus 0,3 mm möödistuskauguse 10 ... 25 m korral. Skaneeringute seaded on kirjeldatud Tabel 6, mis olid kõikide katsetuste vältel samad. Skaneeritud punktipilved värviti vastavalt RGB-värvidele kasutades skanneri möödistuse ajal tehtud fotosid.

**Tabel 6.** Staatilise skaneerimise parameetrid.

Skaneeringu aeg ühes jaamas [mm:ss]	Ligikaudselt 06:36
Punktipilve suurus [punktide arv]	8192 x 3414
Teoreetiline punktide arv	28,0 mln
Punktide vaheline kaugus [mm / 10 m]	7,670

Test 1 ala möödistati kasutades staatilise laserskaneerimise meetodit eelnevalt kirjeldatud parameetritega kuuest erinevast jaamast (vt Joonis 8). Punktipilvede koordineerimine toimus ReCap Pro (v.23.1) tarkvaraga, kasutades samu 8 tähist, mille abil olid koordineeritud ka madala hinnaklassi LiDAR seadmega möödistatud punktipilved. Tähiste koordinaadid on toodud lisas B olevas tabelis (vt Tabel B1).

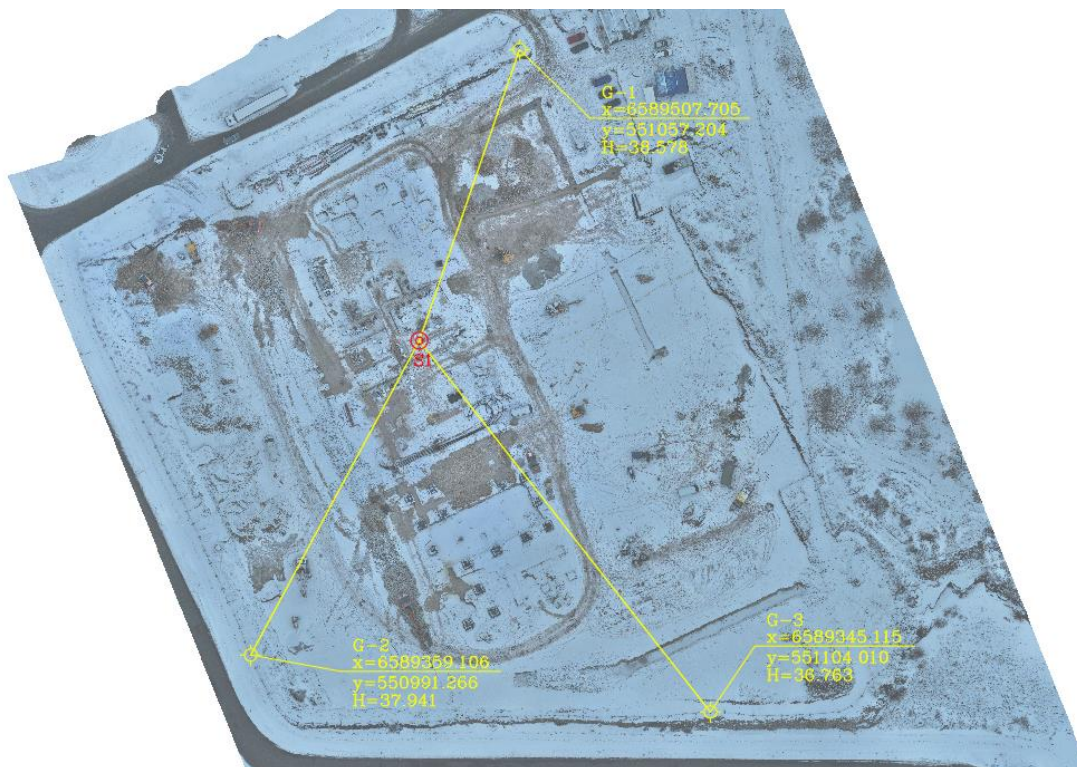
Välikatsetuste objektidel, valideerimisandmekorje jaoks, kasutati referents-süsteeme Eesti riiklikus L-EST97 koordinaatsüsteemis ning EH2000 kõrgussüsteemis. Test 2 objektil kasutati kindelpunktide süsteemi, mis oli juba varasemalt loodud geodeedi poolt ehitusgeodeetiliste märkimis- ja möödistustööde tarbeks. Robot-tahhümeeter GT-1001 (Topcon, 2016) paigaldati lahtise kaeviku servale ning koordineeriti joonelis-nurgalise vastulõike meetodil (Horemuz ja Jansson, 2017; Alizadeh-Khameneh jt., 2018), kahe täisvõttega, kasutades kolme lähtepunkti (vt Joonis 11). Loodud seisust mõõdeti sisse 5 tähist staatilise laserskaneerimise punktipilvede koordineerimise tarbeks (vt siniseid tähiseid Joonis 10a). Lisas B toodud tabel kajastab staatilise skaneerimise tähiste koordinaate (vt Tabel B2).



**Joonis 11.** Test 2 joonelis-nurgalise vastulõike skeem (tahhümeetri seisupunkt on punaselt).

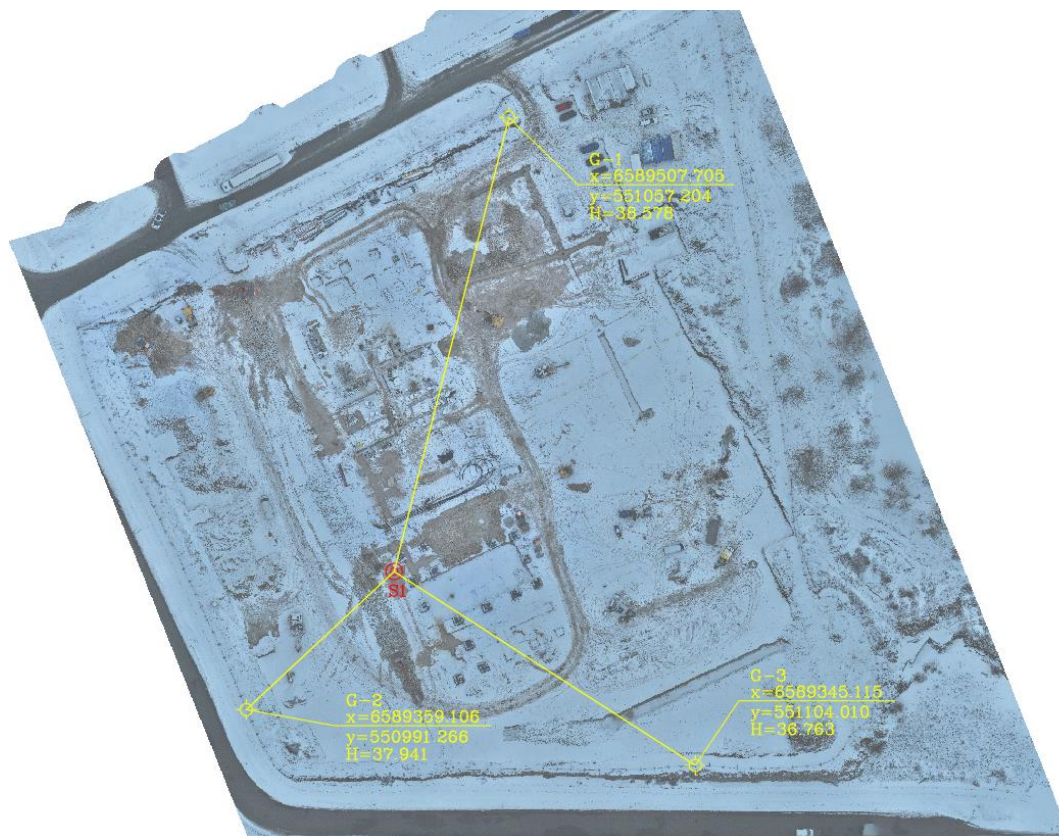
Test 3 tarbeks loodi möödistusvõrk kasutades Sokkia GCX3 GNSS vastuvõtjat (Sokkia, 2017). Möödistusvõrk koosnes kolmest punktist, mis mõõdeti sisse 60 epohhiga 1 Hz sagedusega. Peale igat möödistust toimus GNSS-RTK initsialiseerimine. Peale kolme möödistust koordinaadid keskmistati ning saadi algsed lähtepunktide koordinaadid. Test

3 jaoks määrati tahhümeetri seis saadud kolme lähtepunkti abil kasutades joonelis-nurgalise vastulõike meetodit ning mõõdistades igat lähtepunkti kahe täisvõttega. Joonis 12 kujutab test 3 joonelis-nurgalise vastulõike skeemi. Järgnevalt mõõdeti kolm lähtepunkti uuesti sisse kasutades tahhümeetrilist mõõdistust kahe täisvõttega, ning määrati punktidele lõplikud koordinaadid (vt Joonis 12). Kindlustatud referentssüsteemi lõplike koordinaatidega punkte kasutati ka test 4 käigus. Määratud seisust mõõdeti kahe täisvõttega tähised staatilise laserskaneerimise tarbeks (vt siniseid tähiseid Joonis 10b). Lisas B toodud tabel (vt Tabel B3) kajastab staatilise skaneerimise tähiste koordinaate.



**Joonis 12.** Test 3 joonelis-nurgalise vastulõike skeem (tahhümeetri seisupunkt on punaselt).

Kuna test 4 mõõdistust teostati samal objektil, kus ka test 3 mõõdistust, siis oli võimalik kasutada varasemalt loodud referentssüsteemi. Robot-tahhümeeter koordineeriti jällegi joonelis-nurgalise vastulõike meetodil mõõdistades kahe täisvõttega. Joonis 13 kujutab test 4 joonelis-nurgalise vastulõike skeemi. Antud positsioonist määrati tahhümeetrilisel meetodil kahe täisvõttega staatilise laserskaneerimise tarbeks tähiste koordinaadid (vt siniseid tähiseid Joonis 10c), mis on kajastatud lisas B toodud tabelis (vt Tabel B4).



**Joonis 13.** Test 4 joonelis-nurgalise vastulõike skeem (tahhümeetri seisupunkt on punaselt).

Test 2 staatilise laserskaneerimise mõõdistus teostati 5-st seisust, millest 3 seisu olid paigutatud väljaspool kaevikut ning 2 seisu olid teostatud kaeviku põhjas (vt punaseid tähiseid Joonis 10a). Testide 3 ja 4 käigus teostati staatiline laserskaneerimine 6-st seisust (vt Jooniseid 10b ja 10c). Seisud paiknesid enamasti ainult kaevikute sees, kuna kaeviku sügavus oli väike (kuni 40 cm) ning vajadus teostada skaneerimist eraldi kaeviku servadelt puudus.

Lisaks staatilisele laserskaneerimisele teostati välikatsetuste punktipilvedest mõningate lihtsasti eristatavate tehnoorkude elementide mõõdistus tahhümeetrilisel meetodil. Elemendid mõõdistati robot-tahhümeetriga kahe täisvõttega. Antud info oli vajalik, et kontrollida staatilise laserskaneerimise punktipilvede täpsust ning teostada ka madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvede täiendavat valideerimist. Test 2 objektile mõõdeti 3 torustiku elementi, test 3 objektile 8 elementi ning test 4 objektile 6 elementi (vt oranže tähiseid Joonis 10).



## 4.4. Andmete järeltötluse kirjeldus

Staatilise skaneerimise erinevate seisude punktipilvede registreerimine test 2 ja 3 mõõdistustest toimus pilv-pilvega meetodil, kuna objektidel oli ebapiisav arv tähiseid, et kasutada tähiste põhise registreerimist. Test 1 ja 4 mõõdistuse jaoks oli aga paigaldatud piisav arv tähiseid, et igast staatilise skaneerimise seisust oleks näha vähemalt 3 tähist korraga, mistõttu sai ka seisude punktipilvede registreerimist teostada tähistel põhineval meetodil. Registreerimise järgselt toimus kõigi punktipilvede koordineerimine kasutades tähiseid ning tahhümeetrilisel meetodil saadud koordinaate. Test 1, 2 ja 4 staatilise skaneerimise punktipilvede registreerimine ning koordineerimine toimus ReCap Pro (v.23.1) tarkvara kasutades, ning test 3 jaoks kasutati Faro Scene (v.2023.0.1.10677) tarkvara. Antud erinevus tulenes sellest, et test 3 mõõdistusala oli väga ühetaoline. Alal puudusid lihtsasti eristuvad elemendid ning objektid, mistõttu andis ReCap Pro tarkvara pilv-pilvega registreerimine ebatäpse tulemuse. Seevastu aga Faro Scene andis tulemuse, mis oli võrreldav teiste katsetuste registreerimisega ReCap Pro tarkvaras.

Tabel 7 näitab test 1 staatilise laserskaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemusi ReCap Pro tarkvaraga. Autodeski kodulehel (Autodesk ReCap Pro, 2024) on tabelis olevad parameetrid kirjeldatud järgnevalt: ülekate näitab protsentuaalset ühiste omaduste osa terve projekti ulatuses. Suurem ülekate protsent näitab, et pinnad, mis on varjatud või peidetud teiste objektide taha ühes skaneeringus (näiteks posti taha varju jääv ala), on nähtavad mõnes teises skaneeringus. Tasakaal näitab skaneeringus ühiste elementide protsenti. Juhul, kui skaneerida suurt ning ühetaolist ala, siis on olemas oht, et erinevad skaneerimise jaamad hakkavad registreerimisel n-ö libisema üksteise suhtes, kuna puudub piisav arv elemente, mille tasapinnad oleksid võimalikult erisuunalised. Just selline olukord tekkis ilmselt test 3 andmetötluse käigus, mistõttu ei olnud võimalik punktipilvede registreerimisel kasutada ReCap Pro tarkvara. Mida suurem on tasakaalu protsent, seda rohkem on erinevates skaneeringutes ühiseid, erisuunalisi pindasid. Punktide ülekate <6 mm näitab kattuvate punktide protsenti terve projekti ulatuses. Autodeski juhiste järgi peaks see protsent soovituslikult olema üle 90%; sellisel juhul on lõplik punktipilv registreeritud suure täpsusega. Keskmise ruutvea (KRV) täpsushinnangud näitavad erinevate skaneeringute vaatluste ja keskmistatud asukoha erinevust projekti ulatuses. Joondamise usaldusväärsus näitab punktipilve registreerimise ja koordineerimise täpsust. Mida väiksem on tabelis toodud kaugus, seda paremini on punktipilved omavahel joondatud.

**Tabel 7.** Test 1 ReCap Pro staatilise skaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemused.

Test 1 registreerimise andmed (ReCap Pro)				
Skanneeringu number	Ülekate	Tasakaal	Punktide ülekate <6 mm	KRV
Scan 1	86,0%	39,4%	100%	0,22 mm
Scan 2	89,5%	45,2%	100%	0,21 mm
Scan 3	81,7%	41,3%	100%	0,24 mm
Scan 4	87,3%	49,8%	100%	0,24 mm
Scan 5	90,4%	54,0%	100%	0,19 mm
Scan 6	75,8%	29,9%	100%	0,31 mm
Test 1 koordineerimise andmed (ReCap Pro)				
Tähise number		Joondamise usaldusväarsus		
T-00		1,62 mm		
T-01		19,73 mm		
T-02		5,33 mm		
T-03		2,72 mm		
T-04		3,48 mm		
T-05		2,57 mm		
T-06		5,97 mm		
T-07		1,39 mm		

Tabel 8 näitab test 2 staatilise laserskaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemusi ReCap Pro tarkvaraga. Kõik tabelis toodud parameetrid on kirjeldatud eelnevalt.

**Tabel 8.** Test 2 ReCap Pro staatilise skaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemused.

Test 2 registreerimise andmed (ReCap Pro)				
Skanneeringu number	Ülekate	Tasakaal	Punktide ülekate <6 mm	KRV
Scan 1	45,7%	6,3%	98,3%	0,87 mm
Scan 2	39,3%	15,0%	99,9%	0,44 mm
Scan 3	42,9%	21,0%	99,4%	0,65 mm
Scan 4	40,8%	20,1%	99,9%	0,66 mm
Scan 5	29,3%	16,3%	99,5%	0,63 mm
Test 2 koordineerimise andmed (ReCap Pro)				
Tähise number		Joondamise usaldusväarsus		
T-75		5,42 mm		
T-76		3,16 mm		
T-77		0,76 mm		
T-78		2,00 mm		
T-79		4,80 mm		

Tabel 9 näitab test 3 staatilise laserskaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemusi Faro Scene tarkvaraga. Erinevalt ReCap Pro kirjeldatud parameetritest on punktide ülekate statistiliseks näitajaks <4 mm punktide ülekate.

Kahjuks ei ole Faro Scene juhendites kirjeldatud, kui suur protsent punktide ülekattel <4 mm näitab punktipilve kõrgtäpsset registreerimist, kuid arvestades, et ReCap Pro tarkvara punktide ülekatte <6 mm puhul on heaks täpsusnäitajaks 90%, siis Faro Scene <4 mm puhul võiks see näitaja olla 70-80%. Kuigi test 3 punktide ülekatte protsent on enamasti 40-50%, näib antud punktipilve registreering siiski üsna usaldusväärne, kuna üldine ülekate on keskmiselt 75% ning keskmine ruutviga on ligikaudselt 4-5 mm. Lisaks võisid punktide ülekatte vähest protsenti mõjutada konkreetse mõõdistusala tingimused, kuna kaevik oli väga madal ja maapind ühetaoline. Punktipilvede koordineerimise käigus selgus, et tähis T-1 andis suure koordineerimise erinevuse, mis viitab sellele, et mõõdistuse käigus võis kindelpunkt liikuda. Seetõttu oli antud tähis lõplikust punktipilve koordineerimisest välja jäetud.

**Tabel 9.** Test 3 Faro Scene staatilise skaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemused.

Test 3 registreerimise andmed (Faro Scene)				
Skanneeringu number	Ülekate	Tasakaal	Punktide ülekate <4 mm	KRV
Scan 1	83,2%	34,5%	46,4%	4,50 mm
Scan 2	62,4%	52,2%	47,1%	4,46 mm
Scan 3	74,6%	55,9%	40,5%	5,31 mm
Scan 4	76,0%	39,1%	43,4%	4,87 mm
Scan 5	81,2%	19,5%	52,3%	3,86 mm
Test 3 koordineerimise andmed (Faro Scene)				
Tähise number		Joondamise usaldusväärsus		
T-70		4,98 mm		
T-72		1,67 mm		
T-73		3,33 mm		

Tabel 10 näitab test 4 staatilise laserskaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemusi ReCap Pro tarkvaraga. Kõik tabelis toodud parameetrid on kirjeldatud eelnevalt.

**Tabel 10.** Test 4 ReCap Pro staatilise skaneerimise punktipilvede registreerimise ja koordineerimise tulemused.

Test 4 registreerimise andmed (ReCap Pro)				
Skanneeringu number	Ülekate	Tasakaal	Punktide ülekate <6 mm	KRV
Scan 1	19,6%	34,5%	90,1%	3,55 mm
Scan 2	21,1%	52,2%	93,7%	3,27 mm
Scan 3	25,7%	55,9%	89,7%	2,26 mm
Scan 4	24,1%	39,1%	93,1%	2,23 mm
Scan 5	21,2%	19,5%	84,4%	2,02 mm
Scan 6	14,8%	10,9%	85,0%	1,73 mm

**Tabel 10 jätk.**

Test 4 koordineerimise andmed (ReCap Pro)	
Tähise number	Joondamise usaldusväärsus
T-72	5,01 mm
T-73	12,00 mm
T-74	6,50 mm
T-75	5,03 mm
T-76	5,80 mm
T-77	5,18 mm
T-78	2,27 mm
T-79	2,42 mm

Tabelitest 7 kuni 10 järeldeb, et kõikide katsetuste staatilise laserskaneerimise punktipilved on koordineeritud piisava täpsusega antud töö raames, et järgnevalt kasutada neid andmeid referentsandmetena madala hinnaklassi LiDAR seadme punktipilvedega võrdluses. Tähiste joondamise usaldusväärsus on üldiselt vahemikus 1-6 mm (v.a test 1 tähis T-01 ning test 4 tähis T-73, mille joondamise usaldusväärsused on vastavalt 19,73 mm ning 12,00 mm, mis võivad olla põhjustatud käsitsi määratud tähiste tsentrite ebatäpsusest). Kattuvate punktide (punktide ülekate <6 mm) protsent testide 1, 2 ja 4 puhul ületab kõikide teostatud skaneerimise jaamade puhul 80% ning test 3 puhul (punktide ülekate <4 mm) ületab 40%. Antud väärtused viitavad erinevate skaneeringute jaamade heale kokkusobivusele ning keskmiste ruutvigade väärtused on kõikide katsetuste jaamade puhul valdavalt alla 5 mm (v.a test 3, jaam 3, mis võib olla tingitud teiste katsetustega võrreldes erinevast koordineerimise tarkvara kasutamisest).

Eeltoodud tabelitest on samuti näha, et testide 3 ja 4 puhul on KRV väärtused suurusjärgu võrra suuremad kui testide 1 ja 2 korral. See võiks olla tingitud erinevate mõõdistusobjektide olude tõttu. Test 1 mõõdistus toimus siseruumis, kus mõõdistusala oli ümbritsetud seintega ning seetõttu omavad ka staatilise laserskaneerimise jaamade registreerimise tulemused väga suurt täpsust (alla 1 mm KRV väärtusega). Test 2 puhul oli tegemist väga sügava kaevikuga ning mõõdistuspaika ümbritsesid hooned ja rajatised. Antud juhul oli sarnaselt test 1 olukorrale üsna palju erisuunalisi pindasid, mille järgi suutis ReCap Pro tarkvara teostada skaneerimise seisude registreerimise väga kõrge täpsusega (alla 1 mm KRV väärtusega). Testide 3 ja 4 mõõdistusala olid seevastu väga madalate ning laugete kaevikutega, mis olid üsna sarnased ümbritseva reljeefiga. Samuti puudusid kaevikute läheduses muud hooned ja rajatised, mis soodustaksid skaneerimise seisude registreerimise kõrgemat täpsust (test 3 puhul olid skaneerimise jaamade KRV väärtused üldiselt 4-5 mm; test 4 puhul üldiselt 2-3 mm). Seetõttu on testide 3 ja 4 KRV väärtused madalama täpsusega kui testide 1 ja 2 väärtused.



Autodesk kodulehel (Autodesk ReCap Pro, 2024) on öeldud, et kattuvate punktide (punktide ülekate <6 mm) protsent peaks üldjuhul ületama 90%, kuid magistritöö autori arvates on tegemist soovitusel, mis puudutab üldjuhul hoonete ja rajatiste punktipilvede andmetöötluse teooriat. Eeltoodud allikas on muid parameetreid kirjeldatud kasutades näideteks hoone poste ning parklat. Antud magistritöö raames mõõdistati kaevikuid, mille pind ei pruugi olla muutusteta ning võib muutuda nii keskkonna kui ka inimtekkelistel põhjustel, näiteks tuule, sademete või ehitustööliste objektile tegutsemise tõttu. Sellisel juhul võiks punktide ülekatte protsent 80% olla sobiv järgimiseks eelkirjeldatud tingimustes. Antud väidet kinnitab ka asjaolu, et sisetingimustes teostatud test 1 punktide ülekatte protsent on kõikide seisude puhul 100%, mis tähendab, et välikatsetustel võisid tõepoolest mängida suurt rolli kaeviku pindade muutlikkus ning muud kõrvalised olud.

Madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilvede koordineerimine toimus CloudCompare tarkvaras. Objektile RTK-GNSS seadmega mõõdetud punktide koordinaadid koos mõõdistatud punktipilvedega imporditi samasse CloudCompare projekti. Punktipilvedest oli võimalik visuaalselt tuvastada GNSS-lätepunktide tsentrid (vt Joonis 14) ning viia need vastavusse mõõdistatud koordinaatidega L-EST97 ning EH2000 süsteemides kasutades tarkvara CloudCompare *Align* funktsiooni. Madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilvede koordineerimise veahinnanguid kirjeldatakse hiljem jaotises 5.2.



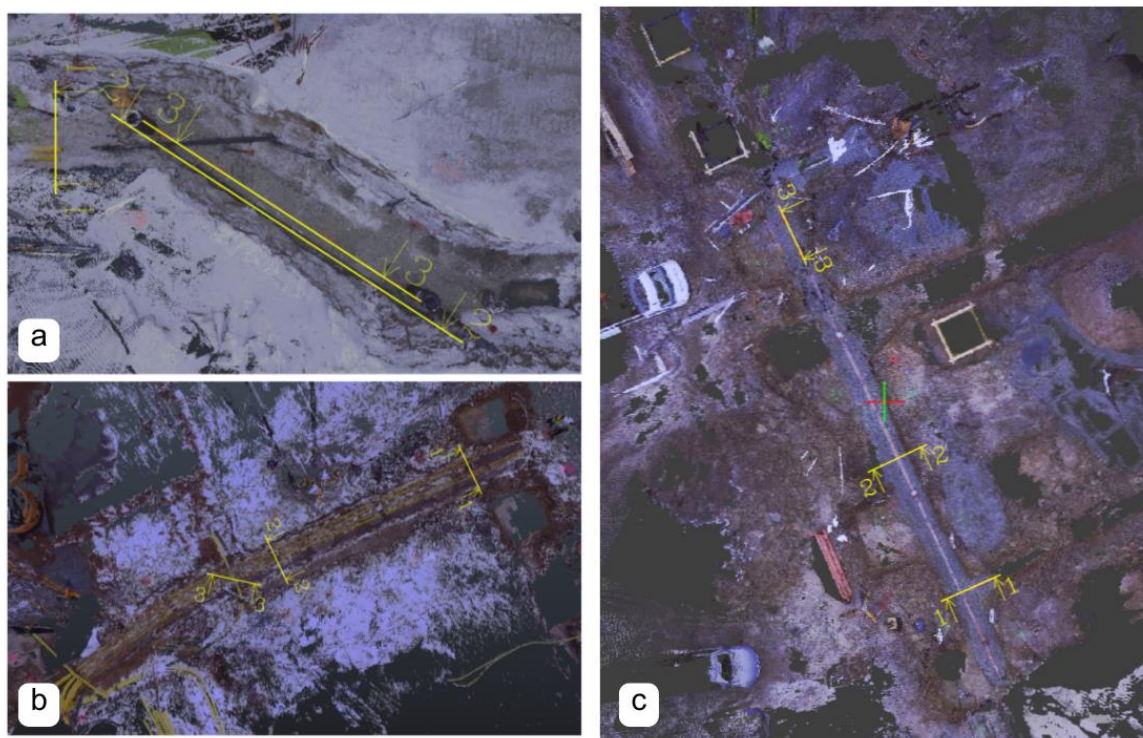
**Joonis 14.** Näiteid GNSS-tähistest välikatsetuste punktipilvedest.

Peale seda kui nii staatilise laserskaneerimise kui ka madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilved olid registreeritud ning koordineeritud, oli võimalik teostada nende omavaheline võrdlus. Esimese võrdluse jaoks olid kõik punktipilved lõigatud ühesuguselt, eemaldades liigsed punktipilvede osad väljaspool kaeviku serva. Edaspidi käsitletakse esimese võrdluse punktipilvesid „kaevik” terminiga, kaasa arvatud ka sisekatsetuse oma, mis on nimetatud kaevikuks ühtse käsitluse tarbeks. Teise võrdluse jaoks lõigati kõikidest punktipilvedest välja kogu maapinna osa ning alles jäid ainult torustikud ning nende elemendid. Edaspidi käsitletakse teise võrdluse punktipilvesid

„torustik“ terminiga. Erinevused madala hinnaklassi LiDAR mõõdistuste ja staatilise laserskaneerimise mõõdistuste vahel kvantifitseeriti CloudCompare tarkvaraga kasutades M3C2 tarkvaramoodulit (Lague jt, 2013), mis võimaldab Eukleidiliste kauguste arvutamist kahe punktipilve vahel. Lisaks CloudCompare'ile kasutati Cyclone 3DR (v.2024.0.6.45713) tarkvara, et visualiseerida punktipilvede vahelisi erinevuseid.

Selleks, et hinnata punktipilves torustike geomeetrilist täpsust, lõigati test 1 punktipilvedest välja umbes 5 cm laiused segmendid iga toru kohta. Lõiked paiknesid umbes 10 cm kaugusel toru otsast sissepoole ning ka toru keskel. Enamjaolt tehti iga toru punktipilve kohta 3 väljalõiget, välja arvatud toru nr 2 puhul (vt Joonis 8), kus toru punktipilve kohta teostati 4 väljalõiget toru suurema pikkuse tõttu. Toru nr 2 keskmised väljalõiked paiknesid 1/3 ja 2/3 peal. Üks lisa väljalõige teostati ka toru nr 3 kohta 90° põlve peal (vt Joonis 8). Kasutades väljalõikeid punktipilvedest, oli võimalik määrata mõõdistatud torude välisdiameetrid kasutades Pratt'i algoritmi (Pratt, 1987), sobitades vastava punktipilve lõike sisse ringjoone vähimruutude meetodil. Seejärel keskmistati iga toru kohta saadud kolm (või toru nr 2 korral neli) välisdiameetrit ning keskmisi tulemusi võrreldi torude spetsifikatsioonis etteantud välisdiameetritega.

Seevastu väliskatsetuste andmete põhjal tehti torustike ja nende elementide rist- ja pikilõikeid. Lõigete paiknemised on näidatud Joonis 15. Lõiked joonestati välja kasutades Autodesk Civil 3D tarkvara (v.13.5.1510.0 Civil 3D 2023.3.2 update).



**Joonis 15.** Väliskatsetuste punktipilvede lõigete asukohad.

Lisaks lõigete tegemisele arvutati välikatsetuste mõõdistusandmete põhjal ka kanalisatsiooni torustike kalded, et hinnata madala hinnaklassi LiDAR sensoriga määratud kalde vastavust projektsele kaldele, tahhümeetriliselt mõõdetud kaldele ning staatilise laserskaneerimise punktipilvest saadud kaldele. Test 2 ja 3 kõikidest punktipilvedest lõigati välja umbes 2 cm laiused ribad piki kanalisatsioonitoru kulgemist. Seejärel sobitati iga punktipilve lõigu järgi sirge vähimruutude meetodil ning tuvastati sirge tõus ehk punktipilve põhjal arvatud kalle.

## 5. KATSETUSTE TULEMUSED JA ANALÜÜS

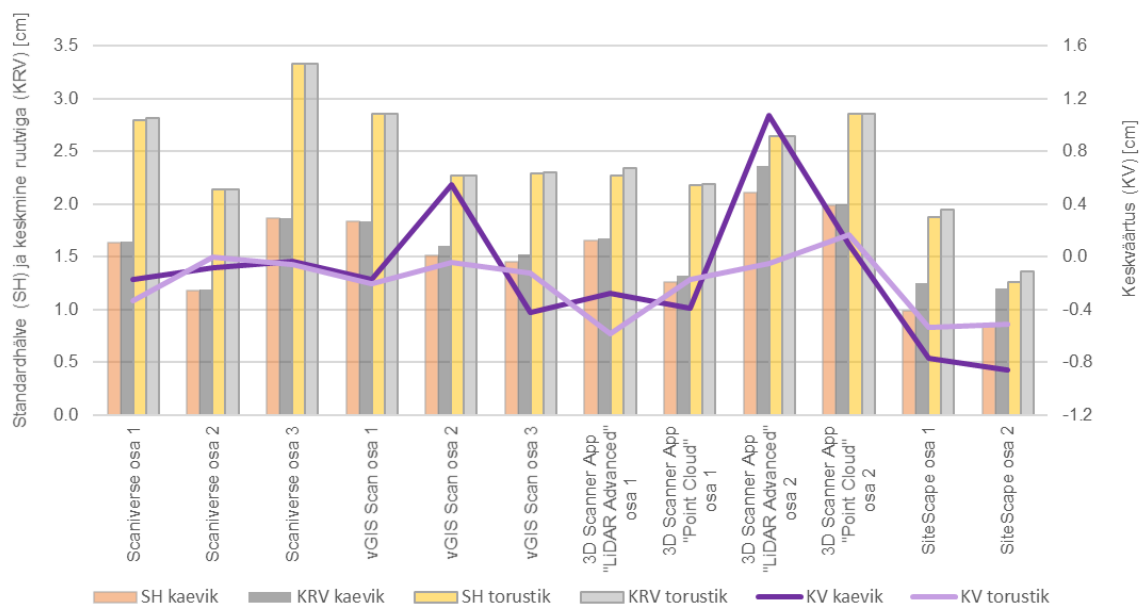
### 5.1. Sisetingimustes läbiviidud katsetuste tulemused

Tabel 11 on toodud test 1 punktipilvede koordineerimise veahinnangud erinevate tarkvarade järgi. Väärtused  $SH_x$ ,  $SH_y$  ja  $SH_z$  on koordinaatkomponentide arvatud valimi standardhälbed ning  $SH_{XYZ}$  kaasab kõiki ruumilisi komponente. Väärtused  $SH_{XYZ}^{CC}$  on CloudCompare'i poolt antud koordineerimise veahinnangud, mis on ilmselt arvatud tarkvara siseselt populatsiooni standardhälbe valemit kasutades. Tabel 11 näitab, et kõikide tarkvarade koordineerimise keskmine standardhälbe tulemus on ligikaudselt 3,3 cm. 3D Scanner App „LiDAR advanced“ osa 2 mõõdistuse koordineerimise standardhälve on teistest ligi 2 korda suurem ning tõenäoliselt on tegemist moonutustest tuleneva jämeda veaga. Kõik ülejäänud standardhälbed näitavad sarnast käitumist, vähenedes teise ja kolmanda osade mõõdistustes võrreldes esimese osa mõõdistusega. Antud tulemused viitavad sellele, et osa 2 ja 3 liikumise muster ja kiirus (vt Joonis 9) annavad parema täpsuse madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdistades, kuna tõenäoliselt kiirem liikumise tempo põhjustab suuremaid moonutusi punktipilvedes.

**Tabel 11.** Test 1 madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvede koordineerimise standardhälbed.

Tarkvara	$SH_x$ [cm]	$SH_y$ [cm]	$SH_z$ [cm]	$SH_{XYZ}$ [cm]	$SH_{XYZ}^{CC}$ [cm]
Scaniverse osa 1	2,5	3,0	1,0	4,1	3,6
Scaniverse osa 2	2,1	1,0	0,6	2,4	2,2
Scaniverse osa 3	0,8	2,4	0,6	2,6	2,4
vGIS Scan osa 1	1,7	4,4	1,3	4,9	5,3
vGIS Scan osa 2	1,6	2,2	1,3	3,0	2,8
vGIS Scan osa 3	1,5	1,5	1,3	2,5	2,4
3D Scanner App „LiDAR Advanced“ osa 1	1,7	2,0	0,7	2,7	2,3
3D Scanner App „Point Cloud“ osa 1	2,1	2,1	0,8	3,1	2,9
3D Scanner App „LiDAR Advanced“ osa 2	4,6	4,7	2,7	7,1	6,6
3D Scanner App „Point Cloud“ osa 2	0,9	1,7	1,3	2,3	2,2
SiteScape osa 1	2,7	1,9	0,4	3,3	3,1
SiteScape osa 2	1,5	0,8	0,5	1,8	1,7

Joonis 16 kujutab statistilisi väärtusi (SH – standardhälve, KRV – keskmine ruutviga, KV – keskvaartus), mis on leitud staatilise laserskaneerimise ja madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilvede erinevuste põhjal. Jooniselt on nähtav süstemaatiline tendents kaeviku ja torustiku punktipilvede täpsuses, kus kaeviku punktipilve standardhälve ja keskmine ruutviga on keskmiselt 1,5 korda väiksem kui torustiku statistilised väärtused. Keskmise ruutvea väärtused varieeruvad kaeviku punktipilve puhul vahemikus 1,2 cm ja 2,4 cm ning torustiku punktipilve puhul 1,4 cm ja 3,3 cm. Antud asjaolu viitab sellele, et madala hinnaklassi LiDAR sensor suudab suhteliselt hea täpsusega mõõdistada tasapinda, kuid keerukama geomeetriaga objektide mõõdistamisel võivad tekkida raskused.



**Joonis 16.** Test 1 statistilised väärtused Apple LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvede ja staatilise laserskaneerimise punktipilve erinevuste kohta (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Joonis 16 põhjal on parimat mõõdistusmeetodit keeruline välja selgitada. Scaniverse tarkvara puhul andis osa 2 mõõdistuse meetodika parema tulemuse kui osa 1 oma ehk veidi aeglasem liikumise kiirus ja trajektor torude vahel andis suurema täpsuse kui kiirem ringjooneline liikumine mõõdistusala ümber. Samas aga jäi ootamatult ebatäpseks osa 3 mõõdistus, kus liikumise kiirus oli veelgi aeglasem kui osas 2 ja trajektor oli täpselt sama. Peamine erinevus seisnes LiDAR sensori muutuvast kõrgusest mõõdistuse ajal. vGIS Scan tarkvara skaneerimise tulemused on rohkem ootuspärased kui Scaniverse puhul. Osa 2 ja 3 mõõdistustäpsus on üsna sarnane ning samas ka kõrgem kui osa 1 täpsus. Ka SiteScape statistilised väärtused osutusid paremaks just osa 2 skaneeringus. Erinevalt eelnimetatud tarkvaradest demonstreerib 3D Scanner App osa 2 mõõdistus mõnevõrra halvemat täpsust kui osa 1 mõõdistus. Üldiselt, Joonis 16

põhjal saab teha järelduse, et osa 2 mõõdistuse meetodika annab parema tulemuse kui osa 1 oma, aga samas osa 3 meetodika ei too mingit olulist lisaväärtust osa 2 meetodikaga võrreldes. Enamgi veel, näib et osa 3 meetodika puhul LiDAR sensori muutuv kõrgus võis põhjustada rohkem ebatäpsust, nagu seda on näha Scaniverse tarkvara kasutamise juhul. Võimalik, et muutuv sensori kõrgus tekitas mõõdistusse liigse müra ning oli põhjuseks lõpliku punktipilve moonutustele.

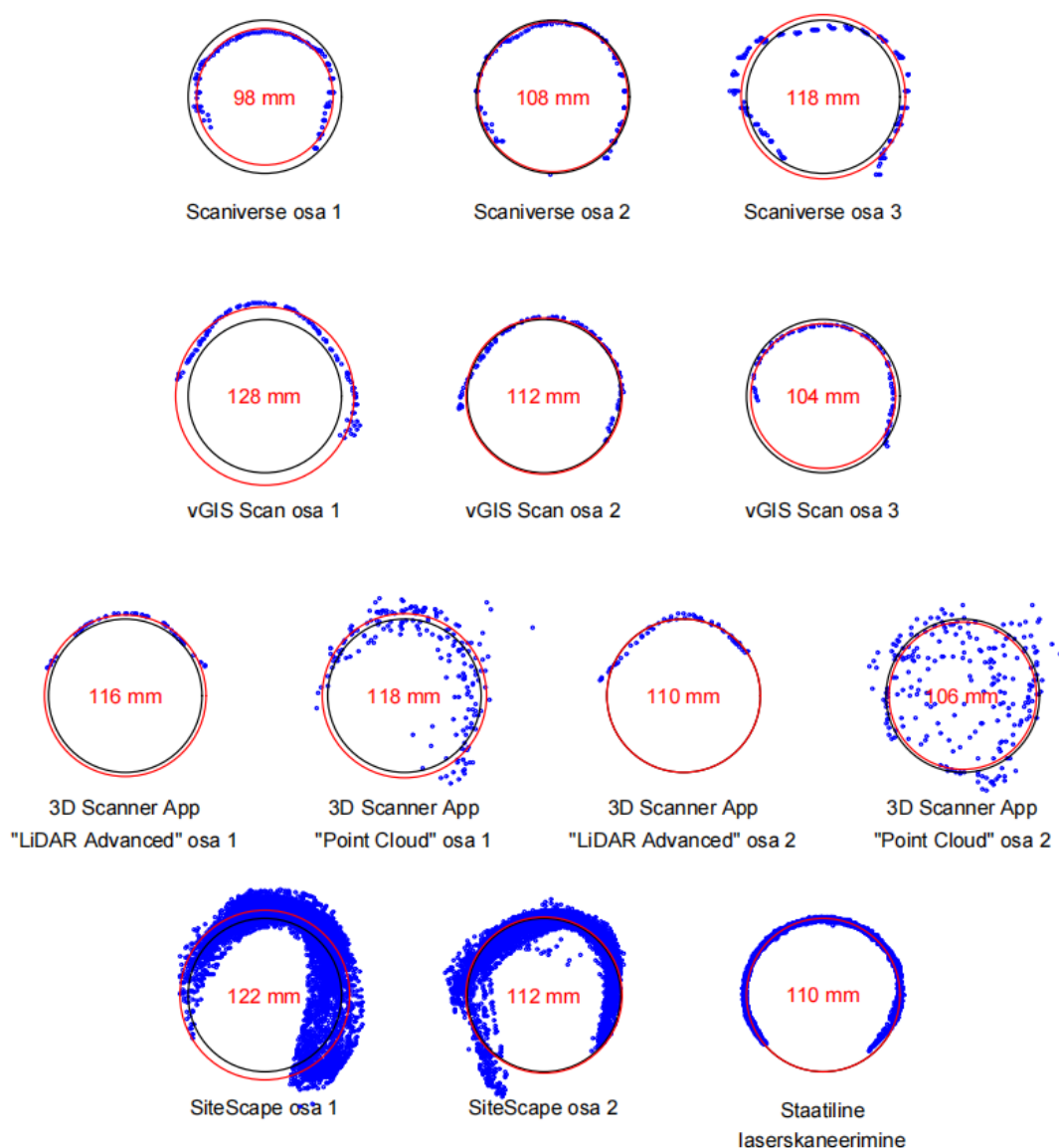
Võrreldes punktipilvede tihedust (vt Tabel 12) on selgelt näha, et staatilise laserskaneerimise punktipilved on kordades suurema tihedusega kui madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilved, välja arvatud SiteScape tarkvara puhul, kus punktipilve tihedus on põhjendamatult ning üsna ülepaisutatult suur. Üldiselt on aeglasema liikumise kiirusel mõõdistatud punktipilved suurema tihedusega kui kiire liikumise puhul, välja arvatud Scaniverse osa 2 mõõdistus. Madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvede tihedus on üldjuhul 2% kuni 8% staatilise laserskaneerimise meetodil mõõdistatu suhtes.

**Tabel 12.** Test 1 madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilvede tiheduse protsentuaalne võrdlus staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Test	Kaevik	Torustik
Staatiline laserskaneerimine	4,16 mln punkti	0,77 mln punkti
Scaniverse osa 1	5,11%	5.50%
Scaniverse osa 2	3,41%	4.43%
Scaniverse osa 3	3,91%	6.23%
vGIS Scan osa 1	3,07%	2.58%
vGIS Scan osa 2	3,18%	2.88%
vGIS Scan osa 3	3,27%	3.49%
3D Scanner App "LiDAR Advanced" osa 1	2,69%	1.98%
3D Scanner App "Point Cloud" osa 1	2,61%	6.00%
3D Scanner App "LiDAR Advanced" osa 2	6,71%	1.87%
3D Scanner App "Point Cloud" osa 2	8,00%	7.98%
SiteScape osa 1	197,30%	146.57%
SiteScape osa 2	395,07%	257.67%

Joonis 17 kujutab test 1 ühe toru (toru nr 3 keskosa) punktipilvede väljalõikeid ning punktipilvede põhjal sobitatud ringjooni, mis kujutavad toru väliskontuuri. Antud joonis kinnitab ka eelnevalt kirjeldatud juttu SiteScape punktipilve liigse tiheduse kohta. Kuigi

sobitatud ringjoon SiteScape osa 2 kohta klapi üsna hästi nominaalse välisläbimõõduga, on antud punktipilve üsna keeruline kasutada teostusjooniste või mudelite koostamisel, kuna punktipilv vajab täiendavat puhastamist ja järeltöötlust. Sarnaselt SiteScape tarkvarale jäljendavad ka 3D Scanner App „Point Cloud“ punktipilvede järgi sobitatud ringjooned spetsifikatsiooni järgi antud välisläbimõõtu hästi, kuid punktipilv on väga mürane ning vajab lisa järeltöötlust. Scaniverse, vGIS Scan ja 3D Scanner App „LiDAR Advanced“ punktipilved aga kujutavad üsna täpselt toru väliskontuuri kuju ning ka sobitatud ringjoonte läbimõõdud ühtivad üsna täpselt toru tegeliku välisläbimõõduga. Joonis 17 järgi suudavad Scaniverse osa 2 ja vGIS Scan osa 2 mõõdistustulemused kirjeldada toru geomeetriat kõige täpsemalt.



**Joonis 17.** Test 1 toru nr 3 (vt Joonis 8) punktipilvede keskmised väljalõiked. Punktipilved on kujutatud siniselt, toru välisläbimõõtu spetsifikatsiooni järgi (110 mm) on kujutatud musta ringjoonena ja punased ringjooned tähistavad punktipilvede järgi sobitatud välisdiameetreid (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).



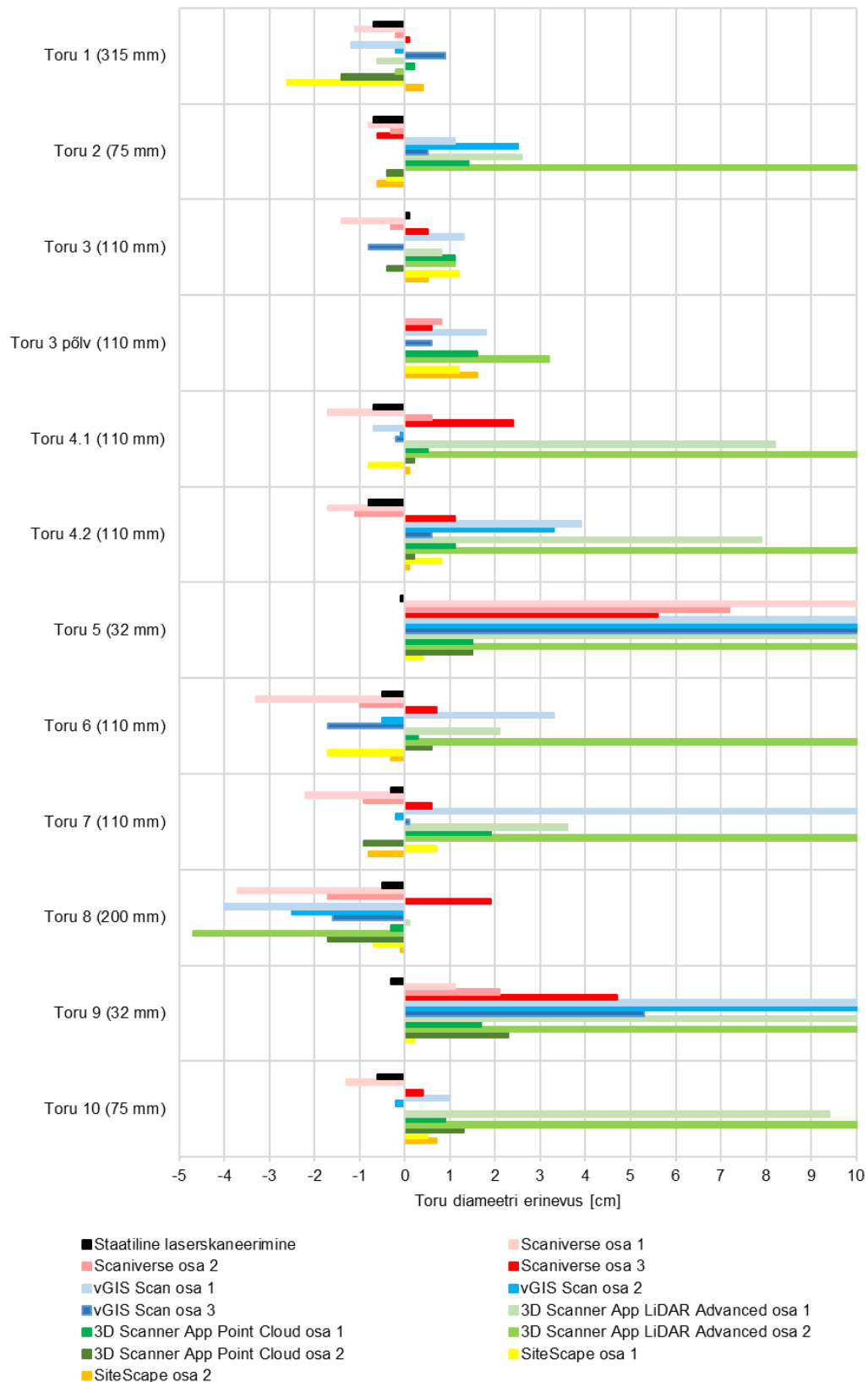
Joonis 18 kujutab kõikide torude punktipilvede väljalõigete järgi sobitatud ringjoonte välisläbimõõtude erinevust võrreldes spetsifikatsioonis esitatud välisläbimõõtudega. Iga toru kohta tehtud kolme või nelja väljalõike järgi sobitatud ringjoonte diameetrid keskmistati ning saadi iga toru kohta keskmine läbimõõt. Seda läbimõõtu võrreldi tegeliku välisläbimõõduga. Erinevused joonisel on näidatud sentimeetrites. Staatilisest laserskaneerimisest saadud keskmised torude välisläbimõõdud on üldiselt kõikide torude puhul maksimaalselt kuni 1 cm väiksemad spetsifikatsiooni järgi antud välisläbimõõtudest. Torul, mille läbimõõt on 315 mm, on maksimaalne välisläbimõõdu erinevus kuni 3 cm. Torul läbimõõduga 200 mm on maksimaalne välisläbimõõdu erinevus kuni 5 cm. Torude DN 110 mm ja väiksemate puhul kasvavad välisläbimõõtude erinevused veelgi. Torude DN 32 välisläbimõõtude erinevused on kõige väiksemad SiteScape tarkvara puhul, kuid nagu demonstreeris Joonis 17, siis punktipilv ei pruugi siiski visuaalselt kasutatav olla ilma täiendava järeltötluseta. Üldiselt näitavad Scaniverse ja vGIS Scan üsna sarnaseid tulemusi; mõlemad tarkvarad on võimelised tuvastama katsetatud torude läbimõõtusid (v.a torudel läbimõõduga 32 mm) suhteliselt hea täpsusega. Enamjaolt erinevad eelnimetatud tarkvaradega mõõdetud ja nominaalsed torude läbimõõdud (v.a 32 mm läbimõõduga torul) keskmiselt  $\pm 2$  cm ning olenevalt kasutatud liikumiskiirusest ja -trajektoorist võib täpsus keskmisest langeda või tõusta 1 cm ulatuses. 3D Scanner App mõõdistuste järgi aga kipuvad ka suuremate torude (kuni 110 mm läbimõõduga k.a.) diameetrite erinevused nominaalsetest läbimõõtudest kahekordistuma või veelgi suurenema võrreldes Scaniverse ja vGIS Scan tulemustega. Tulemused, mis tulpdiaagrammil kujutavad erinevust 10 cm, on tegelikult suuremad, kuid antud graafikul suuremate erinevuste kujutamise ei osutunud asjakohaseks.

Gollob jt (2021) ja Tatsumi jt (2023) järeldasid enda uuringutest, et väiksemate läbimõõtudega puude tüvede (alla 2 dm läbimõõduga) diameetrite määramine Apple LiDAR sensoriga skaneeritud punktipilvedest andis tavaliselt tegelikkusest suurema läbimõõdu tulemuse. Samas olid suuremate tüvede diameetrid Apple LiDAR punktipilvedest määratletud tegelikkusest väiksemate diameetritega. Antud tendents on nähtav ka käesolevas katses torude diameetrite määramisel. Kuni 110 mm välisläbimõõtudega torude diameetrid on määratud suurematena, samas kui üle 110 mm välisläbimõõtudega torude diameetrid on määratud väiksematena tegelikkusest.

Mis puutub torude eri materjalidesse, siis antud juhul ei ole mõõdistustäpsus piisav andmaks adekvaatseid hinnanguid, mis moodi eri materjalid mõõdistustäpsust mõjutavad. Tulemustest võib järeldada, et võrreldes torude läbimõõtudega ei oma torude materjal kuigi suurt mõju.



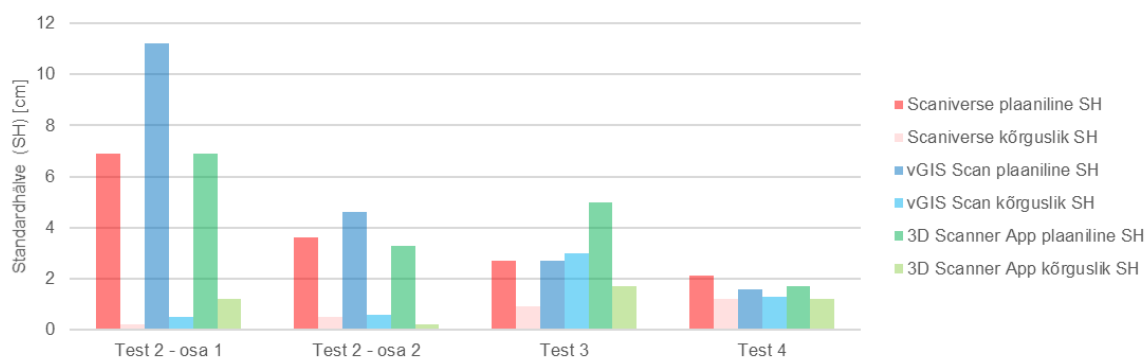
Saadud tulemusi arvestati välimõõdistuste katsetuste läbiviimisel. Skaneerimise meetodika osas võeti aluseks sisekatsetuse osa 2 meetodika ehk liikumiskiirus oli rahulik ning sensori kõrgus muutumatu. Kuna 3D Scanner App „Point Cloud“ andis mitterahuldava punktipilve visuaalse tulemuse (vt Joonis 17), siis välikatsetustel seda edasi ei testitud. Samuti, kuigi SiteScape andis lootusrikkaid tulemusi, ei olnud välikatsetustel seda võimalik kasutada piiratud mõõdistusala suuruse tõttu tasuta versioonis. Seega testiti välikatsetustel vaid Scaniverse, vGIS Scan ning 3D Scanner App „LiDAR Advanced“ skaneerimise tarkvarasid.



**Joonis 18.** Test 1 torude punktipilvede järgi määratud keskmiste välisdiameetrite ja spetsifikatsiooni järgi ette antud välisläbimõõtude erinevused.

## 5.2. Välitingimustes läbiviidud katsetuste tulemused

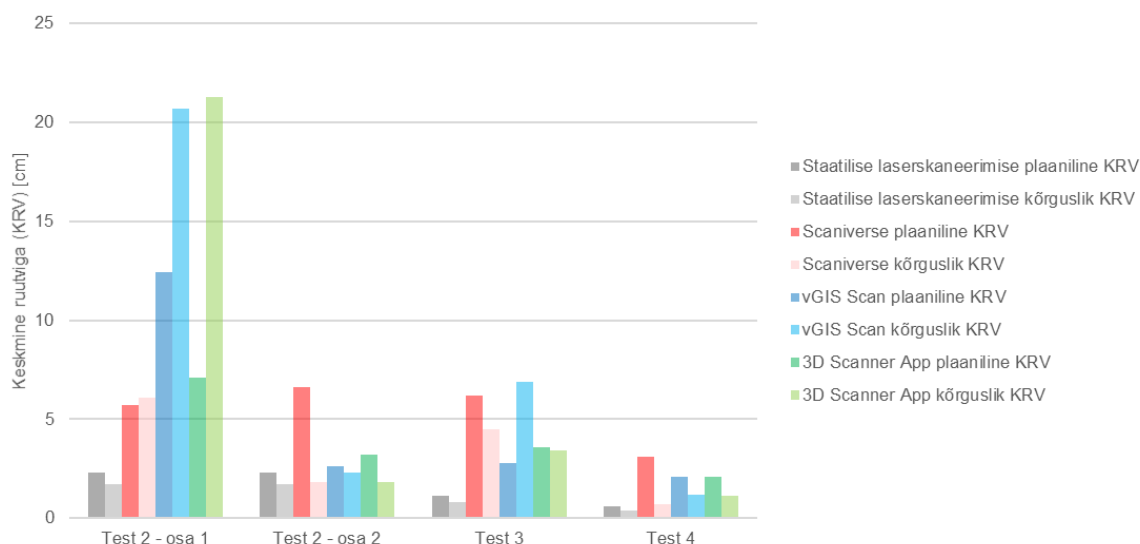
Välimõõdistuste koordineerimise käigus sobitati RTK-GNSS koordinaadid madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvedes tähiste tsentritega. Joonis 19 kujutab tekkinud jääkhälvete plaanilisi ning kõrguslikke standardhälvete väärtuseid. Kõrguslikud standardhälvete hinnangud jäävad enamjaolt kõikide mõõdistuste korral alla 2 cm, välja arvatud test 3 vGIS Scan tarkvara puhul. Antud täpsus viitab sellele, et punktipilved ei sisalda suuri moonutusi. Mõnevõrra kõrgemad standardhälvete väärtused on jälgitavad XY-tasandi plaanilises võrdluses. Antud tendentsi võib soodustada punktipilvede moonutatud värvimine tarkvara siseselt, mis tähendab, et värvid punktipilves ilmuvad nihkega. Selle tõttu on võimalik olukord, kus spreivärviga märgitud tähis, mis on tasapinnaline, ilmub lõplikus punktipilves nihkega valesse kohta. Võimalikud värvimoonutused võivad olla ka põhjuseks, miks plaanilised standardhälbed test 2 osas 1 on suuremad kui test 2 osas 2, kuigi skaneerimise trajektoorid ja kõrgused väljaspool kaevikut olid samad. Test 2 esimese osa mõõdistuste ajal oli Apple LiDAR sensor suunatud peamiselt kaeviku keskele, suunates sensorit tähistele ainult nende läheduses. Seevastu test 1 teise osa mõõdistuste ajal oli sensor suunatud järjepidevalt tähistele. Mõõdistuse suuna muutus osa 1 uuringute ajal võis põhjustada suuremaid värvimoonutusi.



**Joonis 19.** Välikatsetuste standhälvete hinnangud punktipilvede koordineerimise kohta (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Kõikide välikatsetuste võrdlus tahhümeetriga mõõdetud tehnovõrkude elementide (vt oranžid tähised Joonis 10) ja staatilise laserskaneerimise punktipilvedest saadud elementide koordinaatide vahel annab keskmise ruutvea väärtused ligikaudselt kuni 2 cm (vt Joonis 20), mis annab hea hinnangu staatilise laserskaneerimise tulemuste usaldusväärsusele. Sarnased võrdlused madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdistuste kohta annavad keskmise ruutvea väärtused enamasti kuni 6 cm, mis näitab suhteliselt head sensori mõõdistamise võimekust. Erandiks on test 2 osa 1 mõõdistused, kus keskmise ruutvea väärtused ulatuvad kuni 21,3 cm (vt Joonis 20). Esimese osa

mõõdistuste oluliselt kehvem tulemus võrreldes teise osaga on ilmselt tingitud suurematest mõõdistuskaugustest, mis soodustavad punktipilvede moonustumist. See võrdlus näitab, et Scaniverse on ainus tarkvaralahendus (testitud tarkvarade seas), mis suudab pakkuda mõistlikke tulemusi suuremate mõõdistuskauguste puhul. Joonis 20 andmed on detailsemalt kujutatud Tabel 13.



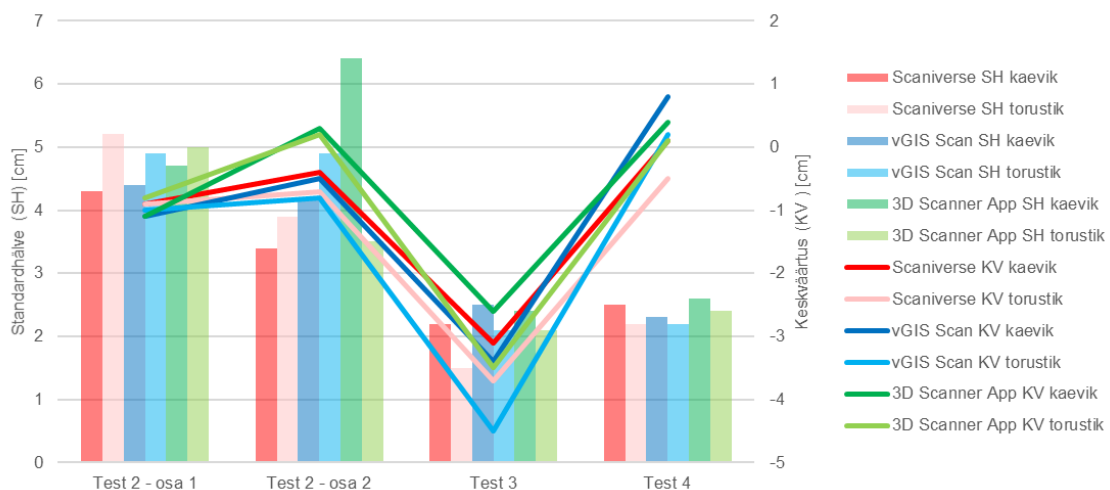
**Joonis 20.** Tahhümeetriliselt mõõdetud ja punktipilvedest määratud tehnovõrkude elementide koordinaatide erinevuste keskmised ruutvead (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

**Tabel 13.** Tahhümeetriliselt mõõdetud ja punktiilvest määratud tehnovõrkude elementide koordinaatide keskmised ruutvead.

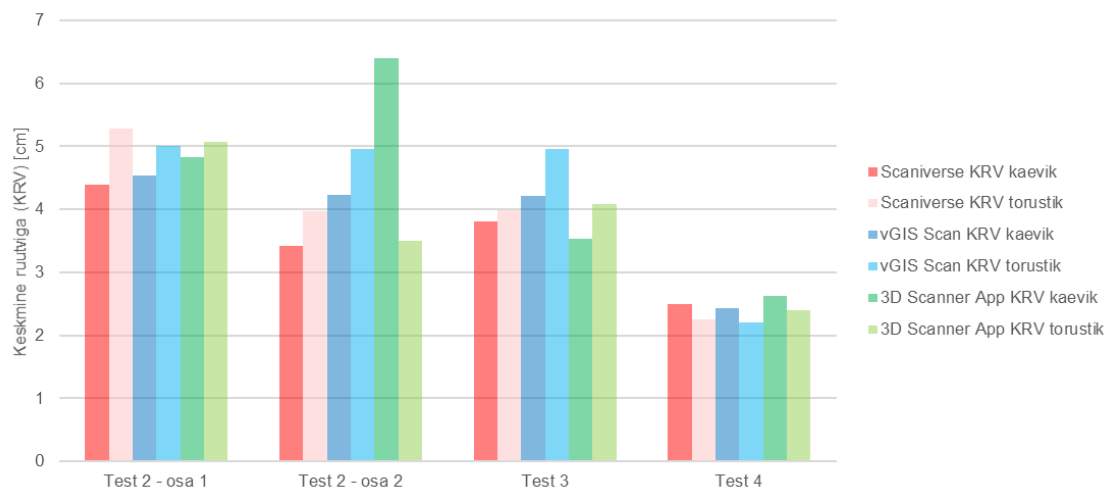
Katsetus	Tahhümeeter mõõdistuse võrdlus ...	$KRV_x$ [cm]	$KRV_y$ [cm]	$KRV_z$ [cm]	$KRV_{xyz}$ [cm]
Test 2	Staatiline laserskaneerimine	1,8	1,5	1,7	2,9
	Scaniverse osa 1	4,3	3,7	6,1	7,8
	Scaniverse osa 2	4,3	5,0	1,8	6,9
	vGIS Scan osa 1	10,4	6,7	20,7	24,1
	vGIS Scan osa 2	1,2	2,3	2,3	3,5
	3D Scanner App osa 1	6,0	3,8	21,3	22,4
	3D Scanner App osa 2	2,8	1,5	1,8	3,6
Test 3	Staatiline laserskaneerimine	0,8	0,7	0,8	1,3
	Scaniverse	2,7	5,6	4,5	7,7
	vGIS Scan	1,5	2,4	6,9	7,4
	3D Scanner App	1,3	3,4	3,4	5,0
Test 4	Staatiline laserskaneerimine	0,5	0,3	0,4	0,7
	Scaniverse	2,8	1,3	0,7	3,2
	vGIS Scan	1,4	1,5	1,2	2,4
	3D Scanner App	1,3	1,6	1,1	2,3

Joonis 21 ja Joonis 22 võtavad kokku statistilised väärtused madala hinnaklassi LiDAR sensori mõõdistuste ja staatilise laserskaneerimise punktipilvede erinevuste kohta.

Tulemuste põhjal on Apple LiDAR sensori võimekus üsna paljulubav, kuna keskmised ruutvead punktipilvede erinevuste kohta (vt Joonis 22) jäävad üldiselt 5 cm piiresse, välja arvatud kaeviku võrdlus 3D Scanner App test 2 osa 2 ajal; torustike võrdlus aga annab keskmise ruutvea tulemused alla 4 cm. Ootamatult sarnased tulemused on test 2 osade 1 ja 2 kohta, mis viitab sellele, et ka osa 1 mõõdistustest saadud kaeviku ja torustiku geomeetria on tabatud üsna hästi. Test 3 ja 4 saavutasid väga hea täpsuse võrreldes staatilise laserskaneerimisega: test 3 standardhälbed jäid valdavalt 2,1 cm juurde (küll aga võib märgata kuni umbes -4 cm süstemaatilist nihet, mis võib tuleneda RTK-GNSS meetodil punktipilvede koordineerimise tarbeks määratud tähiste juhuslikust veast, mis võis tekkida näiteks teleskoop-sau külge kinnitatud GNSS vastuvõtja valest kõrguse määrangust) ning test 4 keskmised ruutvead olid kuni 2,4 cm.

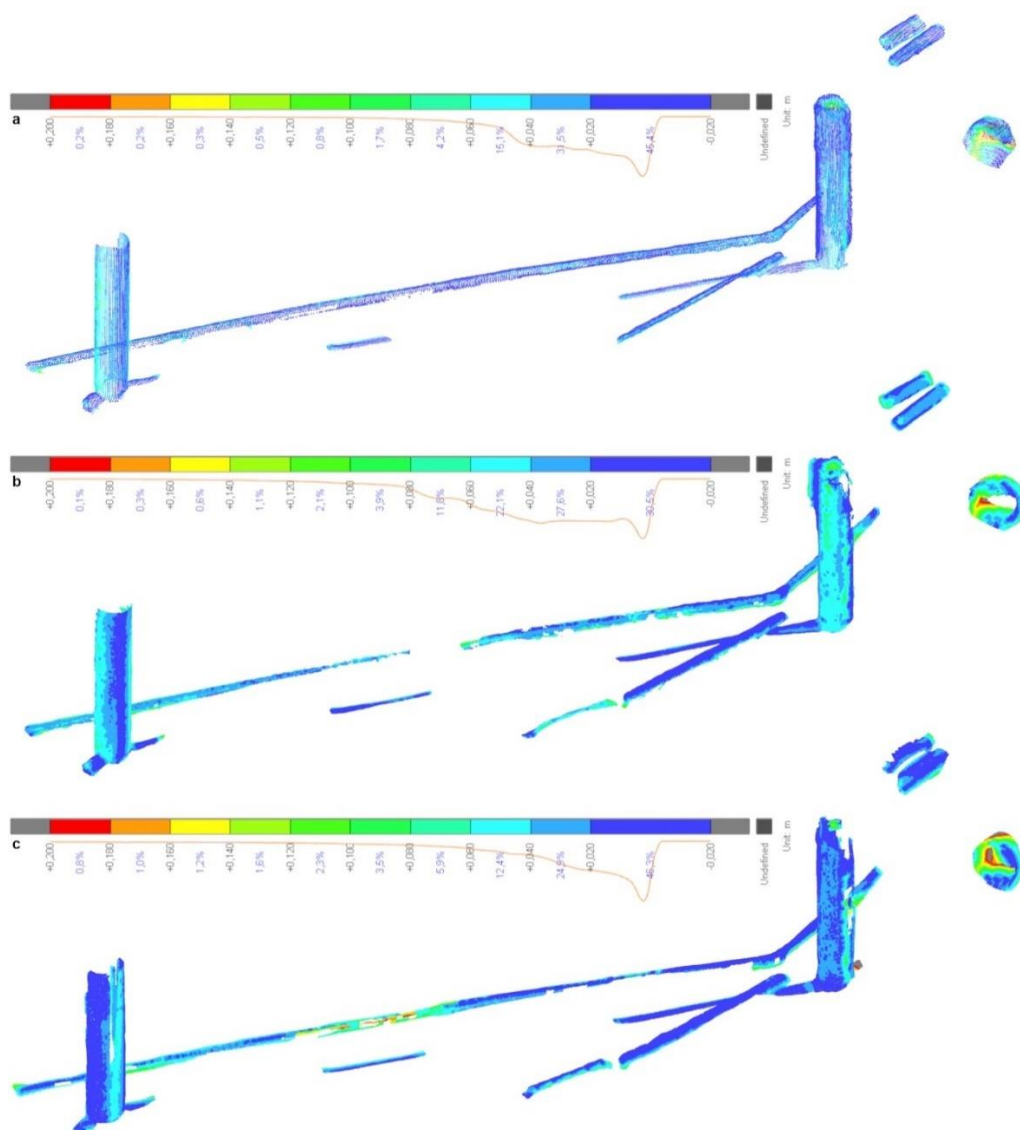


**Joonis 21.** Välikatsetuste standardhälbed ja keskväärtused madala hinnaklassi LiDAR mõõdistuse ja staatilise laserskaneerimise vahel (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).



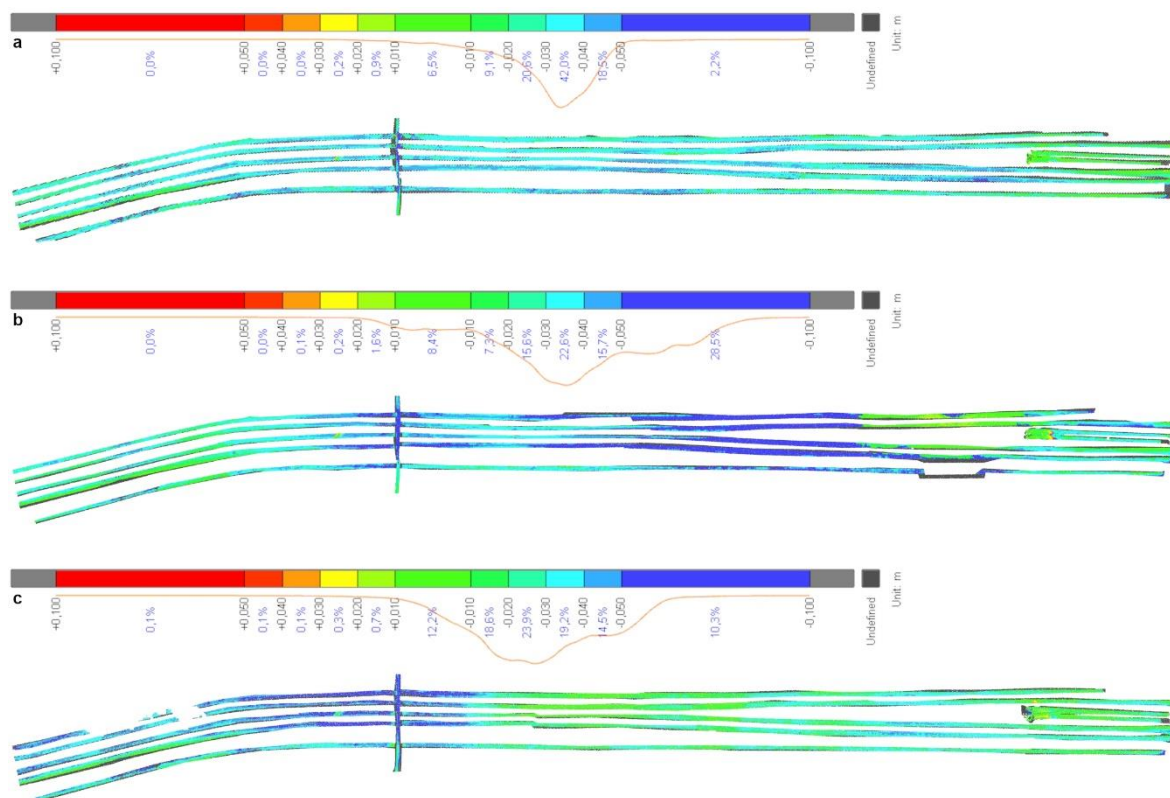
**Joonis 22.** Välikatsetuste keskmised ruutvead madala hinnaklassi LiDAR mõõdistuse ja staatilise laserskaneerimise vahel (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Joonis 23, 24 ja 25 kujutavad madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvede erinevusi võrreldes staatilise laserskaneerimise punktipilvega. Erinevuste visualiseerimiseks on kasutatud Cyclone 3DR tarkvara. Värviskaala näitab punktipilvede erisusi, kusjuures toodud on ka hälvete jaotused. Test 2 osa 2 puhul on näha, et erinevustega vahemikus  $\pm 2$  cm on Scaniverse tarkvaraga mõõdistatud 45,4% punktipilvest (vt Joonis 23a) ja 3D Scanner App tarkvaraga 46,3% (vt Joonis 23c). Samas on vGIS Scan mõõdistatud andmete protsent antud vahemikus mõnevõrra väiksem – 30,5% (vt Joonis 23b). Lisaks on näha, et vGIS Scan tarkvaraga mõõdistatud torustiku punktipilv on suuremate katkestustega ja moonutustega kui Scaniverse ja 3D Scanner App punktipilved (vt veetoru kulgemist ja kaevude kujusid).



**Joonis 23.** Test 2 osa 2 Scaniverse (a), vGIS Scan (b) ja 3D Scanner App (c) punktipilvede erinevused staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

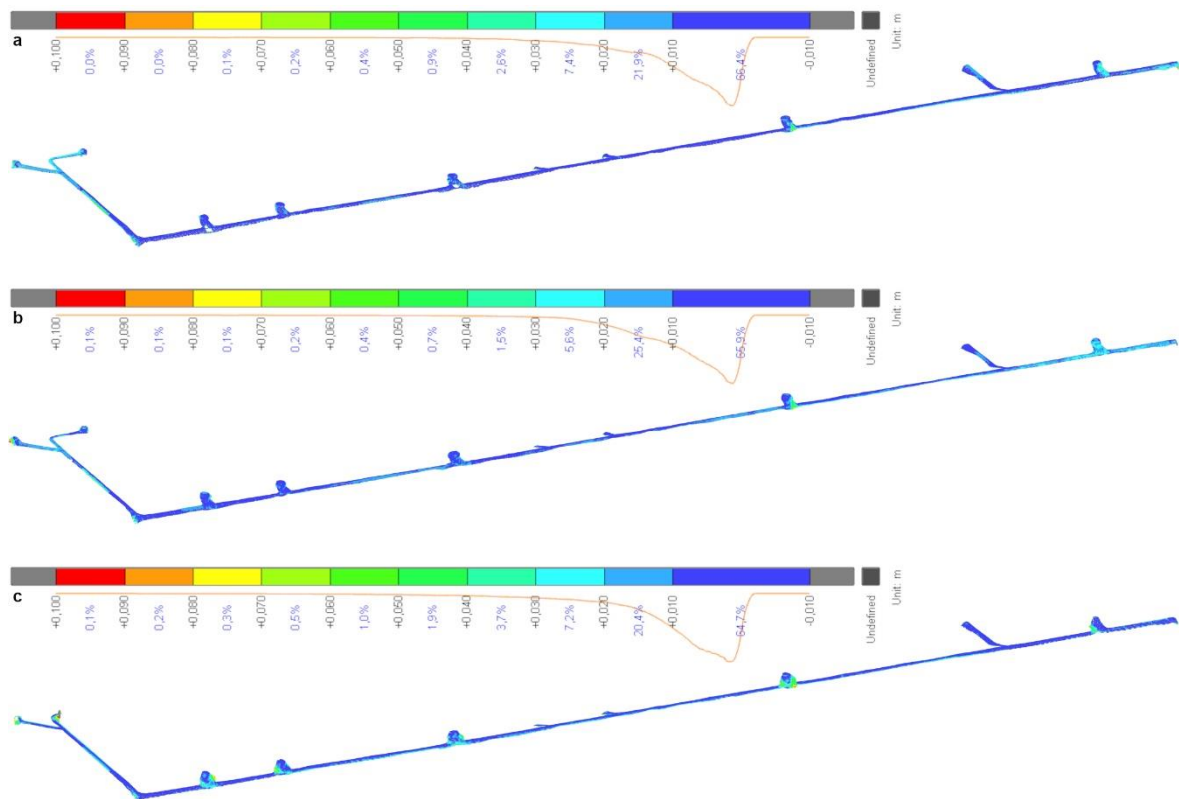
Test 3 punktipilvede erinevuste joonis näitab, et kõikide testitud tarkvarade puhul püsivad punktipilvede hälbed võrreldes staatilise laserskaneerimise punktipilvega enamjaolt vahemikus -1 cm ... -5 cm. Scaniverse tarkvara puhul on antud erinevuste vahemikus 90,2% punktipilvest (vt Joonis 24a), vGIS Scan tarkvara puhul – 61,2% (vt Joonis 24b) ning 3D Scanner App puhul – 76,2% (vt Joonis 24c). Allolevalt jooniselt on näha, et kõige vähem moonutusi on Scaniverse tarkvaraga skaneeritud punktipilves. Tarkvara vGIS Scan puhul on punktipilve parempoolses osas näha, kuidas kaks kaitsetoru kulgevad ebaloomulikult jõnksutades, mis viitab tõenäoliselt sellele, et madala hinnaklassi LiDAR sensoriga skaneeritud andmed ja värvimaterjal fotodelt ei ole korrektselt kombineeritud. Ka 3D Scanner App puhul on märgata sarnaseid moonutusi punktipilve keskosas, kus kaks toru näiliselt katkevad ning edasi kulgevad kaks uut, eraldiseisvat toru; tegelikkuses see aga nii ei ole. Lisaks on vasakus osas punktipilv katkendlik.



**Joonis 24.** Test 3 Scaniverse (a), vGIS Scan (b) ja 3D Scanner App (c) punktipilvede erinevused staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Test 4 mõõdistuste puhul püsivad madala hinnaklassi LiDAR sensoriga skaneeritud punktipilvede erinevused võrreldes staatilise laserskaneerimise punktipilvega enamjaolt vahemikus  $\pm 1$  cm. Scaniverse tarkvaraga skaneeritud punktipilvest on 66,4% eelkirjeldatud erinevustega (vt Joonis 25a), vGIS Scan tarkvara puhul 65,9% (vt Joonis

25b) ning 3D Scanner App puhul 64,7% (vt Joonis 25c). Alloleval joonisel ei ole näha suuri punktipilve moonutusi toru kulgemises, küll aga vaadates toru elemente, näiteks põlvedest koosnevaid vertikaalseid ülesviike, on näha punktipilvedes liigset müra ja moonutusi. Eriti suured moonutused ülesviikude puhul on nähtavad 3D Scanner App tarkvara skaneeringus. Vähesed moonutused horisontaalses torustiku osas on tingitud ilmselt sellest, et skaneerimine madala hinnaklassi LiDAR sensoriga oli teostatud liikudes mööda kaeviku põhja ainult ühes suunas, samas kui rohkemate moonutustega punktipilved olid skaneeritud ringjoonelise liikumismustriga (st testid 2 ja 3).



**Joonis 25.** Test 4 Scaniverse (a), vGIS Scan (b) ja 3D Scanner App (c) punktipilvede erinevused staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Lisas C toodud Joonised C1 kuni C9 kujutavad torustike lõikeid, mis on koostatud kasutades Civil 3D tarkvara ning staatilise laserskaneerimise ja madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvi. Lõigete asukohad on kujutatud joonisel 15.

Test 2 lõige 1-1 (vt Joonis C1) kujutab ristlõiget kaeviku seinast väljuvatest torustike otstest. Ristlõiked näitavad, et väiksemas läbimõõdus kahe kaitsetoru mõõdistamisel saavutas parimaid tulemusi Scaniverse samas kui suure toru mõõdistamine tekitas teatud moonutusi. Tarkvara vGIS Scan aga see eest sai paremini hakkama suure toru mõõdistamisega. 3D Scanner App näitab vGIS Scan tarkvarale sarnaseid tulemusi. Test



2 lõige 2-2 (vt Joonis C2) näitab selgelt, et parima tulemuse pika lõigu ca 10 cm läbimõõduga veetoru mõõdistamisel saavutas jällegi Scaniverse tarkvara. vGIS Scan ja 3D Scanner App osa 1 skaneeringutes on näha suuri punktipilve moonutusi. Samas ka vGIS Scan osa 2 skaneeringus on nähtavad moonutused toru vasakus osas, kuid palju väiksemas mahus ja suuruses kui osa 1 moonutused. Test 2 lõige 3-3 (vt Joonis C3) kujutab kanalisatsiooni kaevusid ja nende vahel kulgevat kanalisatsiooni toru. Jooniselt on jällegi näha, et vGIS Scan tarkvaraga on punktipilves moonutused suurimad võrreldes teiste tarkvarade punktipilvedega. Scaniverse tarkvara kujutab skaneeritud kaeve väiksemana, kui need tegelikkuses on, 3D Scanner App aga suuremana. Kanalisatsiooni toru on kõikide tarkvarade osa 1 mõõdistuse puhul jäänud madalamale kui see tegelikkuses asub.

Test 3 lõige 1-1 (vt Joonis C4) kujutab ristlõiget painutatud kaitsetorude ülesviikudest ning kaevikus paiknevatest kaitsehülssidest. Antud lõikes on näha, et kõikide tarkvarade puhul paiknevad torud madalamal, kui need tegelikult peaksid paiknema. Vertikaalsete ülesviikude kujutamiseks ei saanud hakkama ükski testitud tarkvaradest. Sarnaselt test 3 lõikele 1-1 on ka lõiked 2-2 (vt Joonis C5) ja 3-3 (vt Joonis C6) kujutatud ristlõigetena kaevikus paiknevatest torudest ning ka tendents on täpselt sama, mis eelneva lõike puhul – kõikide tarkvarade punktipilved paiknevad reaalsusest madalamal. Nagu varem mainitud, siis siin võib põhjuseks olla GNSS vastuvõtja valesti määratud kõrgus teleskoop-saual.

Test 4 lõike 1-1 (vt Joonis C7) näol on tegemist kanalisatsioonitoru ja selle elementide kombineeritud piki- ja ristlõikest. Vasakpoolne osa kujutab ristlõiget peatorust ning parempoolne osa on pikilõige peatorust hargnevast torust. Jooniselt on nähtav, et 3D Scanner App tarkvaraga skaneeritud tulemus jäljendab kõige täpsemini reaalselt toru, samas kui Scaniverse ja vGIS Scan tarkvarad skaneerisid toru tegelikkusest veidi kõrgemale. Peatoru on aga kõikide tarkvarade puhul kujutatud üsna täpselt nii kõrguslikult kui ka plaaniliselt. Lõige 2-2 (vt Joonis C8) kujutab jällegi kanalisatsioonitoru ristlõiget, kus on näha, et Scaniverse jäljendab kõige täpsemini toru reaalselt kuju ja asukohta. Lõige 3-3 (vt Joonis C9) kujutab pikilõiget kanalisatsioonitorust ja kahest vertikaalsest ülesviigust. Horisontaalne toruosa on mõõdistatud üsna täpselt kõikide testitud tarkvarade puhul, aga samas vertikaalsed ülesviigid jäljendavad reaalselt olukorda ainult Scaniverse tarkvara puhul. vGIS Scan ja 3D Scanner App tarkvara tulemused sisaldavad moonutusi ja punktipilve müra vertikaalsete ülesviikude ümber, mis on nähtavad ka joonisel 25.

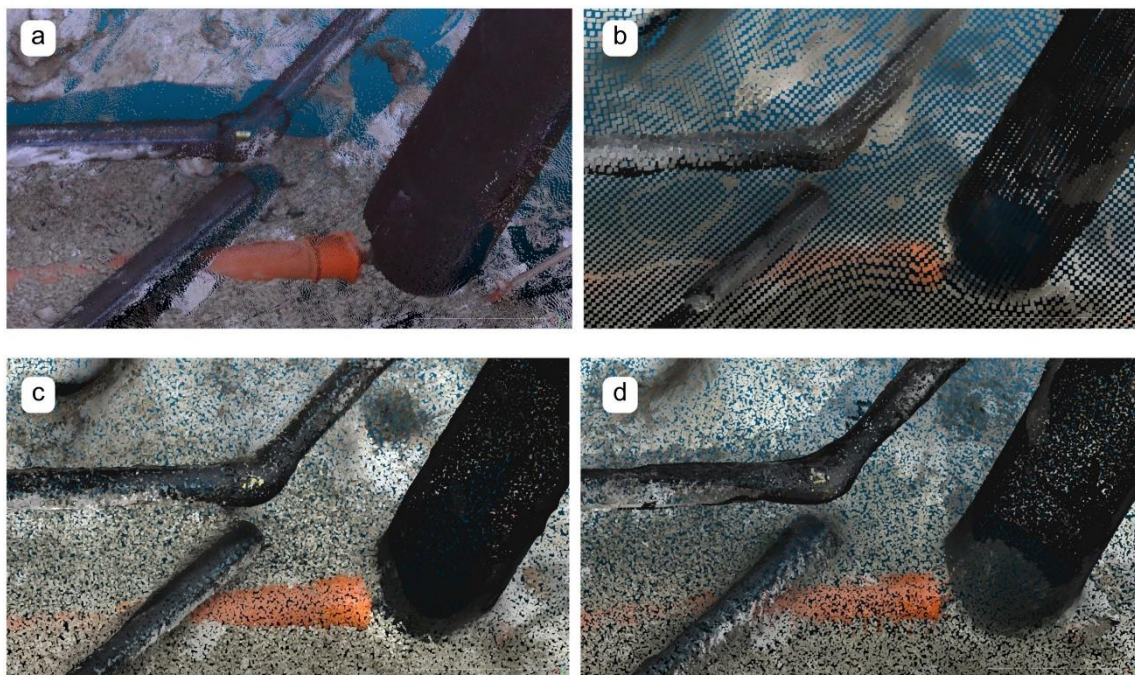
Tabel 14 kujutab välikatsetuste LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilvede tihedust protsentuaalselt staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes. Sarnaselt sisekatsetuse mõõdistusele on ka välikatsetuste punktipilvede puhul võrreldud eraldi terve kaeviku punktipilvi ja ainult torustiku ning nende elementide punktipilvi. Tulemustest järeldeb, et Scaniverse tarkvara punktipilved kõikide välikatsetuste puhul on kordades hõredamad võrreldes teiste testitud tarkvarade punktipilvedega. Ka Joonis 26 näitab, et Scaniverse tarkvaraga punktipilv on silmnähtavalt hõredam kui vGIS ja 3D Scanner App tarkvaradega mõõdetud punktipilved. Antud asjaolu ei ole aga kooskõlas sisetingimustes läbiviidud katsetusega, kus Scaniverse tarkvara pakkus enamjaolt tihedamat punktipilve kui vGIS Scan või 3D Scanner App „Lidar Advanced“ tarkvarad (mõõdistuste parameetrid olid alati samad). Peamiseks erinevuseks sise- ja välikatsetuste vahel oli mõõdistatava ala suurus; välikatsetustes olid uuritud palju suurema pindalaga alad. Suure tõenäosusega sõltub Scaniverse tarkvara andmetöötlus mõõdistusala suurusest, mis tähendab, et suurematel mõõdistusaladel väheneb punktipilvede tihedus muutes lõpp-punktipilvede failide suurused võimalikult väikseks. Seda tõestab ka asjaolu, et Joonis 26b kujutatud Scaniverse tarkvaraga skaneeritud punktipilv on üsna korrapärase punktide asetusega, samas kui vGIS Scan ja 3D Scanner App punktipilvedes on punktide asetused ebakorrapärased. See viitabki sellele, et Scaniverse tarkvara optimeerib sisemiselt punktipilve tihedust vastavalt ala suurusele ning see võib osutada probleemiks väga ulatuslike alade skaneerimisel.

**Tabel 14.** Välikatsetuste madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilvede tiheduse protsentuaalne võrdlus staatilise laserskaneerimise punktipilve suhtes (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Test	Mõõdistusmeetod/tarkvara	Kaevik	Torustik
Test 2	Staatiline laserskaneerimine	98,31 mln punkti	2,06 mln punkti
	Scaniverse osa 1	0,48%	0,85%
	Scaniverse osa 2	0,71%	1,73%
	vGIS Scan osa 1	5,10%	9,13%
	vGIS Scan osa 2	5,98%	12,01%
	3D Scanner App osa 1	4,80%	9,67%
	3D Scanner App osa 2	5,08%	11,77%
Test 3	Staatiline laserskaneerimine	70,45 mln punkti	17,79 mln punkti
	Scaniverse	0,30%	0,32%
	vGIS Scan	2,29%	2,26%
	3D Scanner App	1,36%	1,45%

**Tabel 14 jätk.**

Test	Mõõdistusmeetod/tarkvara	Kaevik	Torustik
Test 4	Staatiline laserskaneerimine	13,25 mln punkti	2,63 mln punkti
	Scaniverse	1,15%	1,34%
	vGIS Scan	5,55%	6,16%
	3D Scanner App	3,58%	4,10%

**Joonis 26.** Test 2 osa 2 väljavõtte staatilise laserskaneerimise (a); Scaniverse (b), vGIS Scan (c); 3D Scanner App (d) punktipilvedest (Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Tabel 15 kujutab test 2 ja test 4 isevoolse kanalisatsiooni torude kaldeid. Test 2 ehitusobjektil määrati kalle torule, mis kulges kahe kaevu vahel (vt Lisa C, Joonis). Test 4 ehitusobjektil oli uuritavaks objektiks Joonis 6 siniseks värvitud toru osa. Tabelis 15 on toodud lisaks madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvedest tuletatud kalletele ka projektse torustike kalded ning tahhümeetrilisel ja staatilise laserskaneerimise meetodil määratud torustike kalded. Test 4 tulemused näitavad ideaalset tulemuste ühtivust kõikide meetodite lõikes. Test 2 aga kujutab mõnevõrra erinevaid tulemusi. Esimene lahknevus, mida tuleks käsitleda, on staatilise laserskaneerimise punktipilvest saadud kalde ja projektse ning tahhümeetriliselt mõõdistatud kalde erinevus. Siinkohal tuleb mainida, et tahhümeetrilisel meetodil määratud toru kalle oli mõõdistatud peale kaeviku tagasitäite tegemist, kaevude seest. Kõige tõenäolisem põhjendus kallete erinevusele on see, et peale test 2 mõõdistust

lahtise kaevikuga ning enne kaeviku sulgemist torude asukohta kohendati, mis võis olla ka põhjuseks tahhümeetrilise ja staatilise laserskaneerimise mõõdistuste erinevusele. Eelkirjeldatud asjaolu tõttu tugineb järgnev analüüs test 2 kallete osas staatilise laserskaneerimise andmetele.

**Tabel 15.** Kanalisatsioonitorude erinevate meetoditega tuvastatud kalded (modifitseeritud Jerjomina ja Varbla, retsenseerimisel).

Meetod	Kalle		
	Test 2 osa 1	Test 2 osa 2	Test 4
Projekteeritud	0,007		0,008
Tahhümeetriline mõõdistus	0,007		0,008
Staatiline laserskaneerimine	0,010		0,008
Scaniverse	0,004	0,007	0,008
vGIS Scan	0,006	0,010	0,008
3D Scanner App	0,006	0,009	0,007

Test 2 osa 1 mõõdistuste puhul on madala hinnaklassi LiDAR sensoriga mõõdetud punktipilvedest määratud kalded alahinnatud võrreldes staatilise laserskaneerimise punktipilve põhise kaldega (vt Tabel 15). Arvestades, et iPad'i hoiti umbes 1,2 m kõrgusel kaeviku servast ning kaeviku sügavus oli kuni 3 meetrit, siis oli vahemaa uuritava toru ja sensori vahel kuni umbes 5 meetrit (arvestades ka mõningast kallet, kuna tuli seista kaeviku servas, mitte selle kohal), mis on samas ka sensori maksimaalne mõõdistusulatus. Sellisel juhul võis suur mõõdistuskaugus mõjutada kalde hinnangut punktipilve moonutuste tõttu. Oluliselt paremad tulemused on nähtavad test 2 osa 2 mõõdistustes, mis toimusid kaeviku põhjas. Kuigi Scaniverse punktipilvest saadud kalle on alahinnatud väärtusega 0,007, vastavad vGIS Scan ja 3D Scanner App tulemused staatilise laserskaneerimise punktipilvest määratud kaldele väärtusega 0,010 hästi.

## 6. KOKKUVÕTE

Eestis hetkel kehtiv MTM määrus nr 34 (2016) sätestab järgmised täpsusnõuded maa-aluste tehnovõrkude teostusmöödistustele: i) plaaniline täpsus 8 cm, ii) kõrguslik täpsus 3 cm kaevuluukide puhul ja iii) kõrguslik täpsus kaevus asuvate elementide puhul 3 cm + 1% kaevu või toru sügavusest kaevuluugi kõrgusega võrreldes. Sama määrus käsitleb ka maa-aluste tehnovõrkude teostusmöödistust lahtise kaevikuga, välja arvatud juhul, kui maa-alused torustikud paigaldatakse kinnise kaeviku meetodil. Paraku aga geodeedil sageli pole võimalik täita viimast nõuet (st teostusmöödistamist lahtise kaevikuga) mitmetel põhjustel. Üheks neist on näiteks tänapäeval kehtiv töömudel, mis keskendub ehitussektoris võimalikult suurele raha kokkuhoiule, tihtipeale just ehitusgeodeetiliste tööde arvelt. Samuti on veel üheks mõjukaks põhjuseks tehnovõrkude teostusmöödistamisel kinnise kaevikuga tihe ehitusgraafik; tihtipeale ei ole ehitajatel võimalik oodata geodeedi saabumist objektile, et teostada möödistus enne kaeviku tagasitäitmist, kuna muud tööd tulevad peale ja ehitus ei saa seiskuda ning oodata möödistuse järgi. Maa-aluste tehnovõrkude teostusmöödistustega kaasnevate probleemide üle on korduvalt laialdaselt arutatud ka Eesti Geodeetide Ühingu (EGÜ juhatus, 2024).

Üheks võimalikuks lahenduseks eeltoodud probleemile võiks olla ehitusobjektile tegutsevate ehitajate kaasamine möödistustöösse; piisava väljaõppe ja geodeedi juhiste ning toega võiksid objektidel tegutsevad ehitajad teostada maa-aluste tehnovõrkude teostusmöödistusi iseseisvalt, kasutades just punktipilve andmekorje meetodit, kuna sellisel juhul on andmed üsna raskesti manipuleeritavad võrreldes üksikute punktide möödistusega. Kuna Apple'i seadmete kasutamine skaneerimiseks on kättesaadav ja intuiitvne (st ehitajad on võimelised neid seadmeid kasutama), siis uuriti antud magistr töö raames, kas Apple LiDAR sensoriga varustatud seadmed sobiksid maa-aluste tehnovõrkude teostusmöödistuste teostamiseks.

Nii sisetingimustes kui ka välistingimustes teostatud katsetuste tulemused näitavad, et MTM määruses nr 34 nõutav plaaniline täpsus 8 cm on madala hinnaklassi LiDAR sensori kasutamisel igati saavutatav, vähemalt kuni 100 m<sup>2</sup> suuruste möödistusalade puhul. Tulevased uuringud peaksid keskenduma veelgi ulatuslikumatele tehnovõrkude möödistusaladele. Samuti on selle magistr töö raames tõestatud, et madala hinnaklassi LiDAR sensori kasutamisel on võimalik saavutada kõrguslikku täpsust kuni 3 cm, kuid hetkel jääb see ka Apple LiDAR sensori puhul piirväärtuseks. Samas, arvestades laserskaneerimise tehnoloogia kiiret arengut ning tänapäeva tendentsi arendada võimekust ruumiandmete kogumiseks nutiseadmeid kasutades, võib oletada, et

lähitulevikus paraneb mõõdistustäpsus veelgi. Kuigi suur kõrguslik täpsus on oluline, eriti just isevoolsete torustike mõõdistamisel, et kontrollida torustike kallet, siis tegelikkuses surve- ja kaitsetorustikele võiks olla vastuvõetav ka madalam absoluutkõrguse määranu täpsus. Asjakohane on rõhutada, et isegi vähesel määral moonutatud punktipilved maa-alustest tehnovõrkudest on oluliselt täpsemad ning usaldusväärsemad alternatiivid andmekorjele, kui ehitaja ütlused, kaevetööde jäljed või foto- ja videomaterjal, mis on tänapäeval sageli aluseks teostusdokumentatsiooni koostamisele.

Isevoolsete torustike puhul sai näidatud, et Apple LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvedest on võimalik määrata kallete suunda ja suurust võrdlemisi usaldusväärset. Samas tuleb arvestada, et mida lühem on uuritava toru lõik, seda vähem täpseks ning ebausaldusväärsemaks muutub toru kalde määranu uuritavas lõigus. Madala hinnaklassi LiDAR sensori mõõdistuskaugust tuleks võimalusel vähendada (ka teised uuringud näitavad, et optimaalne mõõdistuskaugus on 1-2 m), kuna suurem kaugus suurendab punktipilve moonutusi (vt ka Çakir jt, 2021; Bobrowski jt, 2023; Teo ja Yang, 2023). Lisaks kalde määramisele sai käesolevas töös tõestatud, et Apple LiDAR sensoriga mõõdistatud punktipilvede põhjal on võimalik määrata üle 200 mm läbimõõduga torustike diameetreid üsna suure usaldusväärseusega, sealjuures sõltumata kasutatavatest mõõdistustarkvaradest. Väiksemate läbimõõtudega torude puhul andis aga ainult SiteScape hea tulemuse (ka toru välisläbimõõduga 32 mm puhul). Teistes uuringutes (Teppati Losè jt, 2022; Askar ja Sternberg, 2023) on samuti täheldatud SiteScape'i head toimivust ning seda tuleks tulevastes uuringutes käsitleda põhjalikumalt. Tulemused viitavad ka sellele, et 110 mm ja väiksemate torude läbimõõdud on üle hinnatud, samas kui 200 mm ja 315 mm torude läbimõõdud kipuvad alahinnatud olema. See tulemus vastab ka puutüvede läbimõõtude hinnangutele varasemalt teostatud uuringutes (vt Gollob jt, 2021; Tatsumi jt, 2023).

Lisaks sellele, et Apple seadmetega skaneerimise teostamine on lihtne ja intuitiivne, on nende suureks eeliseks ka seadmete mobiilsus. Välistingimustes katsetuste kõige pikem mõõdistusaeg Apple LiDAR sensoriga oli ca 5 minutit, mis oli lühem kui ühe staatilise laserskaneerimise jaama mõõdistusaeg (6 min 36 sek). Võrreldes geodeetiliste täppismõõdistuse instrumentidega on Apple seadmed ka palju odavamad (Apple seadmete hinnavahe on umbes 1000-2000 €). Apple LiDAR punktipilvede esialgne andmetöötlus on teostatav otse läbi kõikide katsetatud skaneerimise tarkvarade, kusjuures siinkohal on oluline välja tuua, et kõikide testitud skaneerimise tarkvarade puhul olid kasutusel tasuta versioonid. Esialgse andmetöötluse tulemuseks valmib igati kasutatav punktipilv. Sellegipoolest vajab punktipilve täiendav puhastamine ja

georefereerimine kolmandat tarkvara, nagu näiteks antud töö raames kasutatud vabavaralist tarkvara CloudCompare.

Kokkuvõttes näitasid antud töö raames läbiviidud uuringud, et Apple LiDAR sensoril on potentsiaal saavutada maa-aluste tehnovõrkude mõõdistamiseks vajalik täpsus; tulemused jäid üldiselt vahemikku 2 cm kuni 5 cm. Magistritöö autori arvates, arvestades kõikide katsetuste tulemusi, võiks Scaniverse sobida uuritud tarkvaradest kõige paremini tehnovõrkude teostusmõõdistamiseks. Sisekatsetusest selgus, et Scaniverse suudab üsna usaldusväärset määrata torude läbimõõtusid, üldiselt täpsusega  $\pm 2$  cm. Lisaks oli test 1 toru ristlõike jooniselt näha, et Scaniverse mõõdistatud punktipilv jäljendab üsna täpselt toru pealispinna kuju ning punktipilves puudub müra, mis raskendaks tehnovõrgu pealispinna määramist mõõdistustulemustest. Välikatsetustes näitas Scaniverse samuti häid tulemusi, sisaldades kõige vähem visuaalselt tuvastatavaid moonutusi punktipilvedes. Tehnovõrkude vertikaalsete elementide (nt ülesviikude) kuju jäljendamise detailsus oli eelnimetatud tarkvaraga mõõdistustel parim.

Kõik läbiviidud katsetused näitavad, kuidas Apple'i seadmed loovad uusi andmete kogumise võimalusi ning seetõttu saab järeldada, et Apple LiDAR sensorid võivad aidata lahendada ka tiheda ehitusgraafiku tõttu tekkivaid probleeme, mis tavaliselt takistavad maa-aluste tehnovõrkude mõõdistamist kvaliteetsel ja usaldusväärset moel.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- 3D Scanner App. (2024). 3D Scanner App. Loetud 20. mai 2024 aadressil <https://3dscannerapp.com/>
- Alijani, Z.; Meloche, J.; McLaren, A.; Lindsay, J; Roy, A.; Berg, A. (2022). A comparison of three surface roughness characterization techniques: photogrammetry, pin profiler, and smartphone-based LiDAR. *International Journal of Digital Earth*, 15 (1), 2422-2439. <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2160842>
- Alizadeh-Khameneh, M. A.; Horemuž, M.; Jensen, A. B. O.; Andersson, J. V. (2018). Optimal vertical placement of total station. *Journal of Surveying Engineering*, 144 (3), #06018001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000255](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000255)
- Alsadik, B.; Karam, S. (2021). The Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-An Overview, *JASTT*, vol. 2, no. 02, pp. 147–158. <https://doi.org/10.38094/jastt204117>
- Apple. (2024). iPad Pro. Loetud 20. aprill 2024 aadressil <https://www.apple.com/ipad-pro/>
- Askar, C.; Sternberg, H. (2023). Use of smartphone lidar technology for low-cost 3D building documentation with iPhone 13 Pro: a comparative analysis of mobile scanning applications. *Geomatics*, 3 (4), 563–579. <https://doi.org/10.3390/geomatics3040030>
- Autodesk ReCap Pro (2024). *Registration Quality Report*. Loetud 04. september 2024 aadressil [https://help.autodesk.com/view/RECAP/ENU/?guid=scan\\_register\\_quality](https://help.autodesk.com/view/RECAP/ENU/?guid=scan_register_quality)
- Bai, H.; Sinfield, J. V. (2020). Improved background and clutter reduction for pipe detection under pavement using ground penetrating radar (GPR). *Journal of Applied Geophysics*, 172, #103918. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103918>
- Bobrowski, R.; Winczek, M.; Zięba-Kulawik, K.; Wężyk, P. (2023). Best practices to use the iPad Pro LiDAR for some procedures of data acquisition in the urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 79, #127815. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127815>
- Brach, M.; Tracz, W.; Krok, G.; Gąsior, J. (2023). Feasibility of low-cost LiDAR scanner implementation in forest sampling techniques. *Forests*, 14 (4), #706. <https://doi.org/10.3390/f14040706>
- Burchi, B. M. J.; Theuerkauf, E. J. (2024). Comparative analysis of sandy beach and foredune geomorphic change measurements from Apple lidar and small-occupied aerial systems. *Scientific Reports*, 14 (1), #12828. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63466-1>



- Çakir, G. Y.; Post, C. J.; Mikhailova, E. A.; Schlautman, M. A. (2021). 3D LiDAR scanning of urban forest structure using a consumer tablet. *Urban Science*, 5 (4), #88. <https://doi.org/10.3390/urbansci5040088>
- Chase, C. E.; Liscio, E. (2023). Technical note: validation of Recon-3D, iPhone LiDAR for bullet trajectory documentation. *Forensic Science International*, 350, #111787. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.111787>
- Corradetti, A.; Seers, T.; Mercuri, M.; Calligaris, C.; Busetto, A.; Zini, L. (2022). Benchmarking different SfM-MVS photogrammetric and iOS LiDAR acquisition methods for the digital preservation of a short-lived excavation: a case study from an area of sinkhole related subsidence. *Remote Sensing*, 14 (20), #5187. <https://doi.org/10.3390/rs14205187>
- Desai, J.; Liu, J.; Hainje, R.; Oleksy, R.; Habib, A.; Bullock, D. (2021). Assessing vehicle profiling accuracy of handheld LiDAR compared to terrestrial laser scanning for crash scene reconstruction. *Sensors*, 21 (23), #8076. <https://doi.org/10.3390/s21238076>
- Díaz-Vilariño, L.; Tran, H.; Frías, E.; Balado, J.; Khoshelham, K. (2022). 3D mapping of indoor and outdoor environments using Apple smart devices. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B4-2022, 303–308. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2022-303-2022>
- EarthScope Consortium (s.a.). Terrestrial Laser Scanning. Loetud 16. oktoober 2024 aadressil <https://www.earthscope.org/what-is/tls/>
- Eesti Soojuspumba Liit (s.a.). ESPL-i sisesed ühtsed soojuspumpade paigaldusnormid. Loetud 13. september 2024 aadressil <http://www.soojuspumbaliit.ee/Normid>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2015). Äravoolu- ja kanalisatsioonitorutike ehitamine ja katsetamine (EVS-EN 1610:2015) <https://www.evs.ee/et/evs-en-1610-2015>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2019+A1:2021). KAUGKÜTTETORUD Soojusisoleeritud konsolideeritud üksik- ja kaksiktorusüsteemide projekteerimine ja paigaldamine vahetult maasse paigaldatud soojaveevõrkudele. Osa 1: Projekteerimine (EVS-EN 13941-1:2019+A1:2021) <https://www.evs.ee/et/evs-en-13941-1-2019-a1-2021-consolidated>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2019+A1:2021). KAUGKÜTTETORUD Soojusisoleeritud konsolideeritud üksik- ja kaksiktorusüsteemide projekteerimine ja paigaldamine vahetult maasse paigaldatud soojaveevõrkudele. Osa 2: Paigaldamine (EVS-EN 13941-2:2019+A1:2021) <https://www.evs.ee/et/evs-en-13941-2-2019-a1-2021-consolidated>

- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2021). Hoone kanalisatsioon (EVS 846:2021) <https://www.evs.ee/et/evs-846-2021>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2022). Veevarustuse välisvõrk (EVS 921:2022) <https://www.evs.ee/et/evs-921-2022>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2022). Äravoolu- ja kanalisatsioonitorustike kaevikuta ehitamine ja katsetamine (EVS-EN 12889:2022) <https://www.evs.ee/et/evs-en-12889-2022>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2023). Katuseehitusreeglid osa 5: Lamekatused (EVS 920-5:2023) <https://www.evs.ee/et/evs-920-5-2023>
- Eesti Statistikaamet. (s.a.) EH04: EHITUSLOA SAANUD JA KASUTUSSE LUBATUD ELURUUMID. Loetud 15. september 2024 aadressil [https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus\\_\\_ehitus\\_\\_ehitus-ja-kasutusload/EH04/table/tableViewLayout2](https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__ehitus__ehitus-ja-kasutusload/EH04/table/tableViewLayout2)
- EGÜ juhatus. (2024) Tehnovõrkude andmete kättesaadavus, nende kvaliteet, võrguvaldajate suhtumine, protseduur, vastutuse jagunemine. Geodeet, 52 (76), 12-14.
- Ehitusgiid. (2024) Elekter ja side. Loetud 11. september 2024 aadressil <https://www.ehitusgiid.ee/tehno/elekter-side>
- Ehitusgiid. (2024) Gaas. Loetud 10. september 2024 aadressil <https://www.ehitusgiid.ee/tehno/gaas>
- Ehitusgiid. (2024) Küte, jahutus ja ventilatsioon. Loetud 11. september 2024 aadressil <https://www.ehitusgiid.ee/tehno/kute-jahutus-ventilatsioon>
- Ellmann, A.; Märdla, S.; Oja, T. (2020) The 5 mm geoid model for Estonia computed by the least squares modified Stokes's formula. Survey Review, 52 (373), 352-372. <https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1583848>
- ESA Navipedia (s.a.). GNSS. Loetud 18. august 2024 aadressil <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS>
- ESA Navipedia (s.a.). GNSS Receivers General Introduction. Loetud 18. august 2024 aadressil [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS\\_Receivers\\_General\\_Introduction](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Receivers_General_Introduction)
- FARO. (2013). FARO laser scanner Focus<sup>3D</sup> X 330. Loetud 15. Juuli 2024 aadressil [https://ats.se/pdf/faro/FARO\\_Laser\\_Scanner\\_Focus3D\\_X\\_330\\_Tech\\_Sheet.pdf](https://ats.se/pdf/faro/FARO_Laser_Scanner_Focus3D_X_330_Tech_Sheet.pdf)
- Forkuo, G. O.; Borz, S. A. (2023). Accuracy and inter-cloud precision of low-cost mobile LiDAR technology in estimating soil disturbance in forest operations. Frontiers in Forests and Global Change, 6, #1224575. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1224575>

- Gaasivõrk ettevõttestandard (GV-TS 1:2021). PE torustike ehituse tehniline spetsifikatsioon. Loetud 14. september 2024 aadressil <https://www.gaas.ee/wp-content/uploads/pe-torustike-ehituse-tehniline-spetsifikatsioon-v-1-21.pdf>
- Gentili, F.; Madonna, S. (2024). Photogrammetry from UAV and low-cost lidar for sinkhole hazard mitigation in urban areas: applications and evaluations. *Geographies*, 4 (2), 343–362. <https://doi.org/10.3390/geographies4020020>
- Gollob, C.; Ritter, T.; Kraßnitzer, R.; Tockner, A.; Nothdurft, A. (2021). Measurement of forest inventory parameters with Apple iPad Pro and integrated LiDAR technology. *Remote Sensing*, 13 (16), #3129. <https://doi.org/10.3390/rs13163129>
- GPRS (s.a.). Utility locating: electromagnetic locating. Loetud 14. september 2024 aadressil <https://www.gp-radar.com/manuals/utility-locating-electromagnetic-locating>
- Granshaw, S. I. (2020). Photogrammetric terminology: fourth edition. The Photogrammetric Record. Loetud 17. august 2024 aadressil <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/phor.12314>
- Haenel, R.; Semler, Q.; Semin, E.; Grussenmeyer, P.; Tabbone, S. (2022). Evaluation of low-cost depth sensors for outdoor applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2/W1-2022, 101–108. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-101-2022>
- Hao, T.; Rogers, C. D. F.; Metje, N.; Chapman, D. N.; Muggleton, J. M.; Foo, K. Y.; Wang, P.; Pennock, S. R.; Atkins, P. R.; Swingler, S. G.; Parker, J.; Costello, S. B.; Burrow, M. P. N.; Anspach, J. H.; Armitage, R. J.; Cohn, A. G.; Goddard, K.; Lewin, P. L.; Orlando, G.; Redfern, M. A.; Royal, A. C. D.; Saul, A. J. (2012). Condition assessment of the buried utility service infrastructure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 331–344. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.10.011>
- Hexagon (s.a.). What are Global Navigation Satellite Systems? Loetud 18. august 2024 aadressil <https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss>
- Horemuž, M.; Jansson, P. (2017). Optimum establishment of total station. *Journal of Surveying Engineering*, 143 (2), #06016004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000207](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000207)
- Jerjomina, A.; Varbla, S. (retsenseerimisel). Advantages of low-cost LiDAR sensors in surveying underground utility networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*.

- Kaugkütteseadus. (2003) Seadus jõustunud 01. Juuli 2003.  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/103032017012?leiaKehtiv>
- King, F.; Kelly, R.; Fletcher, C. G. (2022). Evaluation of LiDAR-derived snow depth estimates from the iPhone 12 Pro. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, #7003905. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3166665>
- Kottner, S.; Thali, M. J.; Gascho, D. (2023). Using the iPhone's LiDAR technology to capture 3D forensic data at crime and crash scenes. *Forensic Imaging*, 32, #200535. <https://doi.org/10.1016/j.fri.2023.200535>
- Künnapuu, A. (2020) Ebatäpsetest tehnovõrguandmetest tekkinud ressursikulu analüüs ning lahendusettepanekud teedeehituse objektidel.  
<https://digikogu.taltech.ee/en/Item/d42df526-0e62-4087-afed-71a7f122f689>
- Lague, D.; Brodu, N.; Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–26.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Luetzenburg, G.; Kroon, A.; Bjørk, A. A. (2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an application in geosciences. *Scientific Reports*, 11 (1), #22221.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>
- Maiese, A.; Manetti, A. C.; Ciallella, C.; Fineschi, V. (2022). The introduction of a new diagnostic tool in forensic pathology: LiDAR sensor for 3D autopsy documentation. *Biosensors*, 12 (2), #132.  
<https://doi.org/10.3390/bios12020132>
- Majandus- ja taristuministerium. Määrus nr 34. (2016) Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmöödistamisele esitatavad nõuded. Määrus vastu võetud 14. aprill 2016. Loetud 13. september 2024 aadressil  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/119042016003>
- Majandus- ja taristuministerium. Määrus nr 34. Lisa 1 (2016) Digitaalsel joonisel kasutatavad leppemärgid ja kihijaotus.  
[https://www.riigiteataja.ee/akt/lisa/1190/4201/6003/MKM\\_m34\\_lisa1.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/akt/lisa/1190/4201/6003/MKM_m34_lisa1.pdf#)
- Majandus- ja taristuministerium. Määrus nr 34. Lisa 2 (2016) Leppemärkide kujud.  
[https://www.riigiteataja.ee/akt/lisa/1190/4201/6003/MKM\\_m34\\_lisa2.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/akt/lisa/1190/4201/6003/MKM_m34_lisa2.pdf#)
- Majandus- ja taristuministerium. Määrus nr 34. Lisa 3 (2016) Tehnovõrgu sidus ühendamine.  
[https://www.riigiteataja.ee/akt/lisa/1190/4201/6003/MKM\\_m34\\_lisa3.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/akt/lisa/1190/4201/6003/MKM_m34_lisa3.pdf#)
- Majandus- ja taristuministerium. Määrus nr 73. (2015) Ehitise kaitsevööndi ulatus, kaitsevööndis tegutsemise kord ja kaitsevööndi tähistusele esitatavad nõuded. Määrus jõustunud 01. juuli 2015.  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/103022022020>

- Majandus- ja taristuministeerium. Määrus nr 74. (2015) Elektripaigaldise käidule ja elektritööle esitatavad nõuded. Määrus jõustunud 01. juuli 2015. <https://www.riigiteataja.ee/akt/105012024010?leiaKehtiv#para2>
- Majandus- ja taristuministeerium. Määrus nr 86. (2015) Auditi kohustusega elektripaigaldised ning nõuded elektripaigaldise auditile ja auditi tulemuste esitamisele. Määrus jõustunud 11. juuli 2015. <https://www.riigiteataja.ee/akt/108072015014?leiaKehtiv#para3>
- Marshall, A.; Morrison, R. R.; Jones, B.; Triantafillou, S.; Wohl, E. (2024). Handheld lidar as a tool for characterizing wood-rich river corridors. *River Research and Applications*, 40 (3), 353–364. <https://doi.org/10.1002/rra.4239>
- MEETOPTICS. (2024). Single-Photon Avalanche Diode (SPADs). Loetud 17. august 2024 aadressil <https://www.meetoptics.com/academy/single-photon-avalanche-diode>
- Monsalve, A.; Yager, E. M.; Tonina, D. (2023). Evaluating Apple iPhone LiDAR measurements of topography and roughness elements in coarse bedded streams. *Journal of Ecohydraulics*. <https://doi.org/10.1080/24705357.2023.2204087>
- Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., Landes, T., and Macher, H. (2021): FIRST ASSESSMENTS INTO THE USE OF COMMERCIAL-GRADE SOLID STATE LIDAR FOR LOW COST HERITAGE DOCUMENTATION, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B2-2021, 599–604, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-599-2021>
- Neon (2024). The National Ecological Observatory Network. Loetud 17. august 2024 aadressil <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics>
- Niclass, C. L.; Shpunt, A.; Agranov, G. A.; Waldon, M. C.; Rezk, M. A.; Oggier, T. (2019). Light detection and ranging sensor. US Patent No. 10,324,171 B2. [US10324171B2 - Light detection and ranging sensor - Google Patents](https://patents.google.com/patent/US10324171B2)
- Oberhofer, K.; Knopfli, C.; Achermann, B.; Lorenzetti, S. R. (2024). Feasibility of using laser imaging detection and ranging technology for contactless 3D body scanning and anthropometric assessment of athletes. *Sports*, 12 (4), #92. <https://doi.org/10.3390/sports12040092>
- Paukkonen, N. (2023). Towards a mobile 3D documentation solution. Video-based photogrammetry and iPhone 12 Pro as fieldwork documentation tools. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 6 (1), 143–154. <https://doi.org/10.5334/jcaa.135>

- PipeLife (2009, 07. august). Reovee kanalisatsioon. [https://www.pipelife.ee/content/dam/pipelife/estonia/marketing/general/toote\\_dokumendid/kataloogid/Reoveekanalisatsioon\\_2408.pdf](https://www.pipelife.ee/content/dam/pipelife/estonia/marketing/general/toote_dokumendid/kataloogid/Reoveekanalisatsioon_2408.pdf)
- PipeLife (2023, detsember). Hoonesisene- ja väline kaablikaitse. [https://www.pipelife.ee/content/dam/pipelife/estonia/marketing/general/toote\\_dokumendid/kataloogid/KAABLIKAITSE%20KATALOOG.pdf](https://www.pipelife.ee/content/dam/pipelife/estonia/marketing/general/toote_dokumendid/kataloogid/KAABLIKAITSE%20KATALOOG.pdf)
- PipeLife (s.a.). PE gaasitorustik. Loetud 12. september aadressil [https://www.pipelife.ee/content/dam/pipelife/estonia/marketing/general/toote\\_dokumendid/kataloogid/gaas.pdf](https://www.pipelife.ee/content/dam/pipelife/estonia/marketing/general/toote_dokumendid/kataloogid/gaas.pdf)
- Pluta, P.; Siemek, D. (2023). Possibilities and limitations of using iPhone 13 Pro with built-in LiDAR sensor in cave research – on the example of paleoflow analysis in Mylna Cave (Western Tatra Mts, Poland). *Landform Analysis*, 42, 51–62. <https://doi.org/10.12657/landfana-042-004>
- Pratt, V. (1987). Direct least-squares fitting of algebraic surfaces. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 21 (4), 145–152. <https://doi.org/10.1145/37401.37420>
- Routescene. (2022). What is UAV LiDAR? Loetud 18. oktoober 2024 aadressil <https://www.routescene.com/resources/what-is-uav-lidar/>
- Rutkowski, W.; Lipecki, T. (2023). Use of the iPhone 13 Pro LiDAR scanner for inspection and measurement in the mineshaft sinking process. *Remote Sensing*, 15 (21), #5089. <https://doi.org/10.3390/rs15215089>
- Scaniverse. (2023). Scaniverse. Loetud 20. mai 2024 aadressil <https://scaniverse.com/>
- SiteScape. (2024). SiteScape. Loetud 20. mai 2024 aadressil <https://www.sitescape.ai/>
- Siu, K. L.; Lai, W. W. L. (2019). A lab study of coupling effects of electromagnetic induction on underground utilities. *Journal of Applied Geophysics*, 164, 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.02.002>
- Sokkia. (2017). GCX3 GNSS receiver. Loetud 21. mai 2024 aadressil [https://eu.sokkia.com/sites/default/files/product/downloads/sokkia\\_gcx3\\_brochure\\_sok\\_1041\\_reva\\_sm.pdf](https://eu.sokkia.com/sites/default/files/product/downloads/sokkia_gcx3_brochure_sok_1041_reva_sm.pdf)
- Stevenson, S.; Liscio, E. (2024). Assessing iPhone LiDAR & Recon-3D for determining area of origin in bloodstain pattern analysis. *Journal of Forensic Sciences*, 69 (3), 1045–1060. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15476>
- Su, Y.; Wang, J.; Wang, X.; Yao, Y.; Shou, W. (2023). 3D reconstruction in underground utilities. *Automation in Construction*, 156, #105100. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105100>
- Tallinna Vesi (s.a.) *Täpsusnõuded torustike ja kaevude paigaldamisel*. Loetud 24. juuli 2024 aadressil <https://tallinnavesi.ee/tehnilised-nouded/ehitamine-2-2/tapsusnouded-torustike-ja-kaevude-paigaldamisel/>

- Tamimi, R.; Toth, C. (2023). Comparison of iPhone 13 Pro's camera and LiDAR sensor to UAS photogrammetric model of the Great Pyramid of Giza. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-3-2023, 299–306. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-3-2023-299-2023>
- Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Amet (s.a.) Gaasiseadmed ja -paigaldised. Loetud 10. september 2024 aadressil <https://ttja.ee/ariklient/ohutus/tooted-teenused/gaasi-ja-surveseadmed>
- Tatsumi, S.; Yamaguchi, K.; Furuya, N. (2023). ForestScanner: a mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*, 14 (7), 1603–1609. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>
- Teo, T.-A.; Yang, C.-C. (2023). Evaluating the accuracy and quality of an iPad Pro's built-in lidar for 3D indoor mapping. *Developments in the Built Environment*, 14, #100169. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100169>
- Teppati Losè, L.; Spreafico, A.; Chiabrandò, F.; Giulio Tonolo, F. (2022). Apple LiDAR sensor for 3D surveying: tests and results in the cultural heritage domain. *Remote Sensing*, 14 (17), #4157. <https://doi.org/10.3390/rs14174157>
- Tontini, A.; Gasparini, L.; Perenzoni, M. (2020). Numerical model of spad-based direct time-of-flight flash lidar CMOS image sensors. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/18/5203>
- Topcon. (2016). GT series robotic total station. [https://sourceware.spillersusa.com/forms/spillers/INV/313GT\\_Series%20Brochure.pdf](https://sourceware.spillersusa.com/forms/spillers/INV/313GT_Series%20Brochure.pdf) (Loetud 21. mai 2024)
- Transpordiamet (2018-015). Nõuded tehnovõrkude ja -rajatiste teemaale kavandamisel. [https://www.transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2021-12/nouded\\_tehnovorkude\\_teemaale\\_kavandamisel\\_0%20%281%29.pdf](https://www.transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2021-12/nouded_tehnovorkude_teemaale_kavandamisel_0%20%281%29.pdf)
- Transpordiamet (2024). Täiendavad nõuded topo-geodeetilisele uuringule teede projekteerimisel. <https://transpordiamet.ee/media/2798/download>
- Uponor. (s.a.). Kaugkütte- ja jahutusvõrgud. Loetud 20. oktoober 2024 aadressil <https://www.uponor.com/et-ee/tooted/eelisooleeritud-torud-ecoflex/kutte-ja-jahutusvork#kaugkuttevork>
- Vacca, G. (2023) 3D survey with Apple LiDAR sensor – test and assessment for architectural and cultural heritage. *Heritage*, 6 (2), 1476-1501. <https://doi.org/10.3390/heritage6020080>

- vGIS. (2024). vGIS Scan. Loetud 20. mai 2024 aadressil <https://www.vgis.io/ar-augmented-reality-lidar-reality-capture-iphone-ipad-bentley-esri-autodesk-hexagon/>
- VSL. (s.a.). LiDAR. Loetud 01. oktoober 2024 aadressil <https://arhiiv.eki.ee/dict/vsl/index.cgi?Q=lidar>
- Wang, D.; Watkins, C.; Xie, H. (2020) MEMS mirrors for LiDAR: A review. Loetud 17. august 2024 aadressil <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7281653/>
- Wang, M., L.; Birken, R. (2022). Sensing solutions for assessing and monitoring roads. Sensor Technologies for Civil Infrastructures. Loetud 15. september 2024 aadressil <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102706-6.00020-9>



## LISAD

### Lisa A – RTK-GNSS mõõdetud tähiste koordinaadid

**Tabel A1.** Test 2 RTK-GNSS meetodil mõõdetud tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid toodud L-EST97 koordinaatide süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis.

Tähis	X	Y	H
GNSS-1	6588315,643	546183,891	46,594
GNSS-2	6588318,006	546179,450	46,238
GNSS-3	6588320,750	546188,052	46,618
GNSS-4	6588317,933	546191,696	46,622
GNSS-5	6588317,300	546196,575	46,628

**Tabel A2.** Test 3 RTK-GNSS meetodil mõõdetud tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid toodud L-EST97 koordinaatide süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis.

Tähis	X	Y	H
GNSS-1	6589437,781	551037,673	37,151
GNSS-2	6589439,060	551044,266	37,081
GNSS-3	6589432,617	551037,578	37,062
GNSS-4	6589429,763	551030,836	37,216
GNSS-5	6589428,928	551025,513	37,088
GNSS-6	6589431,494	551023,554	37,064
GNSS-7	6589434,904	551030,259	37,093

**Tabel A3.** Test 4 RTK-GNSS meetodil mõõdetud tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid toodud L-EST97 koordinaatide süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis.

Tähis	X	Y	H
GNSS-1	6589392,877	551031,671	37,023
GNSS-2	6589397,678	551029,158	36,655
GNSS-3	6589403,046	551027,105	36,556
GNSS-4	6589408,749	551023,840	36,684
GNSS-5	6589414,473	551024,905	37,064
GNSS-6	6589408,366	551027,515	37,056
GNSS-7	6589402,959	551030,421	36,975
GNSS-8	6589397,676	551032,699	36,950
GNSS-9	6589392,599	551035,222	37,034

## Lisa B – Staatilise laserskaneerimise tähiste koordinaadid

**Tabel B1.** Test 1 staatilise laserskaneerimise ning ka madala-hinnaklassi LiDAR sensori mõõdistuste tähiste koordinaadid. Plaanilised ja kõrguslikud koordinaadid on lokaalses süsteemis.

Tähise nimi	X	Y	H
T-00	6486221,041	558154,091	-0,740
T-01	6486223,712	558157,362	-0,564
T-02	6486224,357	558151,625	-0,394
T-03	6486224,630	558154,415	-0,833
T-04	6486223,249	558154,215	-1,183
T-05	6486222,546	558152,162	-1,194
T-06	6486221,296	558153,944	-1,186
T-07	6486222,526	558155,616	-1,181

**Tabel B2.** Test 2 staatilise laserskaneerimise tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid on L-EST97 süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis.

Tähise nimi	X	Y	H
T-75	6589393,431	551033,861	36,920
T-76	6589398,361	551028,968	37,102
T-77	6589389,696	551033,566	37,070
T-78	6589404,171	551028,723	36,975
T-79	6589407,167	551025,118	37,145

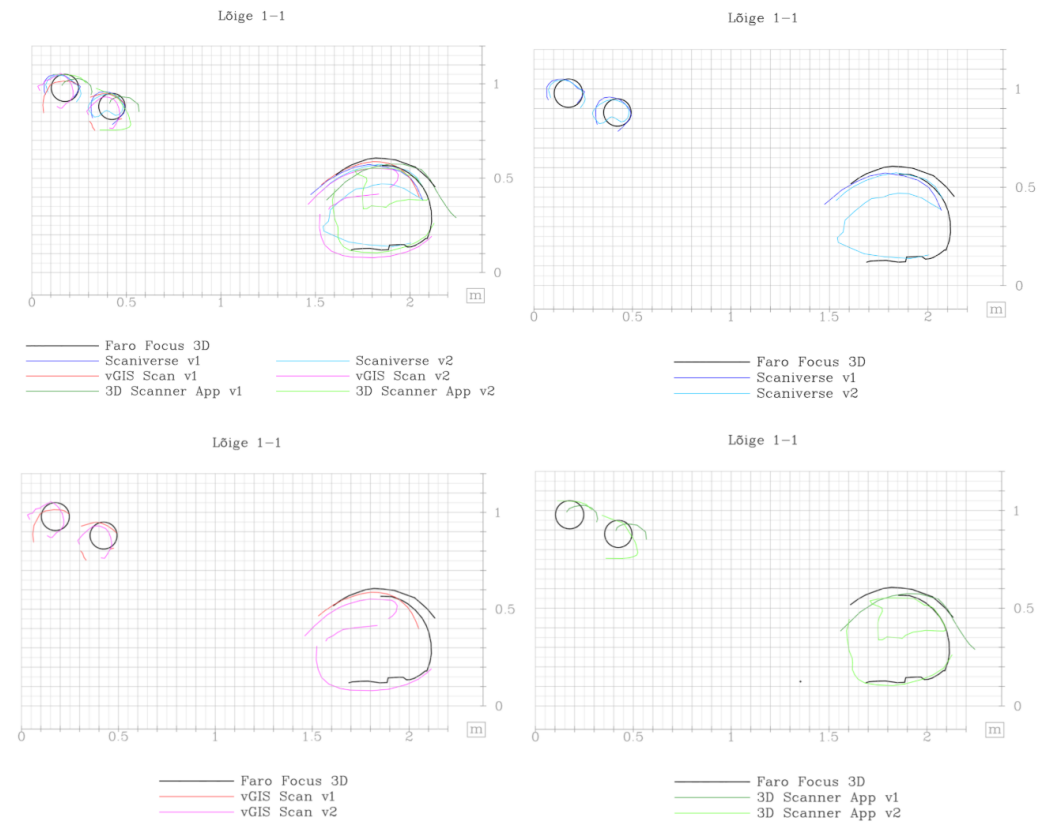
**Tabel B3.** Test 3 staatilise laserskaneerimise tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid on L-EST97 süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis.

Punkti nimi	X	Y	H
T-1	6589437,371	551040,255	36,925
T-70	6589430,417	551032,537	37,618
T-72	6589429,992	551029,332	37,455
T-73	6589431,780	551025,470	37,310

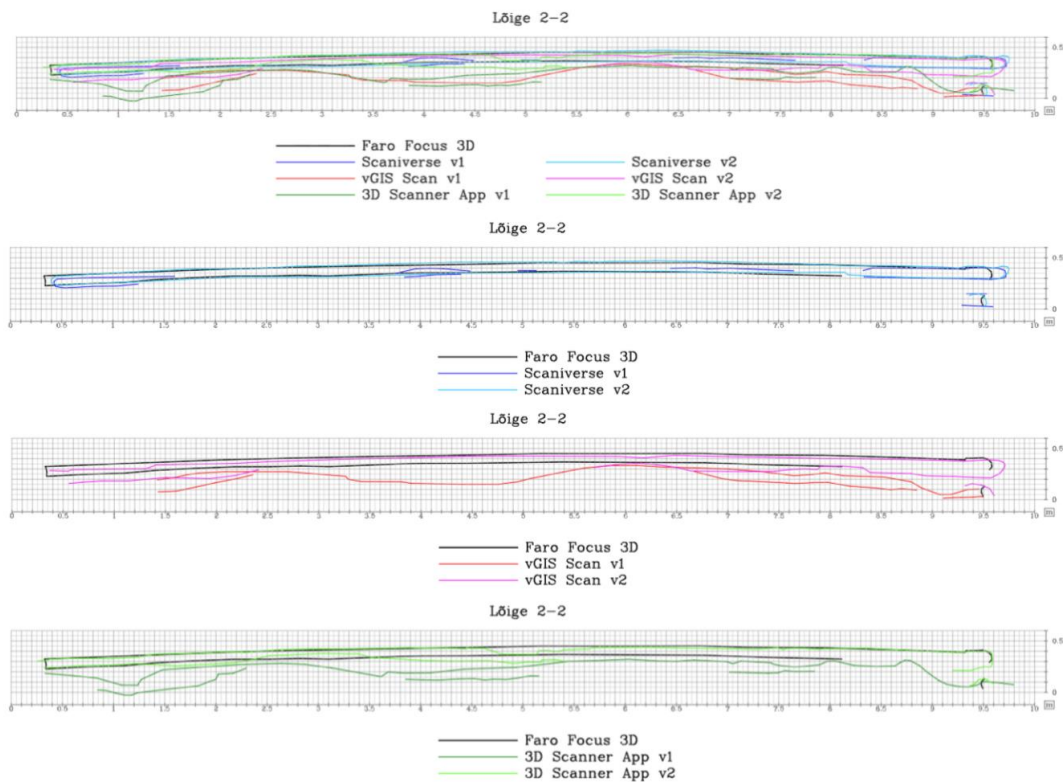
**Tabel B4.** Test 4 staatilise laserskaneerimise tähiste koordinaadid. Plaanilised koordinaadid on L-EST97 süsteemis ja kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis.

Punkti nimi	X	Y	H
T-72	6589393,431	551033,861	36,920
T-73	6589398,361	551028,968	37,102
T-74	6589389,696	551033,566	37,070
T-75	6589404,171	551028,723	36,975
T-76	6589407,167	551025,118	37,145
T-77	6589396,620	551032,191	36,968
T-78	6589408,949	551026,413	37,052
T-79	6589410,189	551023,308	37,109

# Lisa C – Tehnovõrkude rist- ja pikilõiked

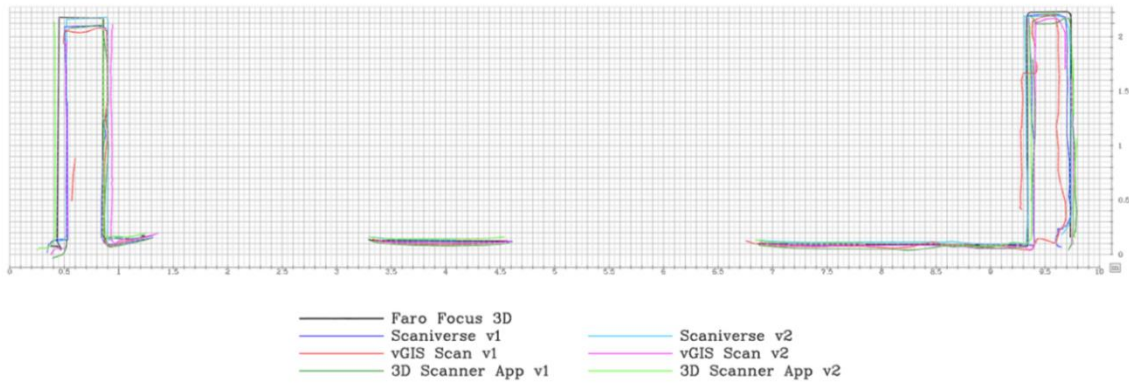


Joonis C1. Test 2, lõige 1-1.

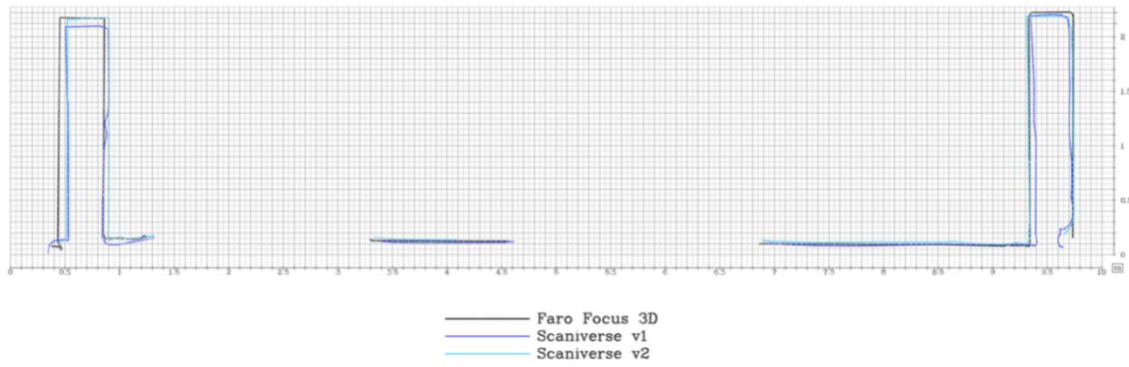


Joonis C2. Test 2, lõige 2-2.

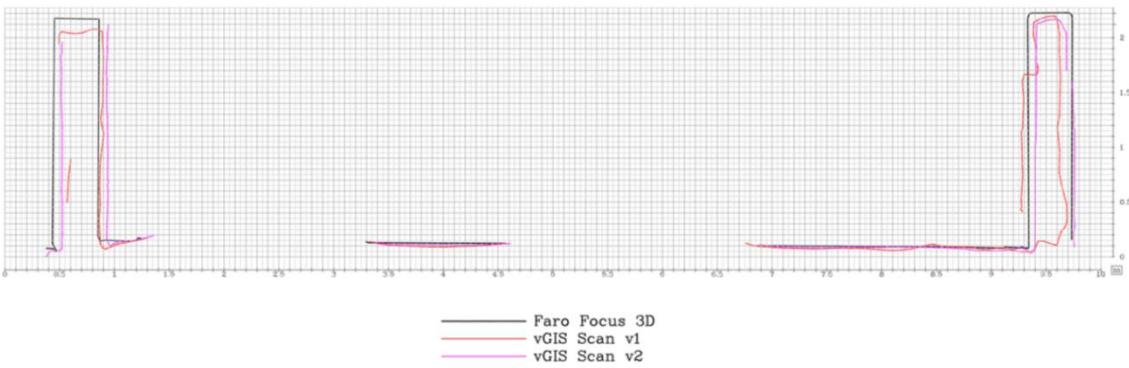
Lõige 3-3



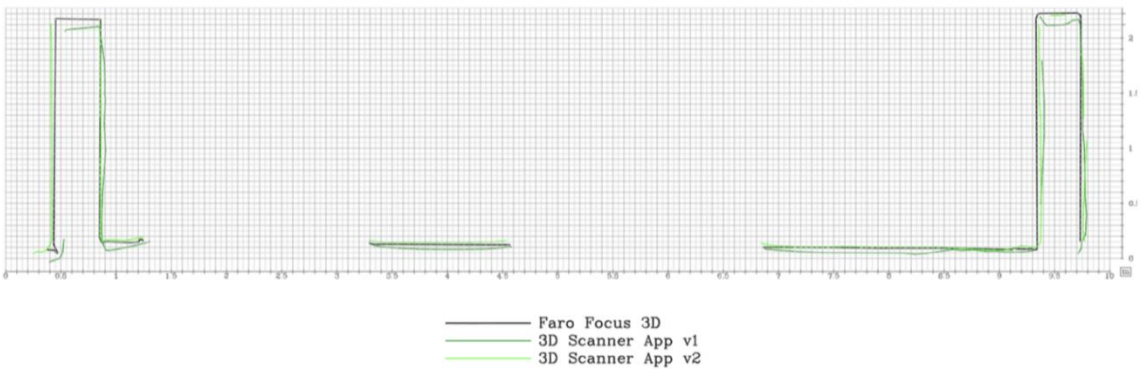
Lõige 3-3



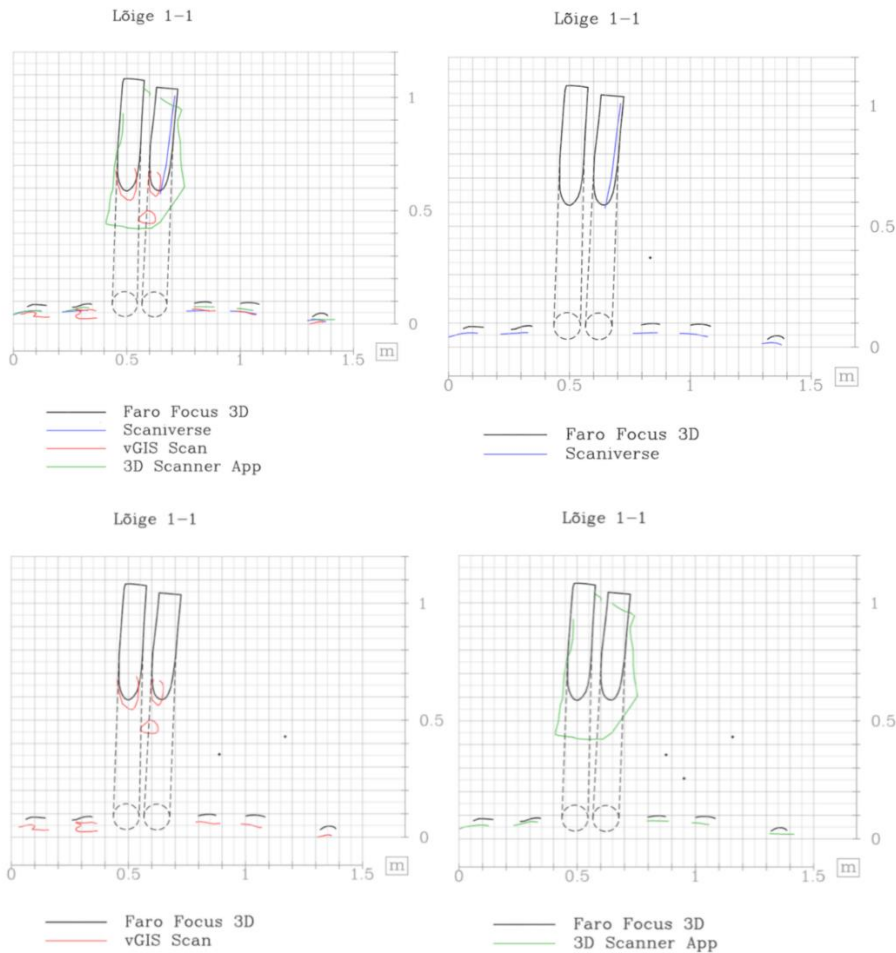
Lõige 3-3



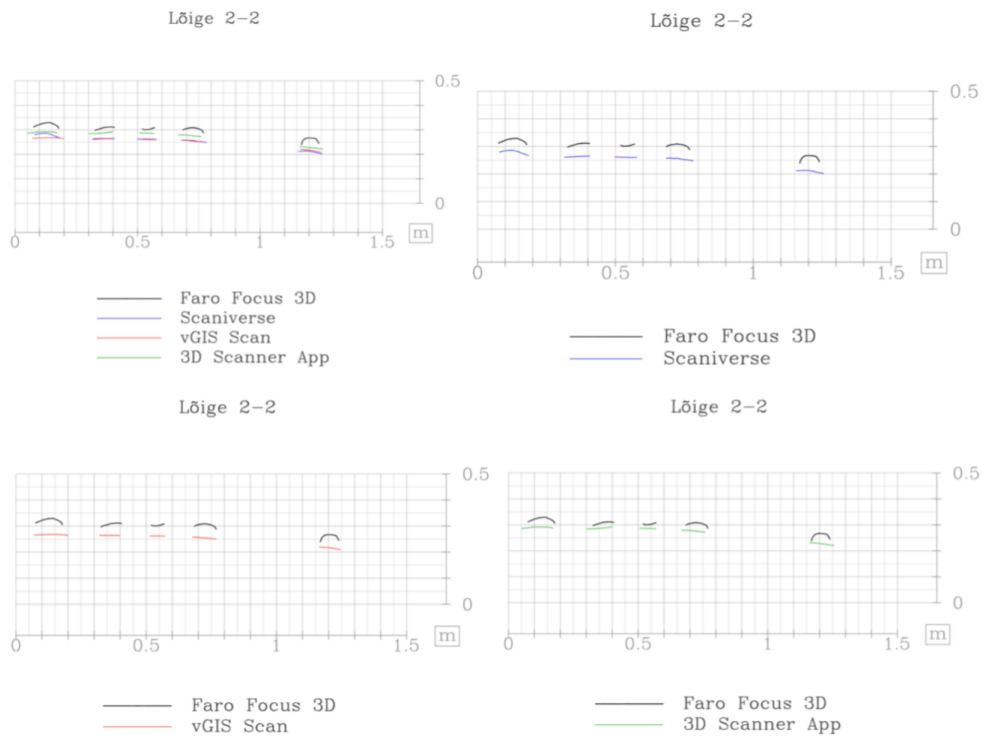
Lõige 3-3



Joonis C3. Test 2, lõige 3-3.

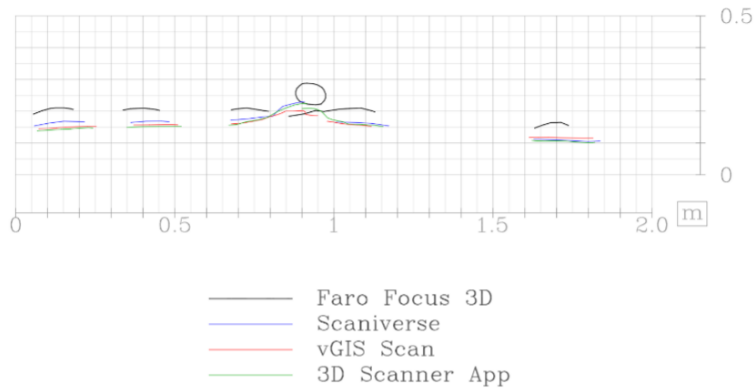


**Joonis C4.** Test 3, lõige 1-1.

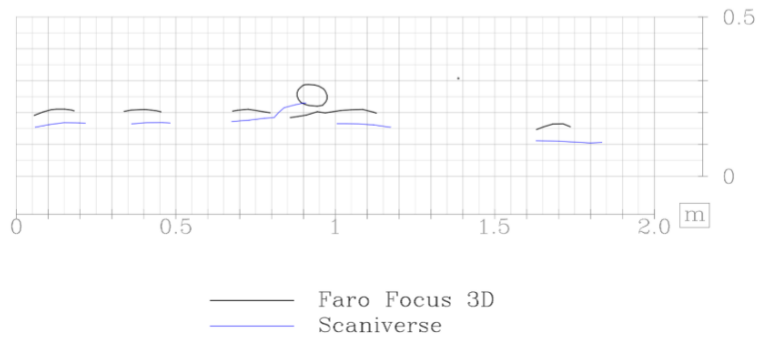


**Joonis C5.** Test 3, lõige 2-2.

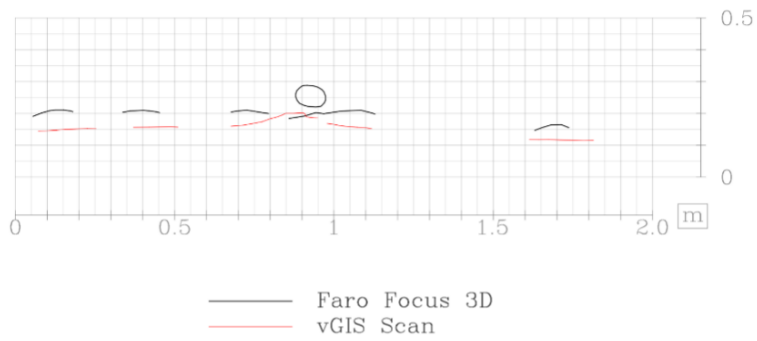
Lõige 3-3



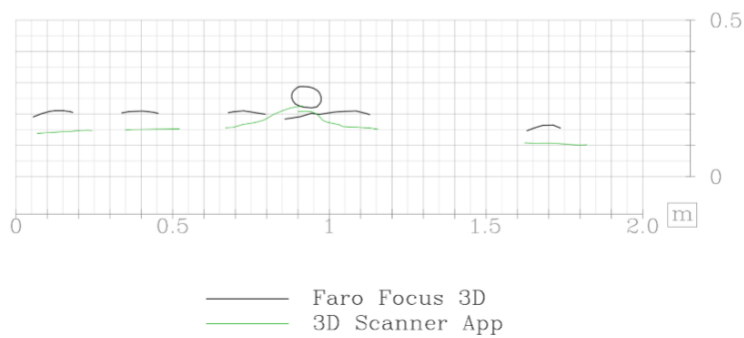
Lõige 3-3



Lõige 3-3

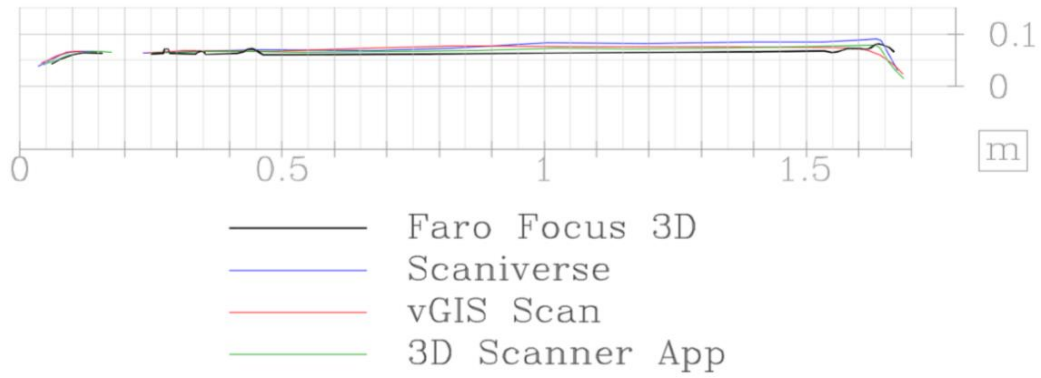


Lõige 3-3

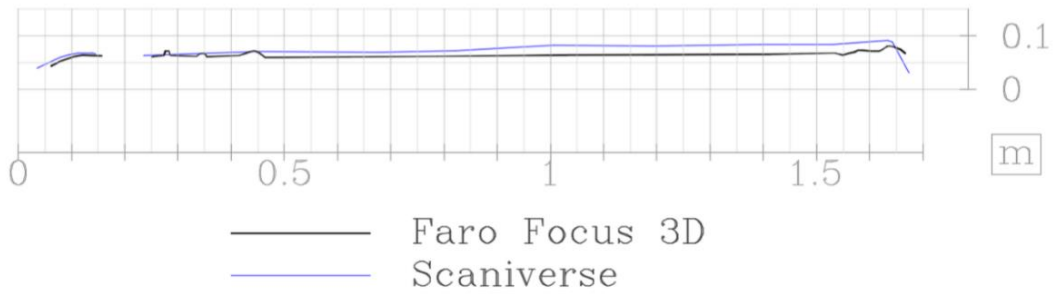


**Joonis C6.** Test 3, lõige 3-3.

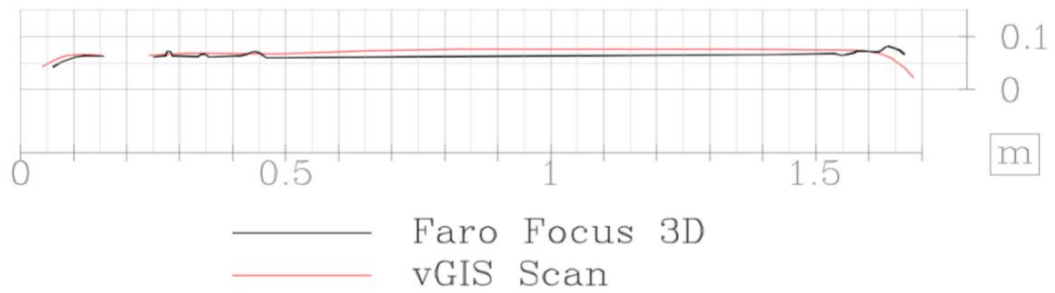
Lõige 1-1



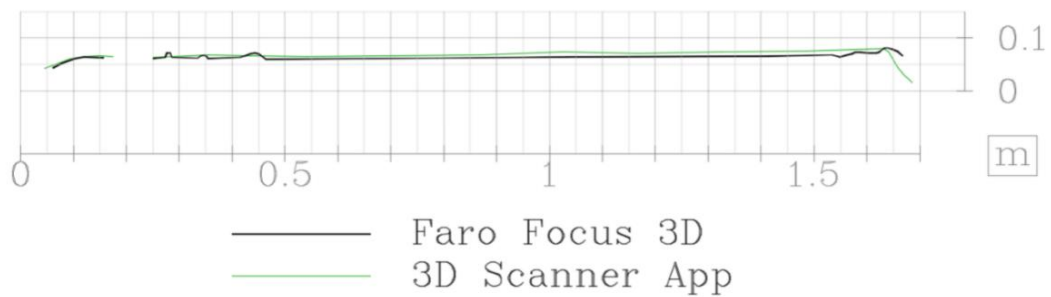
Lõige 1-1



Lõige 1-1



Lõige 1-1



**Joonis C7.** Test 4, lõige 1-1.

Lõige 2-2



- Faro Focus 3D
- Scaniverse
- vGIS Scan
- 3D Scanner App

Lõige 2-2



- Faro Focus 3D
- Scaniverse

Lõige 2-2



- Faro Focus 3D
- vGIS Scan

Lõige 2-2

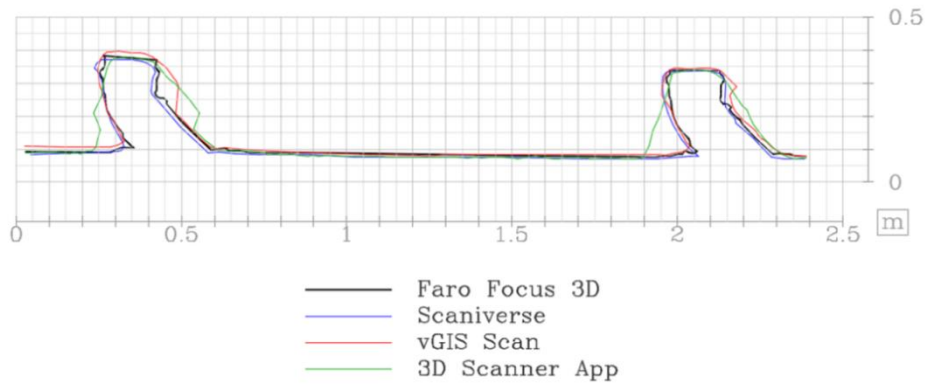


- Faro Focus 3D
- 3D Scanner App

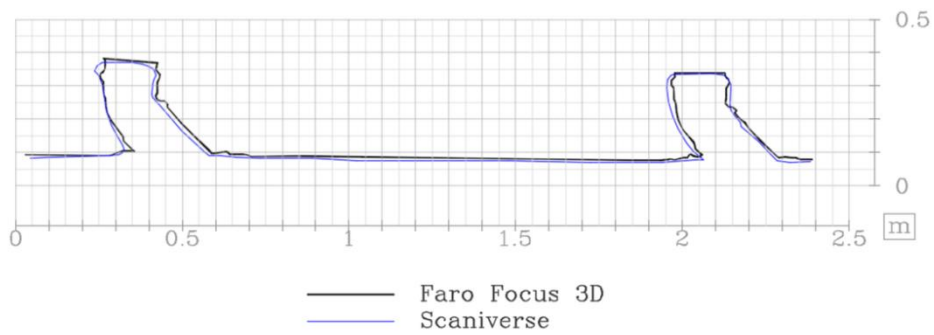
**Joonis C8.** Test 4, lõige 2-2.



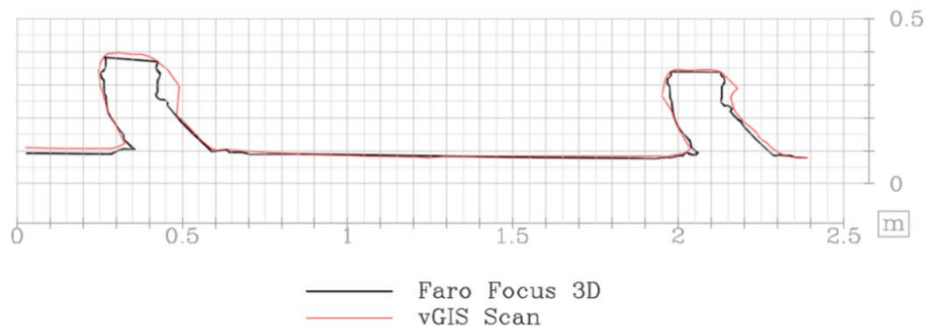
Lõige 3-3



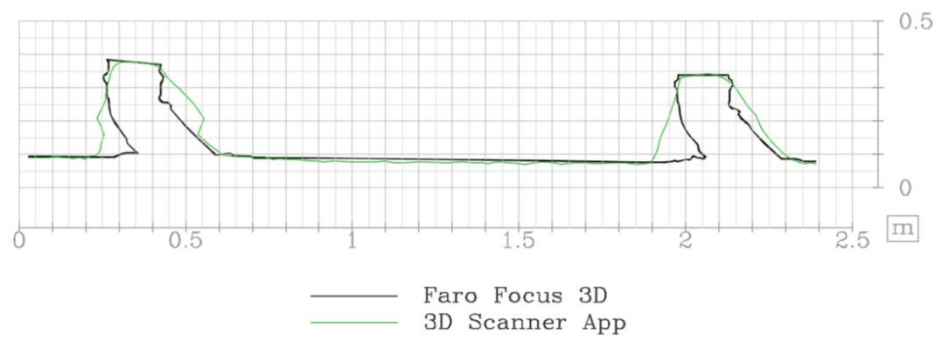
Lõige 3-3



Lõige 3-3



Lõige 3-3



**Joonis C9.** Test 4, lõige 3-3.

**Geodeesiateemalised lõputööd Tallinna Tehnikaülikoolis alates 1993**  
**Teedeehituse ja geodeesia õppekava (vastuvõtt alates 2018)**  
**TRANSPORDIEHITUSE õppekava Ehitusgeodeesia spetsialiseerumine**  
**RAKENDUSGEODEESIA õppekava**

Tähistused

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

<b>Üliõpilane</b>	<b>Aasta</b>	<b>Töö teema</b>
<b>Mairolt Kakko</b>	1993	Tallinna linnahalli geotehniline uurimine
<b>Tauno Saks</b>	1993	Suuremõõtkavaline stereofotogramm-meetriline mõõdistamine
<b>Mati Oja</b>	1993	GPS mõõdistamine Eesti piirialade näitel
<b>Risto Pomerants</b>	1993	Eesti Vabariigi 2. klassi geodeetiline põhivõrk Türi objekti näitel
<b>Peep Kirsimäe</b>	1995	Jätkuvtala- pingbetoonsilla (36+54+36m) projekt koos geodeetiliste töödega
<b>Valdar Tammin</b>	1995	Sillamäe linna plaanilise põhivõrgu ülevaatus ja selle rekonstrueerimise projekt
<b>Marja Talvari</b>	1996	Territoriaalandmete kogumine ja digitaalkaardistus
<b>Arvi Taru</b>	1996	Tallinna geodeetiliste koordinaatsüsteemide võrdlus
<b>Karin Kollo</b>	1996	GPS kontseptsioonid ja nende kasutamine Eesti tihendusvõrgus
<b>Vello Kala</b>	1997	Monteeritavate karkasshoonete rajamise geomeetrilise täpsuse tagamiseks tehtavate geodeetiliste tööde tehnoloogilise kompleksi väljatöötlus ja täpsuse analüüs (magistritöö)
<b>Rannala, Marek</b>	2000	Teegeomeetria mõõdistamine reaalaraja kinemaatilise GPS abil
<b>Vallo Padari</b>	2000	Raudtee rekonstrueerimisprojekti geodeetilised uurimistööd Tapa- Nõmmküla objektil
<b>Karin Kollo</b>	2000	Ida-Viru maakonna tihendusvõrgu objekti tasandamine ja arvutustulemuste analüüs (magistritöö)
<b>Arvi Taru</b>	2000	Tallinna kohaliku koordinaatide süsteemi ja Lambert-Est koordinaatide süsteemi sidemest (magistritöö)
<b>Aidi Pank</b>	2002	Koidula raudtee piiriületuspunkti maa-ala topogeodeetilised uurimistööd (rakendusgeodeesia)
<b>Tatjana Belova</b>	2003	Kõrgelasuvate ehituskonstruksioonide kõrguste mõõdistamine muudetud trigonomeetrilisel meetodil (rakendusgeodeesia)
<b>Kert Rebane</b>	2003	Uuringud programmeerimiskeele JAVA kasutamiseks geodeetilise mõõdistussüsteemi loomisel (rakendusgeodeesia)

<b>Andrei Anissimov</b>	2003	Lasernivelliiri QL310 DS täpsuse uurimine (rakendusgeodeesia)
<b>Laura Salumaa</b>	2003	Kohaliku geodeetilise põhivõrgu eelarvutused (rakendusgeodeesia)
<b>Kersti Peetersoo</b>	2003	Muhu vald, Lõetsa ja Tupenurme küla maade tagastamine (rakendusgeodeesia)
<b>Kirsika Koitjärv</b>	2003	Maa raskuskiirenduse mõju hinnang nivelleerimistulemustele Eesti kõrguselise põhivõrgu valitud käikudel (rakendusgeodeesia)
<b>Laura Ulla</b>	2003	Kaalude mõju hindamine Eesti gravimeetrilise põhivõrgu tasandamistulemustele (rakendusgeodeesia)
<b>Kristi Käär</b>	2003	Pakterminali geotehniline kontroll (rakendusgeodeesia)
<b>Kristi Kõiva</b>	2003	Elektro-optilise kaugusmõõtja kalibreerimistulemuste ja mõõtmisandmete redutseerimise vajalikkus kohalike geodeetiliste põhivõrkude tasandamiseks (rakendusgeodeesia)
<b>Kersti Lohvart</b>	2004	Ekvivalentse projektsiooni kasutamine katastrimõõtmisel (rakendusgeodeesia)
<b>Kadi Vahuri</b>	2004	Polügonomeetria mõõtmiste täpsustest kohalike plaaniliste geodeetiliste põhivõrkude rekonstrueerimisel ja rajamisel (rakendusgeodeesia)
<b>Toomas Marrandi</b>	2004	Aerolaserskaneerimise mõõdistusmetoodika ja kasutatav tehnoloogia (rakendusgeodeesia)
<b>Sirle Sink</b>	2004	Geodeetilisi probleeme hüdrograafilisel mõõdistamisel (rakendusgeodeesia)
<b>Riho Võigemast</b>	2004	Uued nõuded projekteerimise geodeetiliste uurimistöodele (1:500-1:2000) (rakendusgeodeesia)
<b>Maido Ridalaan</b>	2004	Balti-Kiisa 330kV ülekandeliini trassi L504 geodeetilised kompleksuuringud, metoodika optimiseeritud lahendused (rakendusgeodeesia)
<b>Raivo Ranne</b>	2004	Geodeesia aluste õppematerjalid (teadusmagister)
<b>Annika Hussar</b>	2005	Kaardilehe servade ühildamine. Probleemid ja lahendused Eesti põhikaardi näitel (rakendusgeodeesia)
<b>Rait Riim</b>	2005	Daatumite transformatsioon ja transformeerimisparameetrite määramine vabavara programmidega (rakendusgeodeesia)
<b>Tuuli Viljamaa</b>	2005	Tallinna teletorni deformatsioonide vaatlused (rakendusgeodeesia)
<b>Kaja Liik</b>	2005	Tornimäe 3 kõrgosa ehituse geodeetilise teenindamise projekt (rakendusgeodeesia)
<b>Ülle Turner</b>	2005	Pääsküla prügila vertikaalsete ja horisontaalsete deformatsioonide kontrollmõõtmised (rakendusgeodeesia)
<b>Erkki Mäekivi</b>	2005	Raskuskiirenduse andmete interpoleerimine Eesti kõrgusvõrgu reeperitele Tartu piirkonnas ning tulemuste analüüs (rakendusgeodeesia)

<b>Gabriela Kotsulim</b>	2005	Uuringud sadamaehitiste rajamisel (magistritöö)
<b>Lauri Lilja</b>	2006	Sangaste-Valga raudteelõigu, pikett 498,87-503,76 geodeetilise alusvõrgu rajamine ja ballasti puhastamise ehitusgeodeetiline teenindamine (rakendusgeodeesia)
<b>Tatjana Belova</b>	2006	Valguskaugusmõõtuuri töö uurimine (magistritöö)
<b>Kristi Kõiva</b>	2006	Välistingimuste mõju GPS mõõtmistulemustele (magistritöö)
<b>Kersti Lohvart</b>	2006	Nivelliiri Leica NA2002 põhitingimuse muutus temperatuuri mõjul (magistritöö)
<b>Ardo Kollo</b>	2006	Geodeetilised tööd naftaplatvormide X ja Y ehitamisel (rakendusgeodeesia)
<b>Martin Loosaar</b>	2007	Tallinna lauluväljaku mõõdistamise analüüs (rakendusgeodeesia)
<b>Andrei Anissimov</b>	2007	Refraktsiooni mõju trigonomeetrilisel nivelleerimisel keskmise pikkusega madalate vaatekiirtega (magistritöö)
<b>Angeelika Sepp</b>	2007	Geodeetiliste tööde probleemid Mercedes-Benz Kuressaare teeninduskeskuse ehitamisel (rakendusgeodeesia)
<b>Kristi Käär</b>	2007	Pakterminali vajumisvaatluste problemaatika ja graafiline kujutamine (magistritöö)
<b>Marju Lember</b>	Kevad 2008	Narva mnt 5 ehitusaegne naaberhoonete geotehniline kontroll
<b>Tarvo Mill</b>	2008	Erinevate mõõtmistehnika võrdlus silla geodeetilisel mõõdistamisel (magistritöö)
<b>Erkki Mäekivi</b>	2008	Raskuskiirenduse andmete võrgustamine ja interpoleerimine Eesti kõrgusvõrgu reeperitele (magistritöö)
<b>Anti Gruno</b>	Kevad 2011	Läänemere valgala hoojaliste massivariatsioonide arvutamine sateliitgravimeetriliste andmete põhjal
<b>Kirill Šapošnitšenko</b>	Juuni 2012	Refraktsiooni ja kalibreerimisparandite arvestamisest täppisnivelleerimisel reeperite stabiilsuse uurimiseks
<b>Silja Talvik</b>	Juuni 2012	Astanguliste pinnavormide mõjust Maa raskuskiirenduse väljale ja täppisnivelleerimise tulemustele Põhja-Eesti klintranniku näitel
<b>Erkko Grünthal</b>	Juuni 2013	Rannaprotsesside monitooring aerolaserskaneerimise kordumõõtmistest
<b>Kalev Julge</b>	Juuni 2013	Aerolaserskaneerimise andmetest maapinna tuvastamine erinevate filtreerimisalgoritmidega
<b>Eigo Kärdi</b>	Juuni 2013	Deformatsioonide uuringud Kiviõli vanal tuhamäel
<b>Aleksandra Kolõganova</b>	Jaanuar 2014	Pinnasetööde mahuarvutused erinevate GIS tarkvarapakettidega Kohtla-Järve poolkoksi ladestu sulgemistöde näitel
<b>Liis Elmi</b>	Juuni 2014	Fassaadide võrdlev mõõdistus tahhümeetria, maapealse fotogramm-meetria ja laserskaneerimisega

<b>Merle Kivistik</b>	Juuni 2014	Kortermaja vajumise uuring kõrgtäpse nivelleerimisega ja invarlattice lihtsustatud kalibreerimise aprobeerimine
<b>Hannes Lõhmus</b>	Juuni 2014	Terrestrilise laserskaneerimise kaasamine sildade koormuskatsetuste geodeetilistel uuringutel
<b>Sander Saarik</b>	Juuni 2014	Elektrontahhümeetrite ja laserskanneri kaugusmõõtu täpsuse hindamine
<b>Martin Sobak</b>	Juuni 2014	Pinnavormide terrestriline laserskaneerimine ja 3D modelleerimine
<b>Katrin Uueküla</b>	Juuni 2014	Terrestrilise laserskaneerimise andmete baasil loodud 3D mudelite kvaliteedi analüüs
<b>Annika Urbel</b>	Jaan 2015	Aerolaserskaneerimise andmetest jõgede pikiprofiilide määramine keila jõe näitel
<b>Taavi Talver</b>	Jaan 2015	Trigonomeetiline nivelleerimine ja laserskaneerimine teede külmakergete uurimisel
<b>Silver Aule</b>	Jaan 2015	Mittestandardse kujuga ehitiste laserskaneerimine ja punktipilve põhjal modelleerimine TTÜ veetorni näitel
<b>Simo Rebane</b>	Juuni 2015	Mittestandardsete hoonete rajamise geodeetiline teenindamine kaasaegsete mõõdistustehnoloogiate kaasamisega
<b>Aidi Sula</b>	Juuni 2015	UAV mõõdistuse kõrgusliku ja plaanilise täpsuse valideerimine
<b>Jaanus Metsar</b>	Juuni 2015	Riiklik GNSS püsijaamade võrk, selle aegridade kasutamine jääajajärgse maatumise täpsustamisel"
<b>Priidu-Evert Pärna</b>	Juuni 2017	Laohoone karkassi teostusmõõdistamise meetodite võrdlus
<b>Martti Putnik</b>	Jaan 2018	Mobiilse laserskaneerimise tehnoloogia rakendamine teekatendite mõõdistamisel
<b>Romet Kõök</b>	Jaan 2018	Mehitamata lennumasinade (UAV) fotogrammeetriaalsete mõõdistuste põhjal koostatavate pinnamudelite täpsus tee-ehituslike rakenduste näitel
<b>Sander Varbla</b>	Juuni 2019	Meregeoidi mudelite valideerimine laeval mõõdetud GNSS ning aerolaserskaneerimise kõrgusprofiilidega
<b>Kaia Malberg</b>	Juuni 2019	Siseruumide ja allmaakaevõõnte ruumikuju määramine mobiilse laserskaneerimisega
<b>Jürgen Resev</b>	Juuni 2019	UAV fotogrammeetria kasutamine hoone välisgeomeetria ja deformatsioonide mõõdistamisel Tallinna Lennusadama näitel
<b>Kevin Reimann</b>	Juuni 2019	GNSS-RTK võimekusega mehitamata lennumasinatega saavutatava mõõdistustäpsuse evalveerimine
<b>Emil Haljend</b>	Jaan 2020	Sildkraanate laserskanneri mõõdistamise täpsuse aprobeerimine
<b>Serafima Goman</b>	Juuni 2021	Joonobjekti droon-fotogrammeetriaalsete mõõdistuste täpsuse sõltuvus kontrollpunktide arvust kasutades integreeritud georeferentimist
<b>Taavi Limperk</b>	Juuni 2021	Tallinna Keslinna mattunud ürgoru piirides asuva kõrghoone vertikaalliikumise analüüs

<b>Johanna Koobak</b>	Juuni 2022	Madala hinnaklassi GNSS sensoriga saavutatav 3D asukohamäärangu täpsus
<b>Lenne-Liisa Heinoja</b>	Juuni 2022	Satelliitaltimeetria andmetel põhineva merepinna kõrguse täpsuse kindlaks määramine erinevate andmestike koosmõjul
<b>Jevgenia Lobina</b>	Juuni 2022	Vertikaalsete tasapindade konstrueerimine 3D punktipilvest kahe tarkvara näitel
<b>Uku Toomsar</b>	Juuni 2022	Ehituse Mäemaja punktipilve ja digitaalse kaksiku loomine
<b>Aleksei Kupavõh</b>	Juuni 2024	SWOT satelliitaltimeetria meretaseme andmete võimekus ranniku- ning avamerealade uuringutel
<b>Jelena Frolova</b>	Juuni 2024	ESTPOS tugijaamade koordinaatide analüüs multi-GNSS arvutustest