



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**TEOSTUSMÕÕDISTUSTE VÕRDLEV ANALÜÜS JA  
HETKE KITSASKOHAD EESTI TEE  
EHITUSPROJEKTI NÄITEL**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF AS-BUILT SURVEY  
TECHNIQUES AND THEIR LIMITATIONS IN ESTONIAN  
ROAD CONSTRUCTION SECTOR**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Marleen Võsa

Üliõpilaskood: 192688

Juhendaja: Raido Puust

## 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 bakalaureusetöö/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 Marleen Võsa (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Teostusmöödistuste võrdlev analüüs ja hetke kitsaskohad Eesti tee-ehitusprojekti näitel“, mille juhendaja on Raido Puust,

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 loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja

**Ehituse ja arhitektuuri instituut**  
**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Marleen Võsa, 192688 (nimi, üliõpilaskood)  
Õppekava, peeriala: EATI02/17 – Teedehitus (kood ja nimetus)  
**Juhendaja(d):** Abiprofessor, Raido Puust, 6202457 (amet, nimi, telefon)

**Lõputöö teema:**

Teostusmõõdistuste võrdlev analüüs ja hetke kitsaskohad Eesti tee-ehitusprojekti näitel.  
Comparative analysis of as-built survey techniques and their limitations in Estonian road construction sector.

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Uurida erinevate mõõdistusinstrumentide täpsusi
2. Ülevaade Eesti mõõdistusnõuetest
3. Analüüsida reaalse objekti näitel erinevate mõõdistusmeetodite täpsusi

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaate valmimine	01.02.24
2.	Pilootprojekti ja tavaprojekti analüüs	01.04.24
3.	Lõputöö sisuline pool valmis	06.05.24

**Töö keel:** eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 20.05.2024a

**Üliõpilane:** Marleen Võsa ..... ".....".....2024a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Raido Puust ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** Mihkel Kask ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

.....

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
Lühendite ja tähiste loetelu .....	8
SISSEJUHATUS .....	9
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	11
1.1 Lähiriikide mõõdistuspraktika .....	11
1.2 Teostusmõõdistuse tehnoloogiad .....	13
1.2.1 Tahhümeeter .....	13
1.2.2 Terrestriline laserskaneerimine .....	14
1.2.3 RTK-GNSS Rover .....	16
1.2.4 Droon .....	17
1.2.5 Masinmõõdistamine – greider .....	20
1.2.6 Masinmõõdistamine – pinnaserull .....	21
1.2.7 Robotid .....	22
1.2.8 Mõõdistusinstrumentide võrdlus .....	24
2. OLEMASOLEV MÕÕDISTUSPRAKTIKA .....	27
2.1 Hanke kirjeldus .....	27
2.2 Nõuete vaade .....	28
2.2.1 Mõõdistusi teostava isiku nõuded .....	28
2.2.2 Mõõdistamisinstrumendile seatud nõuded .....	29
2.2.3 Lubatud hälbed .....	29
2.3 Kasutatavad mõõdistusinstrumendid .....	30
2.3.1 Tahhümeeter ja laserskaneerimine .....	30
2.3.2 Reaalne mõõdistamine objektile .....	31
3. KAASAEGETE MEETODITE PILOTEERIMINE .....	33
3.1 Hanke kirjeldus .....	33
3.2 Tehnoloogiline vaade .....	34
3.2.1 Masinmõõtmine ja 3D masinjuhtimine .....	35
3.2.2 GNSS-RTK rover .....	37
3.2.3 Drooni mõõdistamine .....	38
3.3 Pilootprojekti tulemused .....	41
3.3.1 Mõõdistamiseks kulunud aeg .....	42
3.3.2 Mõõdistustulemuste järelused .....	42
3.4 Pilootprojektide probleemid ja tehtud vead .....	45
3.4.1 Masinmõõdistamise ja 3D masinjuhtimise probleemid ja tehtud vead .....	45
3.4.2 RTK-GNSS roveriga mõõdistamise probleemid ja tehtud vead .....	46
3.4.3 Droonimõõdistamise probleemid ja tehtud vead .....	46
4. ETTEPANEKUD PILOOTPROJEKTI TULEMUSTE RAKENDAMISEKS .....	48
KOKKUVÕTE .....	50

Conclusion .....	52
kasutatud kirjandus .....	54

## EESSÕNA

Lõputöö teema kujunes välja Tariston AS-i 2023 aastal teostatud pilootprojekti raames, millest tulenevaid andmeid on selle lõputöö tegemisel järelanalüüsitud. Töö käsitleb erinevate mõõdistusinstrumentide kasutust tee ehitusprojektiga seotud mõõdistustööde juures lähtuvalt Eestis kehtivatest nõuetest. Pilootprojekti käigus kogutud andmeid analüüsitakse teostusmõõdistamise esitamise täpsuse aspektist.

Töö autor tänab ettevõtet Tariston AS, kes võimaldas töö käigus kogutud andmeid taaskasutada lõputöö raames teostatud järelanalüüsis. Lisaks avaldab autor suurt tänu juhendajale Raido Puust, kelle abiga sõnastati lõputöö sisu ja teema. Töö autor tahab tänada ka enda sõpru ja pere, kes uskusid ja toetasid antud lõputöö valmimisse.

**Võtmesõnad:** masinmõõdistamine, RTK-GNSS rover, UAV, teostusmõõdistus, magistritöö

## Lühendite ja tähiste loetelu

BIM - ehitusinformatsiooni mudel/modelleerimine (ingl *Building Information Modeling*)

GCP – maapinna kontrollpunktid (ingl *Ground Control Points*)

GPS - üleilmne asukoha määramise satelliitnavigatsiooni süsteem (ingl *Global Positioning System*)

IMU - inertsiaalandur (ingl *Inertial Measurement Unit*)

KVR – keskmine ruutviga

LIDAR – laserskaneerimisseade (ingl *light detection and ranging*)

PPK - (ingl *Post-Processing kinematic*)

RTK - reaalaja kinemaatika (ingl. *Real-Time Kinematic*)

RTK-GNSS - reaalajas kinemaatilise – globaalse navigatsioonisatelliitide süsteem (ingl *Real Time Kinematic – Global Navigation Satellite System*)

SIMBA - *Statsbygg*i ehitusinfo mudelite nõuded

TLS - terrestriline laserskaneerimine (ingl *terrestrial laser scanning*)

TRAM – Transpordiamet

TS – tahhümeeter (ingl *Total Station*)

UAV – mehitamata õhusõiduk (ingl *Unmanned Aerial Vehicle*)

YIV - üldised infrastruktuurimudeli nõuded (soome keeles *Yleiset inframallivaatimuskset*)



## SISSEJUHATUS

Lõputöö teema on ajendatud autori huvist uurida erinevate mõõdistusvõimaluste ja -täpsuste kohta. Eestis on teedehitusvaldkonnas erinevate mõõtmiste kasutusvõimalustest jäänud autori seisukohal vajaka. Teostusmõõdistusprotsessi kiirendamine annab võimaluse nii ehitajale kui ka tellijale kiiremaks raha ja ehitusprotsesside liikumiseks. Magistritöös tuuakse välja masinmõõdistamise (pinnaserulli ja greideri abil), RTK drooni ja RTK-GNSS roveriga mõõdistamise plussid ja miinused. Antud teemal on pilootprojekti tellimusi esitanud ka Eesti teedevaldkonna suurim rahastaja Transpordiamet (edaspidi TRAM). See näitab, et lisaks ehitajale on teema põhjalikumast uurimisest huvitatud ka ehitustööde tellijad.

Magistritöö eesmärgiks on uurida erinevate mõõdistusinstrumentide täpsusi, anda ülevaade Eesti mõõdistusnõuetest ja analüüsida reaalse objekti näitel erinevate mõõdistusmeetodite täpsusi. Töö koosneb uurimuslikust ja praktilisest osast.

Esimene peatükk kuulub uurimuslikku osasse, mis omakorda jaguneb kaheks - esimeses pooles uuritakse Eesti lähiriikide (Soome ja Norra) mõõdistuspraktikat läbi nende normdokumentatsiooni. Teises osas töötatakse läbi mitmed teadustööd erinevate mõõdistusmeetodite korral. Teadustööd on kokku kogutud kohtadest üle maailma, kus on testitud erinevate mõõtmisinstrumentide kõrguslikku täpsust. Nende tööde olulisematest tähelepanekutest on tehtud kokkuvõtte. Mõõdistusinstrumendid, mida selles peatükis käsitletakse on tahhümeeter, terrestriline laserskanner, RTK-GNSS rover, droon, greideri ja pinnaserull. Lisaks antakse põgus ülevaade uuematest mõõdistamist lihtsustavatest robotitest.

Teises peatükis kaardistatakse TRAM-i poolt koostatud tavapärase hanke dokumentatsiooni, mille eesmärk on saada ülevaade mõõdistamistingimustest. Tulemuste teadasaamiseks on aluseks võetud Tarbja kogujatee ja Tarbja sillaehituse projekt. Esmalt uuritakse projektdokumentatsiooni, Majandus- ja Taristuministeeriumi ning TRAM-i poolt välja antud nõudeid. Teiseks tehakse nende baasil võimalike mõõdistusinstrumentide analüüs koos reaalse mõõdistusmeetodi ajakuluga.

Kolmas peatükk kuulub praktilisse osasse, kus analüüsitakse TRAM-i poolt loodud projektis „Kõrvalmaantee 15173 Oisu-Kärevere-Taikse km 4,920-7,706 ja 15212 Raukla-Äiamaa-Oisu km 0,046-2,760 tolmuvaaba katte ehitus koos masinjuhtimise seadmetest info kogumise katsetamisega“ (edaspidi pilootprojekt). Pilootprojekti viis läbi Tariston AS. Lisaks käiakse läbi kõik katsetatud mõõdistamisviisid ehk masinmõõdistamine, RTK-GNSS rover ja droon. Tulemusi võrreldakse geodeedi poolt

tahhümeetriga mõõdistatud andmetega. Viimases alapeatükis annab autor ülevaate pilootprojektis tekkinud probleemidest ja tehtud vigadest.

Neljandas ehk viimases peatükis esitab autor ettepanekuid, kuidas võiks pilootprojekti tulemusi rakendada, lisades juurde ka teisi lõputöös käsitletud teemasi.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Kirjanduse ülevaates on toodud välja nii lähiriikide ehitusinfo mudelitega (edaspidi BIM) seotud mõõdistusnõuded kui ka ülevaade erinevatest mõõdistamisinstrumentidest. Lähiriikidest on valitud eeskujuks Soome ja Norra. Need riigid on Eestile sarnase kliimaga ehk temperatuuri ja ilmamuutused jäävad valdavas osas sarnasesse tsüklisse, mis sobib autori arvamusel analüüsimiseks hästi. Lisaks on eelnimetatud riikides juba väljakujunenud praktikad ehitusinfomudelite nõuete tähenduses, mis kaasavad ka mõõdistusinfot. Teises kirjanduse ülevaate osas uuritakse hetkel rohkem kasutuses olevaid mõõdistamismeetodeid nagu näiteks tahhümeeter, terrestriline laserskanner ja RTK-GNSS (reaalajas kinemaatilise – globaalse satelliitnavigatsiooni süsteem) rover. Lisaks antakse ülevaade ka uuema aja viisidest nagu näiteks mehitamata õhusõidukite ja tee-ehitusmasinate abil mõõdistamistest. Põgusalt vaadeldakse ka täisautomatiseeritud lahendusi, kuhu kuuluvad autonoomsed robotid ja nende tänased rakendused, ning võimekus mõõdistusinfo kogumisel.

## 1.1 Lähiriikide mõõdistuspraktika

Eesti lähiriikide näitel võib ennekõike välja tuua Soome ja Norra teostusmõõdistuste nõuded ja kriteeriumid, mis käsitlevad lubatud mõõdistamise viise ja hälbeid. Mõistagi on need kriteeriumid riigiti erinevad. Norra ja Soome nõuded on tihedalt seotud ka ehitusinfo mudelitega, andes võimaluse kasutada uuemaid mõõdistamisviise. Soome on loonud eraldi infrastruktuurimudelite nõuded [1], mis on tõlgitud ka eesti keelde [2], kuid Eestis neid laiemalt kasutusele võetud ei ole. Norras on lisaks baasmudeli käsiraamatule ka kinnisvarahaldus ja arendaja *Statsbygg* [3], mis on keskendunud teedeehituse digitaalsele arengule.

Norra ja Soome nõudeid saab vaadelda erinevatest aspektidest, nagu ka Eestis on standardid, riiklikud nõuded, eraomanditeede nõuded ja juhised. Standardid ei ole kohustuslikud dokumendid, kuid õigusaktis standardile viidates saab selle kehtestada kohustuslikuks [4]. Nõuded on välja toodud ehitusseadustiku alusel ja neid tuleb järgida terve ehitusprotsessi vältel [5].

Norras on loodud käsiraamatute süsteem, mis kirjeldab Norra Teedeameti teede projektide dokumentatsiooniga seotud aspekte. R761 käsiraamatus ehk teelepingute standardkirjelduses on toodud välja, et töid tuleb teostada kooskõlas Norras kehtivate

seaduste ja avalike määrustega [3]. Eraldi on veel olemas R110 mudelbaaside käsiraamat, kus on detailselt kirjas mudelite nõuded ja nendega seotud aspektid. Lisaks on eelmainitud *Statsbygg*, kelle missiooniks on kliimasõbralikuma ja digitaalsema ehitustööstuse arendamine. *Statsbygg* on välja töötanud *Statsbygg* BIM-i nõuded – SIMBA, mis kirjeldab *Statsbygg* BIM-i tarnenõudeid. Kõigil *Statsbygg* projektidele kehtib nõue kasutada nende enda BIM käsiraamatut. Lisaks võimaldab mudelfailide masinvalideerimine hinnata nii mudeli edusamme kui ka projektifaasis mudelite tulemuste abil ehituskvaliteediga. *Statsbygg* toetab aktiivselt rahvusvaheliste standardite kasutamist, nagu näiteks *buildingSMART* standardid ja GS1 (ingl *global system of standards*) standardid. [6]

Soomes on välja töötatud eraldi üldised infrastruktuurimudeli nõuded (edaspidi YIV), kus on väljatoodud masinjuhtimise ja -möödistamise tingimused ja juhised nende täitmise kohta. Soomes võib masinmöödistamist teha vaid nendel kihtidel, kus ehitamisel on kasutatud masinjuhtimist. Teostusmöödistuste saamiseks kasutatakse RTK-GNSS vastuvõtjat või tahhümeetrit. Soomes on nende mõõteseadmetega tehtavad teostusmöödistused täiendavad möödistamised masinmöödistamisele ning ühtlasi ka masinautomaatika töö kvaliteedi tagamise osa. Nagu Eestiski tehakse seal objektidel penetromeetri või mõõtmeseadme Inspectoriga kvaliteedi tagamiseks pistelisi tiheduse ja kandevõime mõõtmisi. Kuid Soomes võib kvaliteeti kontrollida ka teerulli abil sisseehitatud tiheduse jälgimise funktsiooni kaudu. Samuti kasutatakse fotograafia, videograafia ja laserskaneerimist käsitsi, drooni või sõiduki abil. Tugijaama täpsuse nõudeks on Soomes  $\pm 20\text{mm}$  ja seda kontrollitakse tahhümeetriga kord kuus. Vajadusel kalibreeritakse tugijaam ja jätkatakse tööd kui täpsusnõuded on täidetud. [1]

Norra ja Soome dokumentatsioon annab ülevaate, kuhu on Eesti lähiriikides kaasaegsete möödistamismeetodite rakendamisega arenenud. Eelnevalt mainitud Soome YIV nõuded on tõlgitud ka eesti keelde. Seevastu Norra käsiraamatud on vaid norrakeelsed ja käsiraamatutega tutvudes selgus, et detailsete lubatud hälvete info on lisatud projektdokumentatsiooni, mistõttu ei saanud autor Norra dokumentatsiooni Soomele sarnaselt võrrelda. Lubatud hälvete info annab suuresti sisendit möödistamismeetodite võimaluste kohta. Autor on seisukohal, et Eesti võiks võtta eeskujuks rohkem lähiriikide standardeid, uurides võimalusel projektdokumentatsioonides väljatoodud andmeid ja neid analüüsida.

## 1.2 Teostusmöödistuse tehnoloogiad

Teostusmöödistuste nõudeid saab täita erinevate seadmetega, millel omakorda on erinevad täpsused. Selles peatükis analüüsib autor kolmandas peatükis teostatud pilootprojektis rakendatud ehk masinmöödistusti ja mehitamata õhusõidukeid ning klassikalisi mõõtmisinstrumente, nagu tahhümeeter, laserskanner ja rover. Lisaks tuuakse välja läbi erinevate katsetuste ja uuringute instrumentide ajakulud ja täpsused.

### 1.2.1 Tahhümeeter

Tahhümeeter (edaspidi TS) on üks levinumaid mõõtmisvahendeid nii geodeetide kui ka ehitajate seas. Seepärast on töö autor võtnud analüüsimiseks TS-i, mille areng sai alguse 1960. aastatel. Neil aastatel hakkas ka geodeetilise nurga ja kauguse mõõtmise valdkonnas arenema elektroonikaseadmete kasutuselevõtt. Üheks esimeseks tänapäevaste instrumendiomadustega TS-iks peetakse Hewlett Packard 3820A instrumenti (Joonis 1.1), mis tuli välja 1977.aastal. Masin oli lihtsasti hallatav tema väikese suuruse ja kiire möödistamise tõttu. [7]



Joonis 1.1 Hewlett Packard 3820A [7]

Tahhümeetri abil möödistamise üheks miinuseks on ajakulu. Ajakulu sõltub nii keskkonnast kui ka möödistatava pinna pikiprofiilist, sest helkurprisma ja TS-i ühenduse

puudumisel mõõdistamist ei toimu. Suurema liiklussageduse korral võib sõidukite möödasõitmisel side TS-i ja helkurprisma vahel katkeda. [8] Tahhümeetri eeliseks on asjakohase seadistuse korral saavutatav mõõdistustäpsus, mis jääb mõne millimeetri piiresse. Sellise täpsuse saavutamiseks tuleks pikematel mõõdistamistel kindlate ajavahemike järel TS-i täpsust kontrollida ja vajadusel kalibreerida. [9] Tahhümeetri mõõtmisi ja mõõtevigu suurendavad ka keskkonnaga seonduvad muutused - temperatuur, õhurõhk, atmosfäärirõhk ja suhteline õhuniiskus. [10]

Kui võrrelda tahhümeetrit ehitajatele kättesaadavama masina ehk detailsemalt analüüsitud peatükis 1.2.3 roveriga (RTK-GPS), siis GPS täpsust peetakse väiksemaks ehk mõõtemääramatus jääb sentimeetri piiresse [11]. Iraagis teostatud katsetusel saavutati TS-i täpsuseks võrdlusvõrgu (*reference network*) võrdluses alla 1,3 mm standardhälve kõigis punktides, nii horisontaal- kui ka vertikaalkoordinaatides. Staatilise RTK-GNSS mõõtmise puhul esinesid standardhälbed suuremad. Ajakulu oli mõlema mõõdistustehnoloogia puhul sarnane - TS-i puhul kulus aega 196 minutit ja RTK-GNSS puhul 167 minutit. [9]

### **1.2.2 Terrestriline laserskaneerimine**

Terrestriline laserskaneerimine (edasipidi TLS) on kasutusel objektide mõõdistamisel ka tänapäeval, kuid tahhümeetriga võrreldes võib seda igapäevaselt objektidel vähem kohata. TLS on ajalooliselt väljatöötatud kosmose- ja kaitsetööstuse jaoks. [12] 2000. aastate alguses arendati TLS-id, mis olid mõeldud geograafilistele andmetele [13]. Esimest TLS-i pole võimalik välja selgitada, aga teerajajateks peetakse Austriast tulnud RIEGL LMS Z210 ja USAst toodetud TLS-i nimega CYRAX 2200 [14]. Lisaks objektide jäädvustamisele kasutatakse laserskannereid ka kultuuripärandite, taimede, autode, liikluse jms täpseks modelleerimiseks ja dokumenteerimiseks. Joonisel 1.2 on välja toodud Aafrika kultuuripärandi talletamine laserskanneri abil.



Joonis 1.2 Leica Geosystem laserskanner Aafrika kultuuripärandi mõõdistamisel [13]

TLS ehk maapealne 3D laserskanner suudab mõõdistada tuhandeid andmepunkte sekundis ja genereerida neid andmeid omakorda otse punktipilve üles [15]. Laserskannerite abil saab toota kõrge eraldusvõimega pilte, mida on võimalik georefereerida ja rakendada andmete analüüsiks ja töötlemiseks [16]. Võimalikult täpsete andmete saamiseks on oluline laserskanner paigutada nii, et laserkiir jookseks objekti pinnaga risti. Kui nii ei ole võimalik skannerit seadistada, siis tuleb arvestada, et erinevad laserkiire langemisnurgad võivad anda erineva kvaliteediga 3D punkte. Sihtmärkide paigaldamisel on oluline, et need oleks paigutatud skaneerimisalal ühtlaselt, erinevatele kõrgustele ja kaugustele. Sihtmärkide asetuse on tähtis, sest need mõjutavad registreerimistäpsust. [17]

TLS tehnoloogias kategoriseeritakse mõõtevead instrumentaalseteks, objekti eripärast tulevevateks, keskkondlikeks ja metodoloogilisteks [11]. Katsetused on näidanud, et toote infolehtedel lubatud täpsused ei ole alati kooskõlas reaalelus saavutatavate täpsustega. Seadme täpsus võib sõltuda nii kalibreerimisest, hooldusest kui ka seadme enda eripäradest. Laserskannerite puhul mõjutab viga ka mõõdistatava pinna parameetreid, näiteks värv ja peegeldumine. Mõõdistamised on näidanud, et eri tüüpi pinnad tekitavad tulemustes süstemaatilisi vigu. Vigade suurusi saab hinnata kasutades valgeid sihtmärke. Selleks tuleb uuritav materjal või pinnas laotada valgete sihtmärkide keskosale, teha mõõdistamised ning seejärel teha mõõdistamine ilma keskosaga kasutamata. Tulemuste võrdlus näitab pinnase parameetritest tulenevat viga. Mõõdistamisel tuleb hinnata ka keskkonda - nimelt mõjutab skannereid nii

kõrgetemperatuur, tolmune ja aurune atmosfäär kui ka liigne valguskiirgus. Need võivad mõjutada tulemuste täpsusi või aeglustada mõõdistustöö teostamist. [18]

Transilvaania ülikoolis võrreldi omavahel droonimõõdistust ja laserskaneerimist. Sama objekti mõõdistamise peale kulus laserskaneerimisel ajaliselt 6,5 minutit ehk 18,5 minutit vähem kui drooniga mõõdistamisel. Laserskaneerimise vea määr jäi 1,5-2 mm. [16] Tallinna lähistel TLS-i ja tahhümeetri võrdluse jaoks tehtud uuringus arvutati välja mõlema tehnoloogia mõõdistamisaeg. 1300 m<sup>2</sup> ala mõõdistamiseks tahhümeetriga kulus arvutuslikult ja liiklust arvesse mitte võttes 12,4 minutit, kuid seevastu TLS-iga arvustuslikult ning liiklust arvesse mitte võttes ligikaudu 7,3 sekundit. [8]

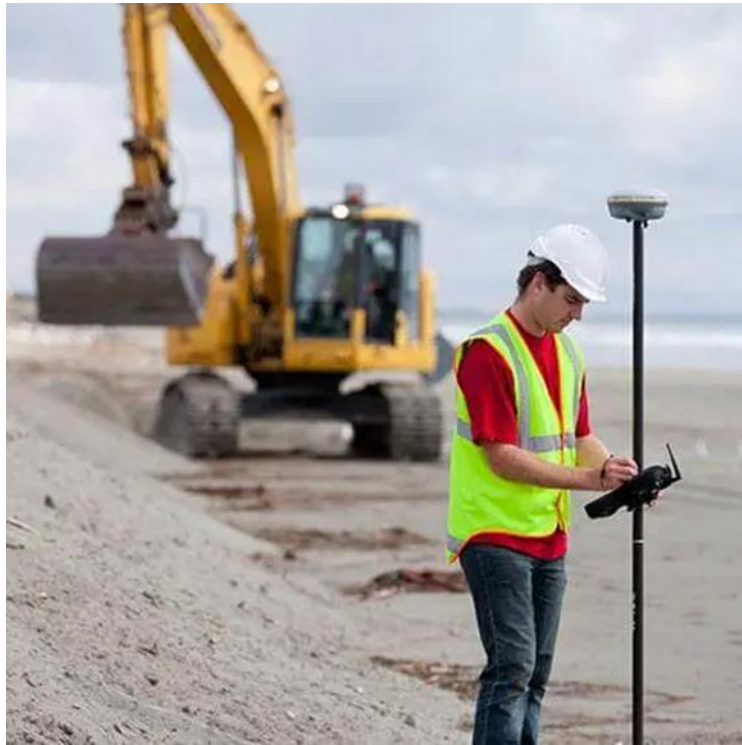
### **1.2.3 RTK-GNSS Rover**

RTK-GNSS rover on ehitajatele kõige lihtsam ja kättesaadavam geodeetiline instrument, sest neile sisseehitatud tarkvara on lihtne käsitleda ja instrumendi kõrguslik kontroll toimub ehitusplatsil asuvate reeperite abil. Seetõttu analüüsib autor RTK-GNSS veamäära ja mõõdistuste ajakulu. Ajaloolised andmed roveri esmakordsele kasutamisele on puudulikud.

Kasutades roverit, millel on RTK-GNSS meetod, annab see mõõdistajale usaldusväärse positsioonitäpsuse läbi reaalaja diferentsiaalandmete. Positsioneerimistäpsust mõjutavad ka aktiivse GNSS-võrgu pakutavad parandid. [19] Koordinaatidega fikseeritud tugijaama saab kasutada mitu roverit korraga. Server, mis koosneb juhtimiskeskusest võtab vastu ja töötleb jaamade andmeid reaalajas, hinnates samal ajal satelliitide hälbeid ja kõrvalekaldeid. [20]

Eestis kasutatavat Trimble R8s täpsust on erinevates uuringutes testitud, kuid manuaalis on maksimaalseks täpsuseks märgitud 8 mm horisontaalselt ja 15 mm vertikaalselt. [21] Bosnia ja Hertsegoviinas katsetati roveri täpsust kolmel erineval viisil – a) tavapärane viis, kus rover on mõõdistuspulga peal (vt Joonis. 1.3), b) rover on kahejalgsel pulgal ning c), kus rover asub statiivil. Kõik kolm katsetatud viisi andsid statistiliselt sarnased tulemused. Katsetuses pakkus enim huvi tavapärase mõõdistuspulga abil tehtud mõõdistamise täpsus, sest see on ehitusobjektile enim levinud praktika. Tavapärast mõõdistuspulka kasutades oli mõõdetäpsuseks horisontaalselt 7 mm ning vertikaalselt 8 mm. [19]





Joonis 1.3 Trimble R8s mõõdistuspulgal [21]

Indoneesias läbiviidud katsetusel võrreldi tahhümeetrit, laserskannerit ja roverit. Uuringusse võeti kaks testala, mille järel võrreldi alade punktide arvu, mõõdistamisele kulunud ajakulu ja mõõdetud pinnase mahtu. Saadud andmete täpsuse kontrolliks võeti aluseks TLS-i mõõdetud andmed. Tahhümeetri täpsus jäi 36-46 mm vahele ja GNSS-RTK roveril 51-71 mm juurde. Mahtude analüüsimisel tuli samuti välja, et ühelgi instrumendil ei muutunud TLS-iga võrreldes maht rohkem kui  $\pm 1\%$ . Ajaliselt selgus, et välitöodes on TLS TS-ist umbes 4 korda kiirem ja GNSS-RTK-st 3,2 korda kiirem. Kõige rohkem kulus aega TLS andmete töötlemiseks, järjekorras teisel kohal oli ajakulu vaatest TS ja kõige vähem aega kulus GNSS-RTK andmete töötlemiseks. [22]

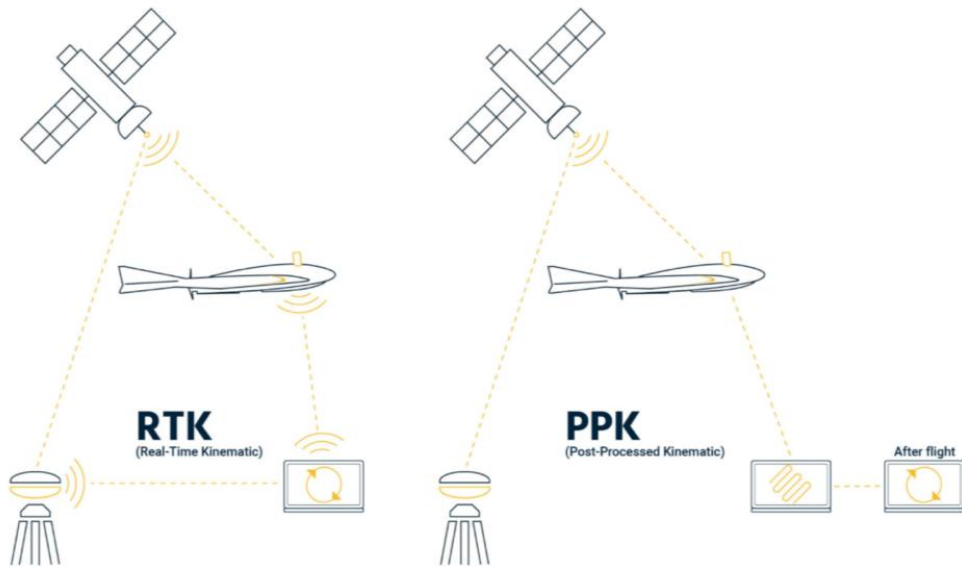
#### **1.2.4 Droon**

Tulenevalt arengutest sõjatööstuses tekkis 19. sajandil esmakordselt vajadus töötada välja sõiduk, mille juhtimiseks ei asu piloot masina sees. Välja töötati droon (ingl *Unmanned Aerial Vehicle* ehk UAV). Loodud droon oli kaugjuhitava õhikutõusmise ja maandumisega, korduvkasutatav ning vastas tänapäevastele funktsioonidele. Joonisel 1.4 olev droon pärineb 1935. aastast ning kandis nime DH 82B Queen Bee ja oli algselt kasutusel sõjalistel eesmärkidel. [23]



Joonis 1.4 droon DH 82B Queen Bee [24]

Droonimõõdistuse abil on võimalik teada saada nii maapinna kõrguspunkte kui ka uuritava maa-ala mahte läbi kõrguspunktide genereeritud pinnamudeli. Drooniga mõõdistamise puhul sõltub täpsus suuresti drooni fotogramm-meetria kaamerast [25]. Täpsust mõjutavad ka ilmastikutingimused, fotode ülekatte protsentuaal, kontrollpunktide arv, droonilennukõrgus ja -kiirus. Droon, mille abil soovitakse saada täpseid maapinnakõrguslike andmeid, peab olema lisaks heale kaamerale ka ühendatav GNSS-RTK tehnoloogiaga. [26] Peale reaalaaja kinemaatika (edaspidi RTK) on olemas ka PPK (ingl *Post-Processing kinematic*) režiim. RTK on süsteem, kus GNSS-vastuvõtja suhtleb referentsjaamaga reaajas ja suudab parandusi teostada lennu ajal. PPK režiim on kinemaatiline järeltötlusega GNSS-meetod, kus arvutatakse tehtud fotode koordinaadid ja parandused lisatakse peale lendu tugijaamast. [27, 16] Joonisel 1.5 on visuaalselt näidatud RTK ja PPK režiimide erinevus.



Joonis 1.5 RTK ja PPK režiimide erinevus [28]

Möödistamise puhul on oluline paika panna maapinna kontrollpunktid (edaspidi GCP). Kontrollpunktid on maapinnale märgitud sihtmärgid, mille keskelt on määratud koordinaadid. Hilisemal andmetöötlusel aitavad kontrollpunktid möödistatud pinda mudelisse täpselt paigutada. Mudelite georefereerimisel võimaldab GCP-de kasutamine tagada usaldusväärset positsioneerimisinfot. GCP-de arv ja ruumiline paigutus mõjutavad oluliselt mudeli täpsust. Türgis läbiviidud uuringus tuli välja, et GCP-de kasutamine fotogrammeetriaga ei vähendanud olulisel määral vigu X- ja Y-suunas, kuid vähendas neid Z-suunal. [29]

Enimlevinud droonid on 12-14MP kaameratega, mille täpsust on uuritud palju. *DroneDeploy* poolt tehtud kõrguslikes katsetustes kajastub, et olenevalt lennukõrgusest tuli 12MP kaamera veamarginaaliks umbes 20 cm [30]. Eestis läbiviidud katsetus näitab, et 20MP kaameraga drooni 50 m ja 40 m kõrguste lendude vertikaalne keskmine ruutviga jääb 3,5-4,7 cm. Saadud tulemus põhineb GCP-d kasutamata ehk vertikaalne positsioneerimistäpsuse tulemus kontrollpunktide lisamisel on tegelikult veelgi parem. [31]

Magistrant K. Reimanni lõputöö raames viidi läbi katsetus, mille käigus võrdleti erinevate droonide pinnamudelite mahuandmeid. Võrdluses määrati lähtepinnaks tahhümeetrilistest andmetest baseeruv pinnamudel ning võrreldi seda pinda UAV möödistustest koostatud pinnamudelitega. UAV möödistatud pinnamudeli maht erines tahhümeetrilistest andmetest koosnevast pinnamudelist 0,5%. [26]

### 1.2.5 Masinmöödistamine – greider

Masinmöödistamise ajalugu ulatub 1990. aastate lõppu, mil 3D masinate otsingu- ja juhtimiskonstruktsioonid turule jõudsid. Konstruktsioonid töötati välja Trimble, Leica ja Topcon poolt koostöös oma partneritega. [32] 3D mudelite kasutamise ehitustöös ning töödejärgne masinmöödistamine on Eestis igapäevatoos kasutusel algtasemel.

Lõputöös tuuakse masinjuhtimisel- ja möödistamisel enim näiteid greideri kasutamisest. Greideri masinmöödistamisel on palju olulisi nüansse, mida tuleb silmas pidada, alustades juhi kompetentsist ja huvist. Greider peab olema varustatud näiteks „Trimble Ready“ ja Trimble 3D *Grade Control Systemi* (GCS) või muude alternatiivsete süsteemidega. Masinmöödistamise teostamisel on üheks tähtsaimaks osaks ka tahhümeetri kalibreerimine, kuna tahhümeeter annab greiderile reaalses ajas täpset ja usaldusväärset positsioneerimis- ja mõõtmisinfort. [33]

Kasutades Trimble poolt loodud tarkvara on masinajuhil võimalus reaalajas näha kabiinis asetsevalt juhtpaneelilt mudeli põhjal graafilist pilti, mis kajastab infot masina tera asukohast, tera kaldest jms. Selle abil on võimalus masinaga töötada millimeetri täpsusega. Täpsuse saavutamiseks tuleb masinajuhil tööde alustamisele eelnevalt masin kalibreerida, mis hõlmab endas programmis ettenähtud suuruste mõõtmist, kuhu kuulub näiteks terade suuruse mõõtmine. Masinajuhtimise tarkvarad on tänaseks arenenud nii kaugele, et greiderijuhil on võimalus valida möödistamise aeg ja salvestada tööpäeva jooksul ehitatud pinda. Möödistatud alad ja punktid salvestuvad otse programmi, kus nendest on võimalus koostada aruanne, allkirjastada punkte või teha muid vajalikke toiminguid. [33] Eestis täidab selle programmi funktsioone näiteks InfraKit.

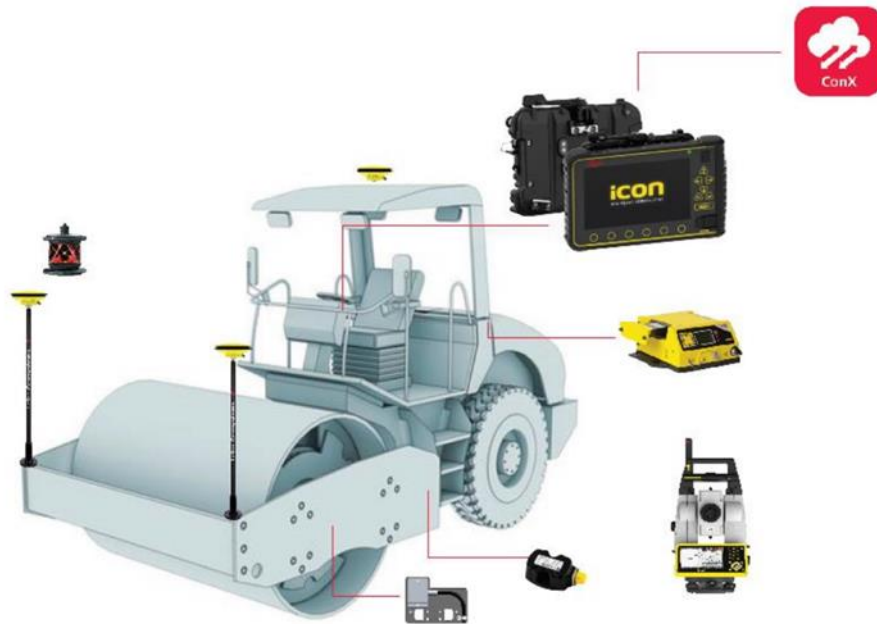
Greideri täpsust on uuritud erinevatel viisidel üle maailma. 28.03.2024 Tartumaal toimunud masinjuhtimiskonverentsil esitatud uuringus on välja toodud Trimble masinate täpsused. Masina täpsus sõltub suuresti sellest, kust greider enda positsioneerimisinfo saab. Kui masin kasutab vaid globaalset satelliitnavigatsioonisüsteemi (GNSS), siis on masinmöödistamise ja ehitamise täpsus väiksem võrreldes robotaahhümeetri positsioneerimisel. Uuringud on näidanud, et täpsus jääb 20-30 mm juurde. Kasutades GNSS-i on masina tera mõlemale küljele paigutatud antennid. Kui möödistamisi teostada robottahhümeetri abil, on masina terale paigutatud „sihtmärk“, mida tahhümeeter automaatselt jälgib. Robottahhümeetri kasutamisel on täpsuseks saadud  $\pm 5$  mm. [34]

Masinmöödistamise plussiks on suuresti ajakokkuvõid. Kui masinajuht juba ehitamiseks masinjuhtimist kasutab, saab peale kihi valmimist masinmöödistamist kasutades tulemused kohe peale kihi valmimist. Soomes läbiviidud uuringu käigus selgus, et masinmöödistamisega on võimalik säästa aega ja raha isegi kuni 50%. [32] Selline ajakokkuvõid on võimalik vaid koolitatud ja oskusliku masinajuhiga.

### **1.2.6 Masinmöödistamine – pinnaserull**

Tänapäevani on masinmöödistamise katsetamist kasutades pinnaserulli testitud vähesel määral. Teadustööna aktsepteeritavaid katsetusi pole autoril õnnestunud leida. Eestis on ettevõttesisese huvi põhjal katsetanud ja analüüsinud masinmöödistamist pinnaserulliga näiteks ettevõtte Tariston AS. Rohkem on teostatud uuringuid tihendusteguri möödistamisest rulli abil. Joonisel 1.6 on pinnaserull, kus näidatakse milliseid seadmeid on Leica ICON tarkvara põhjal 3D möödistamise ja ehitamise jaoks vaja.

GNSS-RTK pinnaserulli on võimalik kasutada rohkematel viisidel kui kõrguslike andmete teada saamiseks. GNSS-RTK kasutamisel on võimalik saada rullmasinaga automaatselt reaajas täpseid ja kolmemõõtmelisi andmeid. Kui valtsimiskordade arv pole piisav ja surveformatsioon ei saavuta esitatud normi, toob see kaasa ka muude kvaliteedihindamise näitajate ebapiisavad tulemused. Protsessi kiirendamiseks on rulltihenduse kvaliteedijärelevalve süsteemi alusel näha asukohapõhiselt ja reaajas tihendamistulemusi. GNSS reaajas tihendamise kvaliteedijärelevalve süsteem on GNSS lisamine pinnaserullile ja seejärel on süsteemis jälgitav rulliteekond, töötamisaeg, sõidukiirus, tihendus ning sujuvus. Teavet, mis on reaajas jälgitav, suudab süsteem ka automaatselt salvestada. [35]



Joonis 1.6 Pinnaserulli jaoks vajalikud komponendid [THEK tehnika esitlus]

### 1.2.7 Robotid

Lähiminevikus on robotikavaldkond olnud pidevas arengus ning tänaseks on välja arenenud ka masinmöödistamiseks vajalik riist- ning tarkvara. [36]. Robotiteks peetakse nii täiesti uusi masinaid, nagu Husky UGV ja ANYmal kui ka robotgreiderit, mis on klassikalise greideri põhjal ülesehitatud süsteem.

Clearpath Robotics Inc. on loonud roboti Husky UGV (ingl *unmanned ground vehicle*), mis on keskmise suuruse ja ratastega platvorm, kuhu saab paigutada erinevaid andureid. Platvormi suur kandevõime ja mahutatavus on boonuseks, mis võimaldab robotile lisada stereokaamerad, laserskaneerimisseadme (LIDAR), satelliitnavigatsiooni süsteemi (GPS), inertsiaalanduri (IMU) ja muid töö teostamiseks vajalike seadmeid. Lisades Husky UGV-le vajalikke seadmeid on võimalik teha möödistamisi nii tasastel pindadel kui ka konarlikel pindadel kuni 15 cm kõrguste takistustega. [36] [37] Robot Husky UGV on nähtav joonisel 1.7.



Joonis 1.7 robot Husky UGV [37]

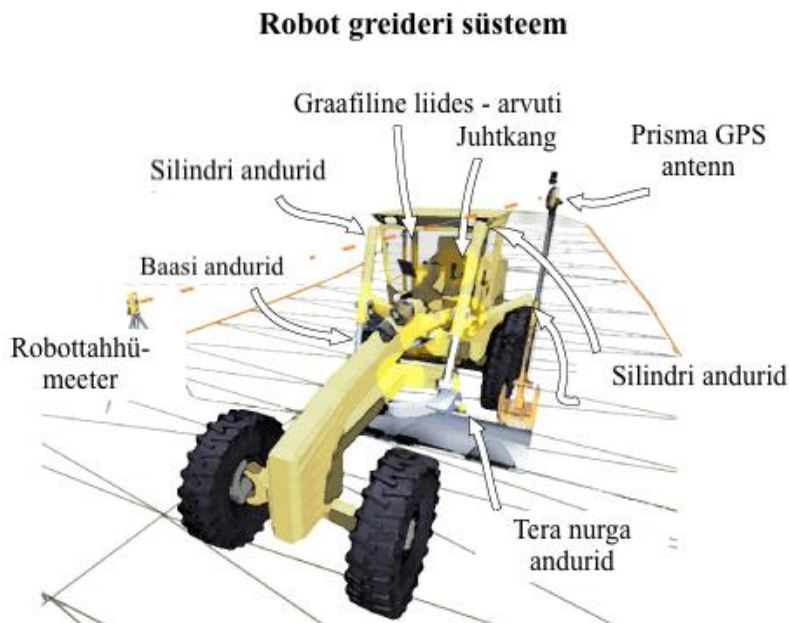
ETH Zürichi teadlased arendasid välja roboti nimega *ANYmal*. Tegemist on neljajalgse robotiga, mis saab iseseisvalt hakkama ka keeruliste pinnareljeefidega keskkondades. Sisseehitatud laserandurite ja 360° kaamerate abil suudab robot tajuda ümbritsevat keskkonda, luua kaarte ja operatiivselt lokaliseerida. Selle info alusel suudab robot iseseisvalt oma navigatsiooniteekonda luua ja kõndimisel hoolikalt oma tugipunkte valida. *ANYmal*-i peal on optilised- ja termokaamerad, mikrofonid, gaasituvastuse andurid ja aktiivne valgustus. Lisaks Husky UGV-le on *ANYmal*-il võimekus ka dünaamiliselt joosta ja liikuda kõrgematel pindadel. [36] [38] Robot *ANYmal* on nähtav joonisel 1.8.



Joonis 1.8 Robot *ANYmal* [39]



Roadsys Ltd arendas robot-greideri, mis on terviklahenduse põhimõttel töötav süsteem. Andurid ja välja töötatud tarkvara algoritmid juhivad kõiki terade liikumissuundi. Süsteem juhib automaatselt terade kõrgust, kallet ja sõidujoont. Juhtkangi abil on masinajuhil võimalus terade liikumist ise juhtida. [32] Robot greider on nähtav joonisel 1.9.



Joonis 1.9 Robot greider [32]

### 1.2.8 Mõõdistusinstrumentide võrdlus

Eelnevalt uuritud mõõdistusinstrumente saab omavahel analüüsida erinevatest aspektidest. Parameetrid, mida autor lõputöö raames võrdleb, on erinevate töötappide ajakulu ja täpsus, mis on esitatud tabelis 1.1.

Erinevatest parameetritest on täpsus ainuke, mida saab kasutatud kirjanduse põhjal numbriliselt võrrelda. Akuraatseim instrument on tahhümeeter, mille täpsuseks on  $\pm 1,3$  mm. Laserskanneri täpsus on suhteliselt sarnane ehk  $\pm 1,5-2$  mm. Natuke suurem erinevus esineb greideriga mõõdistamisel, mille täpsuseks on  $\pm 5$  mm. See saavutati kui mõõdistamisel kasutati positsioneerimiseks robottahhümeetrit. GNSS kasutamise korral jääb täpsus umbes  $\pm 20-30$  mm juurde. Kõige ebatäpsemaks saab pidada drooni, mille täpsus jääb  $\pm 57$  mm. See on 20MP kaameraga drooni keskmine ruutviga. Paremate parameetritega drooni puhul on võimalus saada ka parem täpsus.



Möödistustöödele kulunud aega saab vaadelda nii välitööde kui ka kameraaltööde abil. Autor võrdleb neid tabelis eraldiseisvalt, kuid kindlasti tuleks neid vaadelda ka tervikuna. Tahhümeetri puhul on tegemist inimressursi vaatest kõige ajakulukama möödistusviisiga. Droonil ja laserskaneerimisel on küll järeltötluse ajakulu suhteliselt suur, kuid enamik ajast kulub failide töötlusprogrammi ja programmisesele laadimisele. Kõige efektiivsemaks möödistamiseks saaks tõenäoliselt pidada masinöödistamist juhul, kui kasutada möödistatud punktide kokkupanemist masinas.

Tabel 1.1 Autori analüüsil baseeruv möödistamisinstrumente võrdlev tabel.

	Tahhümeeter	TLS	Droon	Masinmöödistamine (greider)
Täpsus (mm)	±1,3 mm	±1,5-2 mm	± 30 mm	±5 mm
Möödistamise ajakulu	Võrreldavatest meetoditest kõige ajakulukam möödistamisviis	Võrreldavatest meetoditest kõige kiirem möödistamisviis	Drooni lend on tahhümeetrilisest möödistamisest kiirem, kuid jääb ajaliselt alla laserile ja masinale	Võrdluses olevatest meetoditest saab pidada seda kõige kiiremaks
Järeltötluse ajakulu	Kõige ajamahukam	Järeltötluse ajakulu punktide rohkuse tõttu on punktipilve ja punktide puhastamise tõttu suurem (tarkvaraline ajakulu)		Kasutades möödistatud punktide baasil masinas kokku pandud mudelit, saab seda pidada kõige väiksema järeltötluse kuluga vahendiks
Positiivsed aspektid	Väga täpne	Väga kiire möödistamine ja palju punkte lühikese ajaga	Möödistamisel ja järeltötlusel on teostaja ajakulu minimaalne	Kiire ja lihtne möödistamise ja mudeli valmimise protsess
Negatiivsed aspektid	Möödistamine on ajakulukas	Tuleb korrata palju punkte, mis vajavad puhastamist	Võrreldes teiste möödistusmeetoditega	Vaja oskuslikku ja koolitatud masinajuhti, et

	Tahhümeeter	TLS	Droon	Masimõõdistamine (greider)
			on täpsusel suur veamäär	saavutada hea täpsus

Võrdluses esitab autor ka mõõdistusinstrumentide äärmused ehk negatiivsed ja positiivsed aspektid. Tahhümeeter on väga hea täpsusega, millest tulenevalt on see siiani üks peamisi mõõdistusinstrumente geodeetidele. Miinuseks on tahhümeetril ajakulu. Nii väli- kui ka kameraaltööd on mõlemad väga ajakulukad. Sellest tulenevalt on autor teisi mõõdistamismeetodeid lähemalt uurinud. Laserskanneri puhul on mõõdistamisele kuluv aeg suureks plussiks, kuid hilisem andmete töötlemine ja mudeli arusaadavaks kohandamine on ajamahukad protsessid. Drooni puhul saab pidada ajalist kulu üleüldiselt minimaalseks, see-eest väga tugevaks ja mõjutavaks negatiivseks aspektiks on teostusmõõdistuste kontekstis tulemuste suur veamäär. Masimõõdistamise plussiks on kiire mõõdistamine ja mudeli kokkupanek, kuid täpsust ja kiirust on võimalik saavutada vaid oskusliku ja koolitatud masinajuhiga.

Kõikidel meetoditel on omad miinused ja plussid. Autori arvamusel ja koostatud tabeli 1.1 põhjal tuleks suurendada masimõõdistamise osakaalu mõõdistustööde teostamisel. Kui objektidel nõutaks rohkem masinajuhtidelt 3D funktsioonide kasutamise oskuseid, suureneks ka kogemustega juhtide arv.

## 2. OLEMASOLEV MÕÕDISTUSPRAKTIKA

Teine peatükk keskendub Transpordiameti poolt tellitud klassikalise ülesehitusega projektile. Autor analüüsib Tarbja kogujatee ja Tarbja silla ehituse riigihanget (edaspidi hange), tuginedes hanke dokumentatsioonile ja mõõdistustingimustele. Tegemist ei ole BIM lahenduse ega masinmõõdistamise katsetamisega seotud hankega. Läbi projekti proovib autor anda edasi tänast mõõdistuspraktikat.

### 2.1 Hanke kirjeldus

Tarbja kogujatee ja Tarbja sillaehituse hange kuulub avatud hankemenetluse alla ning sellele ei ole kohaldatud täiendavaid lisanõudeid mõõdistamise ning dokumenteerimise osas. Välja on toodud, et tööde tegemisel tuleb juhinduda „Teetööde tehnilisest kirjeldusest“ [40]. Ehitusgeodeetiliste mõõdistustööde läbiviimisele kohalduvad erinevad õigusaktid, mis on määratletud tee omanikuga (Riigiteed, kohalik omavalitsus jne) [40]. Joonisel 2.1 on punasega [41] märgistatud Tarbja kogujatee ja sillaehituse asukoht. Objekti asukoht jääb Tallinn-Tartu-Luhamaa maantee kõrvale.



Joonis 2.1 Tarbja kogujatee ja Tarbja sillaehituse objekti asukoht punasega märgitud [Autori erakogu]

## 2.2 Nõuete vaade

Tarbja kogujatee ja Tarbja sillaehituse puhul on teostusmõõdistuste tingimused välja toodud teetööde tehniliste kirjelduste eritingimustes. Kui projektis puudub lisainfo mõõdistamistehnoloogia või hälvete kohta, siis tuleb juhinduda olenevalt tee omanikust, kas Transpordiameti või omavalitsuse kodulehel avaldatud dokumentidega, või Majandus- ja taristuministeeriumi välja antud määrusega, mis on avaldatud Riigi Teatajas.

Lähtudes Tarbja objektist, mis kuulub riigitee koosseisu, tuleb järgida teetööde tehnilist kirjeldust, projektdokumentatsioonis esitatud nõudeid, „Enimlevinud kontroll- ja vastuvõtutoimingute loetelu“ [42], „Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded“ [43]. Tee ehitamise kvaliteedi nõuetes [44] on esitatud hälbed.

### 2.2.1 Mõõdistusi teostava isiku nõuded

Kuna magistritöö käsitleb lisaks tavapärasele mõõdistamisele ka masinmõõdistamist, soovib autor läheneda nõutele teise nurga alt – uurides, kas ehitaja või masinajuht võib punkte mõõdistada. Tarbja kogujatee ja sillaehituse projektis ei ole sätestatud, et mõõdistajal peab olema geodeedi kutset.

Majandus- ja taristuministri poolt välja antud „Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded“ määruse kohaselt tuleb lisaks mõõdistamist teostanud isiku nimele esitada ka registrikood ning majandustegevuse registrinumber. Teostusmõõdistuste eest peab vastutama pädev isik oma nime ja kvalifikatsiooniga. [43] Mõõdistustöid saab teostada ka ilma geodeedi kutsetunnistusega isik, kui pädev isik need hiljem esitab ja vastutuse võtab.

Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirjas on eraldi välja toodud, et mõõdistustööde eest vastutav isik peab omama vähemalt tase 6 geodeedi kutsetunnistust ja varasemat kogemust teedeehituse geodeetilistes töodes [42]. Riigiteedel ehk Transpordiameti alla kuuluvatel teedel on reguleeritud mõõdistustööde eest vastutav isik täpselt nende nõuete alusel.

Masinmõõdistamist saaks teostada, kuid mõõdistamise eest ei saaks kutsetunnistusega ehitaja vastutada. Seega on võimalik esitada esimeses lõigus välja toodud küsimusele

vastuseks, et mõõdistajal ei pea olema geodeedi kutsetunnistust, vastavat kutset ja taset peab omama vaid mõõdistuste eest vastutav isik.

### **2.2.2 Mõõdistamisinstrumentidele seatud nõuded**

Mõõdistamiseks on erinevaid mõõdistusvahendeid. Riigihangetes ei ole enamasti välja toodud, millise geodeetilise mõõdistusinstrumentiga tuleb mõõdistusi teostada, on vaid viidatud määrustele. Tarbja objekti puhul ei ole samuti projektis kindlat mõõdistamisinstrumenti välja toodud.

Määrustes ei ole selgesõnaliselt mõõdistusvahendite kohta kirjutatud, kuid on välja toodud lubatud hälbed, mille alusel valib geodeet sobiva mõõdistusviisi/-vahendi. Kuna on välja toodud nõue, et insener mõõdistab kas geodeedi või roveri abil, siis masinmõõdistamise võimalust nõuetest ei tulene.

Transpordiamet on koostatud dokumendi, kus on kirjas enimlevinud kontroll- ja vastuvõtutoimingud [45]. Selles dokumendis on välja toodud, et „insener mõõdistab töövõtjast eraldiseisvalt, vajadusel kaasata geodeet või GNSS või GPS mõõdistamisele.“ Kuna mõõdistusi tuleb teostada töövõtjast eraldiseisvalt, siis on kõige lihtsam kaasata geodeet, mis tähendab tahhümeetrilist või roveriga mõõdistamist. Enimlevinud kontroll- ja vastuvõtutoimingute loetelus on ka lisatud märkus, et see dokument ei ole lõplik, sest lisanduda võivad veel eraldi projektist ja lepingust tulenevad nõuded.

### **2.2.3 Lubatud hälbed**

Lubatud hälbed võivad olla projektis nõudena ette kirjutatud, kuid enamasti on need määratletud tee ehitamise kvaliteedinõuetes. Hälbed on ka peamiseks aluseks, mille järgi valitakse mõõdistamisinstrument. Tarbja projekti puhul on eraldi teetööde tehniliste kirjelduste eritingimustes välja toodud, et töövõtja on kohustatud teostama objektil teostusmõõdistusi 25 meetrise sammuga ja teostusmõõdistuste osas tuleks juhinduda Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirja lisast nr 4. [41]

Lubatud hälbed erinevate tööliikide alusel on paika pandud majandus- ja taristuministri poolt väljastatud tee ehitamise kvaliteedinõuetes. Kruusatee, muldkeha, drenkihi ja killustikaluse ehitamisel on suurim lubatud hälve tee telje kõrguse suhtes  $\pm 50$  mm. Kui

tee asub asustatud alas või liitub külgneva konstruktsiooni või rajatisega võib tee telje hälve olla  $\pm 20$  mm. Muldkehal ja drenkihil võib vastava kihi serva kaugus teljest olla  $-50$  mm/  $+100$  mm. Aluse ehitamise puhul serva kaugus tee telje suhtes võib olla  $-0/+100$  mm. [44]

Lähtudes hälvetest ja peatükist 1.2, kus on välja toodud mõõdistusinstrumentide täpsused, saab väita, et masinmõõdistamine sobiks mõõdistamisvahendiks. Siiski võib masinmõõdistamine osutada töövõtjale keerukamaks kui tavapärane tahhümeetriline mõõdistamine. Geodeedi olemasolu objektil on igal juhul vajalik.

## **2.3 Kasutatavad mõõdistusinstrumentid**

Lähtudes mõõdistamisega seonduvatest dokumentidest, on mõõdistusinstrumenti valiku puhul kõige mõistlikum kasutada tahhümeetrit või laserskaneerimist. Dokumentide korrektseks esitamiseks on tarvis ka geodeedi kaasamine mõõdistustöösse. Selles peatükis analüüsib autor Tarbja objektil kasutatavat mõõdistamistehnoloogiat ja mõõdistamisele kulunud aega.

### **2.3.1 Tahhümeeter ja laserskaneerimine**

Kirjanduse ülevaate peatükis 1.2 selgus, et tahhümeetriga mõõdistamine on üks ajakulukamaid mõõdistamisviise. Tahhümeetriga on võimalik mõõdistada täpselt valitud koordinaate, kuid selle täpsust mõjutavad nii vaatenurk, -kaugus, kui ka iono- ja topofäärilised tingimused. Heade mõõdistamistingimuste saavutamine nõuab samuti aega. Samas on laserskaneerimise mõõteprotsess tunduvalt kiirem.

Tahhümeetril on nii ülesseadmine, mõõdistamine kui ka andmetöötlus küllaltki ajamahukad. Tahhümeetri puhul tuleb leida objektil kõige optimaalsem koht, kuhu masin püsti panna. Võimalikult suure vaatenurga ja -kauguse leidmine võib kurvilisematel objektidel/teedel olla keeruline. Lisaks tuleb pikemate lõikude puhul järjepidevalt selle asukohta muuta. Peale paikapanemise on suurimaks ajakuluks mõõdistamine, kus geodeet laserprisma abil punkte mõõdab ja kõik punkti asukohad ise jalutades läbi peab käima. Hilisem andmetöötlus ehk mudeli koostamine on võrreldes mõõdistamisega kiirem protsess.

Laserskaneerimise puhul on optimaalse moodsustamiskoha leidmine sarnane tahhümeetriga. Skaneerimine on aga kiire ja tõhus. Laserskaneerimine suudab moodsustada tuhandeid punkte sekundis, kuid suurema osa ajast võtab punktiandmete haldamine. [10] Hilisem punktipilve puhastamine ja mudeli koostamine on märkimisväärselt mahukam.

Kõigil moodsustusmeetoditel on omad positiivsed ja negatiivsed küljed. Autori kogemuse põhjal on kõige enam levinud moodsustusviis tahhümeetriiline moodsustamine, kui projektselt pole kindlat moodsustusinstrumenti ette antud. Tahhümeetri eelisteks on täpsus ja igapäevasele kasutajale on kasutamine lihtne.

### 2.3.2 Reaalne moodsustamine objektil

Tarbja objektil teostati moodsustusi geodeedi abil tahhümeetriga moodsustades. Autor analüüsib ühe tehnoloogilise kihi ülesmoodsustamiseks kulunud aega. Lõputöö kirjutamise hetkeks ei ole objekt veel täielikult valminud, kuid 2023. aastal on lõigul tehtud geodeetilisi moodsustamisi ja loodud teostusjooniseid.

Vaatluse alla võetakse tahhümeetriga moodsustatud killustikkiht. Tabelis 2.1 on näha, kui palju kulus Tarbjal välitööde ja kameraaltööde jaoks aega. Objekti pikkus on 2510 m ning killustikaluse moodsustamisele kulus ligikaudu 6 tundi. Teostusjoonise kokkupanemiseks kulus veel omakorda umbes 4 tundi. Kogu protsess, sealhulgas moodsustamine ja teostusjoonise tegemine, võttis kokku ligikaudu 10 tundi. Tegemist on tavapärase objekti ja moodsustamisega, mistõttu on andmeid hea kasutada tulevikus erinevate võrdluste aluseks.

Tabel 2.1 Objekti killustikkihi moodsustusele kulunud aeg

Instrument	Pikkus	Välitööd	Kameraaltööd
tahhümeeter	2510 m	6 h	4 h

Tarbja objekti on olemuselt lihtne moodsustada. Tegemist ei ole väga kurvilise teega. Vaadeldes joonist 2.2, on näha, et moodsustamistingimused on üldiselt head, tegemist ei ole ka liikluse all oleva teega. Foto on valitud tööde algaasist, et illustreerida paremini objekti algset olukorda.



Joonis 2.2 Trassi illustreerimine tööde algfaasis [Autori erakogu]

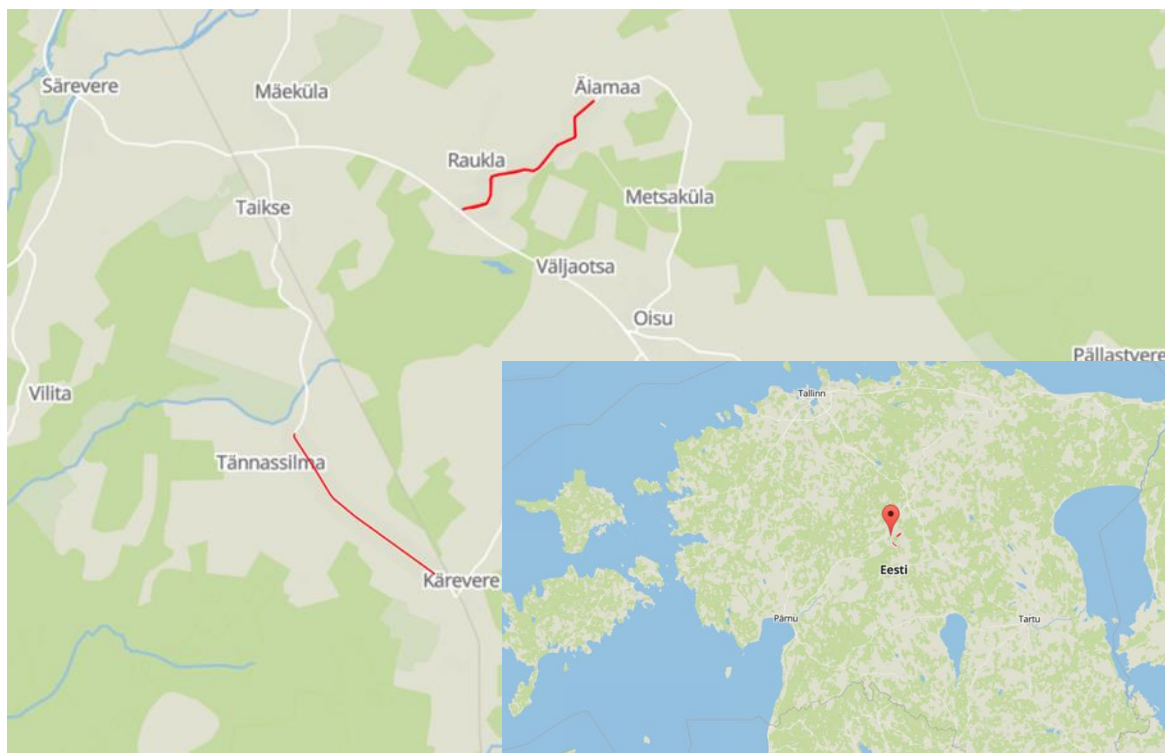


### 3. KAASAEGSETE MEETODITE PILOTEERIMINE

Viimastel aastatel on Transpordiamet hakanud rohkem tegelema moodsustamisega seotud pilootprojektidega nagu näiteks Kõisi-Koigi maanteelõik. Selle põhjal võib eeldada, et masinmoodsustamist ja mudelehitamist on hakatud rohkem katsetama ja loodetavasti aktsepteeritakse tulevikus ka nõuetes. Kolmandas peatükis analüüsib autor kõrvalmaantee 15173 Oisu-Kärevere-Taikse km 4,920-7,706 ja 15212 Raukla-Äiamaa-Oisu km 0,046-2,760 tolmuva kate ehitust koos masinjuhtimise seadmetest info kogumise katsetamisega.

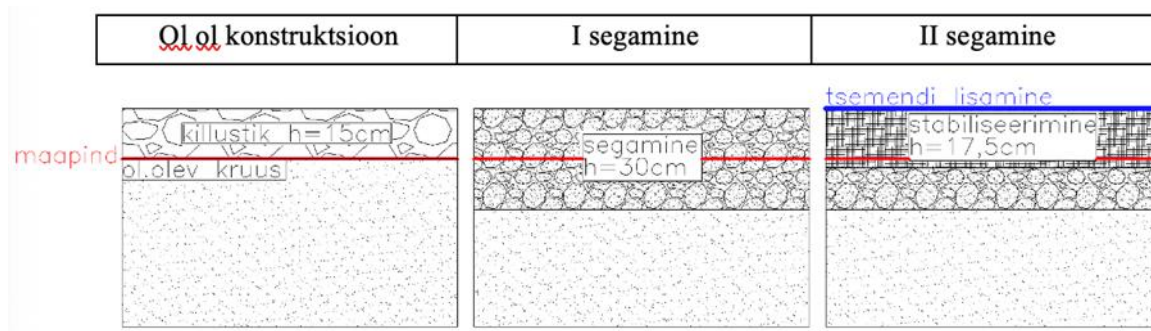
#### 3.1 Hanke kirjeldus

Masinjuhtimise seadmetest infokogumise katsetamisega teostatavad lõigud asuvad Kesk-Eestis, Järva maakonnas, Türi vallas. **Error! Reference source not found.** on punasega tähistatud teede asukoht. Autor valis projekti isikliku kokkupuute tõttu, olles ise sellesse projekti kaasatud. Katsetuste juuresviibimisel annab see objekt autori arvates paremat sisendit täpsuse ja töö analüüsimiseks. Töö objektil toimus 2023. aasta suvel. [46]



Joonis 3.1 Pilootprojekti kuuluvad teed [ autori erakogu ]

Teekatte rajamisel tuli arvestada tee laiusega, kus olemasolev kate profileeritakse ning sellele paigaldatakse 15 cm paksune killustikkiht. Seejärel segatakse olemasolev teekate ehk kruus (15 cm) ja killustik (15 cm) stabiliseerimismasinaga läbi ja laotatakse segatud kihile tsement, sideaine ja optimaalse vee kogus. Peale pindade stabiliseerimist, planeerimist ja tihendamist tuleb pealmiseks kihiks kahekordne pindamine. Joonisel 3.2 on näha skemaatiliselt teekatte nõutud ehitusliku konstruktsiooni. [47]



Joonis 3.2 Hanke dokumentatsioonis esitatud ehituslik konstruktsioon [47]

Hanke eesmärgiks oli kruuskattega teele kate ehitamisel kasutada masinjuhtimise tehnoloogiat. Lisaks masinjuhtimisele kasutada tööviljakuse suurendamiseks masinjuhtimise seadmeid ka tööde üleandmiseks vajalike mõõdistuste teostamisel. Killustikkihi laotamisel oli vaja kasutada masinjuhtimist ning peale laotamist tuli masinajuhil laadida üles masinmõõdistamise alusel tehtud kontrollpunktid, mille alusel tõendati paigaldatud kihi kõrgusliku õigsust. Samuti tuli peale stabiliseerimise teostamist võtta kontrollpunktid, millest hiljem koostada eraldi seisvad mudelid. [47]

## 3.2 Tehnoloogiline vaade

Pilootprojekti raames ehitati olemasolev kruuskate tolmuwabaks katteks, mille käigus kasutati 3D masinjuhtimist ja kontrollmõõdistamist. Töövõtja ülesandeks oli kasutada ühtset süsteemi, kuhu oleks andmed otse objektilt võimalik üles laadida. Peale masinmõõdistamise mõõdistati samad pinnad üle ka roveriga, et tekitada võrdlusmoment. Pinnatud kihtidel kasutati kolme erinevat lahendust, aluseks võeti geodeedi poolt tehtud mõõdistused ja mõõtmised teostati drooni ja roveriga. [46]

### 3.2.1 Masinmõõtmine ja 3D masinjuhtimine

Esimeseks eesmärgiks oli masinmõõdistamist kasutada profileeritud olemasoleva kruuskatte mõõdistamisel. Enne ehitustööde algust kasutati töömudeli loomiseks RTK-GNSS roveriga mõõdistatud punkte. Nende punktide põhjal loodi landXML ehitusmudel 3D masinjuhtimiseks. Joonisel 3.3 on näha, kuidas ehitusmudelit näeb masinajuht masinast. [46]

Tööde teostamisel ja mõõdistamisel kasutati Tariston AS-i pinnaserulli ja Jahho A.M. OÜ hõõvliit. Masinmõõdistamisel kasutati Leica iCON süsteemi ja kontrollpunkte võeti iga 100 m tagant, seda nii peale killustikkihi paigaldust kui ka peale tsemendiga stabiliseerimist. Täpsuse tagamiseks paigaldati objektile kohalik baasjaam, millest saadi masinate parandid. Objekti koondpikkuseks oli kokku 5,1 km, mistõttu tuli hõõvliil RTK parandite edastamiseks kasutada andmesidet. [46]

Greideri ja rulliga mõõdistamisel kasutati manuaalset mõõdistamist. Greideri puhul liigutas masinajuht vastavalt piketaažile tera paika ja seejärel vajutas mõõdistamise teostamiseks vastavat nuppu. Masinajuhivaadet on näha joonisel 3.3 Samasuguse vaate kuvas Leica ConX-i programm ka arvutisse, kus sai vajadusel ekraanijuhtimise üle võtta. Masinal on olemas ka automaatse mõõdistamise võimekus, kus vahemaa ja ajaühiku järgi toimub automaatne punktide mõõtmine. Objektile kasutati manuaalset mõõdistamise võimekust, sest sel viisil sai masinajuht võimaluse ise nii vertikaalselt kui ka horisontaalselt veenduda alustera paiknemises. Mõõdetud kontrollpunktid laaditi otse objektilt Infrakit tarkvarasse üles. [46]



Joonis 3.3 Ehitusmudel greideri iCON tahvilil [46]

Masinmöödistamise seisukohalt võrreldi omavahel ehitusmodelit greideri ja rulliga. Rulliga teostati killustikaluse möödistamine Oisu-Kärevere-Taikse lõigul ja greideriga mõlema lõigu stabiliseeritud kiht. Tabel 3.1 kajastab kõrguste erinevusi ja sisse on jäetud ka roveriga teostatud möödistamine. [46]

Tabel 3.1 Kõrguste erinevused masinmöödistuse kontrollpunktide ja teostusmodeli vahel [46]

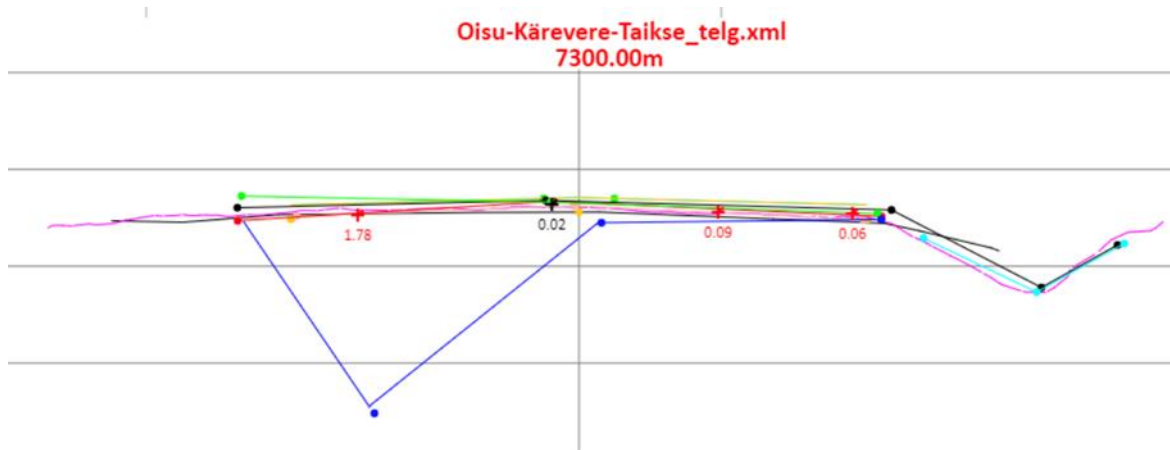
	Ühik	Raukla-Äiamaa-Oisu		Oisu-Kärevere-Taikse	
		Killustikalus	Stabiliseeritud kiht	Killustikalus	Stabiliseeritud kiht
Masin		Rover	Greider	Rull	Greider
Möötmiste arv	tk	80	83	65	85
Aritmeetiline keskmine	m	-0,015	-0,001	-0,011	-0,015
Mediaan	m	-0,016	-0,004	-0,007	-0,018
Min	m	-0,094	-0,079	-0,097	-0,086
Max	m	0,094	0,092	0,046	0,053
Erinevuse ruut		0,101	0,082	0,059	0,080
Keskmine ruutviga	m	0,036	0,032	0,030	0,031

Vaadeldes tabel 3.1 aritmeetilise keskmise tulemusi on näha, et kõikidel masinmöödistamistel jäid vead 15 mm ulatusse. Tulemusi eraldi vaadeldes on aga mõningad möötmistulemused kuni 10 cm vahega. Keskmine ruutviga (edaspidi KRV) on tundlik suuremate vigade suhtes, mistõttu iseloomustab see kõige efektiivsemalt möötmiste täpsusi. KVR alusel on viga suurem ehk masinmöödistamisel kuni 32 mm. [46]

Lisaks kõrguste erinevusele võrreldi omavahel ka Raukla-Äiamaa-Oisu lõigu kihtide paksuste erinevusi. Killustikkiht, mis teele paigaldati, oli 15 cm paksune ja möödeti käsitsi üle. Hõõvliga möödistatult tuli kihi paksuseks keskmiselt 18,6 cm. [46]

Möödistamise käigus tekkisid ka anomaaliad, mis olid andmete analüüsil kergesti tuvastatavad. Anomaaliad seisnesid peamiselt punktide ebareaalsetes kõrgustes e.

Infrakit keskkonnas, kus mudelit hiljem ristlõikes vaadelda sai. Infrakit keskkonnas saab anomaaliaid kergelt tuvastada ja nendega töötada. Joonisel 3.4 on lisatud näide. [46]



Joonis 3.4 mudelis leitav anomaalia [46]

Töö autor on seisukohal, et mõõdistamiste täpsusi oleks saanud tehnoloogilistest aspektidest parendada. Kõik, mis seondub parendamise, tehtud vigade ja esinenud probleemidega, on kirjas peatükis 3.4.

### 3.2.2 GNSS-RTK rover

Pilootprojekti eesmärgiks ei olnud roveri täpsuse ja toimivuse testimine, vaid pindu mõõdistatiga roveriga, mille alusel saab ehitusmudeli või teostusmudeliga võrrelduna täpsusi kontrollida ja andmeid analüüsida. Kõik mõõdistamised viidi läbi Trimble R8s roveriga.

Eelnevas alapeatükis paiknevas tabelis 3.1 on toodud killustikaluse mõõdistamisel kujunenud roveri täpsus. Hanke alusel roveriga pindamiskihti üle ei pidanud mõõdistama, kuid roveri täpsuse analüüsimiseks tegi ehitaja seda siiski. Tabel 3.2 kajastab geodeedi ehk tahhümeetriga mõõdistatud pinna ja ehitaja ehk roveriga mõõdistatud pinna erinevusi ühes lõigus. Tabelis on kujutatud arvud puhastamata ehk koos anomaaliatega.

Tabel 3.2 Tahhümeetri ja RTK-GNSS roveriga mõõdistamise erinevused

	Raukla-Äiamaa-Oisu	Oisu-Kärevere-Taikse
Mõõdistamiste arv (tk)	86	88
Aritmeetiline keskmine (m)	-0,040	-0,021
Mediaan (m)	-0,043	-0,021
Miinumum väärtus (m)	-0,144	-0,089
Maksimaalne väärtus (m)	0,125	0,036
Keskmine ruutviga (m)	0,304	0,033
Anomaaliate arv/protsentuaal (tk)/(%)	6/7	0/0

Analüüsis tabelit 3.2, on näha, et RTK-GNSS roveri anomaaliate protsentuaal Raukla-Äiamaa-Oisu lõigul tuli 7% on küll 2,7 km ehk ühe lõigu kohta suur. Teades, et enamik teiste mõõdistusviiside puhul jäi anomaalia protsent alla 7%. Samas Oisu-kärevere-Taikse lõigul anomaaliad puudusid, mis võib tingitud olla võrguühendusest või satelliitide olemasolust. Mõõdistaja oli mõlema lõigu puhul sama.

Täpsus koos anomaaliatega andis hälbeks -40 mm. Arvestades et anomaaliaid oli sel lõigul 7, siis on täpsus väga arvestatav. Teise lõigu puhul, kus anomaaliad puudusid, oli aritmeetiline keskmine viga -21 mm, mis on väga hea tulemus. Asustatud aladel on Eestis suurim lubatud hälve  $\pm 20$  mm, mistõttu on see täpsus väga lähedal nõuetekohasele täpsusele. Miinumum- ja maksimumväärtused on küll suured, kuid keskmine hälve annab kõige mõistlikuma ülevaate.

### 3.2.3 Drooni mõõdistamine

UAV mõõdistamine teostati pinnatud kihilt. Pärast pindamist mõõdistati sõidutee veel roveri ja eraldi tellitud geodeedi poolt üle, et saada paremaid ja asjakohasemaid võrdlustingimusi. Mõõdistamisel kasutati Phantom 4 RTK drooni. Lendudel kasutati Hades Invest OÜ GNSS püsijaamade võrku HadNet-i. [46]

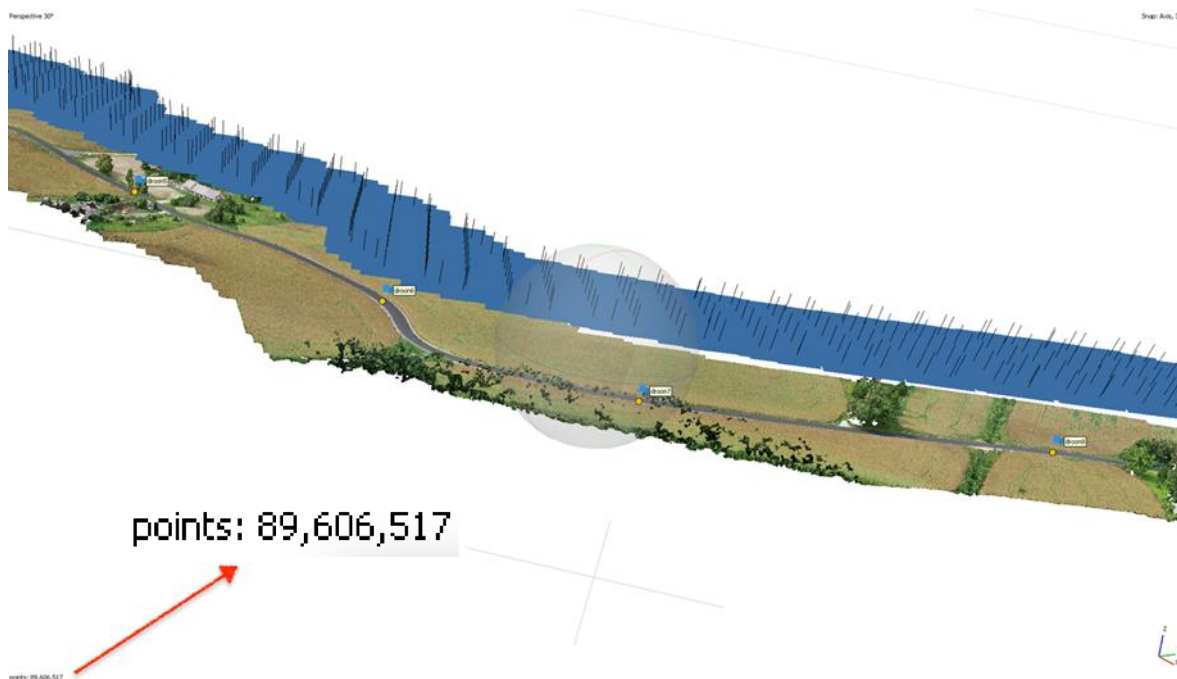
Enne UAV mõõdistamist on oluline teha ka eeltööd. Aja kokkuhoiu mõistes tuleb lend eelnevalt planeerida. Objektile kasutati Google Earth Pro tarkvara, kus on võimalik märkida mõõdistamisele minev ala. Hiljem saab selle lisada mälukaartile ja sealt sisestada otse drooni. Enne mõõdistamist tuleb objektile hiljem vaid lennuparameetrid paika seada. Lisaks paigaldati objektile enne lendu maapealsed kontrollpunktid GCP (vt Joonis 3.5), mille alusel hiljem andmeid töödeldes saab mõõdistamisest tekkinud vigu vähendada. [46]



Joonis 3.5 GCP punktide märkimine maapinnale [Autori erakogu]

Andmete töötlemiseks kasutati *Agisoft Metashape Professional* tarkvara. Andmeid puhastati lisaks *Agisoft*-ile veel ka *Autodesk Recap* tarkvaras. Enne puhastamist tekkis pildifailide töötlemisel 2,2 miljardit punkti, mis tähendas, et objekti pildifailide üles laadimine *Agisoft*-i võttis andmetöötlusel suure osa ajast. Pärast punktipilve puhastamist jäi Raukla-Äiamaa-Oisu teelõigule 89,6 miljonit punkti nagu on näha ka joonisel 3.6. *Autodesk Recap* programm aitas nii punktipilve puhastamisel kui ka objekti väiksemateks lõikudeks tegemisel. Objekti väiksemateks lõikudeks tegemine oli vajalik, et lisada hiljem *Autodesk Civil 3D* abil loodud mudel Infrakiti, kus täissuuruses faili üleslaadimine polnud mahu tõttu võimalik. Lisaks Infrakitile on võimalus ka *Autodesk Civil 3D* tarkvaras kontrollida mõõdistatud mudeli andmeid. [46]





points: 89,606,517

Joonis 3.6 Puhastamata punktipilv Agisoftis [Autori erakogu]

UAV mudelit võrreldi nii kõrguslikult, laiuslikult kui ka mahuliselt. Raukla-Äiamaa-Oisu lõigule lisas autor kontrollpunktid ise maha, kuid võrdlusmomendi tekitamiseks Oisu-Kärevere-Taikse lõigul märkis need maha geodeet. Andmete analüüsimisel on näha, et täpsuselt see tulemusi ei mõjutanud. Kõrguslike andmete võrdlust drooni ja geodeedi poolt mõõdistatud andmetele on näha tabelis 3.3. Tulemused olid lõiguti erinevad, kuid aritmeetiline keskmine jäi  $\pm 28$  mm. [46]

Tabel 3.3 UAV ja geodeedi poolt tehtud kõrguslike mõõdistuste võrdlus [46]

	ühik	Raukla-Äiamaa-Oisu	Oisu-Kärevere-Taikse
Aritmeetiline keskmine	m	0,006	-0,028
Mediaan	m	0,012	-0,023
Min	m	-0,106	-0,142
Max	m	0,081	0,06
Erinevuse ruut		0,129	0,244
Keskmine ruutviga	m	0,039	0,053



Sõidutee laiuste mõõtmine droonimudelilt oli kohati raskendatud. Täpsemalt on sellest juttu peatükis 3.4.2. Seetõttu leiab töö autor, et andmete analüüsimine selles kontekstis poleks tulemuslik ega informatiivne. [46]

Mahuliselt võrreldi omavahel mõlemat lõiku eraldi ja sõidutee alusel, mahasõitude mahtu sisse ei arvestatud (tabel 3.4 ja tabel 3.5). Greideriga mõõdistatud andmeid mahuarvutustesse ei kaasatud, sest objektile greider laiusi ei mõõdistatud. Kuna droonimudelilt oli sõidutee laiuse defineerimine raskendatud, siis võrdluses kõige ebatäpsemaks võis osutada droon. Analüüsidest mahte on drooni ja geodeedi mõõdetud mahud sarnased - mõlema lõigu puhul on mahu erinevus  $\leq 1\%$ . [46]

Tabel 3.4 Raukla-Äiamaa-Oisu teostusmõõdistuste tulemuste võrdlus [46]

Pinnatud kihi maht pinnamudelilite alusel (ilma MS)		
Droon	Geodeet	Rover
19137 m <sup>2</sup> (589839 punkti)	18961 m <sup>2</sup> (372 punkti)	17950 m <sup>2</sup> (601 punkti)

Tabel 3.5 Oisu-Kärevere-Taikse teostusmõõdistuste tulemuste võrdlus [46]

Pinnatud kihi maht pinnamudelilite alusel (ilma MS)		
Droon	Geodeet	Rover
17948 m <sup>2</sup>	17902 m <sup>2</sup>	16741 m <sup>2</sup>

### 3.3 Pilootprojekti tulemused

Pilootprojekti tulemusi on põgusalt analüüsitud ka eelmistes alapeatükkides. Antud peatükis toob autor välja mõõdistamiseks kulunud ajakulu ja võrdleb mõõdistamistulemusi Majandus- ja Taristuministeriumi poolt välja antud tee ehitamise kvaliteedinõuetes välja toodud lubatud hälvetega. Samuti annab autor ülevaate sellest, kas pilootprojekti rakendatud meetmeid oleks võimalik kasutada ka teostusmõõdistamisi tehes pilootprojektiväliselt igapäevaselt.

### 3.3.1 Mõõdistamiseks kulunud aeg

Erinevate mõõdistamiste peale kulunud ajad pandi kirja. Kõige vähem kulus aega 2,7 kilomeetrise lõigu mõõdistamisel greideril ja kõige enam geodeedil, kellel kulus puhtalt mõõtmisele 4 h. Droon ja RTK roveriga mõõdistamise ajakulu jäi nende kahe meetodi vahele - droonilend oli 45 min ja roveriga mõõtmine 1,5 h. Drooni hilisemat andmetöötlust on raskem arvestada, sest ajalisel kulus sellele umbes 2,5 päeva. Küll tegutses suurema osa sellest ajast programm punktipilve genereerimisega. Punktipilve genereerimise ajal ei pea olema keegi arvuti juures ega sellele protsessile järelevalvet teostama. See-eest RTK roveri ja greideri andmetöötluse korral on punkte niivõrd vähe, et punktipilvest mudelite loomine võtab aega vaid mõned hetked.

Masinmõõdistamise kasutamine vähendaks vajadust teostada välimõõdistamisi geodeetide poolt ja kiirendaks ehitajatel ehitusprotsesside teostamist. Teisalt suureneks ajakulu projekteerimises pinnamudelite koostamisega. Tööviljakust illustreerib tabel 3.6. [46]

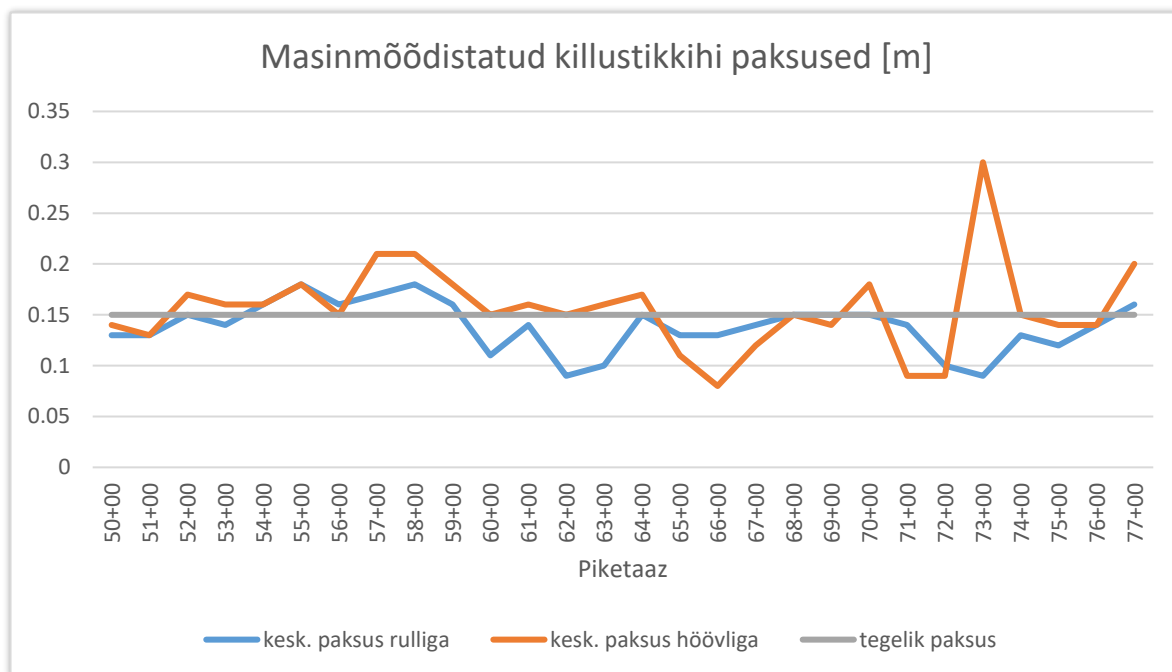
Tabel 3.6 Tööviljakuse võrdlus vastavalt mõõdistamistehnoloogiast [46]

Meetod	Aeg	Kommentaar
Greider	0,5 h	2700 m
RTK-GNSS rover	1,5 h	2700 m
Käsitsi paksuste kaevamine	2 h / 4 h	Iga 200 m tagant/Iga 100 m tagant
Droon	45 min	2700 m pikkuse lennu peale kulunud aeg
Geodeet	8 h	2700 m pikkuse lõigu peale kulunud aeg +4 tundi kameraaltööd

### 3.3.2 Mõõdistustulemuste järelused

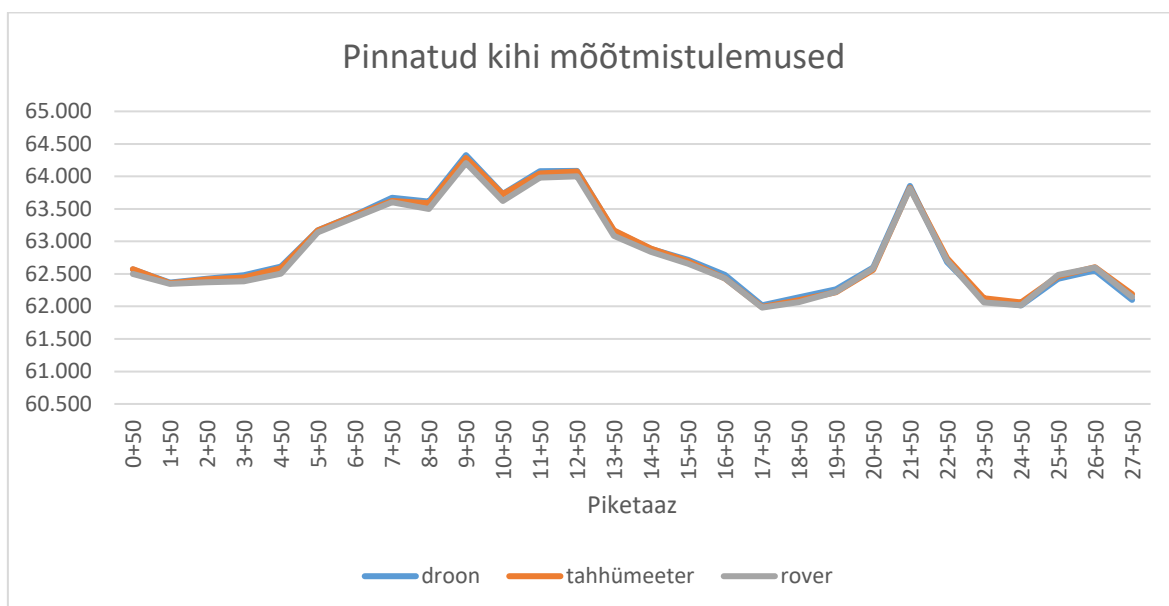
Mõõdistustulemuste järeluses annab autor ülevaate üldistest tulemustest, esitades tulemused nii graafiliselt kui ka kirjaliku ülevaatenähtena. Selles alapeatükis vaadeldakse andmeid ainult täpsuse alusel. Konstruksioonikihtidest võetakse aluseks vaid pinnatud ja killustikkiht.

Joonisel 3.7 on kuvatud killustikkihi keskmised paksused piketaaži põhiselt Oisu-Kärevere-Taikse lõigul. Võrdluse aluseks on võetud killustikkihi nõutud projektne paksus 15 cm ja käsitsi kaevamise meetodil saadud keskmine ehk tegelik paksus 15 cm. Joonisel on näha ka anomaaliaid. Näiteks PK 73+00 on greideriga mõõdetud 30 cm kihi paksus. Võttes andmetest keskmise on rulliga mõõdistatud pinna keskmine 14 cm ja greideriga 16 cm. Anomaaliad ja ebatäpsused on mõõdistustes sees, kuid keskmisena on hälve vaid  $\pm 10$  mm, mis on kokkuvõttes ka nõuete põhjal aktsepteeritav.



Joonis 3.7 Killustikkihi keskmiste paksuste erinevused Oisu-Kärevere-Taikse lõigul

Drooniga mõõdistatud ja geodeedi mõõdetud pinnatud kihi kõrguslik vahe tuli aritmeetilise keskmisena vahemikus 6 mm kuni -28 mm, olenevalt mõõdistatud lõigust. Joonisel 3.8 on kuvatud Raukla-Äiamaa-Oisu pinnatud kihi andmed. Nende samade andmete puhul on näha, et tahhümeetri ja drooni tulemuste keskmine vahe on 7 mm. Drooni ja tahhümeetri väikest tulemuste erinevust kajastab ka tabel 3.3, kus võrreldi tulemusi omavahel mahuliselt. Pilootprojekti raames tuli drooniga mõõdistamise puhul väga hea täpsus, mis annaks võimaluse ka asustamata aladel teha teostusmõõdistusi drooni abil.



Joonis 3.8. Raukla-Äiamaa-Oisu pinnatud kihi mõõdistatud kõrgused erinevate mõõdistusinstrumentide abil

Roveri ja tahhümeetri võrdlusel on kõrguslikud vahed veidi suuremad. Mõlema lõigu keskmine vahe on -21 mm, mis on nõuete puhul aksepteeritav tulemus. Kuid vaadeldes joonisel 3.8 kujutatud lõiku ehk Raukla-Äiamaa-Oisu, on näha, et kõrgused kõiguvad keskmiselt 40 mm, mis asustatud aladel nõuetele ei vastaks.

Võrreldes tulemusi peatükis 2.2.3 välja toodud mõõdistamisel lubatud hälvetega saab pilootprojekti üldiste tulemustega rahule jääda. Kõik mõõdistusmeetodid jäid aritmeetilise keskmisega  $\pm 50$  mm vahemiku. Asustatud aladel või konstruktsiooniga külgneva ala puhul on lubatud nõuetekohaselt kõrguslik kõikumine  $\pm 20$  mm. Seetõttu tuleks katsetada masinmõõdistamise puhul tahhümeetri abil mõõdistamist GNSS asemel, et teada saada täpsuse erinevused. Roveri andmete puhul saaks paremad tulemused kui anomaaliad ja ebatäpsed mõõdistamised oleksid eemaldatud. Kuid kuna magistritöö autor mõõdistas roveriga ja leiab, et need vead on tingitud mõõdistamisest ning neid võib sisse tulla ka teistel objektidel, siis on need mõistlik selle töö raames sisse jätta. Masinate puhul võeti anomaaliad välja. Drooni andmete puhul eemaldas anomaaliad *Agisofti* programm mudelit genereerides.

## **3.4 Pilootprojektide probleemid ja tehtud vead**

Antud alapeatükis käsitletakse piloteerimisel tehtud vigu ja võimalust nende väitumist edasistes projektides. Pilootprojekti jooksul tuli ette ka probleeme, millega eelnevalt arvestada ei osatud, kuid mida lahendati jooksvalt ja hiljem analüüsi. Pilootprojektil tuli ette ka üldine probleem, mõõdistusinstrumendist olenemata. Nimelt muutus olemasoleva katendi teepind kõrguslikult, kuna olemasoleva teekatte olukord mõõdeti kevadel enne külmakergete täieliku taandumist. Suvel töid teostades oli tee tasapind lähtemudelitest 6-8 cm madalam.

### **3.4.1 Masinmõõdistamise ja 3D masinjuhtimise probleemid ja tehtud vead**

Autor on seisukohal, et oleks võinud proovida lisaks GNSS süsteemil masinmõõdistamistele ka tahhümeetri abil mõõdistamist. Peatükis 1.2.5 on välja toodud ka täpsuse erinevusi teiste katsete põhjal. Pilootprojekti jooksul esines probleeme ka satelliitide kättesaamisega suurte puude lähistel nii 3D masinjuhtimisel kui ka -mõõdistamisel. Projektivaatest selline takistus suuri probleeme ei tekitanud, sest tee jäi enamjaolt lagedale alale. Küll aga suuremaid probleeme võib see olukord tekitada metsas, kus satelliitide kättesaamine on raskendatud. Sellisel juhul oleks asjakohasem kasutada GNSS süsteemi asemel tahhümeetrit.

Autor leiab, et GNSS meetodi puhul oleks aidanud täpsust parandada ka tahhümeetri abil tera kontrollimine. Juhul kui masinjuhtimise käigus on lükatud teepind õige absoluutkõrgusega, siis on teepind ise juba täpne. Lisaks annaks tera kontrollimine enne mõõdistamist nii geodeedile kui ka ehitajale kindluse, et mõõdistatud punktid on parima võimaliku täpsusega. Sellist lahendust tuleks siiski eelnevalt katsetada ning katse käigus selgitada välja täpsed veamäärad sarnaselt nagu ka tahhümeetriga ühendatud masinmõõdistamisel. Pärast katse teostamist saaks teha täpsuse kohta järeldusi.

### **3.4.2 RTK-GNSS roveriga mõõdistamise probleemid ja tehtud vead**

Rover mõõdistamise puhul märkimisväärseid probleeme ei esinenud. Rover mõõdistamise puhul sõltub täpsus aparaaadi võimekusest ja parameetritest. On olemas ka võimekamaid aparate kui pilootprojektis kasutatud Trimble R8s. Enamasti ei ole ehitajatel kõige uuemaid ja võimekamaid rovereid, sest roveri abil käib vaid kontrollimine, mitte mõõdistamine. Pilootprojekti raames võeti kõik andmed mõlema lõigu puhul täpselt sama roveriga, et vähendada segadust ja saada parim ülevaade täpsusest.

### **3.4.3 Droonimõõdistamise probleemid ja tehtud vead**

Droonimõõdistamist pilootprojekti käigus teostas magistritöö autor. Seetõttu on autor on teadlik droonimõõdistamisega seonduvatest probleemidest ja vigadest ning on neid analüüsinud. Andmete analüüsi käigus oli üheks suurimaks katsumuseks tee laiuste määramine. Raskendatud oli mudelist täpse pindamiskihi määramine ning ka mõne muu kihi laius oli raskendatud, sest mõõdistamisel arvestati sisse ka kraavid. Samuti ehitati tee äärde kindlustatud serv, mistõttu täpne teelaiuse määramine Infrakitis/pinnamudelilt oli keerukas. Seda probleemi sai lahendada punktipilve puhastamisel *Agisoft* ja *Autodesk Recap* programmis. Mahtude saamiseks tuli pinda töödelda *Autodesk Recap*-is, kuid mahud võisid erineda teatud määral tegelikkusest, sest tee laiuse määramine oli eelnevalt komplitseeritud. Suured puud, mis jäid kohati teele, tekitasid samuti drooniga mõõdistamisel probleeme. Puhastades punktipilve ebaloomulikult kõrgetest punktidest tekkisid nendesse kohtadesse augud, nagu on joonisel 3.9 näha.



Joonis 3.9 Puust tekkinud punktipilve ebakorrapärane äär [autori erakogu]

## **4. ETTEPANEKUD PILOOTPROJEKTI TULEMUSTE RAKENDAMISEKS**

Peatükis on kajastatud autoripoolsed ettepanekud pilootprojekti tulemuste kasutusala lahtuvalt analüüsitud kirjandusest ja teostatud katsetustest. Eestis on masinmöödistamine kui teostusmöödistuse esitamine hetkel võimatu. Möödistused, mida saab esitada, peavad olema möödistatud geodeedi poolt ja eeldatavalt tahhümeetriga.

Autoripoolsed ettepanekud oleksid:

1. teostada masinmöödistamine ka tahhümeetri abil;
2. suurendada drooni ja masinmöödistamise kasutamist;
3. võtta Norra ja Soome nõuetest eeskuj;
4. suurendada kõlapinda möödistusvõimaluste kohta.

Möödistamisega seonduvaid pilootprojekte saab võtta endale aluseks ja vajadusel arvesse võtta möödistamisel tekkinud vead ning luua vajadusel uus ja täpsemate nõudmistega pilootprojekt. Uue sarnase pilootprojekti tellimisel tuleks soovituslikult katsetada ja võrrelda tahhümeetri abil masinmöödistamist, millega on võimalus vähendada mõõteviga.

Kui drooni ja masinmöödistamise kasutamist rakendatakse rohkem juba ehitajate isiklikust huvist, tekiks eelnevalt käsitletud teema kohta rohkem tagasisidet. Drooni ja masinmöödistamise tihedam praktika annab suurema võimaluse möödistamistulemusi parendada ja täpsemaks muuta. Probleemide tekkimisel on suurem võimalus leida optimaalseim lahendus ja reaalsem väljund.

Soome ja Norra eeskujul kohe nõudeid muutma hakata oleks ilmselge liig. Tekitades esmalt võimaluse masinmöödistamise korral teha teostusmöödistusi motiveeriks ka ehitajaid rohkem katsetama mudelite põhjal ehitamist ja möödistamist. Geodeetide ettetehtud pinnamudelite korral toimuks ehitamine juba täpsemalt ja kiiremini. Geodeetide poolne masinatera kontroll annaks möödistamisel ja ehitamisel ka tellijatele ning ehitajatele kindlustunde täpsuse osas. Lisaks annaks juba geodeetidepoolne teostusmöödistuse kontrollimine mõne kontrollpunkti võtmise abil tagasisidet.

Drooni möödistamisi praktiseeritakse Eestis veidi rohkem kui masinmöödistamist. Drooni puhul sõltub täpsus ka suuresti droonist endast ja kontrollpunktidest. Antud



mõõdistamine ja andmete töötlemine on enamjaolt geodeetide tegevus. Selles magistritöös käsitletud pilootprojektis katsetas seda ehitaja ehk autor ise, kes igapäevaselt sellega ei tegele. Sellest hoolimata olid tulemused autori arvamusel head.

Kindlasti ei toimu mõõdistamisviiside muutmine kiirelt. Esmalt tuleb leida usaldus antud mõõdistamiste täpsuste puhul. Mõõdistuste protsessi kiirendamine ei peaks olema vaid ehitajate motivatsioon vaid ka tellija enda tahe. Loodetavasti annab lõputöö sisendit edaspidisteks katsetusteks ja mõõdistamisvõimaluste arendamiseks.

## KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli uurida erinevate mõõdistusinstrumentide täpsusi Eestis kehtivate nõuete kontekstis. Anda ülevaade naaberriikide mõõdistamisdokumentidest ning analüüsida reaalse objekti näitel erinevate mõõdistamisinstrumentide kasutusvõimalusi lähtuvalt seatud täpsusklassidest.

Magistritöö uurimisobjektiks oli Äiamaa-Raukla-Oisu ja Oisu-Kärevere-Taikse pilootprojekt. Pilootprojekti raames analüüsiti RTK-GNSS roveri, drooni ja masinmõõdistamise täpsusi teostusmõõdistuste nõuete vaatest. Uuringu tulemusel selgus, et drooni suurim aritmeetiline keskmine viga tuli ühe lõigu raames -28 mm, masinmõõdistamise puhul -15 mm ja RTK-GNSS korral -40 mm. Arvestades tee ehitamise kvaliteedinõuetes etteantud lubatud hälbeid, siis katsetulemused jäid lubatud piiridesse.

Lõputöö esimene peatükk andis ülevaate erinevatest kasutusel olevatest mõõdistusinstrumentidest. Välja toodi nii teadusartiklitest kogutud andmed kui ka reaalsete katsetuste raames saadud tulemused.

Teises peatükis analüüsiti tavapärase objekti korral projektdokumentatsiooni, Eestis kehtivaid nõuded ja juhendeid mõõdistuste teostamiste kontekstis. Süvitsi uuriti mõõdistajale esitatud nõudeid vastavalt projektis kajastatule. Lisaks uuriti mõõdistusinstrumentide kriteeriume ja lubatud hälbeid.

Kolmandas peatükis teostati järelanalüüs varasemale pilootprojektile, mis valmis autori osalusel 2023. aasta suvel. Kõiki kasutatavaid mõõdistamisinstrumentide tulemusi ja tekkinud probleeme analüüsis autor kolmandas peatükis. Lisaks andis autor ülevaate ka mõõdistamise käigus tehtud vigadest.

Neljandas ehk viimases peatükis toodi välja peamised ettepanekud. Uurimuse põhjal selgus, et esmalt peaks suurendama drooni ja masinmõõdistamise kasutamist, parendamaks nende abil mõõdistamissüsteemi. Samuti tuleks katsetada masinmõõdistamist ka tahhümeetri abil, suurendades kõlapinda mõõdistus-võimaluste kohta. Lisaks on soovitatav võtta eeskuju Soome ja Norra nõuetest.

Lõputöö baasil on võimalik anda soovitusi erinevate mõõdistusviiside kasutuselevõtmiseks lähtuvalt hetkel kehtivatest nõuetest. Selle magistritöö tulemuste ja taustainfo uuringu põhjal on nii Transpordiametil kui ka teistel tellijatel, ehitajatel ja geodeetidel võimalus võtta kasutusele innovaatilisemaid mõõdistusviise, mis samal ajal tagaks nõutud mõõdistustäpsuse.

Katse, mis lõputöösse ei jõudnud, kuid võiks veel autori arvates saada tähelepanu, on masinmöödistamine tahhümeetriga. Möödistusinstrumentide ülevaates uuritud masinmöödistamise viisidest ja täpsustest selgus, et kõige väiksema veamääraga meetodiks oleks tee-ehitusmasina ühildamine tahhümeetriga. See katsetus võiks tulla päevakorda tuleviku pilootiprojektides/uurimistöodes.

## CONCLUSION

The objective of this thesis was to investigate the accuracy of various surveying instruments in the context of the standards applicable in Estonia. To give an overview of surveying documentation from neighboring countries and analyze the usage possibilities of different surveying instruments based on a real-world case study, considering the established accuracy classes.

The first chapter of the thesis provided an overview of the various surveying instruments in use. It included data collected from scientific articles as well as results obtained from actual experiments.

In the second chapter, the project documentation for a typical site was analyzed in the context of the applicable requirements and guidelines for surveying in Estonia.

The third chapter performed a follow-up analysis of a previous pilot project completed with the author's involvement in the summer of 2023. The author analyzed all the results and issues encountered with the surveying instruments used. Additionally, the author provided an overview of the mistakes made during the surveying process.

In the fourth and final chapter, the main conclusions were presented. The author offered an assessment of how the results could be applied.

The subject of the master's thesis was the analysis of the Äiamaa-Raukla-Oisu and Oisu-Kärevere-Taikse pilot project. Within the pilot project, the accuracies of the RTK-GNSS rover, UAV, and machine surveying were analyzed in terms of the requirements for as-built surveys. The study revealed that the greatest mean arithmetic error for the drone within one segment was -28 mm, for machine surveying -15 mm, and for RTK-GNSS -40 mm. Considering the allowed deviations specified in the road construction quality requirements, the test results were satisfactory.

The author's conclusion regarding the results of the thesis is positive, as these results provide a basis for recommending the adoption of various surveying methods in line with current requirements. Based on the results and research of this master's thesis, both the Transport Administration and other clients, builders, and surveyors have the opportunity to adopt more innovative surveying methods that still ensure the required surveying accuracy.

An experiment that did not make it into the thesis, but according to the author deserves attention, is machine surveying with a tachymeter. The literature review on machine

surveying methods and accuracies revealed that the method with the lowest error rate would be to integrate the machine with a tachymeter. This experiment should be considered in future pilot projects or research studies.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Rakennustietomalli Oy, „BuildingSMART Finlad Wiki,” 2021. [Võrgumaterjal]. Available: [https://wiki.buildingsmart.fi/fi/04\\_Julkaisut\\_ja\\_Standardit/YIV](https://wiki.buildingsmart.fi/fi/04_Julkaisut_ja_Standardit/YIV). [Kasutatud 2024].
- [2] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, „www.evs.ee,” 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/tasuta-juhendmaterjalid>. [Kasutatud 2024].
- [3] Norra Maanteeamet, „R761 käsiraamat,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-r761-prosesskode-1-05072018.pdf>. [Kasutatud 2024].
- [4] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, „www.evs.ee,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/standardid-ja-oigusaktid>. [Kasutatud 2024].
- [5] Riigikogu, „www.riigiteataja.ee,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/105032015001?leiaKehtiv>. [Kasutatud 2024].
- [6] Statsbygg, „Statsbygg,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.statsbygg.no/bim>. [Kasutatud 2024].
- [7] J. Timmins, „HP-3820 Total Station,” Utah Valley University, 2009.
- [8] T. Mill, A. Ellmann, K. Uueküla ja V. Joala, „Road surface surveying using terrestrial laser scanner and total station technologies,” 2011. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 2024].
- [9] S. K. Hussein ja K. Y. Abdulla, „Surveying with GNSS and Total Station: A Comparative Study,” *Eurasian Journal of Science & Engineering*, pp. 59-73, 2021.
- [10] S. D. Chekole, „Surveying with GPS, total station and terrestrial laser scanner: a comparative study,” School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology, 2014.
- [11] W. Johnson ja A. Johnson, „Operational Considerations for Terrestrial Laser Scanner Use in Highway Construction Applications,” *Journal of Surveying Engineering*, 2012.
- [12] M. Edl, M. Mizerák ja J. Trojan, „www.actasimulatio.eu,” 2018. [Võrgumaterjal]. Available: [https://actasimulatio.eu/issues/2018/IV\\_2018\\_01\\_Edl\\_Mizerak\\_Trojan.pdf](https://actasimulatio.eu/issues/2018/IV_2018_01_Edl_Mizerak_Trojan.pdf). [Kasutatud aprill 2024].
- [13] M. Lemmens, Geo-information, 2011, pp. 101-121.
- [14] R. Staiger, „www.fig.net,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.fig.net/news/archive/news\\_2011/geosiberia\\_april\\_2011/Novosibirsk\\_Geosiberia\\_2011\\_Paper\\_Rudolf\\_Staiger.pdf](https://www.fig.net/news/archive/news_2011/geosiberia_april_2011/Novosibirsk_Geosiberia_2011_Paper_Rudolf_Staiger.pdf). [Kasutatud 2024].
- [15] J. Hiremagalur, K. S. Yen, T. A. Lasky ja B. Ravani, „Testing and Performance Evaluation of Fixed Terrestrial Three-Dimensional Laser Scanning Systems for Highway Applications,” pp. 29-40, 2009.

- [16] E. A. A. V. L. Nistor-Lopatenco, „Creation of the point cloud and the 3D model for the above-ground infrastructure in the city of Chisinau by modern geodetic methods,” Transilvania University of Braşov, 2022.
- [17] C. Zhang ja D. Arditi, „Advanced Progress Control of Infrastructure Construction Projects Using Terrestrial Laser Scanning Technology,” 2020.
- [18] A. M. W. Boehler, *Investigating Laser Scanner Accuracy*, Saksamaa.
- [19] J. Catic, N. Tuno, A. Mulahusic, J. Topoljak, M. Didelija ja D. Kogoj, „Impact of Rover Pole Holding on the Positioning Accuracy of RTK-GNSS,” *Journal of Surveying Engineering*.
- [20] P. Dabove, *Geodesy and Geodynamics*, 2019.
- [21] geosoft, „www.geosoft.ee,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://geosoft.ee/trimble-r8s/>. [Kasutatud 2024].
- [22] D. G. Pratomo, I. M. Anjasmara ja F. Ahmad, „Analysis of the volume comparison of 3's (TS, GNSS and TLS),” %1 *E3S Web of Conferences*.
- [23] B. Mårton, „oda.uni-obuda.hu,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://oda.uni-obuda.hu/bitstream/handle/20.500.14044/25408/Biztonságtudományi%20Szemle\\_2022\\_4\\_evf\\_3\\_01.pdf?sequence=1](https://oda.uni-obuda.hu/bitstream/handle/20.500.14044/25408/Biztonságtudományi%20Szemle_2022_4_evf_3_01.pdf?sequence=1). [Kasutatud 2024].
- [24] I. w. Museum, „www.vintagewings.ca,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vintagewings.ca/stories/mother-of-all-drones>. [Kasutatud 2024].
- [25] K. Julge, A. Ellmann ja R. Kõök, „Unmanned aerial vehicle surveying for monitoring road construction earthwork,” *The Baltic journal of road and bridge engineering*, pp. 1-17, 2019.
- [26] K. Reimann, „GNSS-RTK võimekusega mehitamata lennumasinatega saavutava mõõdistustäpsuse evaleerimine,” Magistritöö, TalTech, 2019.
- [27] D. Dinkov ja A. Kitev, „Advantages, disadvantages and applicability of GNSS post-processing kinematic (PPK) method for direct georeferencing of UAV images,” %1 *8th International Conference on Cartography and GIS*, 2020.
- [28] AgEagle Aerial Systems Inc, „ageagle.com,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://ageagle.com/blog/gcps-vs-rtk-vs-ppk-when-to-use-what-and-why/>. [Kasutatud 2024].
- [29] R. Eker , E. Alkan ja A. Aydın, „A Comparative Analysis of UAV-RTK and UAV-PPK Methods in Mapping Different Surface Types,” *Forest Engineering and Technologies Platform on-line at www.http://dergipark.gov.tr/ejfe*, pp. 12-25, 2020.
- [30] A. Putch, „Linear Measurement Accuracy of DJI Drone Platforms and Photogrammetry,” 2017.
- [31] S. Varbla, R. Puust ja A. Ellmann, „Accuracy assessment of RTK-GNSS equipped UAV conducted as-built surveys for construction site modelling,” 2020.

- [32] R. Heikkilä ja M. Jaakkola, „The Efficiency of a 3-D Blade Control System in the Construction of Structure Layers by Road Grader-Automated Design-Build of Road Construction in Finland,” 2002.
- [33] M. Bell, „Accuracy of a Machine Guided Grader,” University of Southern Queensland, 2013.
- [34] N. Mattivi, Trimble, „Connecting Office, People and Machines: The New Way to Increase Productivity on Earthmoving and Road Construction Sites,” %1 *1st International Conference on Machine Control and Guidance*, 2008.
- [35] H. Shengxiang ja Z. Wen, „A fast calculation method of rolling times in the GNSS real-time compaction quality supervisory system Author links open overlay panel,” ScienceDirect, 2019.
- [36] A. J. Lee, W. Song, B. Yu, D. Choi, C. Tirtawardhana ja H. Myung, „Survey of robotics technologies for civil infrastructure inspection,” *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2022.
- [37] Clearpath Robotics, by Rockwell Automation, „clearpathrobotics.com,” Clearpath Robotics, [Vörgumaterjal]. Available: <https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/>. [Kasutatud 2024].
- [38] ETH Zürich, Robotic System Lab, „rsl.ethz.ch,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://rsl.ethz.ch/robots-media/anymal.html>. [Kasutatud 2024].
- [39] „Anybotics,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.anybotics.com/robotics/anymal/>. [Kasutatud 2024].
- [40] Transpordiamet, „Teetööde tehnilised kirjeldused,” 2019.
- [41] Transpordiamet, „riigihanked.riik.ee,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5345720/documents?group=B>. [Kasutatud 2024].
- [42] Transpordiamet, „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskiri ; Lisa 4 Nõuded teostatud tööde vastuvõtmise käigus teostatavatele ehitusgeodeetilistele mõõdistustele ja teostusjoonistele,” transpordiamet.ee, 2021.
- [43] Majandus- ja taristuminister, „Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded,” Riigi Teataja.
- [44] Majandus- ja taristuminister, „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded,” Riigi Teataja, 2024.
- [45] Transpordiamet, „Enimlevinud kontroll- ja vastuvõtutoimingute loetelu,” 2024.
- [46] AS Tariston, „Körvalmaantee Oisu-Kärevere-Taikse km 4,920-7,706 ja Raukla-Äiamaa-Oisu km 0,046-2,760 tolmuvaaba katte ehitus koos masinjuhtimise seadmetest info kogumise katsetamisega,” 2023.
- [47] Transpordiamet, „riigihanked.riik.ee,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5158640/documents/source-document?group=B&documentOldId=15864672>. [Kasutatud 2024].



- [48] Tallinna Linnavalitsus, „Geodeetiliste mõõdistus- ja uurimistöõde tegemise kord,“ Riigi Teataja, <https://www.riigiteataja.ee/akt/407062013026>.
- [49] M. Scherer ja J. L. Lerma, „Photogrammetric Scanning Total Station: Comprehensive Review,“ *Journal of Surveying Engineering*, 2009.