

TARTU ÜLIKOOL

Arvutiteaduse instituut

Informaatika õppekava

**Jaagup Kopli**

**Reaalajas kinemaatilise mõõtmisviisi referentsjaama  
ülesseadmine ja täpsuse hindamine**

**Bakalaureusetöö (9 EAP)**

Juhendajad:

Tambet Matiisen MSc

Edgar Sepp MSc

TARTU 2025

# **Reaalajas kinemaatilise mõõtmisviisi referentsjaama ülesseadmine ja täpsuse hindamine**

## **Lühikokkuvõte:**

Käesoleva töö eesmärgiks on anda ülevaade reaalajas kinemaatilise mõõtmisviisi referentsjaama (baasjaama) ülesseadmisest ning selle abil tehtavate mõõtmiste täpsusest. Töö käsitleb referentsjaama rajamise ja seadistamise etappe. Töö käigus tehakse mõõtmised Maa-ameti kohaliku geodeetilise võrgu punktide peal ja võrreldakse töös püstitatud referentsjaama abil teostatud mõõtmiste tulemusi Eesti riikliku referentsjaamade võrgu ESTPOSi abil teostatud mõõtmiste tulemustega ning standardse GPS-mõõtmise tulemustega, kus reaalajas kinemaatilise positsioneerimise (RTK) korrektsioone ei kasutata. Lisaks antakse töö raames ülevaade globaalsete navigatsioonisatelliitsüsteemide (GNSS) toimimispõhimõtetest ning RTK tehnoloogia töömehhanismist. Tulemusena seati Delta õppehoone katusele referentsjaam, mille täpsus ning korratavus oli võrreldav ESTPOSi poolt pakutava täpsusega.

**Võtmesõnad:** RTK, positsioneerimine, GNSS, täpsus

**CERCS:** P515, Geodeesia

## **Setting up a real-time kinematic base station and accuracy assessment**

### **Abstract:**

The aim of this thesis is to provide an overview of the setup process of a real-time kinematic reference station and to evaluate the accuracy of its measurements. The work covers the stages of establishing and configuring a reference station. Measurements are carried out on points from the Estonian Land and Spatial Development Board's local geodetic network and compared with the results obtained from the national reference station network ESTPOS, as well as with standard GPS measurements where no real-time kinematic (RTK) corrections are used. In addition, the thesis provides an overview of how global navigation satellite systems (GNSS) operate and explains the working mechanism behind RTK technology. As a result, a reference station was established on the roof of the Delta building, which demonstrated the accuracy comparable to that offered by ESTPOS.

**Keywords:** RTK, positioning, GNSS, Accuracy assessment

**CERCS:** P515, Geodesy

## Sisukord

<b>Sissejuhatus</b> .....	<b>5</b>
<b>Terminid</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Ülevaade positsioneerimisest</b> .....	<b>7</b>
<b>1.1 Asukoha määramise ajalugu</b> .....	<b>7</b>
<b>1.2 Globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem (GNSS)</b> .....	<b>7</b>
1.2.1 GNSS.....	7
1.2.2 GNNSi asukohamääramise põhimõte.....	8
1.2.3 Täpsust mõjutavad faktorid.....	8
<b>1.3 RTK - reaalajas kinemaatiline mõõtmine</b> .....	<b>9</b>
1.3.1 RTK tööpõhimõte.....	9
1.3.2 RTK kasutusala.....	10
<b>2. Referentsjaam ja selle ülesseadmine</b> .....	<b>11</b>
2.1 RTK süsteemi komponendid ja tarkvarad.....	11
2.2 Referentsjaama asukoht.....	11
2.3 Referentsjaama seadistamine.....	13
<b>3. Metoodika</b> .....	<b>17</b>
3.1 Kontrollpunktid.....	17
3.2 Liikuvjaama komponendid.....	19
3.3 Mõõtmise metoodika.....	19
<b>4. Mõõtmistulemuste analüüs</b> .....	<b>21</b>
4.1 Punkti 2663 mõõtmistulemused.....	21
4.1.1 Täpsuse hindamine.....	21
4.1.2 korratavuse hindamine.....	22
4.2 Punkti 7226 mõõtmistulemused.....	23
4.2.1 Täpsuse hindamine.....	23
4.2.2 Korratavuse hindamine.....	23
4.3 Punkti 10003 mõõtmistulemused.....	25
4.3.1 Täpsuse hindamine.....	25
4.3.2 Korratavuse hindamine.....	25
4.4 Punkti 130 mõõtmistulemused.....	27
4.4.1 Täpsuse hindamine.....	27
4.4.2 Korratavuse hindamine.....	28
4.5 Punkti 10034 mõõtmistulemused.....	29
4.5.1 Täpsuse hindamine.....	29
4.5.2 Korratavuse hindamine.....	29
4.6 Staatiliste mõõtmiste kokkuvõte.....	31
4.7 Mõõtmised liikuva sõiduki peal.....	33
<b>Kokkuvõte</b> .....	<b>36</b>

<b>Viidatud kirjandus.....</b>	<b>37</b>
<b>Lisad.....</b>	<b>40</b>
I. Repositorium.....	40
II. Litsents.....	41

## Sissejuhatus

Lõputöö eesmärk on uurida reaalsajas kinemaatilise mõõtmise (RTK, *real-time kinematic*) referentsjaama ülesseadmise keerukust, maksumust ning hinnata selle täpsust. Täpsuse hindamiseks kasutatakse Eesti geodeetilise võrgu geodeetilisi punkte, et võrrelda oma referentsjaama abil teostatud RTK mõõtmiste täpsust riikliku satelliitandmete keskuse tugijaamade võrgustiku ESTPOS abil teostatud mõõtmiste tulemustega ning ilma RTK paranditeta positsioneerimise tulemustega. Teema on oluline, kuna see aitab potentsiaalselt isejuhtivatel autodidel enda asukohta täpsemalt määrata ning parandada autonoomsust. Lisaks aitab töö aru saada, kas sellise referentsjaama ülesseadmine on mõistlik, arvestades selle maksumust, pakutavat mõõtmistulemuste täpsust ja ülesseadmise keerukust. Lõputöö teema on aktuaalne, kuna RTK meetodit kasutatakse näiteks maamõõtmisel, ehituses ning põllumajanduses. See on eriti tähtis valdkondades, kus asukohti on vaja määrata mõne sentimeetri täpsusega ning seda täpsust on vaja reaalsajas.

Sarnase töö on teinud Margarita Svežova, kes uuris RTK teenuse abil asukoha määramise täpsust ning lahendi stabiilsust. Svežova töös kasutati Trimble r4 vastuvõtjat ning väliarvutit Trimble Juna T41, mille abil andmeid koguti. Töös kasutati parandite saamiseks kolme võrgu-RTK (RTN, *real-time network*) lahendust ning ühte Maa-ameti Toila tugijaama. RTN on sisuliselt sama, mis RTK, kuid füüsilise referentsjaama asemel kasutatakse mitmeid erinevaid referentsjaamu, et luua virtuaalne referentsjaam liikuvjaama lähedale. Edasine töö käik on sama nagu RTK puhul. Töö tulemusena leiti, et X ja Y koordinaatide puhul jäid vead alla 1 sentimeetri ning kõrguse osas kuni 3 sentimeetrit. Erinevus käesoleva tööga on see, et Svežova töö ei käsitlenud oma baasjaama ülesseadmist ning töös kasutatud vastuvõtja Trimble r4 on tunduvalt kallima hinnaklassi toode. [1]

Lõputöö jaguneb neljaks peatükiks. Esimeses peatükis antakse ülevaade GNSS positsioneerimisest, GNSS täpsust mõjutavatest faktoritest ning RTK-st. Teises peatükis käsitletakse referentsjaama ning selle ülesseadmist. Kolmas peatükk sisaldab infot täpsuse mõõtmise meetoodika kohta. Neljandas peatükis analüüsitakse saadud infot ning antakse hinnang tulemustele.

## **Terminid**

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) - globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem (nt GPS, Galileo, GLONASS jms).

RTK (*Real-Time Kinematic*) - reaajas kinemaatika; satelliitmõõtmiste täpsustamine tugijaama abil.

NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) - andmeedastusprotokoll, millega RTK-parandused liiguvad interneti kaudu.

PPP (*Precise Point Positioning*) - täpne GNSS ilma kohalikku tugijaama kasutamata.

ECEF (*Earth-Centered, Earth-Fixed*) - kolmemõõtmeline koordinaatsüsteem, mille nullpunkt asub Maa keskpunktis.

RTN (*Real-Time Network*) - võrgu-RTK; mitmest jaamast koosnev süsteem, mis loob virtuaalse tugijaama.

IMU (*Inertial Measurement Unit*) - Inertsiaalne mõõteseade, mis mõõdab keha liikumist ja pöörlemist ruumis.

# **1. Ülevaade positsioneerimisest**

## **1.1 Asukoha määramise ajalugu**

Geograafiliste punktide kasutamist võib Rüdja ja Sanderi järgi [2] leida juba II sajandil eKr, kui Kreeka astronoom ja kartograaf Hipparchos kattis maa pinna laius- ja pikkuskraadide abil moodustatud paralleelide ja meridiaanidega. Nendega oli võimalik teha üks kindel asukoht kõigile üheselt määratletavaks. Nende sõnul on asukoha määramise nõrgimaks küljeks see, et kindlaid koordinaate looduses ei esine, kuid neid on võimalik määrata teiste kindlate objektide suhtes. Pikalt kasutati asukoha määramiseks nähtavaid taevakehasid. 16. sajandil hakati Prantsusmaal maapealseid punkte määrama. Nendeks olid tihti eraldi selleks ehitatud triangulatsioonitornid, kirikud või muud kaugelt nähtavad ehitised ning neid määrati triangulatsiooni abil. Määrati ühe punkti asukoht ning hakati sellest eemal asetsevate punktide kaugusi mõõtma. Kokku sai sellest triangulatsiooniahel, kus iga punkti asukoht oli täpselt teada. Seda meetodit kasutati Rüdja ja Sanderi järgi kuni satelliitmõõtmismeetodite kasutuselevõtni, st esimene satelliit lähetati kosmosesse 1960. aastal ning süsteem saadi tööle neli aastat hiljem, mis pani aluse täiesti uuele ajastule [2].

## **1.2 Globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem (GNSS)**

### **1.2.1 GNSS**

GNSS ehk globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem on üldnimetus asukoha määramise süsteemile [2]. Rüdja ja Sanderi sõnul [2] on maailmas selliseid süsteeme mitmeid ning need jagunevad kaheks - globaalseteks ja regionaalseteks. Globaalsed süsteemid pakuvad teenust kogu planeedil, regionaalsed süsteemid pakuvad seda mingil kindlal alal. Globaalsete süsteemide alla kuuluvad GPS (Ameerika), Galileo (Euroopa), GLONASS (Venemaa) ning BeiDou (Hiina) [3]. Regionaalsete süsteemide alla kuuluvad NavIC (India), mis pakub teenust Indias ning selle ümbruses ning QZSS (Jaapan), mis pakub teenust Jaapanis ning selle ümbruses [3]. Sulgudes on välja toodud, mis riigid seda süsteemi haldavad. Satelliidisüsteem koosneb laiemalt kahest osast, üheks on satelliidid, mis tiirlevad ümber maa 19 000-36 000 kilomeetri kõrgusel ning teiseks on maapealsed vastuvõtjad [3].

### **1.2.2 GNNSi asukohamääramise põhimõte**

Kosmoses tiirlevad satelliidid saavad maale vajalikku informatsiooni ning maapealsed vastuvõtjad kasutavad seda infot, et oma asukoht määrata [3]. Asukoha määramiseks on satelliidil vaja saada 3 infokildu: trajektoor, ülitäpne aeg ning staatus [3]. Aeg, mis kulub infol satelliidilt vastuvõtjani jõudmiseks korrutatakse valguse levimise kiirusega ning saadakse satelliidi ja vastuvõtja vaheline kaugus. Siinkohal peab aeg olema võimalikult täpne, kuna 1/100 sekundiline eksimus tähendab umbes 3000 kilomeetrist mõõtmisviga [2]. Asukoha määramiseks on vaja vähemalt 4 satelliidi informatsiooni, kuid mida rohkemate satelliitidega ühendus saadakse, seda parem täpsus on võimalik saavutada [2].

### **1.2.3 Täpsust mõjutavad faktorid**

Täpsust mõjutavateks faktoriteks on ajamõõtmine, satelliitide orbiidid, ümbritsev keskkond, satelliitide arv ning nende asukoht [2].

Ajamõõtmisel on veallikaks satelliidi paratamatu ajanihe, mida põhjustavad erinevad gravitatsioonid maapinnal ja satelliidis ning kella täpsus [4]. Satelliitide kellasid võrreldakse maal asuvate ülitäpsete aatomkelladega ning uuendatakse vastavalt [3].

Satelliitide orbiite mõjutavad mitmed tegurid: maa ebaühtlane gravitatsiooniväli, päikese ja kuu külgetõmbejõud, päikesekiirguse rõhk või selle puudumine, satelliidi asend ja kuju [2]. Satelliitide orbiite ennustatakse maapealsetes GNSS keskustes ning läbi selle uuendatakse pidevalt eeldatavat satelliidi poolt läbitavat orbiiti [3].

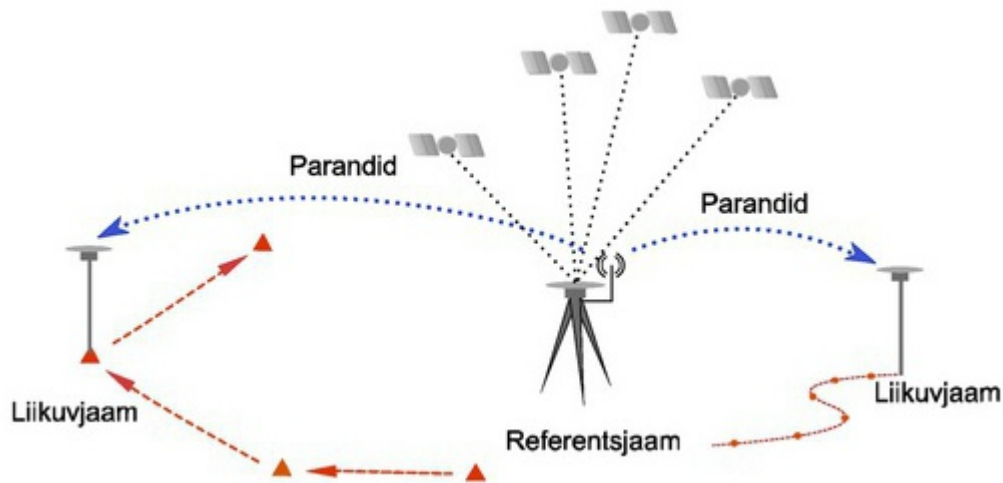
Ümbritseva keskkonna all mõeldakse põhiliselt ionosfääri ja troposfääri mõju. Ionosfäär on 50-1000 kilomeetri kõrgusel maapinnast. Päikeselt kiirgav päikesekiirgus mõjutab ionosfääri tihedust ning see moonutab signaali teepikkust, mis omakorda mõjutab seda, kui kaua võtab aega signaalil maale jõudmine [2]. Troposfääris mõjutavad signaale peamiselt muutuvad faktorid: niiskus, temperatuur ning õhurõhk [3]. Kõik need faktorid mõjutavad signaali levimiskiirust ning võivad mõjutada positioneerimise täpsust.

Signaalide mitmeteelisus tekib siis, kui signaalid põrkuvad mingite pindade pealt ning jõuavad vastuvõtjasse mitmekordselt [3]. Peegeldunud signaalide vastuvõtjasse jõudmine võtab kauem aega ning see muudab arvutatud asukohta [3]. Asukoha määramiseks läheb vaja vähemalt nelja satelliiti [3]. Määramise täpsust aitab parandada see, kui satelliite on rohkem ning need asetsevad vastuvõtja suhtes erinevatel nurkadel ning erinevates suundades [3].

## 1.3 RTK - reaalaajas kinemaatiline mõõtmine

### 1.3.1 RTK tööpõhimõte

RTK koosneb kolmest osast - referentsjaam, liikuvjaam ning nende kahe vaheline side [5]. Referentsjaam peab olema avatud horisondiga, kinnitatud kindlale alusele, kus see ei liiguks, ning selle asukoht peab olema täpselt määratud [2]. Kuna referentsjaama asukoht on täpselt teada, siis võtab see satelliitidelt saadud info ning arvutab nende põhjal parandid [5]. Parandid annavad infot varasemalt välja toodud täpsust mõjutavate faktorite kohta. Liikuvjaam kasutab seda infot, et muuta vastavalt oma asukohta. RTK süsteemi tööpõhimõtet illustreerib joonis 1.



Joonis 1. RTK süsteemi tööpõhimõte [2]

Sõnumite edasi saatmiseks on vajalik liikuvjaama ning referentsjaama vaheline side. Selle jaoks on võimalik kasutada näiteks raadiosignaale, juhet või internetti. Käesolevas töös kasutatav NTRIP on andmevahetusprotokoll, mis võimaldab referentsjaamalt saadud parandeid läbi interneti saata. NTRIP koosneb kolmest osast. NTRIP *caster* ehk server, mis parandeid vahendab, NTRIP *client* ehk liikuvjaam ning NTRIP *server* ehk referentsjaam. [6]

Sõnumid sisaldavad endas infot pseudokauguste, faasimõõtmiste ning signaali-müra suhte kohta [7].

Pseudokaugus on defineeritud kui koodi saatmise aja ning koodi vastuvõtmise aja vahe korrutatud valguse kiirusega [8]. See on sisuliselt esialgne kaugus satelliidi ja vastuvõtja vahel ning selle puhul ei ole arvestatud ühegi teise faktoriga, mis kaugust mõjutada võiks.

Faasimõõtmine tähendab vahemaa arvutamist läbi raadiolainete. Kuna raadiolained levivad lainetena ning nende pikkused on teada, siis on võimalik välja arvutada raadiolainete arvu kaudu vastuvõtja ja satelliidi vahemaa. Leitakse mitu täisvõnget jõudis raadiolaine teha ning sellele lisatakse juurde viimane, mittetäielik laine. See korrutatakse raadiolaine pikkusega ning nii saadaksegi täpsem kaugus satelliidi ja vastuvõtja vahel. [2]

Signaali-müra suhe näitab kui usaldusväärne on saadud info. See aitab vastuvõtjal valida satelliite, mis annavad täpsemat infot, mis omakorda aitab parandada täpsust. [9]

Liikuvjaam võtab vastu referentsjaamalt saadetud parandid, ning kasutab neid oma asukoha täpsemaks määramiseks. [6]

### **1.3.2 RTK kasutusala**

RTK kasutusalasid on mitmeid ja need on väga erinevad. Põllumajanduses kasutatakse seda traktorite juhtimisel ning põldude suuruse mõõtmisel. See kõik aitab põllumeestel optimeerida oma saake ja vähendada kulusid. Ehituses on tähtis, et maja oleks õigete spetsifikatsioonide järgi ehitatud. Sinna alla kuulub ka maja asukoht, mida RTK aitab täpsemalt paika panna. Samuti on see abiks ehitusel rasketehnika juhtimisel. Autonoomsed sõidukid vajavad väga palju andmeid, et turvaliselt ilma juhita opereerida. RTK annab nendele sõidukitele reaajas täpset infot oma asukoha kohta, mis on abiks edasiste otsuste tegemisel. [10]

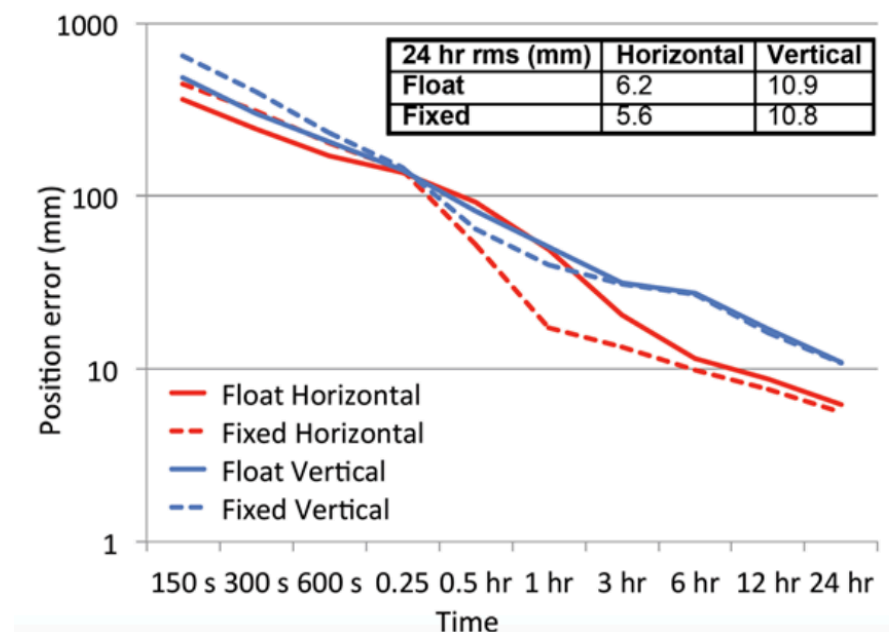
## 2. Referentsjaam ja selle ülesseadmine

### 2.1 RTK süsteemi komponendid ja tarkvarad

Töös kasutati ArduSimple<sup>1</sup> seadmeid. Referentsjaam koosnes RTK2B PRO juhtplaadist, mille külge ühendati u-blox GNSS Multiband ANN-MB-00 antenn signaalide vastuvõtmiseks ning ArduSimple 4G NTRIP Master parandite edastamiseks. NTRIP süsteemi valikuks osutus RTK2GO, mis on tasuta NTRIP edastaja. Lisaks oli töö jooksul vaja kasutada ArduSimple *Serial Datalogger to microSD* moodulit andmete salvestamiseks.

### 2.2 Referentsjaama asukoht

Järgnev lõik pärineb Sparkfun foorumist [11], kus õpetatakse, kuidas referentsjaama üles seada. Täpse asukoha määramiseks on vaja satelliitidelt koguda toorandmeid. Toorandmeid tuleks koguda vähemalt 24 tundi. Selline mõõtmine annab meile referentsjaama asukoha täpsuseks umbes ühe sentimeetri nagu on näha jooniselt 2.



Joonis 2. Täpsuse sõltuvus andmete kogumise ajaga [12].

GNSS-andmete kogumisel kasutati u-blox vastuvõtjat koos U-Center tarkvaraga, mis salvestas mõõtmised binaarvormingus UBX-failina [13]. Fail salvestati Micro-SD kaardi peale kasutades ArduSimple *Serial Datalogger to microSD* moodulit [14]. Selle jaoks oli internetis olemas konfiguratsioonifail, mis tuli jaamale peale laadida [15].

<sup>1</sup> <https://www.ardusimple.com/>

Kuna erinevad vastuvõtjad kasutavad erinevaid andmeformaate, loodi standardiseeritud formaat RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), mis võimaldab andmete ühtset töötlemist sõltumata vastuvõtja tootjast [16]. UBX-faili teisendamiseks RINEX-formaati kasutati vabavaralist tööriista RTKCONV, mis on osa RTKLIB-i komplektist [13].

Seejärel laeti RINEX-fail Kanada Loodusvarade Ministeeriumi (*Natural Resources Canada*) CSRS-PPP<sup>2</sup> (*Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning*) teenusesse, mis kasutab täpseid satelliitide orbiidi, kella ja kõrvalekallete parandusi, et määrata kasutaja täpne asukoht. Sealt saadud ECEF (Earth-centered, Earth-fixed) koordinaadid näitavad, kui kaugel asetseb referentsjaam maa massi keskpunktist. [11] Saadud asukoht on välja toodud joonisel 3. Jooniselt on ka näha, et referentsjaama asukoht on määratud mõne millimeetri täpsusega. Referentsjaama asukoha laiuskraad on +58.38552348° ning pikkuskraad +26.72479248°.

#### **Cartesian coordinates**

**X**      **2993580.920 ± 0.005 m (95%)**

**Y**      **1507237.724 ± 0.003 m (95%)**

**Z**      **5408432.234 ± 0.007 m (95%)**

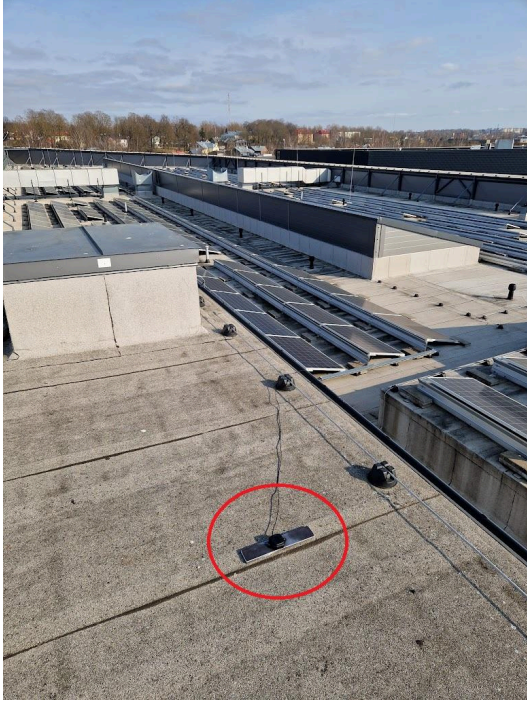
**[2993581.769,1507236.953,5408431.971]**

Joonis 3. Referentsjaama asukoht ECEF koordinaatides.

Referentsjaama valikul oli oluline, et see asuks Tartus ning sellel oleks avatud horisont [11]. Referentsjaam peab asetsema Tartus, kuna isejuhtivate sõidukite labor asub Tartus ning referentsjaam suudab pakkuda usaldusväärseid parandeid umbes 20 kilomeetri raadiuses [17]. Samuti oli oluline referentsjaama tööhoidmiseks pidev voolu olemasolu. Töö käigus paigutati referentsjaam Delta õppehoone katusele. Referentsjaama aluseks sai 3 kilogrammi kaaluv metallalus. Baasjaama asukohta illustreerib joonis 4.

---

<sup>2</sup> <https://webapp.csrscs-nrcan-mcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en>



Joonis 4. Referentsjaam Delta katusel. Punase ringi sees referentsjaama antenn.

## 2.3 Referentsjaama seadistamine

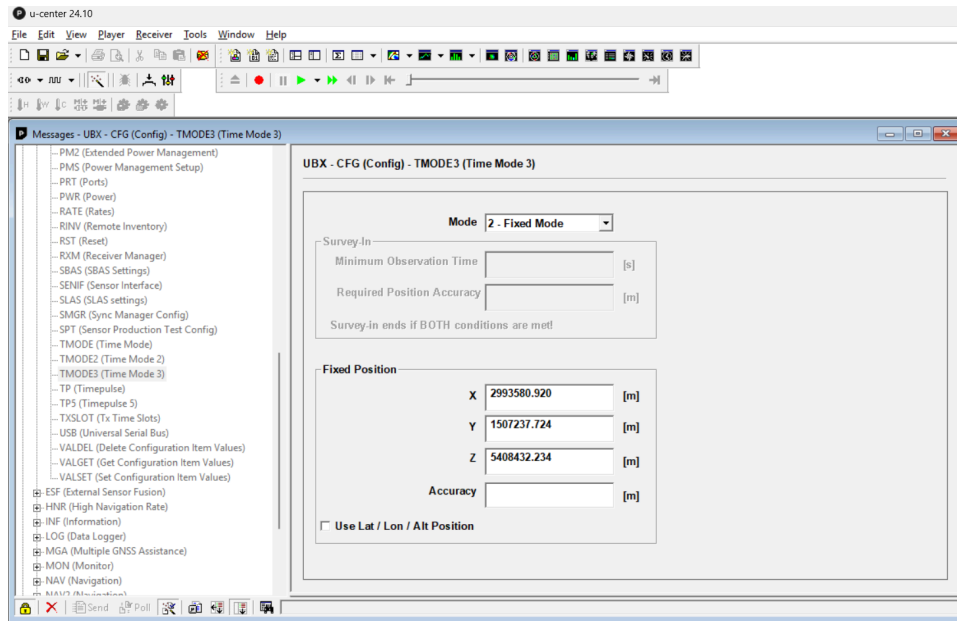
Referentsjaama seadistamiseks kasutati Ubloxi tarkvara u-center versiooni 24.10. Seadistamiseks pidi jaama ühendama arvutiga kasutades USB-C juhet. Referentsjaam peab väljastama RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) sõnumeid [11]. Sõnumid, mida referentsjaam peab edastama on järgnevad [18][12]:

- RTCM3.3 1005 - Sisaldab referentsjaama ECEF koordinaate
- RTCM3.3 1074 - GPS MSM4 sõnum
- RTCM3.3 1084 - GLONASS MSM4 sõnum
- RTCM3.3 1094 - Galileo MSM4 sõnum
- RTCM3.3 1124 - BeiDou MSM4 sõnum
- RTCM3.3 1230 - GLONASS faasinihete sõnum

MSM sõnumid sisaldavad infot pseudokoodi, faasimõõtmiste ning signaali-müra suhte kohta [7]. Kõik need aitavad liikuvjaamal oma täpsust parandada.

Referentsjaamale tuli sisestada eelmises peatükis saadud täpne asukoht. Kõigepealt tuli valida fikseeritud režiim (*fixed mode*) ning seejärel sisestada vajalikud andmed. Fixed mode

tähendab seda, et referentsjaama asukoht on kasutaja poolt määratud ning jääb alati samaks. Koordinaatide sisestamist illustreerib joonis 5.



Joonis 5. Koordinaatide sisestamine kasutades programmi U-Center.

Seejärel tuli referentsjaamale külge ühendada 4G NTRIP Master ning see õigesti seadistada kasutama RTK2GO veebilehte. ArduSimple veebilehel tuli sisestada 4G võimekusega SIM-kaardi PIN, võrgu pääsupunkti nimi (APN, *Access point name*) ja RTK2GO veebilehe info ning alla laadida konfiguratsioonifail.

Konfiguratsioonifail tuli 4G moodulile peale laadida kasutades 4G *NTRIP Master Configurator Tooli*. Laadimise ajaks tuli referentsjaamalt eemaldada võimekus satelliitidelt andmeid saada ning RTK parandeid edasi saata. Peale seda tuli sisestada SIM-kaart ning referentsjaam oli valmis saatma parandeid RTK2GO veebilehele, kust igaüks saab neid oma liikuvjaama jaoks kasutada. [19]

Infot töös loodud referentsjaama kohta RTK2GO<sup>3</sup> veebilehel illustreerib joonis 6.

<sup>3</sup> <http://rtk2go.com:2101/SNIP::MOUNTPT?baseName=UTKatus&tk=vjio2W82toegN4EFWkVo>

## UTKatus Summary

### Base Station Mount Point Details: UTKatus

Station details for stream: UTKatus

Located at Tartu, Estonia  
NTRIP Agent NTRIP\_Ardusimple

### Ant. Location ([Map in Google](#))

	Latitude	Longitude	Height
Pos in LLH	+58.38552348°	+26.72479248°	+ 73.344 (m)
Pos in DMS.sss	+58° 23' 07.884533" +	+26° 43' 29.252936" +	73.344 (m)
Pos in DDMM.m	+58° 23.131409'	+26° 43.487549'	+ 73.344 (m)
	X	Y	Z
Pos in ECEF	+2993580.9200 (m)	+1507237.7240 (m)	+5408432.2340 (m)

### Messages

Msg Format RTCM 3.2  
Messages 1005(1), 1074(1), 1077(1), 1084(1), 1094(1), 1124(1), 1230(1)  
Count 71,204 total msgs ~47.3 (msg/sec)  
Signals GPS: Yes GLO: Yes QZSS: No GAL: Yes BeiD: Yes WAAS: No  
SV Counts GPS:7 GLO:8 QZSS:0 GAL:6 BeiD:9 WASS:4  
Common GNSS Osc. Yes

### Current Caster Table Entry

STR:UTKatus;Tartu;RTCM 3.2;1005(1),1074(1),1077(1),1084(1),1094(1),1124(1),1230(1);GPS+GLO+GAL+BDS;SNIP;EST;58.39;26.72;1;0;sNTRIP:none;B;N;6860;none;

### Recent Uptime Stats

Item	Value
Last Restart	25:05 M:S Up(10/2) (02:48:46 (H:M:S) 99.5% overall)
PFAT time	0.0 mSec (30 sec ave.)
Data In	7.925 MB [-6139bps] (raw reads)
Data Used	7.925 MB (post PFAT)
Data Out	1.245 MB (to clients)
First Seen	Tue April 22 2025 09:05:19 (Coordinated Universal Time)

Joonis 6. Referentsjaam RTK2GO veebilehel.

## 2.4 Referentsjaama maksumus

Referentsjaama komponentide maksumus on välja toodud tabelis 1. Ardusimple toodete hinnad on võetud Ardusimple kodulehelt 09.05.2025 seisuga. Terve süsteemi kogumaksumus oli 744,8 eurot. Sellest 270 eurot oli liikuvjaama maksumus ning 474,8 eurot baasjaama maksumus. Lisaks aitas maksumust madalal hoida vabavaraline NTRIP lahendus RTK2GO. Kallimad kasutatud RTK süsteemid 2020.aastal võisid olla vahemikus 2000 kuni 10000 dollarit ning uuemad süsteemid võisid küündida 15000 dollarini [20]. Hind oleneb palju funktsionaalsusest ning kvaliteedist. Sellele hinnale võib veel lisanduda interneti tasu või NTRIP teenuse tasu.

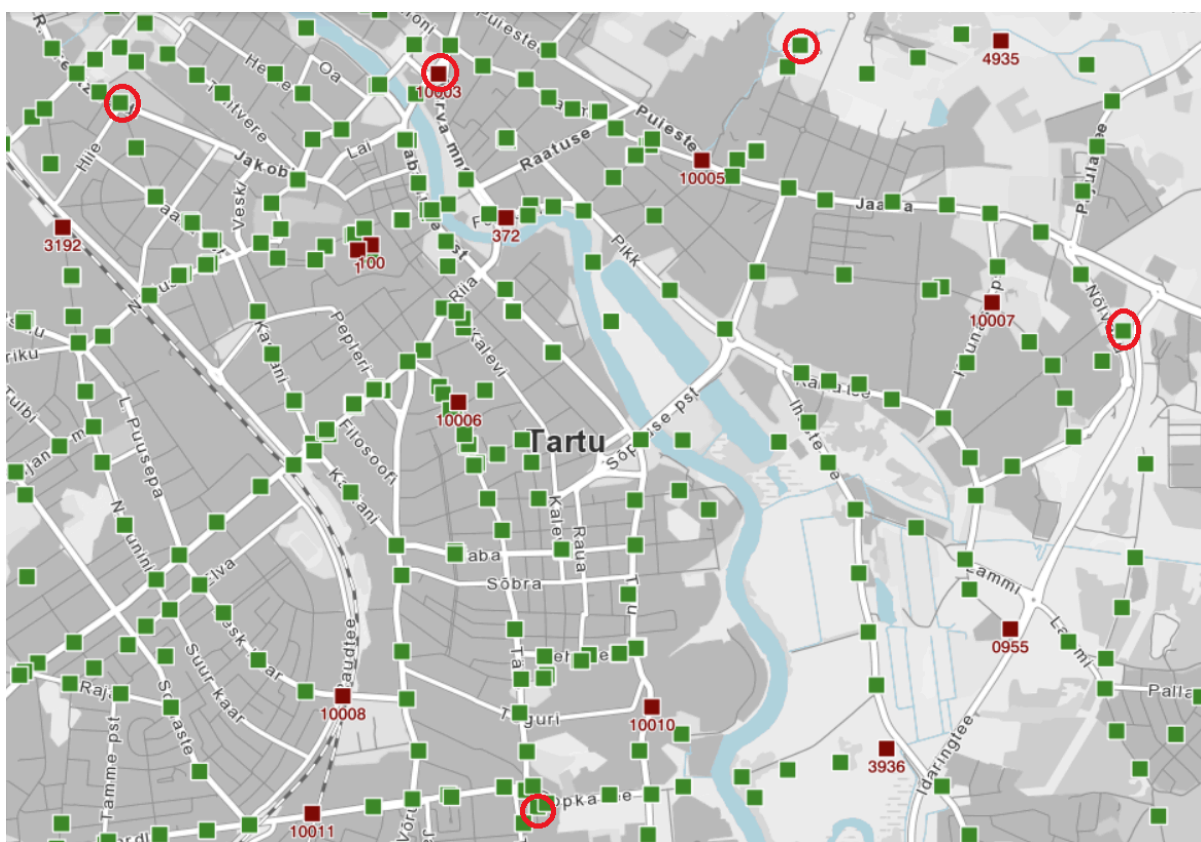
Tabel 1. Referenstjaama komponentide maksumused.

<b>Komponent</b>	<b>Hind (eurodes)</b>
simpleRTK2B Pro	216,0
u-blox GNSS Multiband antenna ANN-MB-00 (IP67)	53,8
4G NTRIP Master	156,0
Serial Datalogger to microSD	49,0
<b>KOKKU</b>	<b>474,8</b>

### 3. Metoodika

#### 3.1 Kontrollpunktid

Kontrollpunktideks valiti erinevad Maa-Ameti kohaliku geodeetilise võrgu 2. järgu punktid ning üks 1. järgu punkt. Punktid valiti mõõtmiseks, kuna need on paika pandud vähemalt täpsusega  $\pm 5$  sentimeetrit [21][22], mis on käesoleva töö jaoks piisav ning neid on Tartus palju. Tähtis oli, et punktid asetseksid Tartus, erinevates linnaosades ning erinevate taevanähtavustega kohtades. Valitud punktide kirjeldused on kirjas tabelis 2 ning on kaardil illustreeritud joonisel 7.



Joonis 7. Kohalikud geodeetilised punktid kujutatud kaardil. Punasega on märgitud valitud kontrollpunktid [23].

Tabel 2. Punktide kirjeldused [23]

Punkti number	Kohaliku võrgu järk	X(m)	Y(m)	Asukoha kirjeldus
2663	2.	6474886.04	657899.852	Fr. R. Kreutzwaldi, L. Koidula ja Hiie tänavate ristmikul, Tähtvere pargi servas, sõidutee ja kõnnitee vahelisel haljasalal.
7226	2.	6475160.91	661134.573	Lääne tänava ääres, käänaku kohal, Põhja puiestee 33 maatüksusel, endises "Hiinalinnas".
130	2.	6471524.178	659886.142	Ropka tee kõrval, Ropkamõisa 7 hoone nurga juures, kõnnitee kõrval haljasalal.
10003	1.	6475023.545	659413.864	Narva mnt ja Vene tn ringristmikul, alajaama kõrval, haljasalal.
10034	2.	6473796.558	662671.133	Nõlvaku tn ääres, autopesula taga, haljasalal.

Kontrollpunkt 2663 on maa sees 30 sentimeetri sügavusel ning on kaetud metallist luugiga. Punkti ümbritsevad puud idast 9,75 meetri kaugusel ning loodest 5,7 meetri kaugusel ja see asub tiheda liiklusega autotee kõrval.

Kontrollpunkt 7226 on maa sees 20 sentimeetri sügavusel ning kaetud metallist luugiga. Punktist 7 meetri kaugusel põhja suunas asub puu.

Kontrollpunkt 130 on maa sees 20 sentimeetrit sügavusel ning kaetud metallist luugiga. Kohe punkti kõrval ida suunas asub puu ning loode suunas 8 meetri kaugusel maja.

Kontrollpunkt 10003 on maa sees umbes 20 sentimeetrit sügavusel. Lähim objekt on 11,4 meetri kaugusel asetsev tänavavalgusti.

Kontrollpunkt 10034 on umbes 30 sentimeetri sügavusel maa sees ning kaetud metallist luugiga. Punkti lähedal on kaks puud - põhjas 4,6 meetri kaugusel ning kagu suunas 2,7 meetri kaugusel.

### **3.2 Liikuvjaama komponendid**

Liikuvjaamaks kasutati ArduSimple *RTK portable bluetooth Kit*'i. See koosnes ZED-F9P RTK moodulist, millel on sisseehitatud Bluetooth võimekus ning samuti on võimalik andmeid edastada läbi USB type C kaabli. Antenniks oli referentsjaamaga samasugune u-blox ANN-MB-00 antenn.

### **3.3 Mõõtmise metoodika**

Uurimismeetodiks on erinevate Maa-ameti kohaliku geodeetiliste punktide peal 5-minutilised mõõtmised. Mõõtmiseid tehti igal punktil kolmel erineval päeval. Antenn paigutati magnetiga kaevu luugile võimalikult täpselt otse mõõtmispunkti kohale. Igal erineval päeval tehtud mõõtmisel asetati antenn võimalikult täpselt samale asukohale, kus ta asetses eelmisel mõõtmisel. Antenni umbkaudsest paigutamisest tingitud asukoha määramatus on vahemikus 0-2 sentimeetrit. Peale antenni asetamist liiguti punktist vähemalt 10 meetri kaugusele, et mitte mõjutada mõõtmistulemusi ning lasti antennil seista minut aega. Antenni asukoht püsis puutumatusena erinevate mõõtmismeetodite kasutamise ajal ühe mõõtmisessiooni ajal. Hinnati kahte erinevat kriteeriumit - täpsus ja korratavus. Täpsus näitab erinevust mõõtmistulemuste ja õige väärtuse vahel. Korratavus iseloomustab aga seda, kui palju mõõtmisel saadud tulemused üksteisest erinevad [2]. RTK süsteemideks kasutati töö koostaja poolt püsti pandud referentsjaama UTKatus ning Maa-amet süsteemi ESTPOS. Lisaks mõõdeti asukohta ka sama liikuvjaamaga, kuid ilma RTK parandideta. Mõõtmiseks kasutati nutitelefoniga programmi SWMaps. SWMaps valiti, kuna see võimaldas koguda andmeid nii RTK meetodit kasutades kui ka ilma selleta. Samuti andis see rakendus kogu vajaliku info mõõtmistulemuste kohta. Andmeid töödeldi Microsoft Excelis ning täpsuse hindamiseks valmistati seal tabelid. Korratavuse visualiseerimiseks kasutati programmi QGIS. Kuna mõõtmisel saadud andmed olid WGS84 koordinaatsüsteemis, ning seda on raske graafikult mõista, siis tuli need ümber teisendada Eestis ametlikult kasutusel olevasse koordinaatsüsteemi L-EST97, mis on meetrites. Selle jaoks kasutati Python programmi ning teeki pyproj.

Liikuvaid mõõtmisi tehti TÜ isejuhtivate sõidukite labori autoga, milleks oli Lexus RX450h. Auto kasutab oma positsiooni määramiseks NovAtel PwrPak7D GNSS vastuvõtjat, VEXXIS Antennas GNSS-502 antenni ning RTK parandite jaoks kasutab auto ESTPOSi [24]. Mõõtmised tehti Tartu kesklinnas 2,1 kilomeetri pikkusel sõidul. Mõõtmiste jaoks kinnitati töös kasutatav liikuvjaam auto katusele ning kasutati nii UTKatuse kui ka ESTPOSi parandeid ja võrreldi neid auto enda vastuvõtja poolt leitud asukohaga. Kuna auto vastuvõtja kasutab täiendavalt inertsiaalandurit GNSS asukohtade silumiseks, siis võib eeldada, et selle hinnatud asukoht on täpsem, kui ainult GNSS liikuvjaama poolt tuvastatud asukoht.

## 4. Mõõtmistulemuste analüüs

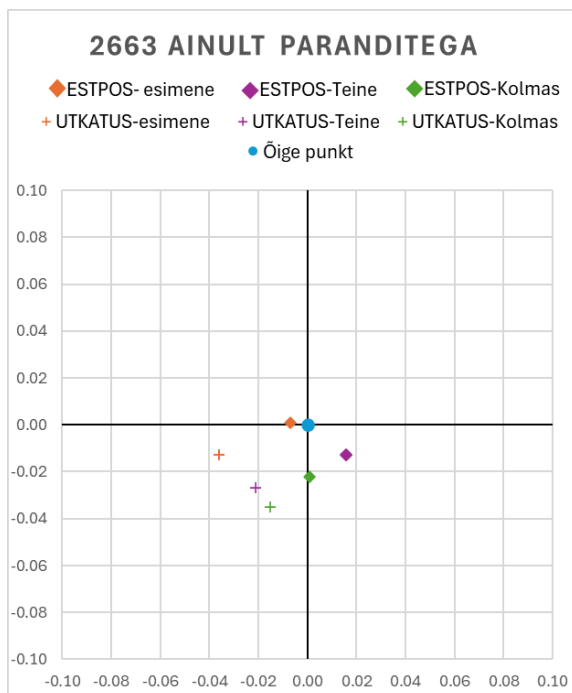
Täpsuse hindamisel määrati iga sessiooni ajal iga mõõtmismeetodi kohta keskmine väärtus. Korratavuse hindamisel on iga meetodiga tehtud kolm mõõtmiskorda ühe punkti peal ning kõik korrad on tähistatud erinevate värvidega. Korratavuse joonistel on esimene mõõtmine on roheline, teine lilla ning kolmas roosa.

### 4.1 Punkti 2663 mõõtmistulemused

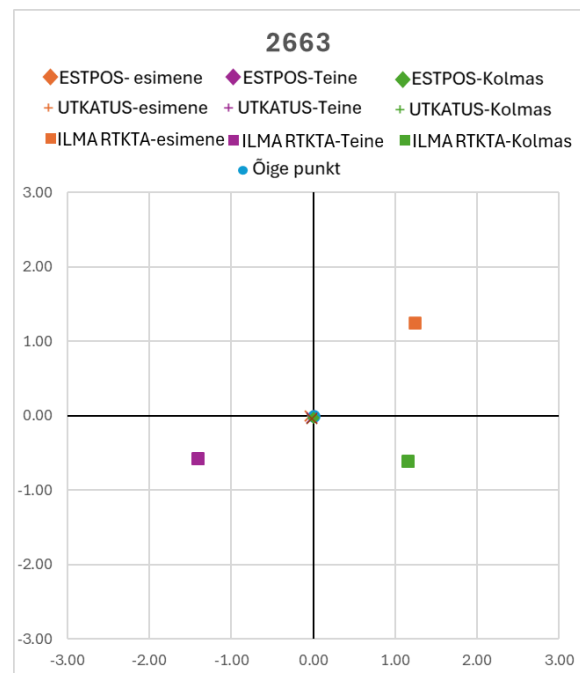
Punktil 2663 tehti mõõtmised kuupäevadel 08.04.2025, 24.04.2025 ja 29.04.2025.

#### 4.1.1 Täpsuse hindamine

Joonistelt 8 ja 9 on näha, et töös püsti pandud referentsjaama UTKatus täpsus jääb alla natukene ESTPOSi omale, kuid on siiski väga hea. Hajuvus mõlema meetodi puhul on üsna sarnane. Selgelt on näha, et ilma paranditeta mõõtmistel on täpsus palju väiksem ning hajuvus palju suurem.



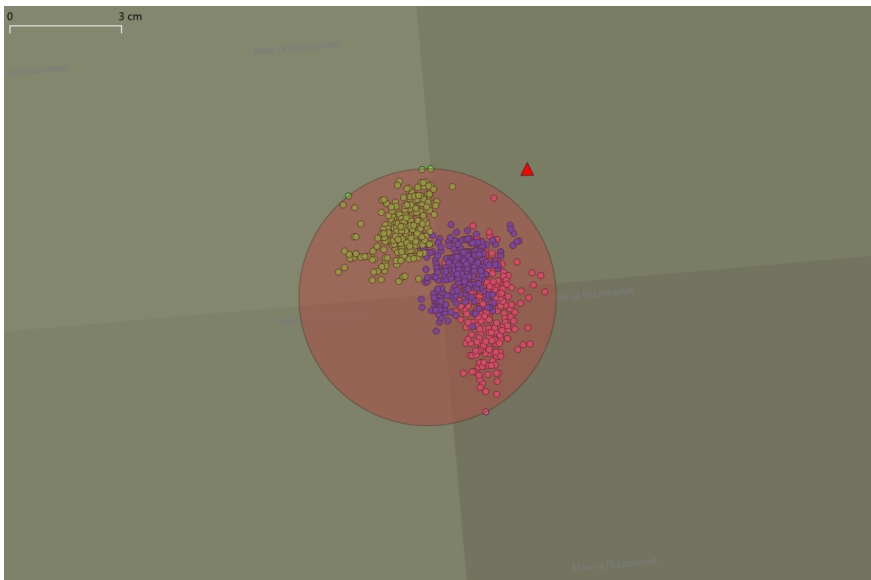
Joonis 8. Punkti 2663 mõõtmistulemused. Joonisel ei ole ilma RTK paranditeta mõõtmisi. Mõõtmised on meetrites.



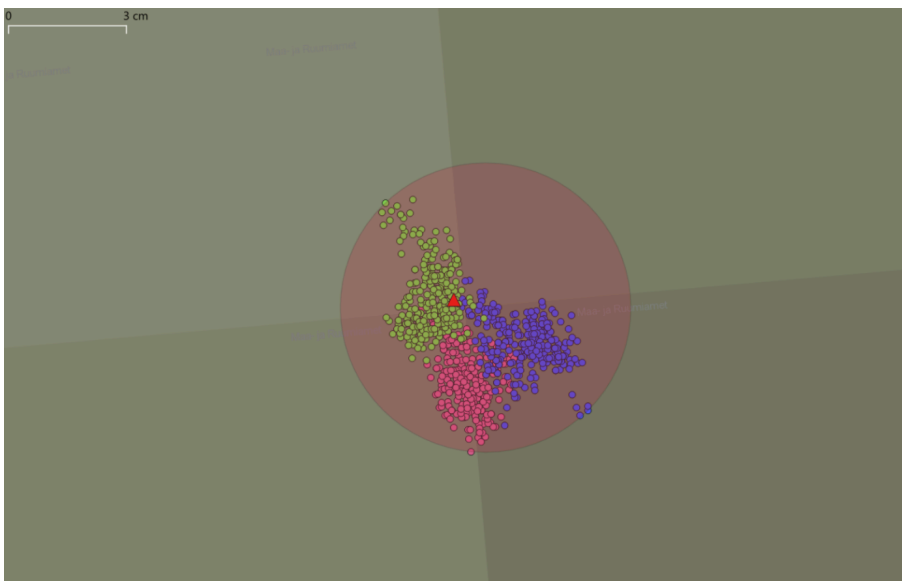
Joonis 9. Punkti 2663 mõõtmistulemused koos kõikide mõõtmistega. Mõõtmised on meetrites.

#### 4.1.2 korratavuse hindamine

Joonistel 10 ja 11 on näha, et UTKatuse korratavus on hea kuid jääb ESTPOSi omale tunduvalt alla. Kui ESTPOSi puhul mahuvad kõik punktid 3,46 sentimeetrise raadiusega ringi sisse, siis UTKatuse puhul on ringi suuruseks 3,69 sentimeetrit. UTKatuse puhul asub ringi keskpunkt õigest punktist 4,37 sentimeetri kaugusel ning ESTPOSi puhul asub ringi keskpunkt õigest punktist 0,84 sentimeetri kaugusel.



Joonis 10. UTKatuse korratavus. Punase ringi raadius on 3,46 sentimeetrit. Punane kolmnurk on kontrollpunkti asukoht.



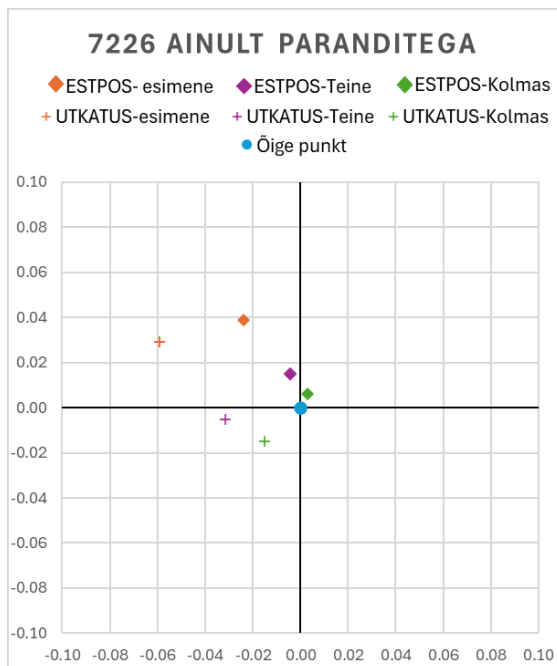
Joonis 11. ESTPOSi korratavus. Punase ringi raadius on 3,69 sentimeetrit. Punane kolmnurk on kontrollpunkti asukoht.

## 4.2 Punkti 7226 mõõtmistulemused

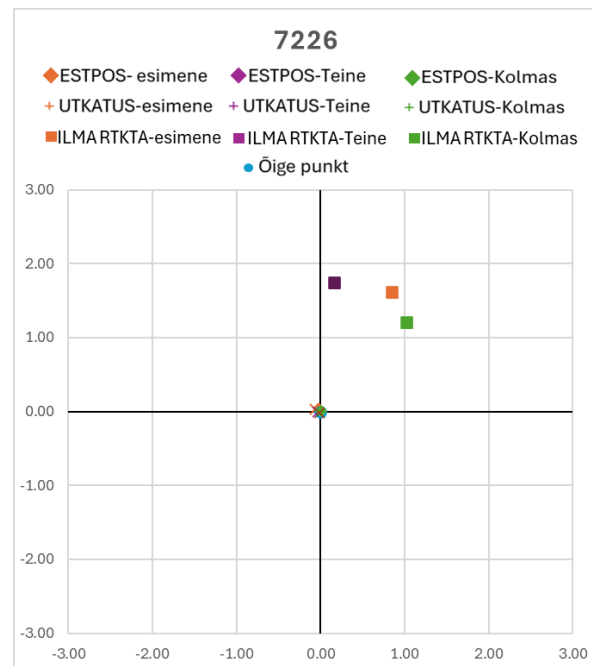
Mõõtmised punktil 7226 tehti kuupäevadel 23.04.2025, 29.04.2025 ning 06.05.2025.

### 4.2.1 Täpsuse hindamine

Joonistel 12 ja 13 on näha mõõtmistulemused punktil 7226. Paranditega mõõtmistel on näha, et punktid asetsevad üksteise suhtes üsna samadel kaugustel. Graafikutelt on näha, et paranditega tehtud mõõtmised on tunduvalt täpsemad kui paranditeta mõõtmised. Kui ilma RTK paranditeta mõõtmised jäävad umbes 2 meetri sisse siis RTK paranditega jäävad mõõtmised 6 sentimeetri sisse. Siinkohal paistab silma see, et UTKatusega tehtud mõõtmised asetsevad igal mõõtmisel ESTPOSiga võrreldes samades suundades. See annab alust arvata, et kui korrigeerida UTKatuse referentsjaama asukohta natukene põhja poole ning natuke lääne poole, siis oleksid tulemused väga sarnased.



Joonis 12. Punkti 7226 mõõtmistulemused. Joonisel ei ole ilma RTK paranditeta mõõtmisi. Mõõtmised on meetrites.

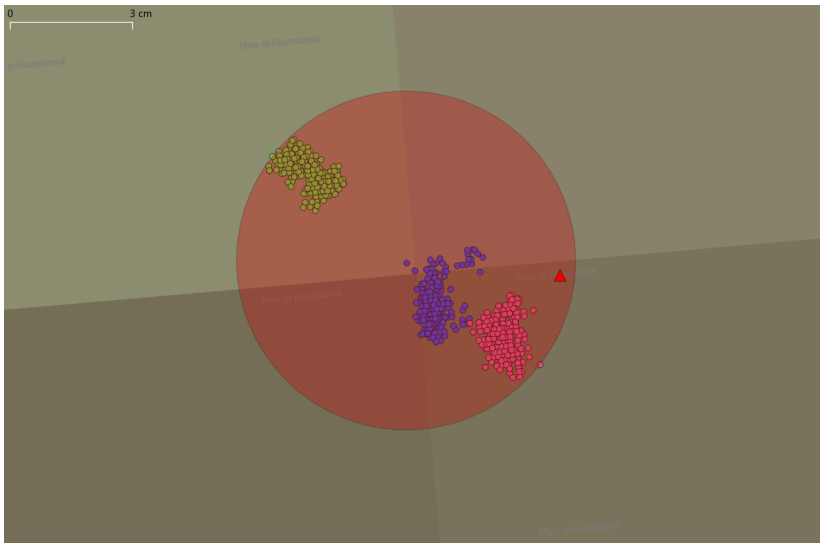


Joonis 13. Punkti 7226 mõõtmistulemused koos kõikide mõõtmistega. Mõõtmised on meetrites.

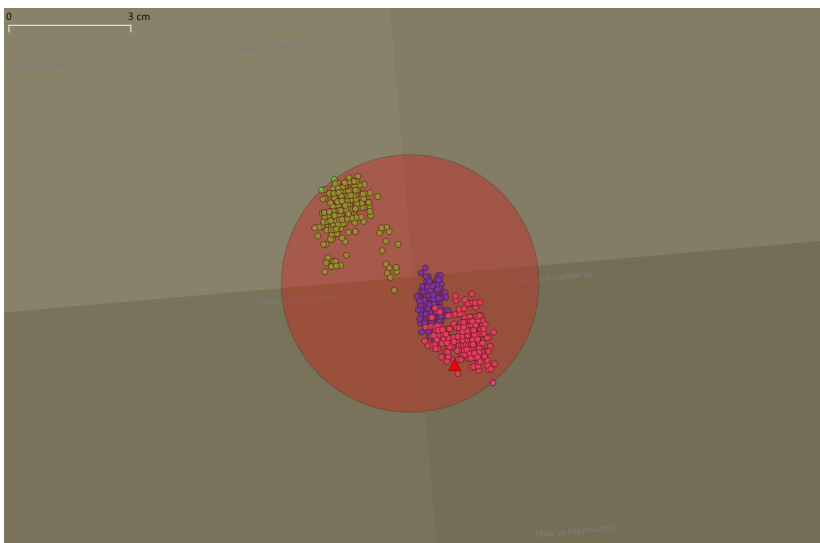
### 4.2.2 Korratavuse hindamine

UTKatusel 2. mõõtmisel olid küll punktid natukene hajunud, kuid jäid siiski väikse ala sisse. ESTPOSi esimesel mõõtmisel hajusid ka punktid natuke laiali, kuid jäid umbes 3 sentimeetri

sisse, mis on rahuldav. UTKatuse puhul asub ringi keskpunkt õigest punktist 5,73 sentimeetri kaugusel ning Estposi puhul asub ringi keskpunkt õigest punktist 2,27 sentimeetri kaugusel.



Joonis 14. UTKatuse korratavus. Punase ringi raadius on 4,16 sentimeetrit. Punane kolmnurk on kontrollpunkti asukoht.



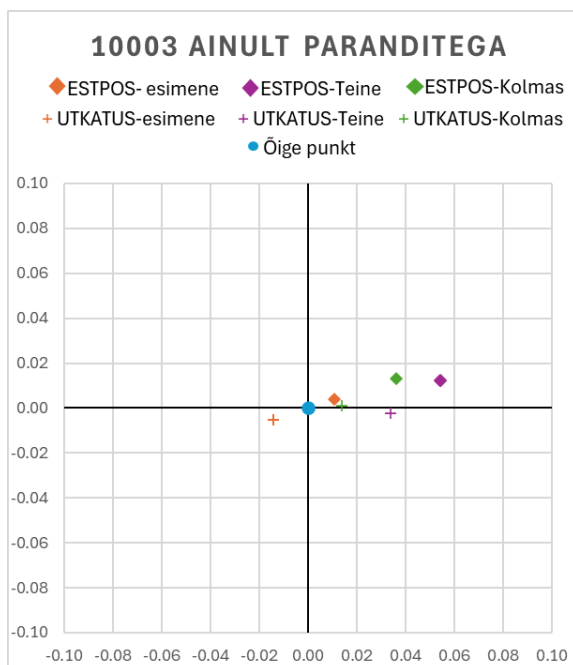
Joonis 15. ESTPOSi korratavus. Punase ringi raadius on 3,17 sentimeetrit. Punane kolmnurk on kontrollpunkti asukoht.

### 4.3 Punkti 10003 mõõtmistulemused

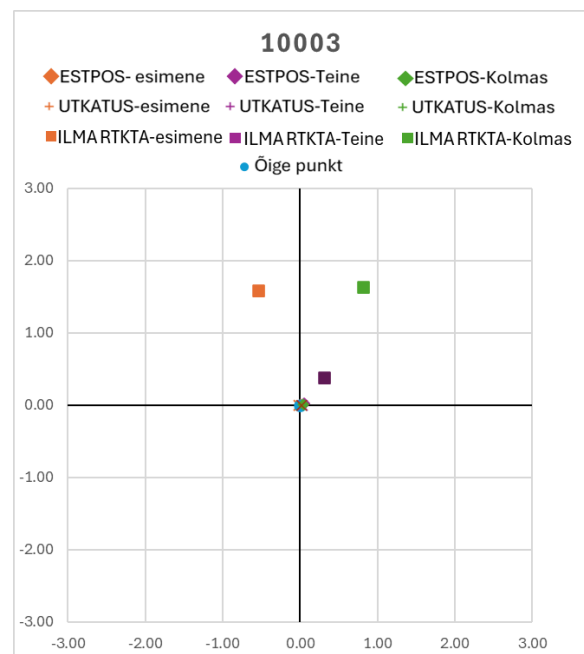
Mõõtmised tehti kuupäevadel 29.04.2025, 06.05.2025 ning 07.05.2025.

#### 4.3.1 Täpsuse hindamine

Joonistelt 16 ja 17 on näha, et UTKatuse ning ESTPOSi mõõtmistulemuste vahed jäid erinevatel mõõtmistel sarnaseks. UTKatuse positsioon oli igal mõõtmisel ESTPOSiiga võrreldes umbes 2 sentimeetrit lääne ning umbes 1-2 sentimeetrit lõuna pool. Joonistelt on näha, et ilma RTK paranditeta mõõtmiste puhul oli teine mõõtmine kõige lähemal, kuid nii UTKatuse kui ka ESTPOSi puhul oli teine mõõtmine kõige kaugemal.



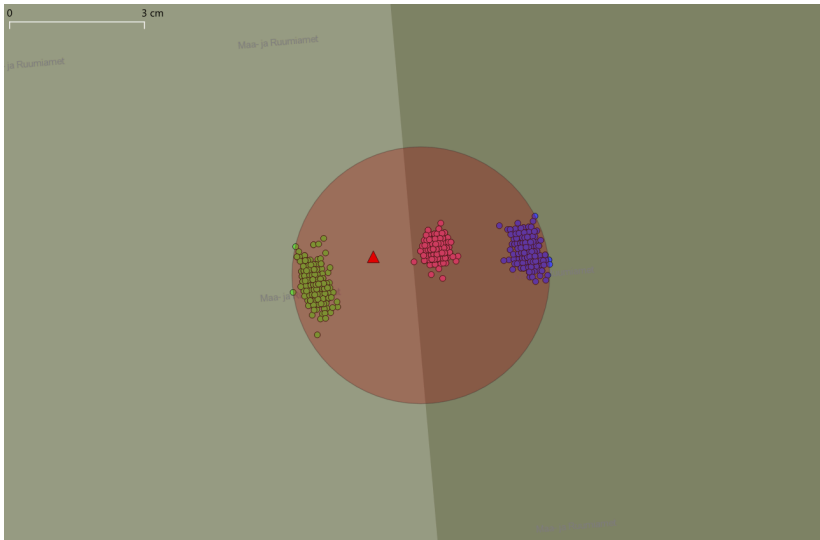
Joonis 16. Punkti 10003 mõõtmistulemused. Joonisel ei ole ilma RTK paranditeta mõõtmisi. Mõõtmised on meetrites.



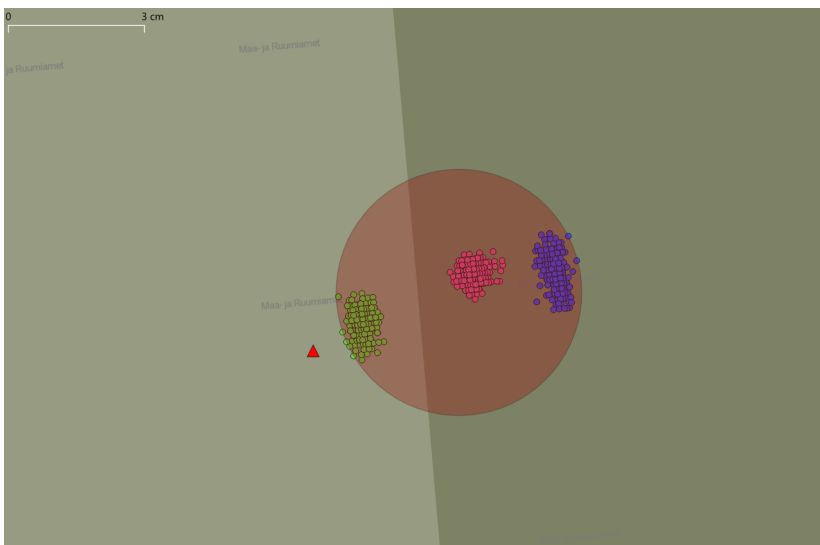
Joonis 17. Punkti 10003 mõõtmistulemused koos kõikide mõõtmistega. Mõõtmised on meetrites.

#### 4.3.2 Korratavuse hindamine

Joonistel 18 ja 19 on kujutatud punktil 10003 tehtud UTKatuse ja ESTPOSi mõõtmised. Mõlema puhul on korratavus olnud väga hea. Igal erineval mõõtmisel on punktid tihedalt koos ning mõlema meetodi puhul jäid kõik mõõtmised alla 3-sentimeetrise raadiusega ringi sisse. UTKatuse puhul asub ringi keskpunkt õigest punktist 1,13 sentimeetri kaugusel ning ESTPOSi puhul asub ringi keskpunkt õigest punktist 3,47 sentimeetri kaugusel.



Joonis 18. UTKatuse korratavus. Punase ringi raadius on 2,86 sentimeetrit. Punane kolmnurk on kontrollpunkti asukoht.



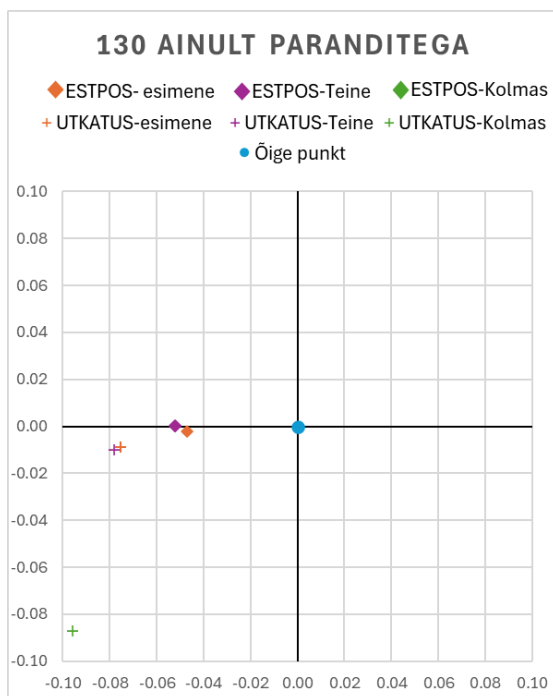
Joonis 19. ESTPOS korratavus. Punase ringi raadius on 2,71 sentimeetrit. Punane kolmnurk on kontrollpunkti asukoht.

## 4.4 Punkti 130 mõõtmistulemused

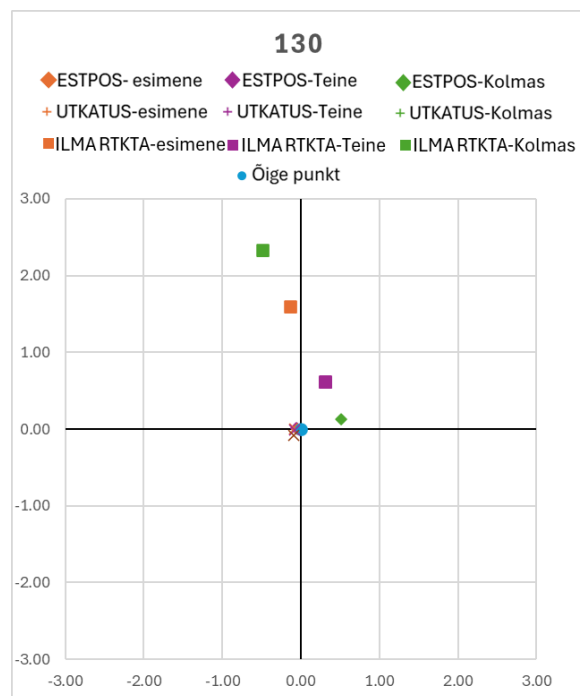
Mõõtmised tehti kuupäevadel 23.04.2025, 29.04.2025 keskpäeval ajal ja 29.04.2025 õhtusel ajal.

### 4.4.1 Täpsuse hindamine

Mõõtmistulemused on illustreeritud joonistel 20 ja 21. Punkt 130 oli üks kõige piiratuma taevalaotusega punkt. Punkti kõrval oli kohe puu ning paari meetri kaugusel maja, mis ilmselt segasid signaale. Nagu joonistelt on näha, siis ESTPOSiga tehtud mõõtmised olid umbes poolteist sentimeetrit täpsemad kui UTKatusega tehtud mõõtmised. Kolmanda mõõtmisega oli aga näha, et võrreldes varasemate mõõtmistega olid nii ESTPOSi kui ka UTKatusega tehtud mõõtmised tunduvalt halvemad. Viimasel mõõtmisel küll RTK parandas mõõtmistulemusi, kuid mitte nii palju kui varasematel mõõtmistel. Ilmselt oli tegemist signaalide ajutise halvenemisega ning kuna see punkt oli niigi piiratud taevalaotusega siis mõjutas see mõõtmistulemusi tunduvalt rohkem. Esimesel kahel mõõtmisel on näha, et nii UTKatuse kui ka ESTPOSi esimene ja teine mõõtmine erinevad üksteisest väga vähe, mis annab aimu heast korratavusest.



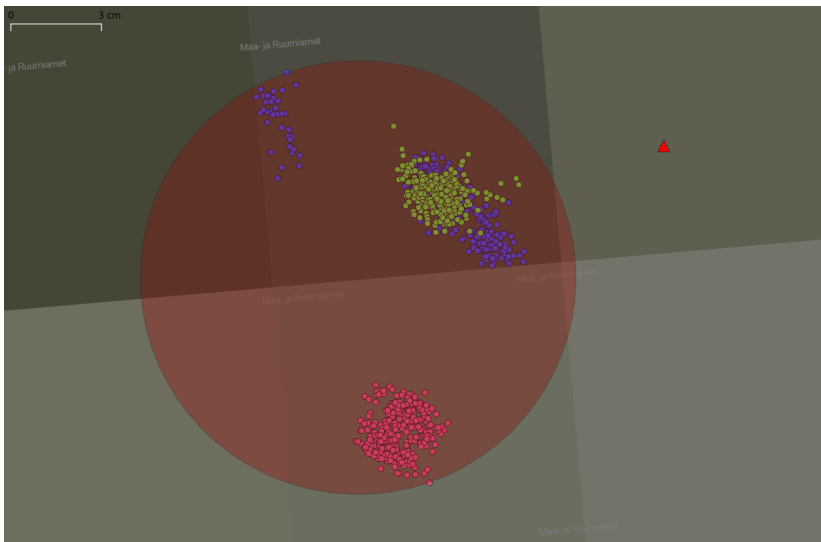
Joonis 20 Punkti 130 mõõtmistulemused. Joonisel ei ole ilma RTK paranditeta mõõtmisi. Mõõtmised on meetrites.



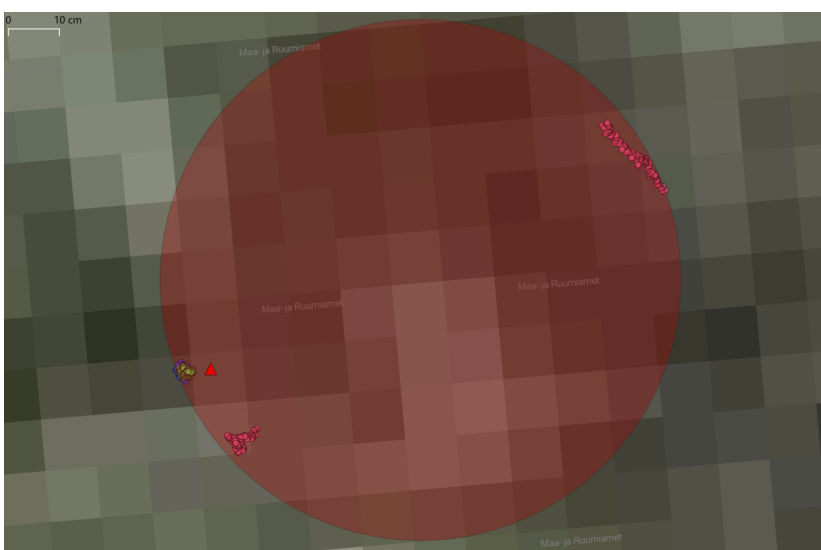
Joonis 21 Punkti 130 mõõtmistulemused koos kõikide mõõtmistega. Mõõtmised on meetrites.

#### 4.4.2 Korratavuse hindamine

Joonistel 22 ja 23 on näha, et UTKatus meetodi teisel mõõtmisel ning ESTPOSi meetodi kolmandal mõõtmisel toimus ootamatu positsioneerimiskoha nihe. Põhjuseks võivad olla selle punkti läheduses paiknevad objektid. Ülejäänud mõõtmistel oli tulemuste korratavus väga hea ning mõõtmised püsisid mõne sentimeetri raadiuses. UTKatuse puhul asub ringi keskpunkt õigest punktist 11,79 sentimeetri kaugusel ning ESTPOSi puhul asub ringi keskpunkt õigest punktist 44,65 sentimeetri kaugusel.



Joonis 22. UTKatuse korratavus. Punase ringi raadius on 7,22 sentimeetrit. Punane kolmnurk on kontrollpunkti asukoht.



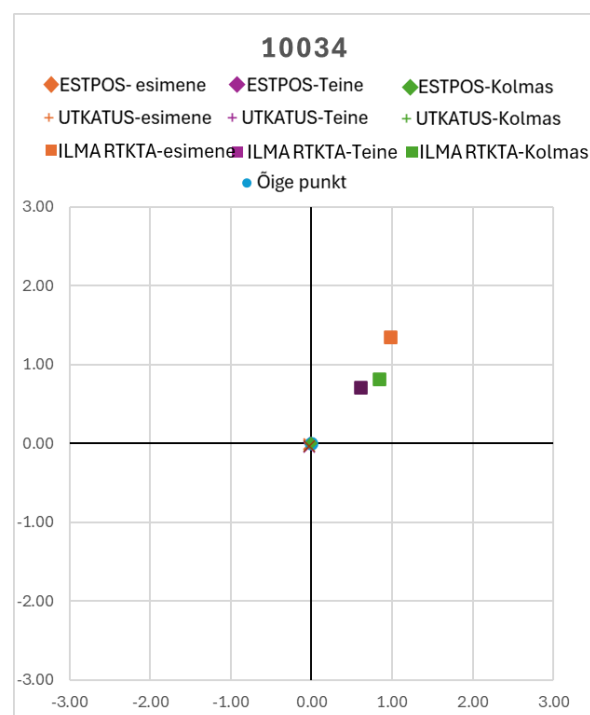
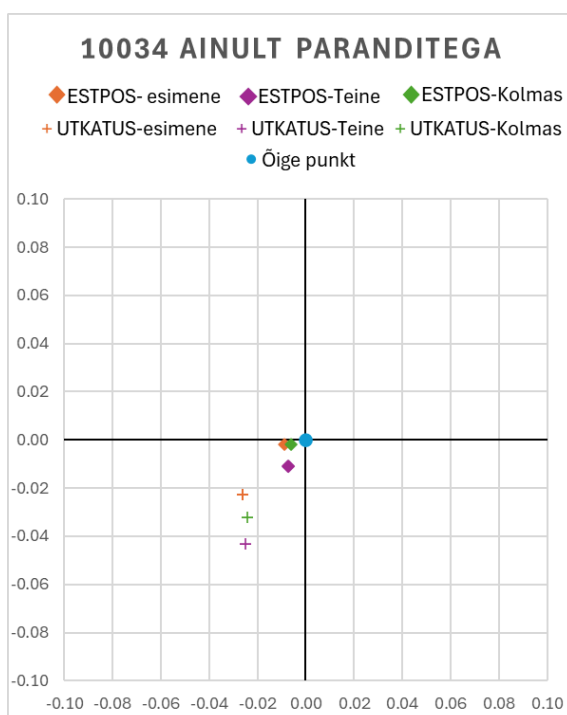
Joonis 23. ESTPOSi korratavus. Punase ringi raadius on 50,9 sentimeetrit. Punane kolmnurk on kontrollpunkti asukoht.

## 4.5 Punkti 10034 mõõtmistulemused

Mõõtmised tehti 23.04.2025, 29.04.2025 päevasel ajal ja 29.04.2025 õhtusel ajal.

### 4.5.1 Täpsuse hindamine

Joonistelt 24 ja 25 on näha, et RTK parandeid kasutades saadi tunduvalt paremad mõõtmistulemused kui ilma RTK paranditeta. Joonistelt on näha, et UTKatuse mõõtmistulemused erinevad ESTPOSi omadest 2-4 sentimeetrit. Samas on näha, et tulemused on sarnased ning ei ole laiali hajunud. Ilma RTK paranditeta tulemused on samuti väikse hajuvusega.



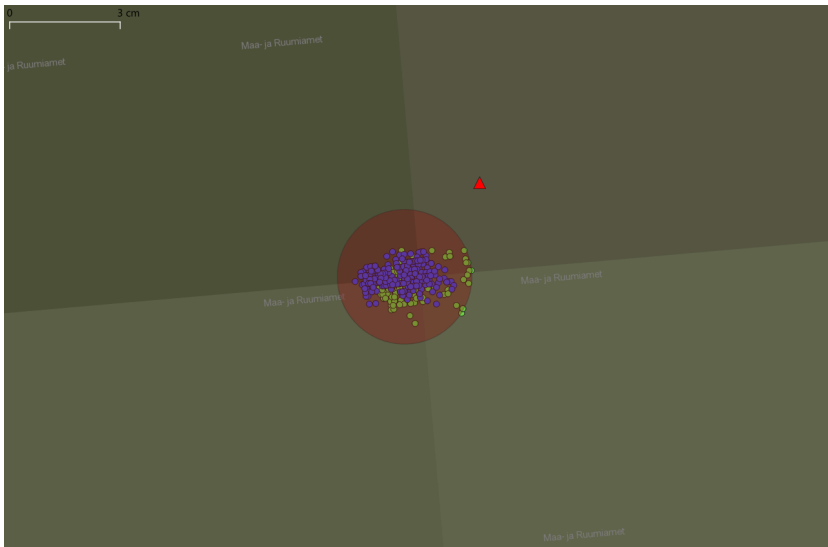
Joonis 24 Punkti 10034 mõõtmistulemused. Joonisel ei ole ilma RTK paranditeta mõõtmisi. Mõõtmised on meetrites.

Joonis 25 Punkti 10034 mõõtmistulemused koos kõikide mõõtmistega. Mõõtmised on meetrites.

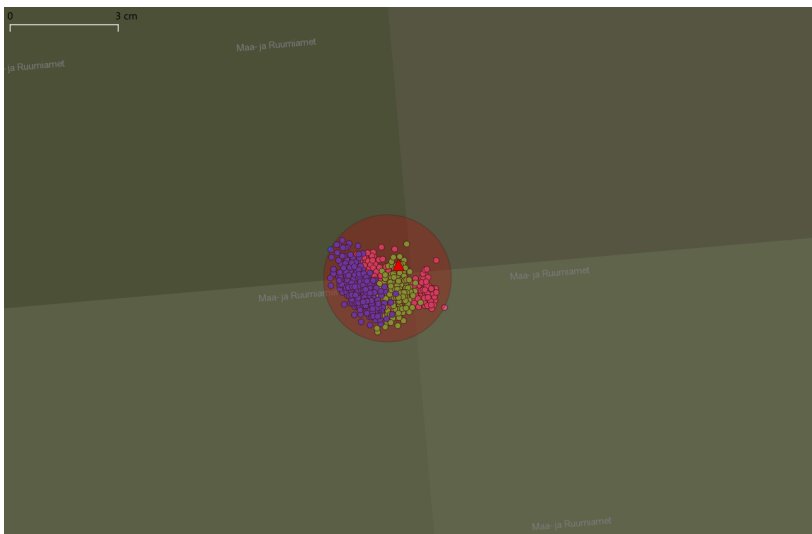
### 4.5.2 Korratavuse hindamine

Joonistel 26 ja 27 on näha, et nii ESTPOSi kui ka UTKatuse puhul on korratavus väga hea. Kõigi kolme mõõtmise tulemused jäävad alla 2-sentimeetrise ringi sisse. See on parim tulemus kõikidest mõõtmistest. UTKatuse puhul asub ringi keskpunkt õigest punktist 3,27

sentimeetri kaugusel ning ESTPOSi puhul asub ringi keskpunkt õigest punktist 0,48 sentimeetri kaugusel, mis on ka ESTPOSi puhul parim tulemus.



Joonis 26. UTKatuse korratavus. Punase ringi raadius on 1,83 sentimeetrit. Punane kolmnurk on kontrollpunkti asukoht.



Joonis 27. ESTPOSi korratavus. Punase ringi raadius on 1,77 sentimeetrit. Punane kolmnurk on kontrollpunkti asukoht.

## 4.6 Staatiliste mõõtmiste kokkuvõte

Tabel 3 näitab kõikide mõõtmistulemuste keskmist kaugust õigest punktist. Täpseim mõõtmistulemus oli punktil 10003 ning sellele järgnes punkt 10034. 10003 oli avatud taevalaotusega, mis ilmselt aitas kaasa ka headele tulemustele. Punktil 10034 olid küll läheduses puud, kuid muid suuri ehitisi, mis taevalaotust palju piiraks, ei olnud. Punktis 130 olid halvimald tingimused ning see põhjendab ka sellel punktil saadud halvemaid tulemusi. Huvitav on siiski see, et ilma RTKta teisel mõõtmisel saadi üsna hea tulemus - kõikidest ilma RTKta mõõtmistest teine parim tulemus. Tabelist on ka selgemalt näha, et kolmandal mõõtmisel punktil 130 olid iga meetodiga mõõtes tunduvalt halvemad tulemused. Paranditega mõõtes olid siiski 28 tulemust 30-st alla 10 sentimeetri ning 22 mõõtmist alla 5 sentimeetri.

Tabelis 4 on välja toodud mõõtmistulemuste kokkuvõte, kust on välja jäetud punktil 130 3. mõõtmise anomaalia. Kui vaadata tabelist 3 meetodite keskmisi tulemusi, siis esmapilgul jääb mulje, et UTKatusega mõõtes saadi parem keskmine tulemus kui ESTPOSiga. Tabelist 4 on aga näha, et ESTPOSi keskmiseks tuleb 0,025 meetrit ning UTKatuse puhul tuleb keskmiseks 0,041 meetrit.

Töö koostaja jaoks on alla 10-sentimeetrine täpsus piisav. Kui välja jätta UTKatuse 3. mõõtmine punktil 130 siis on kõik mõõtmised alla 10-sentimeetrise täpsusega. Kui liita juurde kontrollpunkti maksimaalne viga 5 sentimeetrit, siis jäävad alla 10 sentimeetri 10 mõõtmist 14-st. Keskmiselt olid mõõtmistulemused tunduvalt alla 10 sentimeetri.

Tabel 3. Kaugused kontrollpunktist. Tulemused on meetrites.

	ESTPOS				UTKATUS				ILMA RTKTA			
	I	II	III	Punkti keskmine	I	II	III	Punkti keskmine	I	II	III	Punkti keskmine
130	0.047	0.052	0.523	0.207	0.076	0.079	0.130	0.095	1.604	0.689	2.388	1.560
2667	0.007	0.021	0.022	0.017	0.038	0.034	0.038	0.037	1.761	1.516	1.308	1.528
7226	0.046	0.015	0.007	0.023	0.066	0.032	0.021	0.040	1.828	1.581	1.752	1.720
10003	0.012	0.056	0.038	0.035	0.015	0.034	0.014	0.021	1.675	1.824	0.491	1.166
10034	0.009	0.013	0.006	0.009	0.035	0.050	0.040	0.042	1.660	1.171	0.930	1.254
Meetodite keskmine	0.058				0.047				1.446			

Tabel 4. Kaugused kontrollpunktist. Välja on jäetud punktil 130 III mõõtmine. Tulemused on meetrites.

	ESTPOS				UTKATUS				ILMA RTKTA			
	I	II	III	Punkti keskmine	I	II	III	Punkti keskmine	SSSS I	II	III	Punkti keskmine
130	0.047	0.052		0.050	0.076	0.079		0.078	1.604	0.689		1.147
2667	0.007	0.021	0.022	0.017	0.038	0.034	0.038	0.037	1.761	1.516	1.308	1.528
7226	0.046	0.015	0.007	0.023	0.066	0.032	0.021	0.040	1.828	1.581	1.752	1.720
10003	0.012	0.056	0.038	0.035	0.015	0.034	0.014	0.021	1.675	1.824	0.491	1.166
10034	0.009	0.013	0.006	0.009	0.035	0.050	0.040	0.042	1.660	1.171	0.930	1.254
Meetodite keskmine	0.025				0.041				1.379			

## 4.7 Mõõtmised liikuva sõiduki peal

Mõõtmised tehti kuupäeval 14.05.2025. Mõõtmistel läbitud teekond on näha joonisel 28. Liikuvjaama antenni kaugus auto antennist oli 1,12 meetrit. Tabelist 5 on näha, et UTKatusega mõõtes saadi liikuvjaama antenni ning auto antenni keskmiseks vaheks kogu mõõtmise vältel 1,069 meetrit. See tähendab, et UTKatuse mõõtmised erinesid keskmiselt 0,051 meetrit auto mõõtmistest. ESTPOSi kasutades saadi auto antenni ning liikuvjaama antenni keskmiseks kauguseks 1,638 meetrit. ESTPOSigaga mõõtes tuli keskmiseks mõõtmisvaheks auto antenniga 0,518 meetrit, mis on 10 korda kehvem kui UTKatusega mõõtes. ESTPOSi tulemusi võis mõjutada erinev satelliitide kasutus või mõõtmiste ajal esinev internetiühenduse ebastabiilsus. Ebapiisava andmeside korral ei pruukinud liikuvjaam saada vajalikku RTK-paranduste infot reaalajas, mis omakorda vähendas positsioneerimise täpsust.

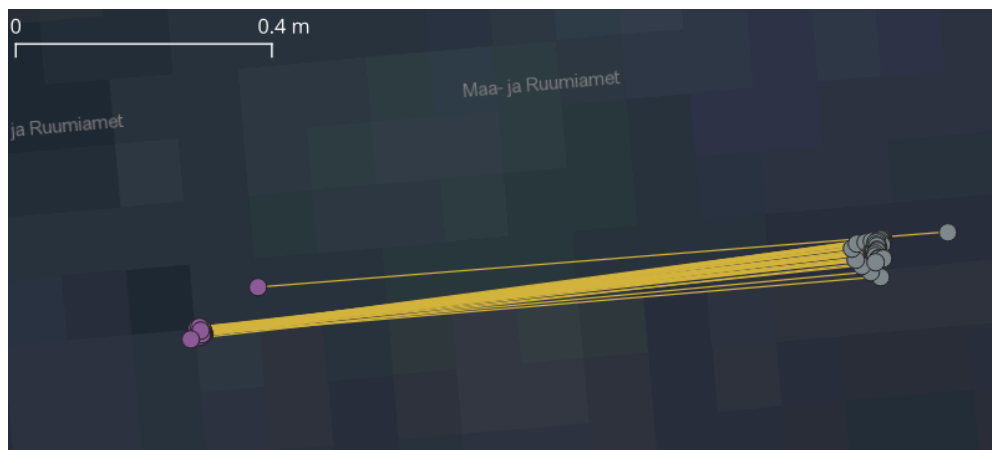
Tabel 5. Autoga tehtud mõõtmiste keskmised. Tulemused meetrites.

	Keskmine kaugus antennist	Mõõtmiste keskmine vahe auto antenniga
UTKATUS	1.069	0.051
ESTPOS	1.638	0.518



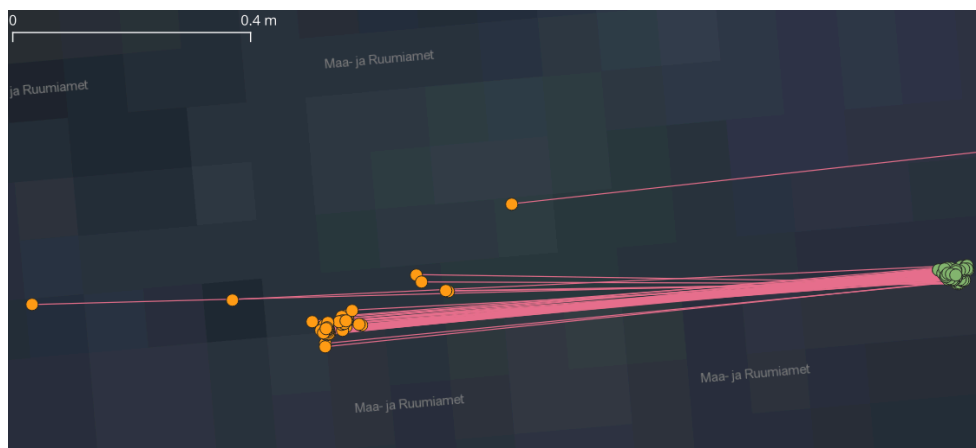
Joonis 28. Autoga läbitud teekond.

Kohapeal seistes oli UTKatuse korratavus parem kui auto antenniga mõõtes nagu joonisel 29 näha. Auto antennil on sisse ehitatud IMU(Inertial Measurement Unit). IMU aitab autol oma positsiooni vastavalt liikumisele parandada, kuid kohapeal seistes võib see segada positsioneerimist ning korratavus halveneb.



Joonis 29. Pildil seisab auto foori taga ühe koha peal. Hallid on autoga saadud mõõtmised ning lillad UTKatusega saadud mõõtmised.

Kui aga võrrelda ESPTOSi ja auto korratavust joonisel 30, siis auto korratavus oli ESTPOSi omast tunduvalt parem. ESTPOSi puhul oli terve mõõtmise vältel probleeme oma asukoha täpse määramisega ning



Joonis 30. Pildil seisab auto foori taga ühe koha peal. Rohelised punktid on autoga saadud tulemused ning oranžid ESTPOSiga saadud tulemused. Jooned ühendavad samal ajahetkel mõõtmispunkti

## Kokkuvõte

Töö eesmärk oli uurida RTK referentsjaama ülesseadmise keerukust, maksumust ning täpsust. Referentsjaam UTKatus seati üles Delta õppehoone katusele Tartus, et pakkuda parandeid Tartus ning selle ümbruses.

Keerukaimaks osaks referentsjaama ülesseadmisel oli baasjaama konfigureerimine. Kuna täpselt sellise baasjaama ülesseadmise juhendit internetist ei leidunud, siis pidi kombineerima mitu erinevat juhendit. Mitmed juhendid olid raskesti arusaadavad ning vajasis lisaselgitusi teistest juhenditest. Edaspidi oleks samasuguse referentsjaama ülesseadmine tunduvalt lihtsam, kuna saab kasutada sama konfiguratsioonifaili, mis on valminud referentsjaama peal.

Referentsjaama maksumuseks käesolevas töös sai 474,8 eurot. Hinda aitas madalal hoida vabavaraline RTK2GO NTRIP edastaja. Võrreldes teiste valmislahendustega on aga töös valmistatud referentsjaama maksumus kordades väiksem.

Täpsuse hindamisel viidi läbi 45 mõõtmist Maa-ameti poolt loodud kohaliku geodeetilise võrgu esimese ja teise järgu punktidel. Töö raames ülesseatud referentsjaama täpsust võrreldi ESTPOSi poolt pakutava teenuse täpsuse ning ilma paranditeta positsioneerimise täpsusega. Mõõtmiste tulemusena selgus, et UTKatuse täpsus jääb vähesel määral alla ESTPOSi poolt pakutavale täpsusele. Täpsemalt on UTKatuse positsioneerimistäpsus ESTPOSi omast keskmiselt 1,6 sentimeetrit ebatäpsem. Siiski oli näha, et UTKatuse parandeid kasutades oli võimalik saavutada tunduvalt parem täpsus ning korratavus kui ilma RTK paranditeta. Joonistelt joonistus välja ka see, et mitmel mõõtmisel asetses UTKatuse poolt saadud positsioon sarnases asendis ESTPOSi mõõtmistega. See annab alust arvata, et UTKatuse positsiooni korrigeerides oleks võimalik saada täpsemad mõõtmistulemused.

Liikuval autol mõõtes oli pilt aga teistsugune. Võrdluseks kasutati auto peal olevat positsioneerimissüsteemi ning UTKatus suutis võrreldes sellega pakkuda pea 10 korda paremat positsioneerimist kui ESTPOS. Siiski tasub mainida, et mõõtmisi tehti ühel päeval ning kummagi meetodiga ainult üks kord.

## Viidatud kirjandus

[1] Svežova M. Võrgu RTK mõõteseriae täpsus, 2018.

<https://dSPACE.EMU.EE/server/api/core/bitstreams/c0bc0aed-6ea3-46a1-9e18-f6496edd7b6b/content> (04.04.2025)

[2] Rüdja A. Sander J. Globaalne asukohamääramine : satelliitmõõtmise näidisülesanded. Tallinn: SA INNOVE. 2013.

[3] NOVATEL INC. An Introduction to GNSS: A primer in using Global Navigation Satellite Systems for positioning and autonomy. Canada: NovAtel Inc. 2010.

[4] Pietila S. Caracheo A. Exploring the role of GNSS time synchronization. 2023. <https://www.u-blox.com/en/blogs/insights/gnss-time-synchronization-development> (09.12.2024)

[5] Zhang D., Zhang y., Huang Y., Wang F. RTK positioning verification method based on GNSS simulator. *2024 4th International Conference on Electronics, Circuits and Information Engineering (ECIE)*, 2024. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.utlib.ut.ee/document/10626831> (09.12.2024)

[6] Lenz E., Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) – Application and Benefit in Modern Surveying Systems, 2004. <https://blog.emlid.com/rtk-corrections-explained-from-base-station-to-ntrip-service/> (10.04.2025)

[7] Emlid, RTCM3 specification, s.a. <https://docs.emlid.com/reachrs3/specifications/rtcm3-format/> (04.04.2025)

[8] GNSS-SDR, Observables, 2021. <https://gnss-sdr.org/docs/sp-blocks/observables/> (16.04.2025)

[9] Novotech, What is Signal-to-Noise Ratio (SNR) in the World of GNSS/GPS Antennas?, s.a. <https://novotech.com/pages/signal-to-noise-ratio-snr> (21.04.2025)

[10] Global GPS Systems,s.a. <https://globalgpssystem.com/gnss/rtk-gps-understanding-real-time-kinematic-gps-technology/> (09.12.2024)

- [11] How to Build a DIY GNSS Reference Station, s.a.  
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-build-a-diy-gnss-reference-station/all#introduction> (04.04.2024)
- [12] Setting up a Rover Base RTK System, s.a.  
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/setting-up-a-rover-base-rtk-system> (04.04.2025)
- [13] ArduSimple, How to generate RINEX files with simpleRTK2B (ZED-F9P) for PPK, 2024. <https://www.ardusimple.com/how-to-generate-rinex-files-with-simplertk2b-for-ppk/> (21.04.2025)
- [14] ArduSimple, Serial Datalogger to microSD, s.a.  
<https://www.ardusimple.com/product/serial-datalogger-to-microsd/> (22.04.2025)
- [15] ArduSimple, How to build a portable PPK data logger with simpleRTK2B Pro receiver, 2020. <https://www.ardusimple.com/how-to-build-a-portable-ppk-data-logger/> (22.04.2025)
- [16] Chen, M. What is RINEX format and its latest version?, 2023.  
[https://www.tersus-gnss.com/tech\\_blog/What-is-RINEX-format-and-its-latest-version](https://www.tersus-gnss.com/tech_blog/What-is-RINEX-format-and-its-latest-version) (21.04.2025)
- [17] Wanninger L. Introduction to Network RTK, 2008.  
<https://www.wasoft.de/e/iagwg451/intro/introduction.html> (21.04.2025)
- [18] Choy S, GNSS Precise Point Positioning (PPP), 2018.  
[https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/ait-gnss/16\\_PPP.pdf](https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/ait-gnss/16_PPP.pdf) (08.04.2025)
- [19] ArduSimple, 4G NTRIP Master Hookup Guide, s.a.  
<https://www.ardusimple.com/4g-ntrip-client-hookup-guide/> (22.04.2025)
- [20] Betzner N. How Much Does RTK GPS Cost?, 2020.  
<https://rtkgpsurveyequipment.com/how-much-does-rtk-gps-cost/>
- [21] Maa-Amet, Kohaliku geodeetilise võrgu rajamise ja rekonstrueerimise juhendi kinnitamine, 2018.  
[https://geoportaal.maaamet.ee/docs/Geodeesia/Kohaliku-geodeetilise-vorgu-rajamise-ja-rekonstrueerimise-juhend.pdf?t=20180511112316&utm\\_source=chatgpt.com](https://geoportaal.maaamet.ee/docs/Geodeesia/Kohaliku-geodeetilise-vorgu-rajamise-ja-rekonstrueerimise-juhend.pdf?t=20180511112316&utm_source=chatgpt.com) (13.05.2025)

[22] Maa-amet, Riiklik geodeetiline võrk.

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed/geodeetilised-andmed/geodeetilised-vorgud/riiklik-geodeetiline-vork-p283.html> (13.05.2025)

[23] Maa- ja Ruumiamet, Geodeetiliste punktide andmekogu.

<https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/gpa> (05.05.2025)

[24] Autonomous Driving Lab, The Lab. <https://adl.cs.ut.ee/lab/vehicle> (14.05.2025)

## **Lisad**

### **I. Repositoorium**

Kõik andmetötluse jaoks vajalikud programmid ning mõõtmisandmed on saadaval Githubi repositooriumis [siin](#).

## **II. Litsents**

### **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Jaagup Kopli,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose Reaalajas kinemaatilise mõõtmisviisi referentsjaama ülesseadmine ja täpsuse hindamine, mille juhendajad on Tambet Matiisen ja Edgar Sepp, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Jaagup Kopli

15.05.2025