

**TAL
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

**MADALA HINNAKLASSI GNSS SENSORIGA
SAAVUTATAV 3D ASUKOHAMÄÄRANGU TÄPSUS**

**THREE-DIMENSIONAL POSITIONING ACCURACY
ACHIEVABLE BY A LOW-COST GNSS SENSOR**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Johanna Koobak

Üliõpilaskood: 177575EATI

Juhendajad: Prof. Artu Ellmann
MSc Sander Varbla

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Johanna Koobak

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Madala hinnaklassi GNSS sensoriga saavutatav 3D asukohamäärangu täpsus

mille juhendajad on prof. Artu Ellmann ja MSc Sander Varbla.

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

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

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

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

_____ (kuupäev)

¹ 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 avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Johanna Koobak, 177575EATI
Õppekava, peeriala: EATI02/17, Ehitusgeodeesia
Juhendajad: Täisprofessor tenuuris, Artu Ellmann, PhD
Doktorant-nooremteadur, Sander Varbla, MSc

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Madala hinnaklassi GNSS sensoriga saavutatav 3D asukohamäärangu täpsus
(inglise keeles) Three dimensional positioning accuracy achievable by a low-cost GNSS sensor

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Selgitada välja, kas madala hinnaklassi GNSS sensori antennil on faasisentri nihe.
2. Urida madala hinnaklassi GNSS sensori mõõtmistäpsust erinevatel kinemaatilistel kõrgusmõõtmisel ning plaanilisel asukohamäärangul.
3. Analüüsida vabavara tarkvara ja kommertstarkvara võimekust madala hinnaklassi GNSS sensori andmeformaadi (*.ubx) töötlusel.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Andmete kogumine ja esmane andmetöötlus	01.03.2022
2.	Tulemuste analüüs ja esmased järeldused	01.04.2022
3.	Tervikmustandi esitamine	01.05.2022

Töö keel: **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja 1: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja 2: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	11
Lühendite loetelu	13
Tähiste loetelu	15
1. SISSEJUHATUS.....	16
2. GNSS ÜLEVAADE	19
2.1 GNSS	19
2.2 GNSS komponendid	19
2.3 Mõõtmismeetodid	23
2.3.1 Faasimõõtmised	23
2.3.2 Asukohamäärang	26
2.3.3 Staatiline mõõtmine	27
2.3.4 Kinemaatiline mõõtmine.....	27
2.4 Satelliitmõõtmiste vigade allikad.....	28
2.4.1 Instrumentaalsed vead	28
2.4.2 Atmosfäärilist tingitud vead.....	29
2.4.4 Trajektoorihäired	30
2.4.5 Mitmeteelisus	30
3. KASUTATUD INSTUMENDID	32
3.1 GNSS sensor	32
3.1.1 Vastuvõtja.....	33
3.1.2 Antenn.....	35
3.2 Leica Viva GS15	37
3.3 GNSS püsijaamad	38
4. MÕÕTMISED JA ANDMETÖÖTLUS	40
4.1 Kasutatud programmid	40
4.1.1 RTKLIB	40
4.1.2 Leica Infinity.....	41
4.2 Täpsushinnangu peamised arvutusvalemid.....	43
4.3 Kõrguskomponendi määramine veetaseme mõõtmistel	43
4.3.1 Mõõtmised kontrollitud keskkonnas	44
4.3.2 Mõõtmised merel	48
4.4 Teadaoleva geomeetriaga kontuuride mõõtmine	51
4.5 Mõõtmised liikuvplatvormilt.....	55
5. ANALÜÜS.....	60
5.1 Veetaseme mõõtmistulemused	60
5.1.1 Mõõtmistulemused kontrollitud keskkonnas	60
5.1.2 Mõõtmistulemused merel	63

5.1.3 Võrdlused veemõõdujaama andmetega	67
5.1.4 Arvutused programmiga Leica Infinity.....	71
5.1.5 Järeldused.....	76
5.2 Kindla geomeetriaga kontuuride mõõtmistulemused.....	77
5.2.1 Kotka jalgpallistaadion	78
5.2.2 Kuressaare jalgpallistaadion	79
5.2.3 Järeldused.....	84
5.3 Liikuvplatvormi mõõtmistulemused	85
5.3.1 Järeldused.....	89
KOKKUVÕTE	91
SUMMARY.....	94
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	97
LISAD	102

JOONISTE LOETELU

Joonis 2.1. Mitmeteelisus linnakanjonis (Kumar et al., 2013)	31
Joonis 3.1. U-blox GNSS vastuvõtja ja Taoglas antenn	32
Joonis 3.2. U-blox ZED-F9P kiip, mis on kaablite vahendusel ühendatud antenniga ning vooluallikaga (sülearvuti, mis on ühtlasi ka väline mälu- ja juhtimisseade)	35
Joonis 3.3. Taoglas MAGMA X2 GNSS antenn	36
Joonis 3.4. ESTPOS võrgu GNSS-püsijaamad (Geoportaal, 2022b).....	39
Joonis 4.1. RTKLIB andmetöötamise protsessi skeem	40
Joonis 4.2. Leica Infinity andmetöötamise protsess.	42
Joonis 4.3. Veetaseme mõõtmisel kasutatud esialgne mõõtesensor.....	44
Joonis 4.4. GNSS mõõtmised kontrollitud keskkonnas (Foto Sander Varbla).....	45
Joonis 4.5. RTKLIB tarkvara tulemusfail (*.pos)	47
Joonis 4.6. Veetaseme mõõtepoi ja kasutatud GNSS püsijaama asukoht (https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo)	48
Joonis 4.7. Mereveetaseme mõõtmisel kasutatud mõõtesensor (Foto Jaan Rebane) ..	49
Joonis 4.8. Mereveetaseme mõõtepoi (Foto Jaan Rebane).....	49
Joonis 4.9. GNSS antenni asukoht Kotka staadioni mõõtmisel	52
Joonis 4.10. Mõõtmised Kotka staadionil.....	52
Joonis 4.11. Foto Kuressaare jalgpallistaadionist koos ümbitseva traataiaga	53
Joonis 4.12. GNSS antenni asukoht Kuressaare staadioni mõõtmisel.....	54
Joonis 4.13. Kontrollseadme ja GNSS sensori paiknemine mõõtmiste ajal	56
Joonis 4.14. Mõõtmiste trajektoor 16.12.2021 mõõtmiste ajal (ArcGIS Pro kuvatõmmis).....	57
Joonis 4.15. Mõõtmiste trajektoor 16.12.2021 mõõtmiste ajal (ArcGIS Pro kuvatõmmis).....	57
Joonis 4.16. Mõõtmiste trajektoor 16.12.2021 mõõtmiste ajal (ArcGIS Pro kuvatõmmis).....	58
Joonis 5.1. Fikseeritud alg tundmatute staatiliste lahenduste hulk kogu mõõtmistest ning poi veetasemete tõelised vead	60
Joonis 5.2. Perioodi 28.06-07.07.2021 fikseeritud alg tundmatute staatiliste lahenduste poi tunni tõeliste vigade standardhälbed	62
Joonis 5.3. Fikseeritud alg tundmatute kinemaatiliste lahenduste poi veetasemekõrguste tunni keskmised tõelised vead ja standardhälbed	63
Joonis 5.4. Perioodil 09.01-22.01.2022 poi tunni keskmiste fikseeritud alg tundmatute kinemaatiliste lahenduste protsent kogu lahendustest	64
Joonis 5.5. Fikseeritud alg tundmatute lahenduste sõltuvus kellaajast	65

Joonis 5.6. Perioodi 09.01-22.01.2022 fikseeritud alg tundmatute kinemaatiliste lahenduste poi tunni keskmised veetaseme kõrgused ja fikseeritud alg tundmatute lahenduste hulk 15 minutiliste sessioonide kestel	66
Joonis 5.7. Fikseeritud alg tundmatute kinemaatiliste lahenduste poi veetaseme kõrguste tunni põhised standardhälbed	67
Joonis 5.8. MSI merevaatlusjaamade ja veetaseme mõõtmispoi asukoht (X-GIS2.0, Maa-amet).....	68
Joonis 5.9. Poi ja MSI Triigi sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused	69
Joonis 5.10. Poi ja MSI Triigi sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused, millele on lisatud sensori eeldatav faasitsentri nihke väärtus ning eemaldatud on jämedad vead	70
Joonis 5.11. Poi ja MSI Triigi sadama tunni keskmiste veetasemete kõrguste erinevused ja tunni põhised standardhälbed.....	71
Joonis 5.12. RTKLIB ja Leica Infinity fikseeritud alg tundmatute hulk maksimaalsest andmepunktide hulgast	72
Joonis 5.13. RINEX (*.obs) formaati konverteeritud (*.ubx) fail	73
Joonis 5.14. RTKLIB ja Leica Infinity arvutatud mereveetasemete kõrgused 09.01-22.01.2022.....	74
Joonis 5.15. RTKLIB (faasitsentri nihkega parandatud) ja Leica Infinity (algsed) veetaseme kõrgused 09.01-22.01.2022	75
Joonis 5.16. Kuupäeva 10.01.2022 GNSS töötamise raport (Leica Infinity kuvatõmmis)	75
Joonis 5.17. 20.02.2022 mõõdetud Kotka jalgpallistaadioni trajektoori esimene (vasakul) ja teine käik (paremal).....	78
Joonis 5.18. Kuressaare jalgpalliväljaku täisväljaku mõõtmiste trajektoori (20.03.2022) esimene (vasakul) ja teine käik (paremal)	80
Joonis 5.19. Kuressaare jalgpalliväljaku poolväljaku mõõtmiste trajektoori (20.03.2022), esimene käik (vasakul) ja teine käik (paremal).....	82
Joonis 5.20. Kuressaare jalgpallistaadioni keskringi mõõtmiste trajektoori (20.03.2022) esimene (vasakul) ja teine käik (paremal)	83
Joonis 5.21. 16.12.2021 mõõtmistulemuste horisontaalsed vead (vasakul) ja vertikaalsed vead (paremal)	86
Joonis 5.22. 08.03.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsed vead (vasakul) ja vertikaalsed vead (paremal)	86
Joonis 5.23. 12.03.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsed vead (vasakul) ja vertikaalsed vead (paremal)	86
Joonis 5.24. 16.12.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsete ja vertikaalsete vigade protsentuaalne jaotus tõelise vea vahemiku järgi.....	87

Joonis 5.25. 08.03.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsete ja vertikaalsete vigade protsentuaalne jaotus tõelise vea vahemiku järgi.....	87
Joonis 5.26. 12.03.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsete ja vertikaalsete vigade protsentuaalne jaotus tõelise vea vahemiku järgi.....	88
Joonis 5.27. Kontrollseadme ja GNSS sensori trajektooripunktid kellaaegadega (AutoCAD kuvatõmmis)	89

TABELITE LOETELU

Tabel 2.1. GNSS süsteemide satelliitide ülevaade (SPS standard, 2020; GLONASS, 2022; ESA, 2022b)	20
Tabel 2.2. GNSS süsteemide signaalide ülevaade (SPS standard, 2020; GLONASS, 2022; GALILEO, 2019)	21
Tabel 2.3 Nutitelefonil Huawei P40 Pro ja GNSS vastuvõtja ZED-F9P-01B positsioneerimis võimekused (HUAWEI, 2022; ZED-F9P, 2022b)	23
Tabel 3.1. U-blox ZED-F9P satelliitnavigatsiooni süsteemid ja signaalid (ZED-F9P, 2022b)	34
Tabel 3.2. U-blox ZED-F9P <i>a priori</i> täpsushinnangud (ZED-F9P, 2022b)	34
Tabel 3.3. MAGMA X2 AA.175 satelliitnavigatsiooni süsteemid ja signaalid (Taoglas, 2022a)	36
Tabel 3.4. Taoglas MAGMA X2 GNSS antenni <i>a priori</i> täpsusnäitajad (Taoglas, 2022a)	36
Tabel 3.5. ZED-F9P, MAGMA X2 ja Leica Viva GS15 seadmete omadused (ZED-F9P, 2022b; Taoglas, 2022a; Leica Viva, 2022a)	37
Tabel 3.6. Leica Viva GS15 täpsushinnangud (Leica Viva, 2022a)	38
Tabel 5.1. Perioodil 09.01-22.01.2022 esinenud jämedate vigade toimumisajad	65
Tabel 5.2. Perioodi 09.01-22.01.2022 poi veetaseme kõrguste keskmised tõelised vead ning perioodi tunnipõhiste keskmiste tõeliste vigade standardhälbed	77
Tabel 5.3. Kontrollseadmega vs sensoriga mõõdetud tulemused (20.02.2022)	79
Tabel 5.4. Erinevused kontrollseadmega ja sensoriga mõõdetud väärtuste vahel (20.02.2022)	79
Tabel 5.5. Kontrollseadmega vs sensoriga mõõdetud tulemused (20.03.2022, täisväljak)	80
Tabel 5.6. Erinevused kontrollseadmega ja sensoriga mõõdetud väärtuste vahel (20.03.2022, täisväljak)	81
Tabel 5.7. Kontrollseadmega vs sensoriga mõõdetud tulemused (20.03.2022, poolväljak)	82
Tabel 5.8. Erinevused kontrollseadmega ja sensoriga mõõdetud väärtuste vahel (20.03.2022, poolväljak)	83
Tabel 5.9. Jalgpalliväljaku keskringi ümbermõõdu arvutused ja nende erinevused mõõdetuna kontrollseadmega vs sensoriga (20.03.2022)	84
Tabel 5.10. Kinemaatiliste mõõtmiste (16.12.2021, 08.03.2022 ja 12.03.2022) kõikide alg tundmatute lahenduste horisontaalsed ja vertikaalsed keskmised tõelised vead ja standardhälbed	88

EESSÕNA

Lõputöö teema pakuti välja professor Artu Ellmanni, Teedehituse ja geodeesia uurimisrühma täisprofessor tenuuris, poolt. Teema kasvas välja varasemast uurimusest seoses vajadusega tuvastada madala hinnaklassi GNSS sensoriga saavutatavat täpsust ning lahendada andmetöötlusega seonduvad probleemid. Lähitulevikus on oodata taoliste madala hinnaklassiga GNSS sensorite laiemat levikut. Kasutajate ootused on üles kütnud ka GNSS sensorite tootjate poolt esitatavad ülioptimistlikud hinnangud saavutatava täpsuse osas.

Magistritöö uurib madala hinnaklassi GNSS sensoriga saavutatava kõrgusliku ja plaanilise asukohamäärangu täpsust. GNSS seadmete spetsifikatsioonides on küll välja toodud seadmete täpsushinnangud, kuid need ei pruugi ühtida praktilises rakenduses mõõdetud tulemustega. Seetõttu on antud töös analüüsitud erinevate staatiliste ja kinemaatiliste mõõtmismeetoditega mõõdetud andmete tulemusi, mille põhjal on arvatud mõõtmisvead.

Magistritöö jaoks kogutud mõõtmisandmed on mõõdetud Tallinnas, Muhus ning Kuressaares. Veetaseme mõõtmisandmed Muhus on saadud Tallinna Tehnikaülikooli Biorobotika Keskuse Arvutisüsteemide Instituudi töötaja Jaan Rebase käest. Veemõõdujaamade andmed, mida kasutati Muhus tehtud merevee taseme mõõtmisandmete kontrollandmetena, on saadud Kaimo Vahterilt, Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudist. Tallinnas Kotka jalgpalliväljakul teostatud mõõtmisi aitasid teostada Aleksander Koobak ning dr Karin Kollo, Maa-ameti geodeesia osakonna juhataja. Kuressaare jalgpalliväljakul tehtud mõõtmisi aitas teostada dr Karin Kollo. Tallinnas teostatud kinemaatilistel mõõtmistel (mõõtmised liikuvalt platvormilt) kuupäevadel 16.12.2021 ja 08.03.2022 aitas Peep Kirsimäe, Maa-ameti Fotogrammmeetria osakonna juhataja ja 12.03.2022 abistas dr Karin Kollo. Püsijaamade andmed on saadud Maa-ameti ESTPOS GNSS-püsijaamade võrgust.

Mõõtmiste ja andmetöötluse valdkonnas konsulteerisid professor Artu Ellmann, dr Karin Kollo, Peep Kirsimäe ja Sander Varbla, Tallinna Tehnikaülikooli Teedehituse ja geodeesia uurimisrühma doktorant-nooremteadur.

Soovin tänu avaldada eelnimetud isikutele, aga ka MTÜ Kotka staadionile, kus võimaldati teostada jalgpalliväljaku mõõtmisi, Maa-ametile GNSS mõõtmisseadmete, tarkvara ja püsijaamade andmete kasutamise võimaldamise eest, Tallinna Tehnikaülikooli Biorobotika Keskuse Arvutisüsteemide Instituuti ning Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituuti mõõtmisandmete eest. Uurimistöös

kasutatud GNSS sensor soetati Eesti teadusfondi grandi PRG330 „Geoidi iteratiivne modelleerimine rannikualal kaasates satelliitltimeetriat ning kohapealseid kontroll- ja mudelandmeid“ vahenditest, merepoi arendus toimus grandi PRG1243 "Mitmemastaabiline looduslike veevoolude mõõtmine rannikualadele ja jõgedele" raames.

Märksõnad: madala hinnaklassi GNSS sensor, kinemaatiline GNSS, järeltöötlus, u-blox, magistritöö.

Lühendite loetelu

- ANTEX – *ANTenna EXchange format*, GNSS antennide andmevahetusformaad
- ARP – *Antenna Reference Point*, antenni referentspunkt
- CEP – *Circular Error Probable*, tõenäoline ringviga
- DGNSS – *Differential GNSS*, diferentsiaalne asukohamäärang
- DGPS/DGNSS – *Differential Global Positioning System/Differential Global Navigation Satellite System*, diferentsiaalne globaalne positsioneerimise süsteem/diferentsiaalne globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem
- DOP – *Dilution of Precision*, satelliitide geomeetrilise tugevuse näitaja
- EGNOS – *European Geostationary Navigation Overlay Service*, Euroopa geostatsionaarse navigatsiooni parendusteenus
- EH2000 – Euroopa vertikaalsel referentsüsteemil põhinevaid kõrgused Eestis
- GAGAN – *GPS Aided GEO Augmented Navigation*, GPS-toega GEO laiendatud navigatsioon (India)
- GLONASS – *Глобальная навигационная спутниковая система*, Vene Föderatsiooni globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem
- GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*, globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem
- GPS – *Global Positioning System*, globaalne positsioneerimise süsteem
- GPST – *Global Positioning System Time*, globaalse positsioneerimise süsteemi aeg
- IGS – *International GNSS Service*, rahvusvaheline GNSS teenus
- IMU – *Inertial Measurement Unit*, inertsiaalandur
- ITU – *International Telecommunication Union*, Rahvusvaheline telekommunikatsiooni ühing
- MSAS – *Multifunctional Satellite-based Augmentation System (Japan)*, multifunktsionaalne satelliidipõhine parandussüsteem (Jaapan)
- MSI – Meresüsteemide instituut
- NMEA – *National Marine Electronics Association*, rahvusvaheline mereelektronika assotsiatsioon
- PCO – *Phase Center Offset*, antenni faasitsentri nihe
- PCV – *Phase Center Variation*, antenni faasitsentri variatsioon
- ppm – *parts per million*, miljondikosa
- PPP – *Precise Post Processing*, täpne järeltöötlus
- PVT – *Position, Velocity and Time*, Asukoht, kiirus ja aeg
- QZSS – *Quasi-Zenith Satellite System*, Quasi-Zenith satelliitsüsteem
- RINEX – *Receiver INdependent EXchange format*, eritüübiliste GNSS vastuvõtjate andmevahetusformaad
- RMS – *Root Mean square*, keskmine ruutviga

RTCM – Radiotechnical Commission for Maritime Services, Mereteenistuste raadiotehniline komisjon

RTK – *Real Time Kinematic*, reaalaaja mõõtmised

SBAS – *Satellite Based Augmentation System*, satelliidipõhine parandussüsteem

SDCM – *The System for Differential Corrections and Monitoring (Russia)*, diferentsiaalparanduse ja monitooringu süsteem (Venemaa)

SIP – *System in Package*, süsteem pakendis

SNAS – *Satellite Navigation Augmentation System (China)*, satelliitnavigatsiooni parandussüsteem (Hiina)

UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*, mehitamata õhusõiduk ehk droon

UTC – *Universal Time Coordinated*, universaalne koordineeritud aeg

WAAS – *Wide Area Augmentation System*, laiaala parandussüsteem

WGS84 – *World Geodetic System 1984*, ülemaailmne geodeetiline süsteem 1984

Tähiste loetelu

$R(t)$ – satelliidi ja vastuvõtja vaheline tegelik kaugus ajahetkel t

ρ – satelliidi ja vastuvõtja vaheline pseudokaugus

$\delta(t)$ – satelliidi ja vastuvõtja kellade hälve GNSS ajast ajahetkel t

$t_R(t)$ – vastuvõtja kellaviga ajahetkel t

a_0 – satelliidi kella hälve

a_1 – satelliidi kella triiv

a_2 – satelliidi kella triivi muut

$\varphi^S(t)$ – vastuvõetud kandelaine faas

$\varphi_R(t)$ – vastuvõtjas genereeritud referentskandelaine faas

c – signaali levikukiirus ehk valguse kiirus ($c = 299\,792\,458\text{ m/s}$)

N – täisarvuline algundmatu

f – signaali sagedus

λ – lainepikkus

X – mõõdetava suuruse tõeline väärtus

θ – tõeline viga

σ – standardhälve

1. SISSEJUHATUS

Möödistustöödel kasutatakse tavapäraselt geodeetilise täpsusega GNSS (globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem) seadmeid, kuid tänu tehnoloogia arengule, on viimastel aastatel tootmisse ilmunud ka madala hinnaklassi GNSS sensorid. Võrreldes geodeetiliste GNSS seadmetega on madala hinnaklassi GNSS sensorite eeliseks nende väike suurus ja kaal, kasutajamugavus, kordades madalam hinnaklass ning lihtne integreeritavus teiste sensoritega (Yuwono *et al.*, 2019). Laiemat kasutust hakkasid madala hinnaklassi GNSS sensorid leidma siis, kui tootmisesse tulid mitmesageduslikud GNSS sensorid, mille tootjapoolsed täpsushinnangud asetavad nad samasse täpsusklassi kallihinnaliste geodeetiliste seadmetega. Mõõtmistel, kus on suur oht vastuvõtja kaotusele või vigastusele, on kallimatele geodeetilise täpsusega GNSS vastuvõtjatele heaks alternatiiviks just mitmesageduslikud GNSS sensorid, kuna need suudavad oma madalama hinnaklassi juures pakkuda arvestatavat täpsust (Hamza *et al.*, 2021). Sellisteks rakendusteks on näiteks maalihete monitoring ning mereseire (Biagi *et al.*, 2016; Knight *et al.*, 2020).

GNSS sensor koosneb antennist ja vastuvõtjast. Ühesageduslikud GNSS sensorid on juba pikemat aega olnud kättesaadavad, mistõttu leidub nende kohta palju erialakirjandust (näiteks Knight *et al.*, 2020; Yuwono *et al.*, 2019). Samuti on viimasel paaril aastal uuritud mitmesageduslike madala hinnaklassi GNSS vastuvõtjate ja antennide kombineerimisel saavutatavat mõõtmistäpsust staatilise möödistuse näidetes (Hamza *et al.*, 2020; Hamza *et al.*, 2021). Kuid publikatsioone, mis käsitleksid kinemaatilise järeltõtluse tulemusi, on vähe avalikustatud (mõningad näited on Oguntuase *et al.*, 2020; Lapadat, 2020). Rohkem on uuritud GNSS sensorite reaalaajalist mõõtmistäpsust (Takasu ja Yasuda, 2008). Sellest tuleneb ka antud magistritöö relevantsus ja ajakohasus, kuna on olemas tendents käsitleda neid sensoreid justkui geodeetilist täpsust võimaldavaid GNSS seadmeid (Sanna *et al.*, 2022). Kasutajate ootuseid säärase madala hinnaklassi GNSS sensoritega saavutatavale täpsusele tõstavad tootjapoolsed küllaltki optimistlikud prognoosid (ZED-F9P, 2022b). Optimismi toetab sensorite võimekus salvestada lisaks C/A koodisignaalidele ka L1 ja L2 kandelainete faasimõõtmisi, seda nii GPS, GLONASS, Galileo ning BeiDou süsteemidelt.

Magistritöö „Madala hinnaklassi GNSS sensoriga saavutatav 3D asukohamäärangu täpsus“ eesmärgiks on uurida madala hinnaklassi GNSS sensoriga saavutatavat täpsust kõrgusliku ja plaanilise asukoha määramisel. Töö esimeseks eesmärgiks on välja selgitada, kas GNSS sensori antennil on faasitsentri nihe, kuna tegemist on antenniga mille andmeid ei ole kirjeldatud IGS (*International GNSS Service*) poolt peetavas ANTEX

(*ANTenna EXchange format*) failis. Teiseks eesmärgiks on uurida madala hinnaklassi GNSS sensori mõõtmistäpsust erinevatel kinemaatilistel kõrgusmõõtmisel ning plaanilisel asukohamäärangul. Antud töös kasutatud ZED-F9P GNSS mooduli ja *patch* antenni kombinatsiooniga on varasemalt saavutatud sentimeetri suurusjärgus 3D täpsust staatilisel mõõdistusel (Hamza *et al.*, 2020). Lisaeesmärgiks on analüüsida vabavara tarkvara ja kommertstarkvara võimekust GNSS sensori andmeformaadi (*.ubx) töötlusel.

Püstitatud eesmärkide uurimiseks teostati kolme tüüpi mõõtmisi:

1. Veetaseme mõõtmised, kus madala hinnaklassi GNSS sensor paigaldati konstrueeritud poi sisse, ankurdati ranniku lähedale ja mõõtmisandmeid salvestati ühe kuni kahe nädala pikkuste mõõtmisperioodide kaupa. Huvi pakkusid esmajoonel veetaseme kõrguslikud muutused, ning saavutatav täpsus avatud taevalaotuse tingimustes. Mõõtmisandmeid töödeldi nii kinemaatilisel kui ka staatiliselt.
2. Teadaoleva geomeetriaga kontuuride (näiteks jalgpalliväljakud) kinemaatilised mõõtmised, kus GNSS sensor paigaldati liikuvale alusele ja mõõtmisi teostati jalakäija kiirusel. Mõõtmisandmeid töödeldi kinemaatilisel.
3. Mõõtmised transpordivahendilt, kus GNSS sensor paigaldati koos geodeetilise täpsusega GNSS vastuvõtjaga auto katusele, ning mõõtmisi teostati linnakeskkonnas keskmise kiirusega 50 km/h. Mõõtmisandmeid töödeldi kinemaatilisel.

Magistritöö on struktureeritud järgnevalt. Teises jaotises antakse teoreetiline ülevaade GNSS põhimõtetest, sealhulgas GNSS mõõtmismeetoditest ning satelliitmõõtmiste vigade allikatest. Kolmandas jaotises kirjeldatakse kasutatud instrumente ning antakse ülevaade kasutatud andmetest. Välja tuuakse tootja poolt esitatud *a priori* täpsushinnangud. Neljandas jaotises kirjeldatakse mõõtmisi ja andmetöötlust. Jaotises kirjeldatakse järgmisi mõõtmisi: veetaseme mõõtmised, teadaoleva geomeetriaga kontuuride mõõtmised (jalgpalliväljakute näitel) ning kinemaatilised mõõtmised transpordivahendilt ning mõõtmisandmete järeltöötlust. Jaotises kirjeldatakse ka arvutusprotsesse RTKLIB ning Leica Infinity tarkvaradega. Viiendas jaotises esitatakse mõõtmisandmete tulemuste ning mõõtmisvigade analüüs. Töö lõppeb kokkuvõttega.

Käesolevas töös kasutati sensoriandmete kogumiseks kaasaskantavasse sülearvutisse installeeritud tarkvara u-center 2. Madala hinnaklassi GNSS sensorid ei talleta mõõtmisandmeid, seega on vaja kasutada välist mäluseadet (antud juhul sülearvutit). Lisaks vajavad sensorid töötamiseks ka välist voluallikat. GNSS andmete töötlemiseks kasutati programme RTKLIB (vabavara) ja Leica Infinity (kommertstarkvara). Andmete formaatide konverteerimiseks kasutati lisaks RTKLIB-le ka Leica Geo Office 8.4

programmi. Töödeldud andmete ning täpsushinnangute graafiliseks esitamiseks kasutati programme Excel, AutoCAD 2021, AutoCAD LISP ja ArcGIS Pro.

2. GNSS ÜLEVAADE

2.1 GNSS

GNSS ehk globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem võimaldab ülemaailmset asukohamäärangut. Tuntuimad GNSS süsteemid on GPS, GLONASS ja GALILEO.

GPS (*Global Positioning System*) töötati välja Ameerika ühendriikide kaitsejõudude poolt, et täita sõjaväe vajadusi. GPS arendati välja eesmärgiga määrata järjepidavalt täpset asukohta, kiirust ja aega ühtses referentssüsteemis Maa peal või selle lähedal (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 13). Hetkel koosneb GPS 30 satelliidist, millest 24 kuuluvad põhikonstellatsiooni ja ülejäänud on varusatelliidid. GPS satelliidid tiirlevad 6 orbiidil umbes 20200 km kõrgusel maapinnast. (GPS, 2022a)

GLONASS (*Глобальная навигационная спутниковая система*) on globaalne satelliitnavigatsiooni süsteem, mida haldab ja arendab Vene Föderatsioon. Aastal 1982 saadeti kosmosesse esimene GLONASS-i satelliit ja 1993. aastal kuulutati süsteem kasutuskõlblikuks. Hetkel kuulub GLONASS süsteemi 24 satelliiti, mis tiirlevad 3 orbiidil 19100 km kõrgusel maapinnast. (GPS, 2022b; GLONASS, 2022)

GALILEO on Euroopa globaalne navigatsioonisatelliitide süsteem, mis on mõeldud tsiviilkasutuseks, ning mis pakub positsioneerimisteenust Euroopa kodanikele, aga ka ülemaailmselt (GALILEO, 2019, 1). Esimene GALILEO satelliit saadeti kosmosesse 2005. aastal (ESA, 2022a). GALILEO süsteemi kuulub 24 satelliiti, mis tiirlevad 3 orbiidil 23200 km kõrgusel maapinnast (GALILEO, 2019, 4).

2.2 GNSS komponendid

GNSS koosneb kolmest komponendist: kosmose, kontrolli ja kasutajate komponent (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 14). Kosmose komponent koosneb satelliitidest, mis saadavad välja signaale. Kontrollikomponent juhib kogu süsteemi tööd. Kasutajate komponendi alla kuuluvad erinevat tüüpi GNSS vastuvõtjad.

Kosmose komponent

Kosmose komponent koosneb navigatsioonisatelliitidest, mis tiirlevad ümber Maa. Tabelis 2.1 on antud ülevaade erinevate GNSS süsteemide satelliitidest.

Tabel 2.1. GNSS süsteemide satelliitide ülevaade (SPS standard, 2020; GLONASS, 2022; ESA, 2022b)

GNSS süsteem	GPS	GLONASS	GALILEO
Satelliitide arv	24	24	24
Orbiitide arv	6	3	3
Satelliitide periood	12 h	11 h 15 min 44 s	14 h
Orbiidi tasandi kaldenurk	55°	64,8°	56°

Satelliitide pardal on aatomkellad, raadiosaatjad, pardaarvutid ning lisaseadmed/varustus, mida kasutatakse süsteemi juhtimiseks (Hoffmann-Wellenhof *et al.*, 2007, 6-7). Lisaseadmete üheks osaks on päikesepaneelid, mis annavad satelliidile voolu. Satelliidid edastavad signaale, mille abil on võimalik kasutajal oma asukohta määrata.

Satelliitnavigatsiooni täpsus sõltub aatomkelladest, mis kontrollivad satelliidi signaali komponente (Hoffmann-Wellenhof *et al.*, 2007, 67). Satelliidi tähtsaimaks osaks on sagedusstandardid, mis on aatomkellade täpse töö aluseks.

Satelliidi signaal

Satelliitide poolt edastatavad signaalid on elektromagnetlained (Hoffmann-Wellenhof *et al.*, 2007, 56). Erinevad süsteemid ja teenused kasutavad elektromagnetilise spektrumi erinevaid kandelaineid, mille kasutus on rangelt kontrollitud rahvusvahelise telekommunikatsiooni ühingu (ITU) poolt. Satelliitnavigatsiooni jaoks on eraldatud L-, S- ja C-kandelained (Hoffmann-Wellenhof *et al.*, 2007, 60). Tabelis 2.2 on antud ülevaade erinevate GNSS süsteemide signaalidest ja signaalide sagedustest.

Tabel 2.2. GNSS süsteemide signaalide ülevaade (SPS standard, 2020; GLONASS, 2022; GALILEO, 2019)

GNSS süsteem	Kandelaine	Signaali sagedus
GPS	L1	1575,42 MHz
	L2	1227,6 MHz
	L5	1176,45 MHz
GLONASS	L1OF	1602 MHz
	L2OF	1246 MHz
	L3OC	1202 MHz
GALILEO	E1	1575,42 MHz
	E5	1191,795 MHz
	E6	1278,75 MHz

Satelliidid edastavad moduleeritud signaale, mis sisaldavad signaali satelliidist väljumise kellaaega. Selle info põhjal saab arvutada satelliidi asukoha orbiidil, sealhulgas kauguse vastuvõtjani, millega arvutada satelliitide asukohti (Hoffmann-Wellenhof *et al.*, 2007, 55). Pseudokaugused (*pseudoranges*), mis on tuletatud signaali levimise ajast, kasutavad pseudojuhuslikke koode (PRN), mis on moduleeritud kandelainetesse (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 18-19). Lisaks PRN koodidele moduleeritakse signaalidesse ka navigatsiooniteade, mis sisaldab teavet satelliidi efemeriidide, ionosfääri modelleerimiskoefitsientide, süsteemi aja ja satelliidi kella vea ning triivi kohta. Satelliidi navigatsiooniteates sisalduvad esialgsed efemeriidid. Need efemeriidid sisaldavad eelarvutuste käigus saadud satelliitide orbiitide infot ja satelliidi liikumist orbiidil (Kollo ja Ellmann, 2008, 79). Esialgseid efemeride saab asendada täpsete efemeriididega andmete järeltöötlusel.

Kontrollkomponent

Kontrollkomponent koosneb peajuhtimisjaamast, seirejaamadest ja sidejaamadest. Kontrollkomponendi ülesandeks on jälgida satelliite, et määrata nende täpsed orbiidi ja kella parameetrid. Kontrollkomponendi tööks on ka satelliitide kellade sünkroniseerimine ja navigatsiooniteadete edastamine satelliitidele. (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007, 324)

Kasutaja komponent

GNSS vastuvõtjate eesmärgiks on töödelda satelliitidelt vastuvõetud signaale. Signaalide töötamise eesmärgiks on erinevate kandelainete rekonstrueerimine ja koodide

eraldamine, et saada satelliitide kellade lugemite andmed ja navigatsiooni sõnum. (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 81)

Nii geodeetilise täpsusega GNSS seadme kui ka madala hinnaklassi GNSS sensori satelliitnavigatsiooni instrumentide komplekt koosneb kahest põhiosast, antennist ja vastuvõtjast, mis on omavahel ühendatud kaablitega või *bluetooth* ühendusega.

Vastuvõtja peamiseks tööorganiks on mikroprotsessor, mis teostab asukoha arvutused ja kontrollib vastuvõtja kõiki komponente (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 82). Antenn konverteerib satelliitide elektromagnetiliste lainete energia elektrivooluks, mida vastuvõtja saaks töödelda (Kollo ja Ellmann, 2008, 75). Antenni puhul on olulised suurus ja kuju, millest sõltub antenni võime võtta vastu ka nõrku signaale. Antenni geomeetriline keskpunkt ja signaalide vastuvõtmispunkt ehk faasitsenter ei lange tavapäraselt kokku, mistõttu on antenni kõrguse määramise koht tavaliselt tähistatud. Nii saab luua seose antenni geomeetrilise- ja faasitsentri asukohtade vahel.

Madala hinnaklassi GNSS sensorid

GNSS arenguga on kaasa tulnud rohkemate süsteemide kättesaadavus, arenenumad vastuvõtjad ja algoritmid. Sellest tulenevalt on olnud fookuses vähendada vastuvõtjate suurus, kaalu ja voolukasutust, kusjuures tähtsal kohal on ka kasutajamugavus. Madala hinnaklassi GNSS sensorid, mis suutsid teha faasimõõtmisi ja olid alternatiiviks geodeetilistele vastuvõtjatele, ilmusid turule juba 90ndate lõpus (Tsakiri *et al.*, 2017). Samas ei leidnud sensorid sellel hetkel laialdast kasutust, kuna need ei pakkunud samaväärset täpsust kui geodeetilised instrumendid, ning nende jaoks polnud arendatud tarkvara, millega saaks salvestada mõõtmisandmeid. Lisaks põhinesid need vastuvõtjad koodsignaalide mõõtmisel. Koodsignaalide põhjal määratud asukoht jääb täpsuse suhtes alla kandelainete põhjal määratud asukoha täpsusele.

Tänapäeval on peaaegu igas nutitelefonis olemas GNSS vastuvõtja, mis põhineb koodsignaalide mõõtmisel, kuid vaid üksikutel telefonimudelitel on võimekus määrata asukohta kandelainete mõõtmistulemustest (Bakula *et al.*, 2022). Ka nutitelefonis olev vastuvõtja on tegelikkuses madala hinnaklassi GNSS sensor, kuid nagu mainitud, siis enamuse nutitelefone ei määra oma asukohta kandelainete mõõtmiste põhjal. Antud magistritöös on madala hinnaklassi GNSS sensori mõiste all mõeldud seadet, mis määrab oma asukohta kandelaine mõõtmiste põhjal. Seega on GNSS sensori ja nutitelefonis oleva GNSS vastuvõtja peamiseks erinevuseks just mõõtmistäpsus. Tabelist 2.3 on näha, et nii nutitelefoni kui ka antud töös mõõtmistel kasutatud GNSS sensor on suutelised vastu võtma erinevate GNSS süsteemide vähemalt kahte signaali. Kusjuures nutitelefoni teostatud PPP (*Precise Point Positioning*) staatiliste mõõtmiste

täpsushinnanguteks (keskmine ruutviga) on hinnatud 0,25 m ida-lääne suunalistes koordinaatides, 0,10 m põhja-lõuna suunalistes koordinaatides ja 0,57 m kõrguskomponendil (Yang *et al.*, 2022). Seevastu ZED-F9P-01B GNSS vastuvõtja *a priori* täpsushinnanguteks on plaanilisel asukohamäärangul tootjapoolselt deklareeritud 0,01 m + 1 ppm CEP (*Circular Error Probability*) ja kõrguskomponendil 0,01 m + 1 ppm (vt tabel 3.1). Seega peaks GNSS sensoriga olema võimalik täpsem asukohamäärang kui kasutades telefoniga positsioneerimist.

Tabel 2.3 Nutitelefoniga Huawei P40 Pro ja GNSS vastuvõtja ZED-F9P-01B positsioneerimise võimekused (HUAWEI, 2022; ZED-F9P, 2022b)

	Huawei P40 Pro	ZED-F9P-01B vastuvõtja
Vastuvõetavad/töödeldavad signaalid	GPS (L1, L5)	GPS (L1, L2C)
	GLONASS (L1, L2)	GLONASS (L1, L2)
	BeiDou (B1I, B1C, B2a)	BeiDou (B1I, B2I)
	Galileo (E1, E5b)	Galileo (E1, E5b)
	QZSS (L1, L5)	QZSS (L1, L2C)

Suur edasihüpe madala hinnaklassi GNSS vastuvõtjate valdkonnas toimus siis, kui arendati välja kõrge tundlikkusega (*high sensitivity*) vastuvõtjad, mis suutsid vastu võtta nõrgemaid satelliitide signaale (Tsakiri *et al.*, 2017). Viimastel aastatel on üha rohkem hakatud kasutama madala hinnaklassi GNSS sensoreid. Need sensorid on leidnud laialdasemat kasutust, kuna neid on lihtne kasutada ja nende hinnaklass on madalam. Oluline on olnud ka sensorite asukohamäärangu täpsuse kasv (Pepe, 2018).

2.3 Mõõtmismeetodid

2.3.1 Faasimõõtmised

Kauguse satelliidi ja vastuvõtja vahel saab leida mõõdetud aja või koodlainete/kandelainete faasi erinevustest, mis on saadud satelliitidelt vastuvõetud signaalide ja vastuvõtja poolt genereeritud signaalide võrdlemisel. Kuna kasutatakse satelliidi ja vastuvõtja kellasisid, siis kaugusi mõjutavad nende kellade vead. Seetõttu nimetatakse neid algseid kaugusi pseudokaugusteks. (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 89)

Pseudokaugused

Pseudokaugusi on võimalik tuletada kandelaaine faasi mõõtmistest (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 181). Olgu vastuvõetud ja rekonstrueeritud kandelaaine faas tähistatud $\varphi^S(t)$, mille sagedus on f^S . Vastuvõtjas genereeritud referentskandelaaine faas on tähistatud $\varphi_R(t)$, mille sagedus on f_R . Parameeter t tähistab epohhi. Faasimõõtmiste valemi elektromagnetiliste lainete põhjal, kus t_φ on signaali levimise aeg, ρ on kaugus satelliidi ja vastuvõtja vahel, f on signaali sagedus ja c valguskiirus, saab esitada (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 76):

$$\varphi = f(t - t_\varphi) = f\left(t - \frac{\rho}{c}\right) \quad (2.4)$$

järgnevad faasi valemid (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 90):

$$\varphi^S(t) = f^S t - f^S \frac{\rho}{c} - \varphi_0^S \quad (2.5)$$

$$\varphi_R(t) = f_R t - \varphi_{0R} \quad (2.6)$$

Esiagsed faasid φ_0^S ja φ_{0R} on mõjutatud kellavigadest ning on võrdsed (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 90):

$$\varphi_0^S = f^S \delta^S \quad (2.7)$$

$$\varphi_{0R} = f_R \delta_R. \quad (2.8)$$

Seega on kandelaaine faasiks (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 90):

$$\varphi_R^S(t) = \varphi^S(t) - \varphi_R(t) = -f^S \frac{\rho}{c} - f^S \delta^S + f_R \delta_R + (f^S - f_R)t. \quad (2.9)$$

Sageduste f^S ja f_R erinevus nominaalsagedusest f on ainult hertsi mõningase murdosa suurusjärgus (sagedusviga on $df = 1,5 \cdot 10^{-3}$ Hz). Sellises suuruses sagedusvea võib arvestamata jätta, kuna signaali levimise ajal ($t = 0,07$ sekundit) on maksimaalne viga väärtusega 10^{-4} , mis on omakorda madalam signaali müra tasemest. Kellavead jäävad millisekundi suurusjärku. Kokkuvõtvalt saab kirjutada valemi 2.9 lihtsustatud vormis (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 91):

$$\varphi_R^S(t) = -f \frac{\rho}{c} - f \Delta\delta, \quad (2.10)$$

kus $\Delta\delta = \delta^S - \delta_R$.

Vastuvõtja sisse lülitamisel epohhil t_0 mõõdetakse kohene murdosaline kandelaaine faas. Algtundmatu N , mis on satelliidi ja vastuvõtja vaheline tsüklite arv, pole teada. Kui satelliidi jälgimine jätkub ilma lukustuse kaotuseta, siis algtundmatu N jääb muutumatuks ja kandelaaine faasi epohhil t on (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 91):

$$\varphi_R^S(t) = \Delta\varphi_R^S \Big|_{t_0}^t + N, \quad (2.11)$$

kus $\Delta\varphi_R^S$ tähistab mõõdetavat murdosa faasist epohhil t , mis on parandatud täisarvuliste tsüklite arv alates algepohhist väärtusega t_0 . Kui asendada valem 2.11 valemisse 2.10 ning tähistada negatiivsete mõõtmiste hulk (*negative observation quantity*) $\phi = -\Delta\varphi_R^S$, on tulemuseks faasimõõtmiste pseudokauguste (*phase pseudoranges*) valem (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 91):

$$\phi = \frac{1}{\lambda}\rho + \frac{c}{\lambda}\Delta\delta + N, \quad (2.12)$$

kus λ tähistab lainepikkust ja ρ vahemaad, mis on määratud satelliidi epohhi t ja vastuvõtja epohhi $t + \Delta t$ vahel. Kandelaine faasi on võimalik mõõta täpsemalt kui 0,01 tsükli, mis on võrdne millimeetri täpsusega (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 92).

Faasimõõtmiste pseudokauguste valemit kasutatakse mõõtmisandmete järeltöötlusel. Valemi põhjal saab arvutada pseudokaugused vastuvõtjast satelliitideni, võttes aluseks kandelainete faasid. Pseudokauguste kasutamine asukohamäärangul on kirjeldatud jaotises 2.3.2.

Kaksikvahe

Suhtelisel asukohamäärangul on võimalik luua lineaarseid kombinatsioone, kuna kasutusel on kaks vastuvõtjat. Üheks selliseks kombinatsiooniks on faasi kaksikvahe. (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 183)

Eeldusel, et mõõtmistel osaleb kaks punkti A ja B ning kaks satelliiti j ja k , saab moodustada kaks faasi üksikvahe valemit, kus N on algitudmatu, f on signaali sagedus, λ on lainepikkus, ρ on pseudokaugus, t tähistab epohhi, alaindeksid A ja B tähistavad punkte ja ülaindeksid j ja k satelliite (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 184):

$$\phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j\delta_{AB}(t) \quad (2.13)$$

$$\phi_{AB}^k(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^k(t) + N_{AB}^k - f^k\delta_{AB}(t). \quad (2.14)$$

Faasi üksikvahe valemi tuletuskäik on toodud lisa 1. Selleks, et saada kaksikvahet, tuleb üksikvahed üksteisest lahutada. Eeldusel, et satelliitide signaalid on sama sagedusega $f^j = f^k$, on tulemuseks (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 185):

$$\phi_{AB}^k(t) - \phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda}[\rho_{AB}^k(t) - \rho_{AB}^j(t)] + N_{AB}^k - N_{AB}^j. \quad (2.15)$$

Kasutades lühendatud indekseid saab kaksikvahe valemi kirjutada kujul (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 185):

$$\phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk}. \quad (2.16)$$

Vastuvõtja kella vead elimineerivad üksteist, mis on ka põhjus miks kasutatakse kaksikvahe kombinatsiooni (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1994, 185).

Kaksikvahe valemi põhjal saab arvutada kandelainete faasimõõtmiste pseudokaugused. Valemi oluliseks eeliseks on vastuvõtja kellavigade elimineerimine. Kaksikvahe valemit on kasutatud antud töös kogutud mõõtmisandmete järeltöötlusel.

2.3.2 Asukohamäärang

Vastuvõtja asukohta on võimalik määrata absoluutse või suhtelise meetodiga. Absoluutne mõõtmismeetod põhineb satelliidi kulgemisaja määramisel ja korrutamisel signaali levimiskiirusega, saades nii kauguse satelliidini, mille põhjal leitakse vastuvõtja asukoht. Absoluutse asukohamäärangu jaoks on vaja vähemalt nelja satelliidi signaali ning ainult ühte GPS vastuvõtjat.

Vastuvõtja koordinaadid saadakse vähemalt nelja pseudokauguse järgi valemiga (Kollo ja Ellmann, 2008, 158):

$$R(t) = \rho(t) + c\delta(t), \quad (2.1)$$

kus $\delta(t)$ on satelliidi ja vastuvõtja kellade hälve GPS ajast ajahetkel t , ρ on pseudokaugus ja c valguskiirus. Vaatleme ühte ajahetke t ja kohaldame eelmise valemi satelliidile j (Kollo ja Ellmann, 2008, 158):

$$R^j(t) = \rho^j(t) + c\delta^j(t). \quad (2.2)$$

Iga satelliidi kohta on neli tundmatut: maapealse vastuvõtja asukoha kolm kohakoordinaati ning kellaviga. Vastuvõtja kohakoordinaadid on igas võrrandis samasugused, kuid iga satelliidiga tuleb lisaks üks tundmatu kellaviga. Kellavead saab satelliidi navigatsioonisõnumist, kust referentsepohhile t_0 antud koefitsientide a_0, a_1, a_2 abil saab taandada vea vaatlushetkele t (Kollo ja Ellmann, 2008, 158):

$$\Delta\delta^j(t) = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 - dt_R(t), \quad (2.3)$$

kus $dt_R(t)$ on vastuvõtja kellaviga hetkel t .

Suhtelise asukohamäärangu meetodiga määratakse punktide koordinaadid tuntud punktide suhtes ja satelliitide asukoha parameetrid, mille kaudu arvutatakse punktide

vahelised vektorid. Suhteliseks asukohamääramiseks on vaja vähemalt nelja satelliidi signaali ning miinimum kahte GNSS vastuvõtjat. (Kollo ja Ellmann, 2008, 158)

2.3.3 Staatileine mõõtmine

Staatilised mõõtmised põhinevad pikkadel mõõtmisperioodidel, ning meetodiga on võimalik määrata asukohta kõrge täpsusega (Static GPS/GNSS Survey Methods Manual, 2018). Staatiliste mõõtmiste mõõtmisperioodiks võib olla ajavahemik 15 minutist kuni mõne päevani. Kui kasutada püsijaamadelt saadud parandeid andmete järeltöötlusel, siis on mõõtmistel vaja ainult ühe vastuvõtja ja antenni kombinatsiooni, mis salvestavad satelliitide vaatlusandmeid, millest hilisema andmetöötluse käigus arvutatakse erinevaid meetodeid kasutades punkti asukoht. Kui püsijaama andmeid ei ole võimalik kasutada, siis tuleb kasutada kahte GNSS mõõteseadet. Mõõtmistel on lihtsam kasutada ühe ja sama tootja antenni ja vastuvõtjaid, kuid kui staatilistel mõõtmistel siiski kasutada erinevat tüüpi vastuvõtjaid ja antenni, tuleb hilisema andmetöötluse käigus need erisused arvesse võtta. Andmevahetuse standardina kasutatakse RINEX-formaati (*Receiver Independent Exchange format*).

2.3.4 Kinemaatiline mõõtmine

Kinemaatilist mõõtmismeetodit kasutatakse juhul kui on vaja kiiresti mõõta trajektooripunktide jadana suur hulk punkte (Kinematic GPS/GNSS Methods Manual, 2021). Mõõtmistel kasutatakse baas- ja liikuvjaama. Liikuvjaamaks on antenni ja vastuvõtja kombinatsioon. Baasjaamaks võib olla ajutine kohalik baasjaam (teine vastuvõtja) või püsijaam, mis asub mõõtmisala lähedal. Kinemaatiliste mõõtmiste põhimõte on järgmine: liikuvjaam mõõdab algsed asukohad ja baasjaama andmete põhjal parandatakse liikuvjaama asukohta. Liikuvjaamaga liigutakse mööda mõõdistuspunkte ning peatatakse neil lühikeseks ajaks (5–30 s), et saavutada esialgne asukoht. Liikuvjaama mõõtmisandmed töödeldakse koos baasjaama poolt edastatavate mõõtmisandmetega, mille tulemusena eemaldatakse erinevat tüüpi vigu. Selline töötlus võib toimuda ka peale mõõtmisi (järeltöötlus).

2.4 Satelliitmõõtmiste vigade allikad

Asukohatäpsus sõltub mitmest erinevast tegurist, sealhulgas ajamääramisest, satelliitide asukohtadest horisondil ja GNSS signaali kulgemise teekonnal tekkinud erinevate iseloomudega hilistustest (Kollo ja Ellmann, 2008, 77). Vigade allikaid saab jaotada nende tekkepõhjuste järgi. Hilistused ja teised veaallikad võivad endaga kaasa tuua suuri vigasid absoluutses asukohamäärangus.

2.4.1 Instrumentaalsed vead

Satelliitidest tingitud vead

Satelliitide vead tulenevad orbiidi parameetrite vigadest, ebatäpsetest efemeriididest ja satelliidi sagedusstandardite ebatäpsustest. Satelliidid edastavad koos signaaliga ka navigatsiooniteateid, mille vastuvõtmist alustatakse siis, kui on olemas side vähemalt ühe satelliidiga. Navigatsiooniteates sisalduvad andmed põhinevad prognoosidel ja seega võivad kaasa tuua vea asukohamäärangul. Näiteks juhul kui toimub satelliidi kõrvalekaldumine ettemääratud orbiidilt, edastatakse navigatsiooniteatega satelliidi vale asukoht. Vale navigatsiooniteate alusel arvutatakse valesti ka vastuvõtja ja satelliidi vaheline kaugus, mis mõjutab otseselt asukohamäärangut. GNSS monitooringujaamad küll tuvastavad satelliitide kõrvalekalded, kuid selle info edasi andmine satelliidile võib aega võtta kuni ühe ööpäeva. See probleem on lahendatav järeltöötusega. Näiteks GPS juhtimiskeskus ja ka teised sõltumatud teaduskeskused arvutavad välja tegelikud satelliitide täppisorbiidid, ning lisades need andmed mõõtmistulemuste järeltöötlusse saadakse õiged tulemused. (Kollo ja Ellmann, 2008, 77)

Satelliitide sagedusstandardid on tavapäraselt väga täpsed, kuid ka nendel esineb triiv. See probleem esineb harva ning võib tekitada umbes 2 m vea vastuvõtja asukoha määramisel. (Kollo ja Ellmann, 2008, 77)

Vastuvõtjatest tingitud vead

Vastuvõtja vigade alla kuuluvad vastuvõtja sagedusstandardi vead ja vastuvõtja elektroonikast tingitud vead. Elektroonikast tingitud vead tekitavad vastuvõtu ja andmetöötuse müra. Nendest tingitud vigu võib lugeda juhuslikeks. (Kollo ja Ellmann, 2008, 78)

Antenni faasitsentri asendist tulenevad vead

Antenni faasitsentris toimuvad satelliitide signaalide komponentide tegelikud mõõtmised. Faasitsentri asend oleneb kõrgusest, asimuudist, satelliidi signaali intensiivsusest ning sõltub ka signaali sagedusest. Teisiti öeldes on igal vastuvõetaval satelliidi signaalil oma faasitsenter. (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007, 148)

Antenni faasitsentri asukoha teadmatusel tingitud viga on võimalik elimineerida orienteerides kõik staatilistel mõõtmistel osalevad antennid ühtemoodi, näiteks põhja suunas. Mõõtmistel on soovitatav kasutada sama tüüpi antenne ning vastuvõtjaid, kuid praktilistes rakendustes on seda raske teha. Näiteks on erinevatel antennitüüpidel faasitsentrid erinevates kohtades. Samuti ei pruugi sama firma poolt toodetud antennidel faasitsentrid kokku langeda, kuna tootjad muudavad antennide konstruktsioone. (Kollo ja Ellmann, 2008, 78)

Eritüübiliste antennide kooskasutamisel tekkivat faasitsentri asendist tulenevat viga saab parandada antennide absoluutkalibreerimisväärtuste kasutamisega. Levinud antennitüüpide jaoks on need väärtused avalikustatud IGS (*International GNSS Service*) kodulehel (<https://igs.org/>). (Kollo ja Ellmann, 2008, 78)

2.4.2 Atmosfäärist tingitud vead

Eeldatakse, et satelliidi signaal levib valguse kiirusega, aga see vastab ainult tõele vaakumis. Selleks, et satelliidi signaal jõuaks vastuvõtjasse, peab see läbima erinevaid atmosfääri kihte, kus signaali levimise kiirus väheneb. See kiiruse muutus toob endaga kaasa vead kauguse mõõtmises. (Kollo ja Ellmann, 2008, 79)

Ionosfäärist tingitud vead

Ionosfäär asub 80–600 km kõrgusel maapinnast. Tegemist on ioniseeritud keskkonnaga, mis muudab raadiolaineid, ja muuhulgas ka satelliitide kandelaineid (NOAA, 2022). Ionosfääri läbimisel muutub satelliidi signaali levimiskiirus, millest tekib viivitus signaali kulgemise ajas (Kollo ja Ellmann, 2008, 79).

Ionosfääri mõju saab elimineerida kasutades kahesageduslikke vastuvõtjaid või pikkade vektorite korral andmetöötluses ionosfääri-vaba kombinatsiooni (Kollo ja Ellmann, 2008, 79). Ionosfääri vea mõju on võimalik vähendada ka kasutades kindlat ionosfääri mudelit, kuid selline vajadus tekib ainult väga täpsetel mõõtmistel (Hoque ja Jakowski, 2007).

Troposfäärist tingitud vead

Troposfäär on maapinnast kuni 50 km kõrgusel ning koosneb kuivast ja niiskest osast. Troposfääri ülemise ehk kuiva osa mõju satelliidi signaalile on lihtsasti modelleeritav. Keerukam on modelleerida troposfääri alumist, ehk niisket osa, mida mõjutavad õhutemperatuur, õhuniiskus ning õhurõhk. Niiskes osas on signaali levimist pidurdavaks teguriks veeaur, mille mõju on raske määrata. (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007, 65)

Troposfääri mõju saab vähendada kasutades standardseid atmosfäärimudeleid või lühikesi vektoreid, mille puhul läbib signaal sama tee läbi atmosfääri (Kollo ja Ellmann, 2008, 79).

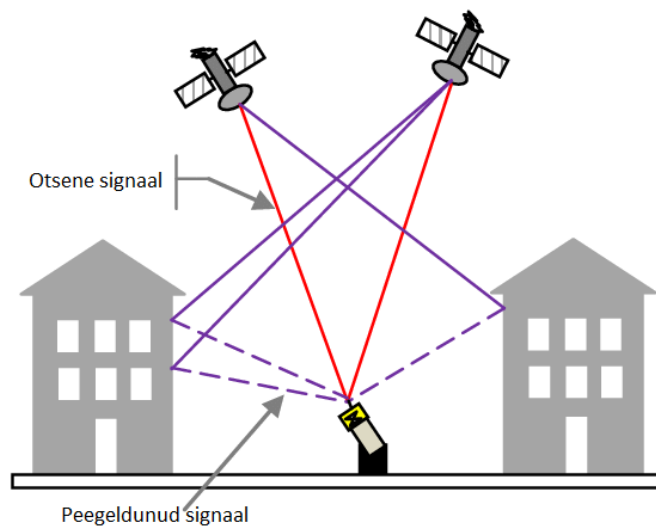
2.4.4 Trajektoorihäired

Satelliidi trajektoor pole kuju poolest ideaalne ellips; satelliitide tegelikku liikumist nimetatakse häiritud liikumiseks. Häiritud liikumist mõjutavad Maa gravitatsiooniväli, Päikese ja Kuu külgetõmbejõud, õhutakistus ning Päikesekiirguse surve. (Kollo ja Ellmann, 2008, 80)

Suurimat mõju satelliitide liikumisele avaldab Maa gravitatsiooniväli ehk maasiseste masside iseärasused. Suurimad kõrvalekalded tulenevad Maa ellipsoidaalsest kujust. Päikese ja Kuu mõju satelliidi trajektoorige on üldiselt suurusjärgu võrra väiksem kui Maa gravitatsiooniväljast tingitud mõju. Mõju suurus satelliitidele oleneb ka kolme taevakeha omavahelisest asendist. Taevakehade külgetõmbe mõjul tekivad looded, mis deformeerivad Maad. See omakorda mõjutab Maa kohal tiirlevaid satelliite. Satelliidi trajektoori mõjutavad ka õhutakistus ning päikese kiirguse surve, kuid nende mõjud on väikesed. (Kollo ja Ellmann, 2008, 80-81)

2.4.5 Mitmeteelisus

Mitmeteelisuse efekti kirjeldab olukord, kus satelliidi poolt väljasaadetud signaal saabub vastuvõtjasse mitme trajektoori kaudu. Mitmeteelisust põhjustavad peamiselt peegeldavad pinnad (näiteks ümbritsev maastik, majad (Joonis 2.1), veekogud, mööduvad transpordivahendid), mis asuvad vastuvõtja läheduses. (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007, 154)



Joonis 2.1. Mitmeteelisus linnakanjonis (Kumar et al., 2013)

Kui ühe satelliidi signaal jõuab vastuvõtjasse erinevaid teid pidi, siis vastuvõtja poolt vastuvõetud signaalidel on relatiivsed faasinihked, ja faasi erinevused on proportsionaalsed erinevate teekondade pikkuste suhtes. Mitmeteelisuse efekti mõju saab hinnata kombineerides kahe signaali sageduse koodi ja kandelaaine faasi mõõtmisi. Mitmeteelisuse mõju kandelaaine faasile suhtelisel asukohamäärangul lühikeste baasjoontega ei tohiks ületada 1 cm (juhul kui on hea satelliitide geomeetria ja piisavalt pikk mõõtmisintervall). Kuid ka sellistel juhtudel võib näiteks antenni kõrguse muutmine kaasa tuua mitmeteelisuse mõju suurenemise, mis vähendab mõõtmistäpsust. Staatilistel mõõtmistel on mõõtesessioonid pikad ja vahelduvad mitmeteelisuse mõjud ei tekita mõõtmistel olulisi probleeme. (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007, 155)

Mitmeteelisuse mõju on väga tugev just linnakeskkonnas. Ka antud magistr töö käigus tehtud kinemaatiliste mõõtmiste marsruudid kulgesid linnakeskkonnas, kus taevalaotus oli vähese avatusega või sootuks kinnine. Taevalaotust varjasid hooned ja erinevad takistused, sealhulgas ka autod ja teised transpordivahendid. Seega oli teada, et linnas teostatud kinemaatiliste mõõtmistulemuste täpsust mõjutab tugevalt mitmeteelisuse efekt. Geodeetilised antennid on polariseeritud, mis vähendab mitmeteelisuse efekti mõju, kuid käesoleva töö mõõtmistel kasutatud madala hinnaklassi GNSS sensori antenn ei ole polariseeritud, mistõttu on see ka tundlikum mitmeteelisuse efekti suhtes (Romero-Andrade *et al.*, 2021).

3. KASUTATUD INSTUMENDID

3.1 GNSS sensor

Käesolevas töös kasutatud GNSS sensor koosneb u-blox vastuvõtja moodulist ja Taoglas antennist. Vastuvõtja ja antenn on eraldiseisvad. Vastuvõtja moodul oli paigutatud plastikkorpusesse, et kaitsta kiipi välise keskkonna eest. Sensori vastuvõtja ja antenn on ühendatud kaabliga ning vastuvõtja mooduli küljes on toite/andmevahetuskaabel (Joonis 3.1).

Tootja u-blox on turul tegutsenud juba üle 20 aasta (U-blox, 2022b). Selle aja jooksul on u-blox välja andnud palju erinevaid GNSS vastuvõtja mooduleid, mida saab eristada seadmete generatsioonide kaupa. Kasutatud u-blox mitmesageduslik GNSS moodul kuulub üheksandasse generatsiooni, kusjuures eelnevate generatsioonide GNSS moodulid on olnud ühesageduslikud (GNSS product line card, 2022). Näiteks aastal 2011 tuli välja u-blox NEO-6 GPS moodulite seeria, mille mudelid võtsid vastu ainult GPS L1-signaali (NEO-6 series, 2011). Seitse aastat hiljem andis u-blox välja GNSS mooduli ZED-F9P, mis oli sellel ajal massturul esimene mitmesageduslik vastuvõtja, suutes vastu võtta signaale kõigist neljast GNSS süsteemist (GPS, GLONASS, Galileo ja BeiDou) kahel sagedusel (ZED-F9P, 2022c). U-blox toodetest on siiani ZED moodulid ainsad, mille eeldatav täpsus võiks jääda sentimeetri suurusjärku (U-blox, 2022a). Lisaks asukohamäärangu moodulitele kuuluvad u-blox toodete hulka ka SIP-d (*System in Package*), kiibid ja antenni moodulid. Toodete peamiseks eelisteks on kompaktsus ning madalam hinnaklass (U-blox, 2022a). Antud töös kasutatud GNSS sensori kogumaksumus oli umbes 350 eurot (ZED-F9P, 2022a; Taoglas, 2022b). Kui võrrelda seda traditsioonilise geodeetilise GNSS seadme hinnaga, näiteks Leica Viva GS15, mis maksab 15 000 eurot (Leica Viva, 2022b), siis muutub ilmseks, miks sensorit nimetatakse madala hinnaklassi GNSS sensoriks.



Joonis 3.1. U-blox GNSS vastuvõtja ja Taoglas antenn

Lisaks madalale hinnaklassile, väiksele suurusele ja kaalule, on GNSS sensori üheks eeliseks ka lihtne integreeritavus teiste sensoritega (Yuwono *et al.*, 2019). Näiteks kinemaatilistel mõõtmistel parema asukoha täpsuse saamiseks on võimalik integreerida GNSS sensor inertsiaalanduriga (IMU) (Merugo *et al.*, 2018). Sensorite kooskasutus võib parandada mõõtmistäpsusi näiteks linnakeskkonnas teostatavatel kinemaatilistel mõõtmistel, kus taevaalaotus on suletud ning sensori antenni mõjutab mitmeteelisus. IMU annab mõõtmistel juurde parameetrid, mille põhjal on võimalik GNSS sensoriga saavutada täpsem asukohamäärang. Sensorite kombineerimisel võib ka GNSS sensor pakkuda teiste sensoritega kogutud andmetele lisaväärtust. Kui kombineerida GNSS sensorit teiste sensoritega, mille eesmärgiks ei ole asukohamäärang, vaid muude andmete kogumine (näiteks keskkonnaseisund, müra saastatus jms), siis annaks mõõtmistele lisaväärtust GNSS sensoriga saadav asukoht ning ajamäärang.

3.1.1 Vastuvõtja

Kasutatud vastuvõtja moodul on u-blox mudel ZED-F9P-01B. Vastuvõtja kiibi mõõtmed on 43,5×43,2 mm ning kiibi kaal 6,8 g (ZED-F9Pa, 2022). Vastuvõtja moodul suudab töötada temperatuurivahemikus alates -40° C kuni +85° C. (ZED-F9P, 2022b, 14).

Tabelis 3.1 on välja toodud, milliseid satelliitnavigatsiooni süsteeme ja signaale ZED-F9P-01B vastuvõtja suudab jälgida ning vastu võtta. Vastuvõtja täpsushinnangud on toodud tabelis 3.2 ja u-blox kiip on näidatud joonisel 3.2. Tabeli 3.2 viimastes veergudes toodud täpsushinnangutest nähtub, et u-blox ZED-F9P vastuvõtjaga peaks olema saavutatav geodeetilise täpsusega asukohamäärang.

Tabel 3.1. U-blox ZED-F9P satelliitnavigatsiooni süsteemid ja signaalid (ZED-F9P, 2022b)

Satelliitnavigatsiooni süsteem	Signaalid/süsteemid
GPS	L1, L2C
GLONASS	L1, L2
BeiDou (北斗卫星导航系统, Hiina navigatsioonisatelliitide süsteem)	B1I, B2I
Galileo	E1, E5b
SBAS (Satellite Based Augmentation System, satelliidipõhine parendussüsteem)	WAAS ² , EGNOS ³ , MSAS ⁴ , GAGAN ⁵
QZSS (Quasi-Zenith Satellite System, Quasi-Zenith satelliitsüsteem)	L1, L2C

Tabel 3.2. U-blox ZED-F9P *a priori* täpsushinnangud (ZED-F9P, 2022b)

GNSS		GPS+GLONASS
Horisontaalne täpsus	PVT (<i>Position, Velocity and Time</i> , asukoht, kiirus ja aeg)	1,5 m CEP ⁶
	SBAS	1,0 m CEP
	RTK (<i>Real Time kinematic</i> , reaalaegne mõõtmised)	0,01 m + 1 ppm CEP
Vertikaalne täpsus	RTK	0,01 m + 1 ppm

Käesolevas töös keskendutakse RTK mõõtmisviisil kogutud tulemuste parendamisele andmete järeltöötusega, kasutades selleks vabavaralist RTKLIB ja kommertsalustel levitatvat Leica infinity tarkvara (vt jaotis 4.1).

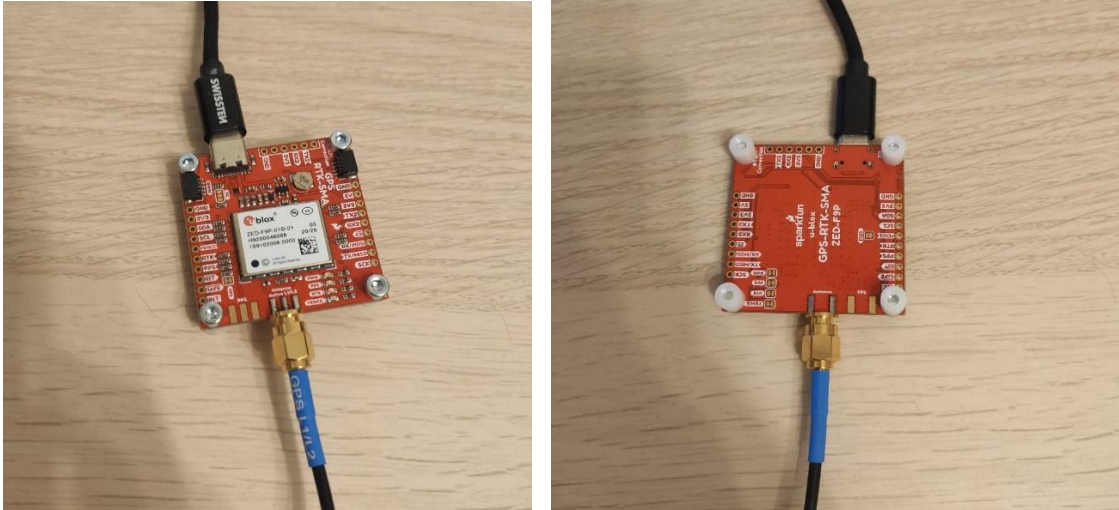
² WAAS – *Wide Area Augmentation System*, laia ala parendussüsteem

³ EGNOS – *European Geostationary Navigation Overlay Service*, Euroopa geostatsionaarse navigatsiooni parendusteenus

⁴ MSAS – *Multifunctional Satellite-based Augmentationsal System (Japan)*, multifunktsionaalne satelliidipõhine parandussüsteem (Jaapan)

⁵ GAGAN – *GPS Aided GEO Augmented Navigation*, GPS-toega GEO laiendatud navigatsioon (India)

⁶ CEP – *Circular Error Probable*, tõenäoline ringviga



Joonis 3.2. U-blox ZED-F9P kiip, mis on kaablite vahendusel ühendatud antenniga ning vooluallikaga (sülearvuti, mis on ühtlasi ka väline mälu- ja juhtimisseade)

3.1.2 Antenn

Kasutatud sensori antenn on tootja Taoglas mudel MAGMA X2 AA.175. Tootja kinnituste kohaselt on antenniga võimalik mõõta sentimeetri täpsusega. Antenni tüüpilised rakendusvaldkonnad on UAV ja robotika, transport, autonoomsed sõidukid, RTK, põllumajandus ja navigatsioon maal ning merel (Taoglas, 2022a).

Antenni mõõtmed on 53×50×17 mm ning antenn kaalub 98 g. Antenni veekindlusetase on IP67. Sensori antenn suudab töötada temperatuurivahemikus alates -40° C kuni +85° C. (Taoglas, 2022)

Tabelis 3.3 on välja toodud, milliseid satelliitnavigatsiooni süsteeme ja signaale antenn MAGMA X2 AA.175 suudab jälgida ning vastu võtta. Sensori antenni täpsusnäitajad on esitatud tabelis 3.4. ja foto antennist on esitatud joonisel 3.3. Tabeli 3.4 esimestes veergudes on toodud välja antenni faasitsentri nihe (PCO – *Phase Center Offset*) ja antenni faasitsentri variatsioon (PCV – *Phase Center Variation*). Tabelist 3.4 on näha, et faasitsentri nihe on igal signaalil erinev.

Tabel 3.3. MAGMA X2 AA.175 satelliitnavigatsiooni süsteemid ja signaalid (Taoglas, 2022a)

Satelliitnavigatsiooni süsteem	Signaalid/süsteemid
GPS	L1, L2
GLONASS	G1, G2
BeiDou	B1, B2b
Galileo	E1, E5b
SBAS	WAAS, EGNOS, SDCM ⁷ , SNAS ⁸ , GAGAN, QZSS
QZSS	L1, L2C

Tabel 3.4. Taoglas MAGMA X2 GNSS antenni *a priori* täpsusnäitajad (Taoglas, 2022a)

Kandelaaine	GPS L2	GPS L1	GLONASS L1
PCO (cm)	5	5	5
PCV (cm)	13,9	18	17
Antenni maksimaalne võimendustegur (<i>Peak Gain</i>)	3,78 dBi	2,22 dBi	2,05 dBi



Joonis 3.3. Taoglas MAGMA X2 GNSS antenn

⁷ SDCM - *The System for Differential Corrections and Monitoring (Russia)*, diferentsiaal parenduse ja monitooringu süsteem (Venemaa)

⁸ SNAS - *Satellite Navigation Augmentation System (China)*, satelliitnavigatsiooni parendussüsteem (Hiina)

3.2 Leica Viva GS15

Kontrollseadmena kasutati kindelkontuuriga objektide ja kinemaatilistel mõõtmisel instrumenti Leica Viva GS15. Leica Viva GS15 on integreeritud vastuvõtja, ehk vastuvõtja ja antenn on samas korpuses. Lisaks vastuvõtjale kuulus instumendi komplekti muudetava kõrgusega sau ja kontrollier. Instrument suudab jälgida korraka maksimaalselt 60 satelliiti erinevatel sagedusel. Leica Viva GS15 võtab vastu GPS (L1, L2, L2C, L5), GLONASS (L1, L2, L3), BeiDou (B1, B2, B3), Galileo (E1, E5A, E5B, Alt-BOC, E6), QZSS, NavLC (L5), SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN) ja L-band signaale. (Leica Viva, 2022a)

Tabelis 3.5 on välja toodud ZED-F9P, MAGMA X2 ja Leica Viva GS15 seadmete omadused, sealhulgas milliseid satelliitnavigatsiooni süsteeme ja signaale seadmed jälgida suudavad, aga ka nende täpsushinnangud.

Tabel 3.5. ZED-F9P, MAGMA X2 ja Leica Viva GS15 seadmete omadused (ZED-F9P, 2022b; Taoglas, 2022a; Leica Viva, 2022a)

	U-blox ZED-F9P vastuvõtja	Taoglas MAGMA X2 antenn	Leica Viva GS15
Täpsushinnangud			
RTK horisontaalne täpsus	10 mm + 1 ppm	-	8 mm + 0,5 ppm
RTK vertikaalne täpsus	10 mm + 1 ppm	-	15 mm + 0,5 ppm
Satelliitnavigatsioonisüsteemid			
GPS	L1, L2C	L1, L2	L1, L2, L2C, L5
GLONASS	L1, L2	G1, G2	L1, L2, L3
BeiDou	B1I, B2I	B1, B2b	B1, B2, B3
Galileo	E1, E5b	E1, E5b	E1, E5A, E5B, Alt-BOC, E6
QZSS	L1, L2C	L1, L2C	-
SBAS	WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN	WAAS, EGNOS, SDCM, SNAS, GAGAN QZSS	WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN

Tabelist 3.5 on näha, et tootjapoolsete *a priori* täpsushinnangute põhjal võib madalama hinnaklassi GNSS sensor olla sobivaks alternatiiviks geodeetilise täpsusega instrumendile. Siiski tuleb arvestada, et tootjate poolsed *a priori* täpsushinnangud on tihti liiga optimistlikud ja reaalsel mõõtmisel esinevad mõõtmisvead võivad ületada neid täpsushinnanguid. Leica Viva GS15 kõik täpsusnäitajad on esitatud Tabelis 3.6.

Tabel 3.6. Leica Viva GS15 täpsushinnangud (Leica Viva, 2022a)

Reaal aja mõõtmised (Vastavusstandard ISO17123-8)	
Ühe baasjoonega	H: 8 mm + 1 ppm/ V: 15 mm + 1 ppm
Võrgu RTK	H: 8mm + 0,5 ppm/ V: 15 mm + 0,5 ppm
Järeltöötlus	
Pikaajaline staatiline (faasimõõtmised)	H: 3 mm + 0,1 ppm/V: 3,5 mm + 0,4 ppm
Staatiline ja kiirstaatiline (faasimõõtmised)	H: 3 mm + 0,5 ppm/V: 5 mm + 0,5 ppm
Diferentsiaal asukohamäärang	
DGPS/RTCM	tavaliselt 25 cm (RMS)

Leica Viva GS15 GNSS seadmega on käesolevas töös mõõdetud nn etalonandmed, kuna kogemuslikult on tabelis 3.6 deklareeritud täpsused ka realselt saavutatavad.

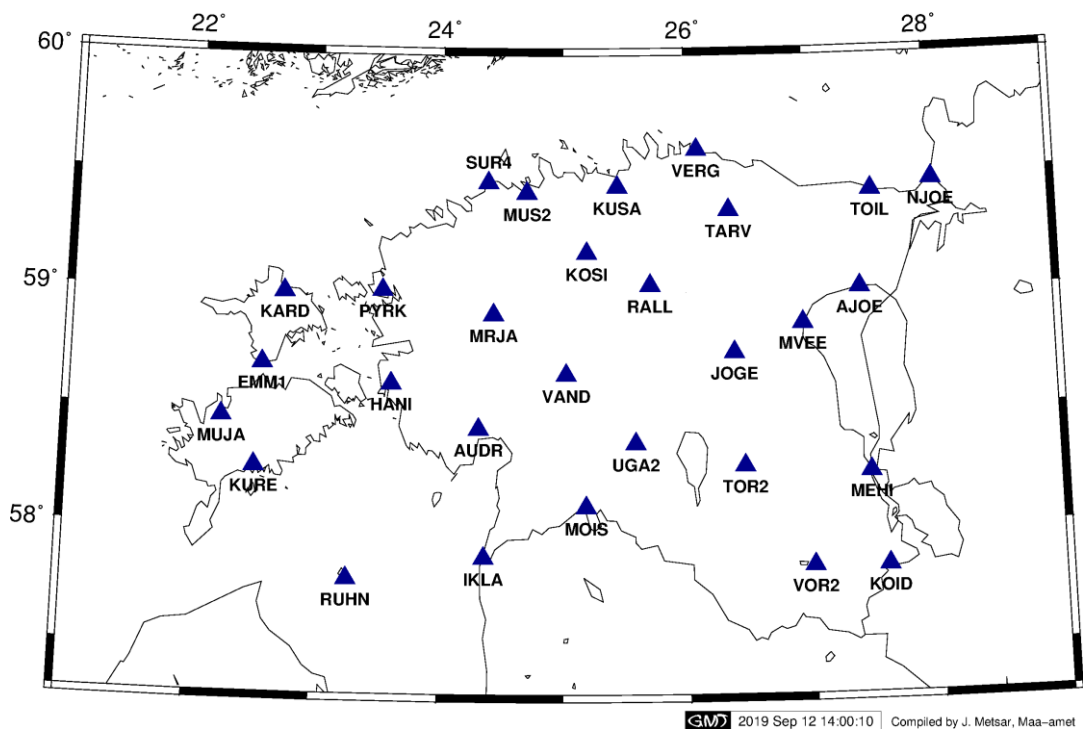
3.3 GNSS püsijaamad

GNSS-püsijaam koosneb GNSS-vastuvõtjast ja antennist koos paigalduskonstruktsiooniga. Püsijaamad on kohtkindlad ja salvestavad andmeid pidevalt alates tööle lülitamise hetkest.

Magistritöö arvutustes on kasutatud Eesti GNSS-püsijaamade võrgu ESTPOS andmeid. Eesti riiklik GNSS-püsijaamade võrk kannab nime ESTPOS. ESTPOS püsijaamade võrku kasutatakse Eesti geodeetilise referentssüsteemi komponentide jälgimiseks, sealhulgas koordinaatide ja maapinna liikumise määramiseks (Geoportaal, 2022a). Riiklik GNSS-püsijaamade võrk tagab täpse asukohapõhise info kättesaadavuse kogu riigis.

ESTPOS kõikides püsijaamades on kasutusel Leica GR25 tüüpi GNSS-vastuvõtjad ning AR25 *Choke Ring* tüüpi antennid koos antennikattega LEIS. 13 püsijaamas on paigaldatud ka meteosensorid Vaisala WXT520, mis võimaldavad fikseerida täpseid ilmastikuolusid ning anda infot troposfääri seisundi kohta. Maa-ameti peahoones Tallinnas asub GNSS reaalaja mõõtmiste jaoks tarvilik juhtimiskomponent, tänu millele saab kasutajatele võimaldada reaalajalist asukohamäärangut paari sentimeetri täpsusega (Metsar *et al.*, 2018). 2019. aasta alguse seisuga on ESTPOS võrgus kokku 29 GNSS-püsijaama, mille paiknemine on esitatud joonisel 3.4. (Geoportaal, 2022b)

Püsijaamade andmed on alla laetud veebilehelt <https://gnss-rtk.maaamet.ee/sbc> ning püsijaamade koordinaatide ja kõrguste info on saadud geodeetiliste punktide andmekogust (<https://gpa.maaamet.ee/>).



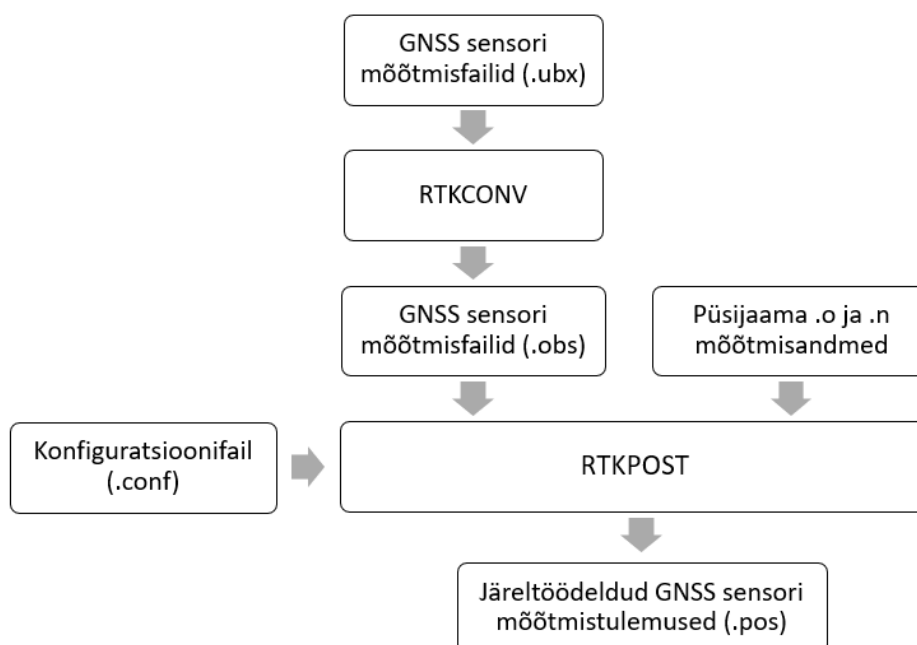
Joonis 3.4. ESTPOS võrgu GNSS-püsijaamad (Geoportaal, 2022b)

4. MÕÕTMISED JA ANDMETÖÖTLUS

4.1 Kasutatud programmid

4.1.1 RTKLIB

Peamise arvutuprogrammina kasutati RTKLIB tarkvara versiooni demo5_b34b. RTKLIB on vabavaratarkvara GNSS standardse ja täpse positsioneerimise jaoks. RTKLIB toetab muuhulgas erinevaid positsioneerimisviise GNSS-ga reaajas ja järeltöötusel: Single, DGNSS (*Differential Global Navigation Satellite System*), kinemaatiline, staatiline, liikuv baasjonn, fikseeritud, PPP-kinemaatiline, PPP-staatiline ja PPP-fikseeritud (RTKLIB, 2013). Andmetöötuse protsess on esitatud joonisel 4.1.



Joonis 4.1. RTKLIB andmetöötuse protsessi skeem

Sensori mõõtmisfailid konverteeriti algformaadist (*.ubx) RINEX formaati (*.obs ja *.nav) kasutades RTKCONV programmi. RINEX formaati andmete konverteerimine oli vajalik selleks, et andmeid saaks töödelda RTKPOST programmiga. RTKCONV seadistused on toodud lisas 2, L2.1.

Järgmise sammuna seadistati konfiguratsioonifail (*.conf), milles sisalduvad parameetrid RTKPOST arvutuste jaoks. Konfiguratsioonifail sisaldas teavet arvutusparameetrite kohta, sealhulgas näiteks positsioneerimismeetod (staatiline või kinemaatiline), kasutatavad satelliitide konstellatsioonid, satelliidi äralõikenurk

(*Elevation mask*), mõõtmisviga (1σ), mis kajastab lubatavat maksimaalset standardhälbe väärtust (Kala, 2009, 63), ja andmete väljundformaad ning baasjaama ehk antud juhul ESTPOS püsijaama asukoha koordinaadid ja jaama antenni tüüp. Konfiguratsioonifaili seadistused on toodud lisa 2, L.2.2 – L.2.6.

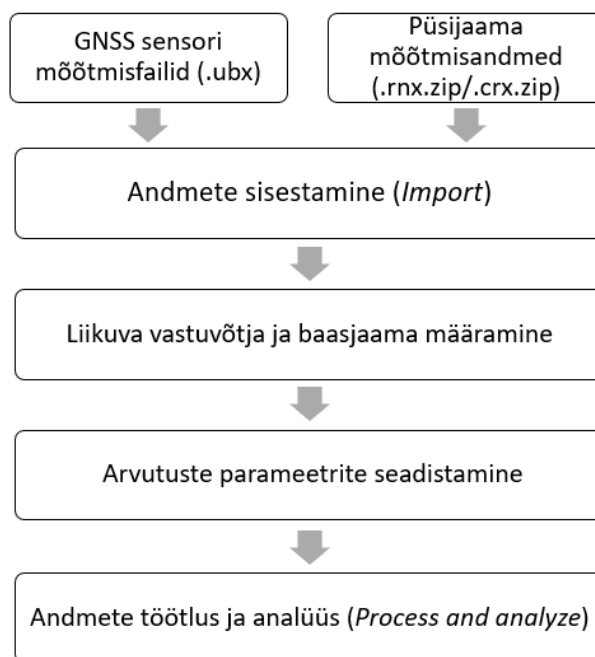
Sensori (faililaiendiga *.obs) ja püsijaama (*.xox ja *.xxn) failid sisestati RTKPOST programmi koos konfiguratsioonifailiga (*.conf). RTKPOST programm teeb asukohamäärangu arvutused, kusjuures liikuvaks vastuvõtjaks on määratud sensori konverteeritud mõõtmistulemused ja baasjaamaks ESTPOS püsijaama andmed.

RTKPOST programmi väljundiks on mõõtmistulemuste järeltöötamise fail (*.pos). Mõõtmistulemuste failis sisaldub teave üksikute mõõtmispunktide kohta, sealhulgas mõõtmiste aeg, koordinaadid (WGS84), kõrgused (ellipsoidist), alg tundmatute lahendus, satelliitide arv ja statistilised näitajad.

Arvutustesse kaasati GPS ja GLONASS satelliitide andmed (Joonis 5.13), sest nende satelliitsüsteemide satelliitide andmed olid kättesaadavad mõõtmisperioodide jooksul (vt Lisa 3).

4.1.2 Leica Infinity

Arvutusteks kasutati tarkvara Leica Infinity versiooni 4.0.0.44003. Leica Infinity on kommertstarkvara, mis on disainitud töötama, kombineerima, analüüsima, teostama kvaliteedikontrolli ja jagama erinevaid mõõtmisandmeid, sealhulgas elektrontahhümeetrite, lasernivelliiride, GNSS-süsteemide ja UAV-de andmeid (Leica Geosystems, 2022). Andmetöötamise protsess on esitatud joonisel 4.2.



Joonis 4.2. Leica Infinity andmetöötluste protsess.

Sensori (*.ubx) ja püsijaama (*.rnx.zip/*.crx.zip) mõõtmisandmed sisestati Leica Infinity tarkvarasse ning määrati andmete mõõtmismeetod (kinemaatiline või staatiline). Seejärel määrati liikuvad vastuvõtjad ja baasjaam (püsijaam) ning arvutusparameetrid, et saaks teostada andmete töötlust ja analüüsi. Andmetöötlustulemusi sai vaadata programmis tabeli kujul, kusjuures eelnevalt sai valida tabelis kajastatavat andmekoosseisu. Andmete hulgast valiti välja punktide kõrgused (ellipsoidist) ning algundmatute lahenduse meetod. Samuti koostab tarkvara analüüsi käigus graafikud erinevate karakteristikute kohta. Mõõtmistulemuste tabelleid sai eksportida *.txt ja *.csv kujul ning mõõtmiste kokkuvõtet *.pdf kujul. Leica Infinity seadistused on esitatud lisa 4, L4.1 – L4.2.

Erinevalt RTKLIB tarkvarast saab Leica Infinity tarkvaras kasutaja muuta vaid väheseid arvutusseadistusi. Mõlemas tarkvaras saab valida ionosfääri ja troposfääri mõju arvestavaid meetodeid, kusjuures Leica Infinity tarkvaras on selleks erinevad mudelid ning RTKLIB tarkvaras parandite meetodid. Leica Infinity tarkvaras on võimalik seadistada kohalik kaardiprojektsioon, nii et väljundandmed on transformeeritud kohalikkude süsteemi. RTKLIB tarkvaras sellist võimalust pole. Mõlemas tarkvaras saab valida arvutustesse kaasatavad satelliitide signaalid. Leica Infinity üheks eeliseks on mõõtmisandmete graafiline esitlemise võimalus.

Leica Infinity programmi puhul olid seadistused automaatsed. Arvutustesse kaasati GPS ja GLONASS satelliitide andmed, sest nende satelliitsüsteemide satelliitide andmed olid kättesaadavad mõõtmisperiodide jooksul.

4.2 Täpsushinnangu peamised arvutusvalemid

Mõõtmisandmete mõõtmisvigade määramiseks kasutati andmete analüüsimisel tõelisi vigasid ning mõõtmiste täpsushinnangu andmiseks standardhälbeväärtusi. Tõeline viga kajastab mõõdetud suuruse erinevust tõelisest väärtust. Tõelise vea arvutusvalem on (Kala, 2009, 60):

$$\theta = x_i - X, \quad (4.1)$$

kus X on mõõdetava suuruse tõeline väärtus ja x_i on ühe väärtuse tulemus.

Mõõtmistäpsuse üheks põhinäitajaks on standardhälve, mille väärtuse saab leida valemiga (Kala, 2009, 62):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (4.2)$$

kus x_i on üksiku mõõtmise tulemus ja \bar{x} on mõõtmistulemuste aritmeetiline keskmine ehk ühe ja sama suuruse mitmekordsete mõõtmiste tulemuse tõenäoliseim väärtus; n on mõõtmiste hulk. Standardhälve annab hinnangu mõõtmistäpsuse vahemikule.

4.3 Kõrguskomponendi määramine veetaseme mõõtmistel

Veetaseme mõõtmised teostati esmalt kontrollitud keskkonnas ning seejärel Muhu saare põhjarannikul. Mõõtmised teostati perioodil 28.06-07.07.2021 Tallinnas ning 09.01-22.01.2022 Muhus. Kontrollitud keskkonnas teostatud mõõtmiste eesmärgiks oli määrata GNSS sensori antenni faasisentri nihe. Poi mõõtmiste eesmärgiks Muhu saare põhjarannikul oli mõõta meretaseme kõrgust.

Nii 28.06-07.07.2021 kui ka 09.01-22.01.2022 perioodil teostatud mõõtmistel kasutati ühte ja seda sama GNSS sensorit. Mõlemal mõõtmisperiodil olid vastuvõtja konfiguratsioonis sisse lülitatud RAWX, SFRBX, MEASX ning NMEA sõnumitest GxZDA, GxMC, GxGGA (J. Rebane pers. comm. 04.05.2022). Sensor oli programmeeritud automaatselt sisse lülituma iga täistunni alguses. Mõõtmiste sessiooni pikkuseks valiti

15 minutit, kuna leiti, et see on piisav aeg, et mõõteseade suudaks fikseerida oma asukoha. Mõõtmiste sageduseks valiti 1 sekund mõõtmiste perioodil 28.06-07.07.2021 ja 0,5 sekundit mõõtmiste perioodil 09.01-22.01.2022. Madala hinnaklassi GNSS sensorite puhul on kõrgema mõõtmisageduse kasutusega võimalik saavutada paremat täpsust (Romero-Andrade et al., 2021). Mõõtmisandmed laeti alla Tallinna Tehnikaülikooli Biorobotika Keskuse Arvutisüsteemide Instituudi veebilehelt <http://biorobotics.ttu.ee/buoy/>.

4.3.1 Mõõtmised kontrollitud keskkonnas

Kasutatud instrumendid

Mõõtmised toimusid Ehituse Mäemaja katusel, aadressil Mäepealse 3, Tallinn. Mõõtmised algasid 28.06.2021 kell 10:00 ja lõppesid 07.07.2021 kell 23:15. Mõõtmistel kasutati sensorit, mis koosnes u-blox ZED-F9P-01B vastuvõtjast ja Taoglas MAGMA X2 AA.175 antennist (Joonis 4.3). Varasemalt tehti katsemõõtmisi ka veetünnis hulpiva ujuvpoiga (Joonis 4.3).



Joonis 4.3. Veetaseme mõõtmistel kasutatud esialgne mõõtesensor

Vastuvõtja paigutati poi sisse ning poi omakorda ääreni veega täidetud 500 l tünni. Esialgsel katsetel oli antenn koos teiste seadmetega poi sees, kuid katsetuse käigus mõõdetud andmete töötlusel selgus, et selline seadmete paigutus mõõtmistel annab halbu tulemusi. Tõenäoliselt olid kehvad tulemused põhjustatud isoleerimata vooluallika toitekaablite segavast (elektromagnetilisest) mõjust, mis häiris GNSS sensori poolt salvestatud signaale. Seega eemaldati antenn GNSS sensori vooluallika vahetust lähedusest. Selleks, et sensor ning poi oleksid ilmastiku mõjude eest kaitstud, paigutati need katsetuse ajaks ümberpööratud veetünni alla (Joonis 4.4). Antenn kleebiti tünni kõrval olevale käsipuule.



Joonis 4.4. GNSS mõõtmised kontrollitud keskkonnas (Foto Sander Varbla)

Mõõtmised

Mõõtmised olid seadistatud toimuma automaatselt. Iga täistunni alguses alustas sensor mõõtmist, mõõtes 1 sekundilise intervalliga 15 minutit järjest. Seejärel lülitus sensor välja ning alustas tööd uuesti järgmisel täistunnil. Selline automaatne seadistus oli programmeeritud poi arendaja poolt. Antud mõõtmiste konfiguratsioon on kirjeldatud eespool, jaotise 4.3 alguses.

Andmetöötlus

Perioodi 28.06-07.07.2021 mõõtmisandmed töödeldi staatiliselt ja kinemaatiliselt RTKLIB tarkvaraga. Andmetöötlusprotsess RTKLIB tarkvaraga on kirjeldatud varasemas jaotises 4.1.1. Mõõtmistulemuste järeltöötlusel kasutati baasjaamana GNSS Suurupi püsijaama andmeid. Suurupi püsijaam asus poi asukohast 17,5 kilomeetri kaugusel. Ideaalis peaks olema baasjaam võimalikult lähedal vastuvõtjale, kuna baasjaama kaugus vastuvõtjast mõjutab mõõtmistulemuste täpsust. Mida kaugemal on püsijaam vastuvõtjast, seda ebatäpsemad on mõõtmistulemused. Poi asukohale oli ka ligemaid GNSS püsijaamu, kuid siiski tehti teadlik valik kasutada kaugemat GNSS püsijaama, kuna oli teada, et antud poi rakenduseks edaspidi on mõõta mereveetaset ligikaudu sama kaugel lähimast GNSS püsijaamast. Võttes siinkohal arvesse, et ESTPOS GNSS püsijaamade omavaheline kaugus on umbes 40 km maismaal (Metsar *et al.*, 2018), võib eeldada, et Eesti territooriumil mõõtes on lähim püsijaam vastuvõtjale maksimaalselt 20 km kaugusel. See tingimus ei pruugi olla täidetud ranniku äärsetel aladel, kus kaugus püsijaama ja vastuvõtja vahel võib ületada 20 kilomeetrit. Sellest tulenes ka kaugema

püsijaama (17,5 km) valik antud mõõtmisandmete järeltöötlusel. Kasutades ligi 20 km kaugusel asuvat Suurupi püsijaama poi andmete järeltöötlusel, sai tulemuste põhjal arvutada eeldatava täpsushinnangu tulevastel mereveetaseme mõõtmistel.

Peale mõõtmistulemuste järeltöötlust programmiga RTKLIB alustati tulemuste andmetöötlusega. Esmalt filtreeriti välja mõõtmisessiooni (15 min) tulemusfailist (*.pos) mõõtmispunktid, millel ei olnud alg tundmatute lahendused fikseeritud. Edasisse töötlusesse kaasati seega ainult sellised mõõtmispunktid, millel olid fikseeritud alg tundmatute lahendused. Fikseeritud alg tundmatute lahendustega punktide hulk loeti kokku ning leiti nende protsent kogu mõõtmiste hulgast. Kogu mõõtmiste hulgaks oli 900 mõõtmispunkti, kuna sessiooni pikkuseks oli 15 minutit ning mõõtmisi tehti 1 sekundilise intervalliga.

Selleks, et saavutada kõrgetäpne positsioneerimine kandelainete faasimõõtmiste põhjal, on vajalik alg tundmatute lahendamine (Zhang *et al.*, 2020). Kui alg tundmatu on lahendatud (fikseeritud), siis on leitud satelliidi ja vastuvõtja vaheline tsüklite arv. Alg tundmatu väärtus on olulisel kohal kandelainete faasimõõtmiste pseudokauguste valemis (Valem 2.12). Seega kui alg tundmatu väärtus pole mõõtmistel fikseeritud, siis võivad tekkida vead pseudokauguste määramisel, mistõttu tekivad vead ka asukohamäärangus. Joonisel 4.5 on väljavõte mõõtmistulemuste (*.pos) failist. Faili Q tähistusega tulp näitab, kuidas on lahendatud alg tundmatud (1 – *fix* ehk alg tundmatute lahendused on fikseeritud, 2 – *float* ehk alg tundmatute lahendused pole fikseeritud). Kui pöörata tähelepanu *fix* ja *float* tulemustega saadud punktide kõrgustele, siis nähtub, et nende erinevus on meetri suurusjärgus. Fikseeritud alg tundmatute lahendustega punktide asukoht on tavapäraselt täpsem, mida kinnitab ka jooniselt 4.5 nähtavad statistilised näitajad (tulbad sdn – sdu), mis kajastavad standardhälbeid. Arvutades fikseeritud alg tundmatute lahendustega punktide protsendilise väärtuse kogu mõõtmistest saab aimduse mõõtmiste kvaliteedist, kuid madal fikseeritud alg tundmatute lahenduste protsent võib viidata ka halvale satelliitide nähtavusele. Madal fikseeritud alg tundmatute lahenduste protsent võib viidata ka suletud taevalaotusele, kuigi antud mõõtmised sooritati avatud taevalaotusega. Joonisel 4.7 on kujutatud poi mõõtmistingimustest nähtub, et GNSS sensori taevahorisont ei ole varjatud antud mõõtmistel kõrvaliste rajatiste poolt.

```

% program : RTKLIB ver.demo5 b34b
% inp file : 2022-01-10--22-00-59-010953000.obs
% inp file : hani010w.22o
% inp file : hani010w.22n
% obs start : 2022/01/10 22:01:12.0 GPST (week2192 165672.0s)
% obs end : 2022/01/10 22:16:11.0 GPST (week2192 166571.0s)
% pos mode : Kinematic
% freqs : L1+L2/E5b
% solution : Forward
% elev mask : 10.0 deg
% dynamics : on
% tidecorr : off
% ionos opt : Broadcast
% tropo opt : Saastamoinen
% ephemeris : Broadcast
% navi sys : GPS GLONASS
% amb res : Fix and Hold
% amb glo :
% val thres : 3.0
% antenna1 : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
% antenna2 : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
% ref pos : 58.623549389 23.632809261 42.3370
%
% (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
% GPST latitude(deg) longitude(deg) height(m) Q ns sdn(m) sde(m) sdu(m) sdne(m) sdeu(m) sdu(m) age(s) ratio
2022/01/10 22:01:12.000 58.680342536 23.174319339 19.8760 2 10 0.6062 0.4857 1.4157 -0.1413 -0.0990 0.4717 -0.01 0.0
2022/01/10 22:01:12.500 58.680342556 23.174319215 19.8785 2 10 0.4338 0.3465 1.0124 -0.1010 -0.0638 0.3363 -0.01 0.0
2022/01/10 22:01:13.000 58.680342774 23.174319212 19.9215 2 10 0.3557 0.2837 0.8297 -0.0828 -0.0501 0.2753 -0.01 0.0
2022/01/10 22:01:13.500 58.680342844 23.174319220 19.9539 2 10 0.3087 0.2461 0.7198 -0.0719 -0.0425 0.2386 -0.01 0.0
2022/01/10 22:01:14.000 58.680342845 23.174319170 19.9780 2 10 0.2764 0.2203 0.6444 -0.0644 -0.0374 0.2135 -0.01 0.0
2022/01/10 22:01:14.500 58.680342895 23.174319204 19.9947 2 10 0.2525 0.2012 0.5886 -0.0588 -0.0337 0.1949 -0.01 0.0
2022/01/10 22:01:15.000 58.680342916 23.174319201 19.9897 2 10 0.2339 0.1864 0.5450 -0.0545 -0.0309 0.1804 -0.01 0.0
2022/01/10 22:01:15.500 58.680342948 23.174319284 19.9963 2 10 0.2189 0.1744 0.5098 -0.0510 -0.0286 0.1687 -0.01 0.0
2022/01/10 22:01:16.000 58.680342991 23.174319380 20.0076 2 10 0.2064 0.1645 0.4806 -0.0481 -0.0267 0.1589 -0.01 0.0
2022/01/10 22:01:16.500 58.680344738 23.174320180 20.6260 1 10 0.0048 0.0038 0.0111 -0.0001 -0.0008 0.0033 -0.01 3.2
2022/01/10 22:01:17.000 58.680344734 23.174320192 20.6264 1 10 0.0048 0.0038 0.0111 -0.0001 -0.0008 0.0033 -0.01 3.2
2022/01/10 22:01:17.500 58.680344734 23.174320183 20.6238 1 10 0.0048 0.0038 0.0111 -0.0000 -0.0008 0.0033 -0.01 3.2
2022/01/10 22:01:18.000 58.680344732 23.174320185 20.6238 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0001 -0.0008 0.0033 -0.01 3.2
2022/01/10 22:01:18.500 58.680344738 23.174320201 20.6212 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0001 -0.0008 0.0033 -0.01 3.2
2022/01/10 22:01:19.000 58.680344733 23.174320221 20.6257 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0001 -0.0008 0.0033 -0.01 3.2
2022/01/10 22:01:19.500 58.680344735 23.174320203 20.6245 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0001 -0.0009 0.0033 -0.01 3.2
2022/01/10 22:01:20.000 58.680344742 23.174320207 20.6279 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.2
2022/01/10 22:01:20.500 58.680344748 23.174320226 20.6245 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.2
2022/01/10 22:01:21.000 58.680344742 23.174320211 20.6285 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:21.500 58.680344735 23.174320206 20.6237 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:22.000 58.680344753 23.174320187 20.6281 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:22.500 58.680344740 23.174320193 20.6238 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:23.000 58.680344735 23.174320185 20.6254 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:23.500 58.680344747 23.174320178 20.6267 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:24.000 58.680344744 23.174320183 20.6265 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:24.500 58.680344735 23.174320219 20.6292 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:25.000 58.680344729 23.174320189 20.6233 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:25.500 58.680344733 23.174320202 20.6261 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:26.000 58.680344734 23.174320176 20.6261 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 3.3
2022/01/10 22:01:26.500 58.680344740 23.174320204 20.6246 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.5
2022/01/10 22:01:27.000 58.680344731 23.174320194 20.6275 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.6
2022/01/10 22:01:27.500 58.680344753 23.174320207 20.6308 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.7
2022/01/10 22:01:28.000 58.680344726 23.174320200 20.6289 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.7
2022/01/10 22:01:28.500 58.680344747 23.174320204 20.6269 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:29.000 58.680344745 23.174320182 20.6251 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:29.500 58.680344749 23.174320178 20.6267 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:30.000 58.680344724 23.174320219 20.6252 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:30.500 58.680344734 23.174320191 20.6246 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:31.000 58.680344741 23.174320192 20.6276 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:31.500 58.680344732 23.174320196 20.6269 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:32.000 58.680344728 23.174320203 20.6282 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:32.500 58.680344725 23.174320186 20.6267 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:33.000 58.680344716 23.174320205 20.6251 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:33.500 58.680344739 23.174320179 20.6297 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8
2022/01/10 22:01:34.000 58.680344731 23.174320191 20.6274 1 10 0.0048 0.0038 0.0110 0.0002 -0.0009 0.0033 -0.01 6.8

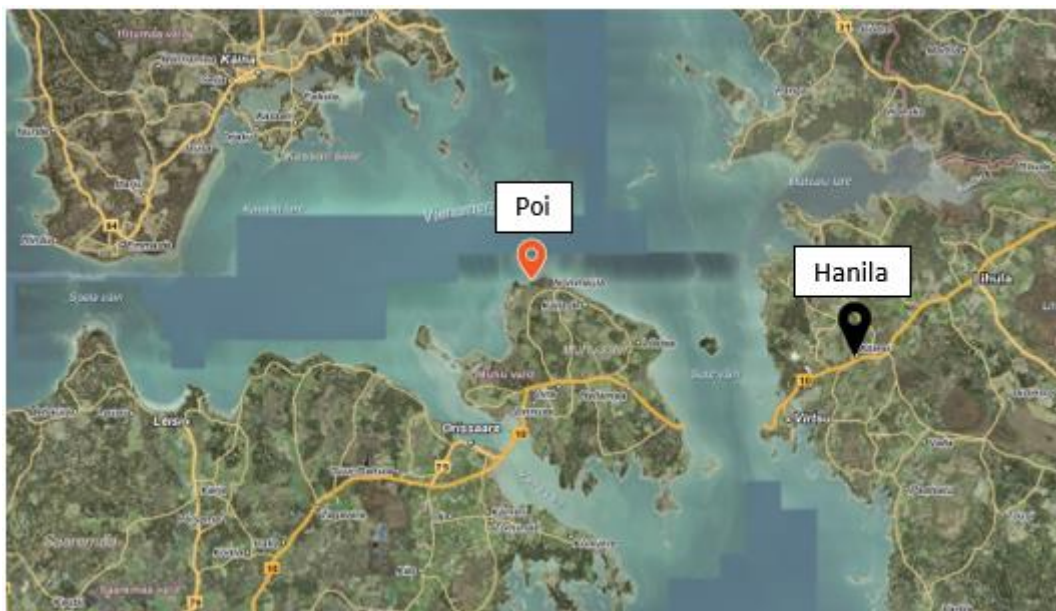
```

Joonis 4.5. RTKLIB tarkvara tulemusfail (*.pos)

Järgnevalt leiti fikseeritud alg tundmatute lahendustega mõõdetud kõrguste tõelised vead (Valem 4.1), milleks lahutati GNSS sensori poolt mõõdetud kõrgustest (ellipsoidist) kontrollseadmega mõõdetud antenni tegelik kõrgus 58,510 m (ellipsoidist) (S. Varbla pers. comm. 28.06.2021). Saadud tõeliste vigade põhjal arvutati mõõtmisessiooni standardhälve (Valem 4.2) ja keskmine tõeline viga. Mõõteperioodi (28.06-07.07.2021) standardhälve ning keskmine tõeline viga arvutati kogu perioodi fikseeritud alg tundmatute lahendustega punktide tõeliste vigade põhjal. Mõõteperioodi keskmine tõeline viga kajastab eeldatavalt GNSS sensori antenni faasisentri nihet.

4.3.2 Mõõtmised merel

Mõõtmised teostati perioodil 09.01-22.01.2022 Muhus. Mõõtmised algasid kell 20:00 09.01.2022 ja lõppesid 22.01.2022 kell 09:15. Poi ning mõõtmisandmete töötlusel baasjaamana kasutatud Hanila püsijaama asukohad on näidatud joonisel 4.6.



Joonis 4.6. Veetaseme mõõtepoi ja kasutatud GNSS püsijaama asukoht (<https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>)

Kasutatud instrumendid

Mõõtmistel kasutati sensorit, mis koosnes u-blox ZED-F9P-01B vastuvõtjast ja Taoglas MAGMA X2 AA.175 antennist (Joonis 4.7). 2021. aasta suvel teostatud mõõtmiste kogemuse põhjal täiustati poi seadmete konfiguratsiooni. Sealhulgas isoleeriti voluallikas mõõteseadmetest kindlamalt. Joonisel 4.8 on näidatud mõõtmisolud.



Joonis 4.7 Mereveetaseme mõõtmistel kasutatud mõõtesensor (Foto Jaan Rebane)



Joonis 4.8. Mereveetaseme mõõtepoi (Foto Jaan Rebane)

Mõõtmised

Mõõtmised toimuvad automaatselt. Iga täistunni alguses alustas sensor mõõtmist, mõõtes 0,5 sekundilise intervalliga 15 minutit järjest. Seejärel lülitus sensor välja ning

alustas tööd uuesti järgmisel täistunnil. Antud mõõtmiste ülejäänud seadistused on kirjeldatud eespool, jaotise 4.3 alguses.

Andmetöötlus

Perioodi 09.01-22.01.2022 mõõtmisandmed töödeldi kinemaatilisel RTKLIB tarkvaraga. Baasjaamana kasutati GNSS Hanila püsijaama andmeid. Hanila püsijaam asus poi asukohast 27,5 kilomeetri kaugusel.

Järeltöötluse tulemusena saadud mõõtmistulemuste andmetöötlus toimus sarnaselt jaotises 4.3.1 kirjeldatud töötuskäigule. Erinevus seisnes selle, et poi mereveetaseme mõõtmisandmeid töödeldi ainult kinemaatilisel. Mõõtmisessiooni (15 min) tulemusfailist (*.pos) filtreeriti välja mõõtmispunktid, millel ei olnud alg tundmatute lahendused fikseeritud. Fikseeritud alg tundmatute lahendustega punktide hulk leiti protsentuaalselt kogu mõõtmiste hulgast. Kogu mõõtmiste hulgaks oli nendel mõõtmistel 1800 punkti, kuna sessiooni pikkuseks oli 15 minutit ning mõõtmisi tehti 0,5 sekundilise intervalliga.

Järgmiseks arvutati GNSS sensori mõõdetud mereveetaseme kõrgused. Fikseeritud alg tundmatute lahendustega mõõtmispunktide kõrgustest (ellipsoidist) lahutati esmalt geoidi ja ellipsoidi vaheline kaugus poi asukohas, et saada kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis. Lühendiga EH2000 tähistatakse Euroopa vertikaalsel referentssüsteemil põhinevaid kõrgusi Eestis (Geoportaal, 2022c). EH2000 kõrgussüsteemi lähtenivooks on Amsterdamis null ning normaalkõrgused on eepohhil 2000. Ellipsoidi ja geoidi vaheline kaugus poi asukohas leiti Maa-ameti EST-GEOID2017 kalkulaatoriga (<https://gpa.maaamet.ee/calc/geoid2017/>). Kõrguste teisendus oli vajalik hilisemaks GNSS sensori mõõdetud mereveetaseme kõrguste võrdlemiseks veemõõdujaamade poolt mõõdetud kõrgustega, mis olid antud EH2000 kõrgussüsteemis. GNSS sensori antenn ei asunud veetasemega samal kõrgusel, mistõttu tuli arvesse võtta ka antenni ja veetaseme vaheline kaugus 23,5 cm (J. Rebane pers. comm. 18.04.2022). Lahutades antenni ja veetaseme vahelise kauguse mõõtmispunktide kõrgustest, leiti GNSS sensori poolt mõõdetud mereveetaseme kõrgus EH2000 süsteemis. Leitud mereveetaseme kõrguste põhjal arvutati mõõtesessioonide (15 min) keskmised mereveetaseme kõrgused ning standardhälbed.

4.4 Teadaoleva geomeetriaga kontuuride mõõtmine

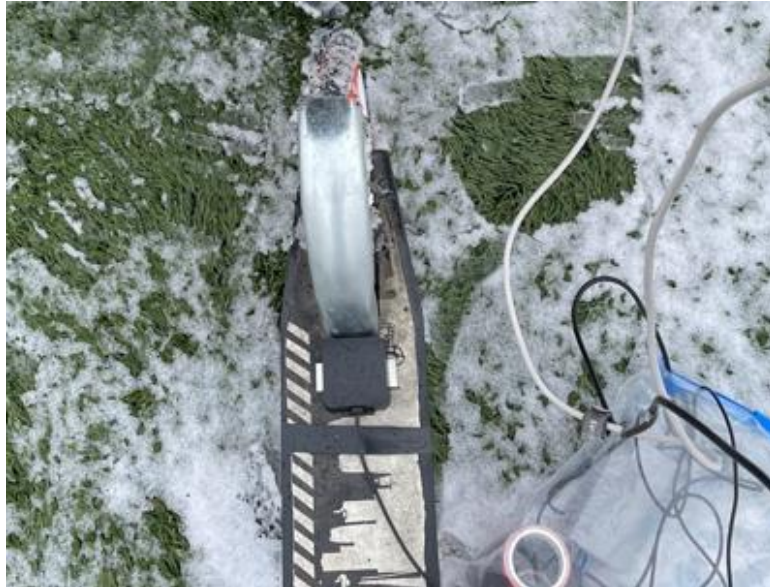
Testimaks GNSS sensori mõõtmisvõimekust ja täpsust kinemaatilistel mõõtmistel, valiti mõõtmisobjektiks jalgpalliväljakud. Jalgpalliväljakud valiti mõõtmisobjektideks, kuna väljakute küljejooned on sirged ja moodustavad korrapärase ristküliku kuju. Peamiseks eesmärgiks oli kontrollida, kui täpselt saab GNSS sensoriga mõõta väljaku küljejoonte pikkuseid. Selleks, et teostada kinemaatilisi mõõtmisi, kasutati raamina tõukeratast, millele kinnitati GNSS sensori antenn.

Maapealsetel mõõtmistel kasutati teist GNSS sensorit kui kontrollitud keskkonnas ja merel teostatud mõõtmistel. GNSS sensori antenni ja vastuvõtja moodul olid küll samaväärsed, kui tegemist oli teise sensoriga. Mõõtmised teostati Tallinnas 20.02.2022 MTÜ Kotka staadionil ning 20.03.2022 Kuressaares Kuressaare jalgpalliväljakul. Mõõtmisandmete salvestamiseks kasutati tarkvara u-center 2 (versioon 21.11.13554). GNSS sensori mõõtmisintervalliks oli 1 sekund. GNSS sensori konfiguratsioonis olid sisse lülitatud MEASX, RAWX ja SFRBX sõnumid ning välja lülitatud NMEA sõnumid. Jälgitavateks GNSS konstellatsioonideks olid GPS, GLONASS, GALILEO ja BeiDou.

Mõõtmised Kotka jalgpallistaadionil

Mõõtmised teostati 20.02.2022 ajavahemikus 12.30-14.00. Mõõtmiste asukohaks oli MTÜ Kotka staadion, mis asub aadressil Linnu tee 9, Tallinn. Väljak oli ümbritsetud traataiaga (Joonis 4.10) ning ühel väljaku küljel ka betoonseinaga, mis tagantjärele hinnanguna võib avaldada halvendavat mõju mõõtmistulemuste täpsusele. Lisaks paiknesid väljaku ümber ka elumajad ja kõrgemad hooned.

Mõõtmistel kasutati sensorit, mis koosnes u-blox ZED-F9P-01B vastuvõtjast ja Taoglas MAGMA X2 AA.175 antennist. Andmete salvestamiseks ja vastuvõtjale voolu andmiseks kasutati sülearvutit. Andmete salvestamiseks kasutati tarkvara u-center 2. Antenn kinnitati tõukeratta tagumise ratta juurde nii, et antenni keskoht läheks kokku tõukeratta tagaratta keskjoonega (Joonis 4.9). Madal antenni asukoht valiti, et antenn püsiks võimalikult paralleelne maapinnaga. Antenni kõrgus maapinnast oli 11,6 cm.



Joonis 4.9. GNSS antenni asukoht Kotka staadioni mõõtmistel

Mõõtmiste eesmärgiks oli mõõta jalgpalliväljaku neli küljejoont. Iga väljaku külg mõõdeti eraldi ning kaks korda. Mõõtmistel liiguti sirgjooneliselt joonte keskel (joonis 4.10).



Joonis 4.10. Mõõtmised Kotka staadionil

Kontrollmõõtmisteks kasutati instrumenti Leica Viva GS15, millega mõõdeti vaid väljaku nurgad ja punktid vahepealsetel sirgetel. Sisenurga punktid mõõdeti kolme initialsiseerimisega, välimised nurgad ja sirgete punktid ühe initialsiseerimisega. Kuna eesmärgiks oli välja selgitada kui täpselt saab GNSS sensoriga mõõta väljaku

küljejoonte pikkuseid, siis ei peetud tarviklikuks kinnitada kontrollseadet mõõtmisraamile samaaegseteks mõõtmisteks. Samaaegne kontrollandmete salvestamine poleks andnud erilist lisaväärtust GNSS sensoriga kogutud andmete valideerimiseks, kuna kõige tõenäolisemalt põhjustas suurt mõõtmisviga nendel mõõtmistel madal antenni asetus ja ümbritseva taevaalaotuse suletus.

Mõõtmised Kuressaare jalgpallistaadionil

Mõõtmised teostati 20.03.2022 ajavahemikus 14:30-16:00. Mõõtmiste asukohaks oli Kuressaare jalgpallistaadion, mis asub aadressil Talve 88, Kuressaare. Väljak oli ümbritsetud metalliiaga (Joonis 4.11), mis mõjutas ka mõõtmistulemuste täpsust. Üldiselt olid mõõtmistingimused aga veidi paremad kui 20.02.2022 teostatud mõõtmistel, kuna väljaku läheduses ei olnud hooneid, mis varjanuks taevaalaotust.



Joonis 4.11. Foto Kuressaare jalgpallistaadionist koos ümbitseva traataiaga

Mõõtmistel kasutati sama sensorit, mis 20.02.2022 tehtud mõõtmistel. Andmete salvestamiseks ja vastuvõtjale voolu andmiseks kasutati sülearvutit. Andmete salvestamiseks kasutati sülearvutisse installeeritud tarkvara u-center 2. Antenn kinnitati tõukeratta lenkstangi külge (Joonis 4.12), nii et antenni keskkohk läheks kokku tõukeratta esiratta keskjoonega. Antenn tõsteti kõrgemale asukohale, kuna 20.02.2022 mõõtmistelt saadud tulemused polnud väga head ning kõige tõenäolisem probleem oli antenni madal asetus. Antenni kõrgus maapinnast oli 20.03.2022 tehtud mõõtmistel 97,3 cm.



Joonis 4.12. GNSS antenni asukoht Kuressaare staadioni mõõtmistel

Mõõtmiste eesmärgiks oli mõõta jalgpalliväljaku neli küljejoont. Lisaks mõõdeti ka poolväljaku jooned ja keskringi joon. Sarnaselt 20.02.2022 teostatud mõõtmistele mõõdeti iga joon eraldi ja kaks korda. Mõõtmistel liiguti sirgjooneliselt joonte keskel.

Kontrollmõõtmisteks kasutati instrumenti Leica Viva GS15. Mõõdeti väljaku nurgad, keskjoone ristumised väljaku küljejoontega ning keskringi ristumised keskjoonega. Eelpool nimetatud punktid mõõdeti kolme initsialiseerimisega ja joone paksuse saamiseks mõõdeti kontrolliks ka ühe initsialiseerimisega ühel küljel keskjoone juures välimise küljejoone piir.

Andmetöötlus

20.02.2022 ja 20.03.2022 mõõdetud andmed töödeldi kinemaatilisel RTKLIB tarkvaraga. 20.02.2022 mõõtmisandmete töötlusel kasutati baasjaamana GNSS Mustamäe püsijaama andmeid ning 20.03.2022 GNSS Kuressaare püsijaama andmeid. Tallinnas teostatud mõõtmistel oli jalgpalliväljaku ja baasjaama vaheliseks kauguseks 2 kilomeetrit ning Kuressaares umbes 800 meetrit.

Mõõtmistel olid jälgitavateks GNSS konstellatsioonideks GPS, GLONASS, GALILEO ja BeiDou, kuid mõõtmisandmete järeltöötlusel kaasati arvutustesse ainult GPS ja

GLONASS satelliitide andmed (Joonis 5.13). Seda seetõttu, et mõõtmiste vältel ei olnud nähtavad teiste süsteemide satelliidid.

Andmetest ei eraldatud fikseeritud alg tundmatute lahendustega punkte, kuna nende hulk mõõtmistel oli niivõrd madal. Selle asemel kasutati kõiki mõõtmistulemusi, mis olid saavutatud esialgsete lahendustena. Tulemusfailidest (*.pos) filtreeriti edasiseks kasutamiseks välja punktide koordinaadid (WGS84). Järgnevalt arvutati sensori koordinaatide põhjal väljaku küljejoonte pikkused.

4.5 Mõõtmised liikuvplatvormilt

Mõõtmised teostati Tallinnas kuupäevadel 16.12.2021, 08.03.2022 ja 12.03.2022. Mõõtmistel kasutatud seadistus ja instrumentide koosseis oli sama, mis jaotises 4.4 kirjeldatud mõõtmistel. Mõõtmised teostati kinemaatilisel, kusjuures keskmine liikumiskiirus oli 50 km/h. GNSS sensor ja kontrollseade kinnitati auto katusel olevatele puidust platvormidele, mis asusid raamidil (Joonis 4.13). Sensori antenn kinnitati kõrvalistuja poolsele platvormile ning kontrollseade juhi poolsele platvormile.

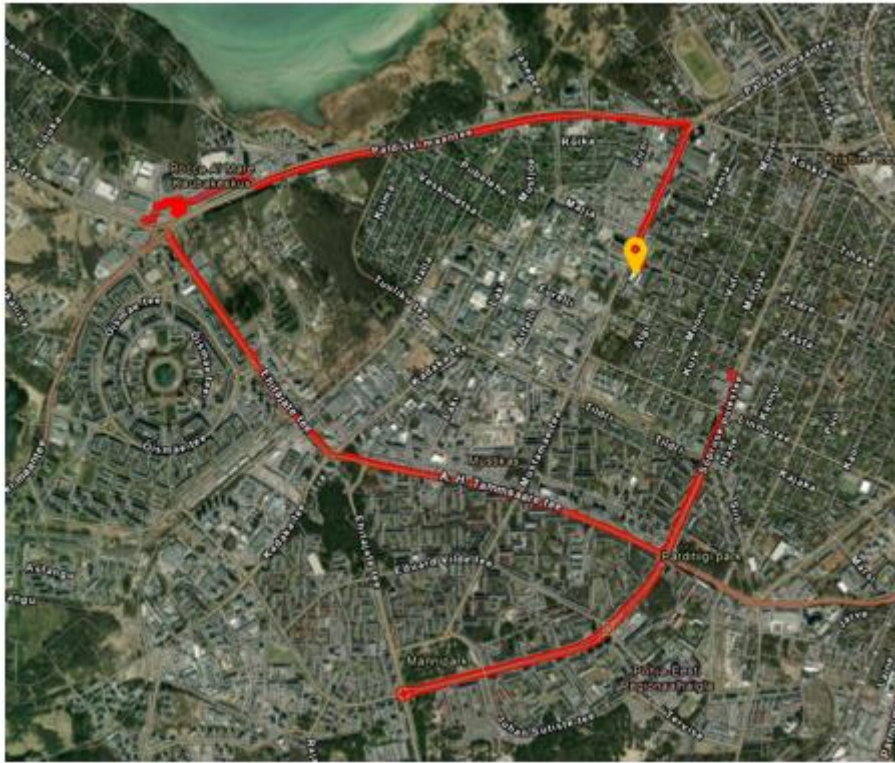
Hilisema andmetöötluse jaoks mõõdeti instrumentide paiknemine teineteise suhtes ning instrumentide kõrgus maapinnast. Need mõõtmised tehti tasase ja horisontaalse põrandaga garaažis. Mõõtmiseks kasutati mõõdulinti. Instrumentide kõrguste mõõtmiseks maapinnast asetati latt-vesilood puitplatvormile instrumentide kinnituskohdadesse ning mõõdeti mõõdulindiga kõrgus latt-vesiloodini. Kontrollseadme puhul oli teada antenni referentspunkti asukoht (ARP), milleks oli antenni põhjaplaat. See info on kättesaadav veebilehelt <https://files.igs.org/pub/station/general/antenna.gra>. Sensori puhul eeldati, et faasitsentri keskpunkt asub antenni põhja keskel. Tegelikuses ei ole antennitüübile MAGMA X2 AA.175 määratud antenni faasitsentri asukohta, mistõttu on see info andmetöötluses teadmata. Kontrollseadme ja sensori antenni omavaheliseks horisontaalseks vahemaaks oli 123,6 cm. Sensori antenni kõrgus maapinnast oli 173,5 cm ning kontrollseadme kõrgus maapinnast 173,7 cm.



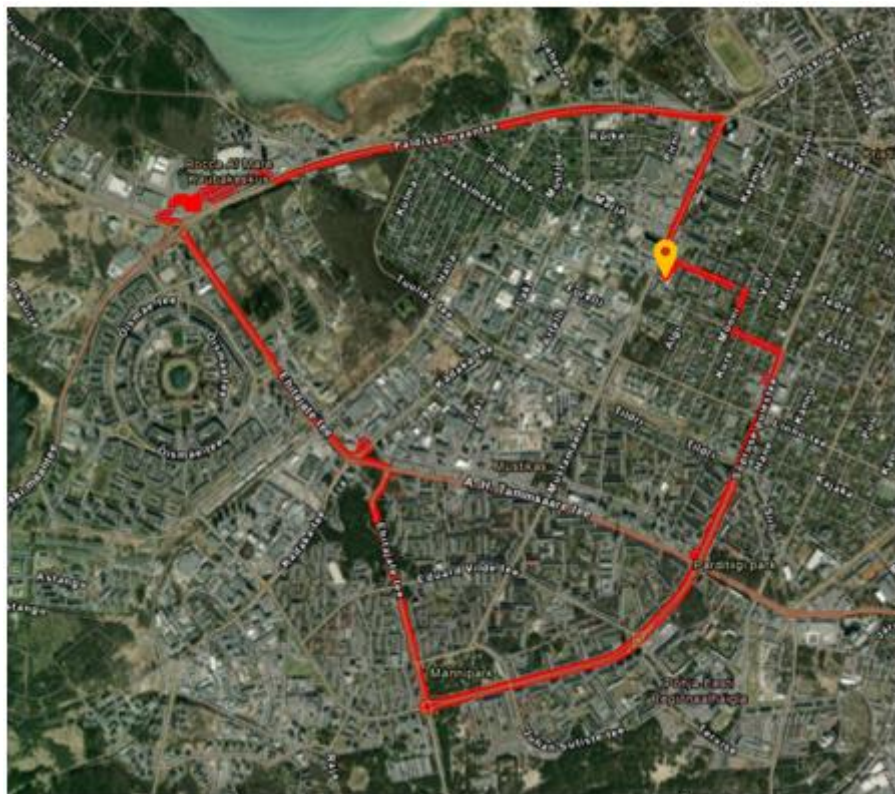
Joonis 4.13. Kontrollseadme ja GNSS sensori paiknemine mõõtmiste ajal

Mõõtmised toimusid 16.12.2021 ajavahemikul 10:00-12:00, 08.03.2022 ajavahemikul 10:30-12:00 ja 12.03.2022 ajavahemikul 13:00-15:00. Mõõtmiste trajektoorid on esitatud joonistel 4.14, 4.15 ja 4.16 vastavalt 16.12.2021, 08.03.2022 ja 12.03.2022 toimunud mõõtmiste kohta.

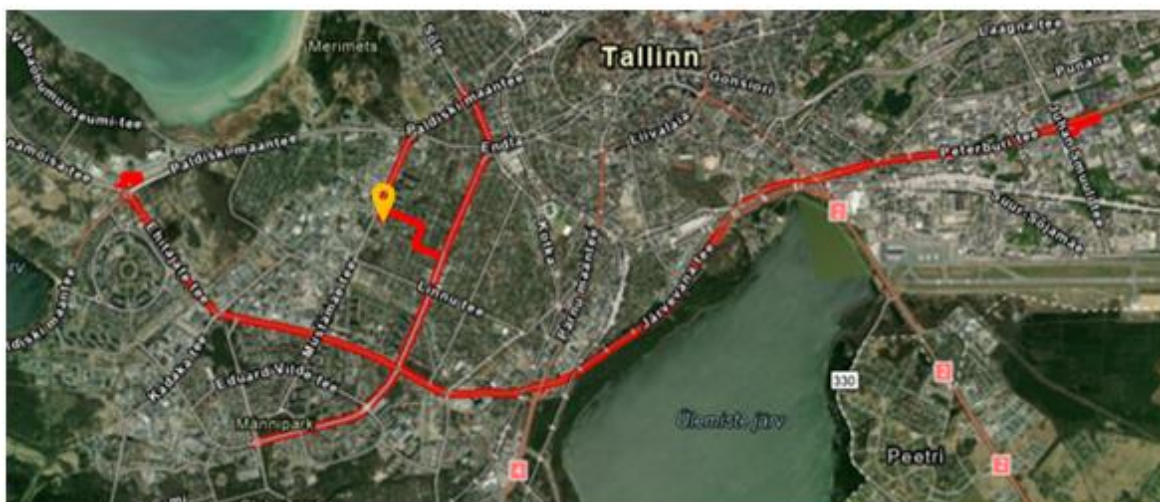
Trajektoorid kulgesid mööda peamagistraale, kuna nendel teedel on ühes sõidusuunas vähemalt kaks sõidurada. Kuna tee oli lai ja sõiduridu mitu, siis oli võimalus sõita tänava keskel teises sõidureas, et tagada GNSS sensorile ja kontrollseadmele mõõtmistel võimalikult avatud taevalaotus. Ka mõõtmiste kellaajad valiti selliselt, et mõõtmised ei sattuks tipptunni aegadele, kus liikluses on palju teisi transpordivahendeid, mis võiksid hakata varjama seadmete taevalaotuse avatust.



Joonis 4.14. Mõõtmiste trajektoor 16.12.2021 mõõtmiste ajal (ArcGIS Pro kuvatõmmis)



Joonis 4.15. Mõõtmiste trajektoor 16.12.2021 mõõtmiste ajal (ArcGIS Pro kuvatõmmis)



Joonis 4.16. Mõõtmiste trajektoor 16.12.2021 mõõtmiste ajal (ArcGIS Pro kuvatõmmis)

16.12.2021, 08.03.2022 ja 12.03.2022 mõõdetud andmed töödeldi kinemaatilisel RTKLIB tarkvaraga, baasjaama andmetena kasutati GNSS Mustamäe püsijaama andmeid. Mõõdetud punktide maksimaalne kaugus püsijaamast oli 9 kilomeetrit. Mustamäe püsijaama asukoht on kujutatud joonistel 4.14, 4.15 ja 4.16 oranži tähisega. Andmetest filtreeriti välja fikseeritud alg tundmatute lahendustega punktid, kuid kuna nende hulk mõõtmistel oli madal (1–7%), siis kasutati edasisel andmetöölusel kõiki mõõtmistulemusi. Tulemusfailidest (*.pos) kirjutati välja punktide koordinaadid (WGS84), kõrgused (ellipsoidist) ja mõõtmiste kellaajad (GPST). Koordinaadid konverteeriti geodeetilistest koordinaatidest L-EST97 koordinaatsüsteemi kasutades Maa-ameti koordinaatide kalkulaatorit (<https://gpa.maaamet.ee/calc/geo-lest/>).

Kontrollandmete kogumine toimus paralleelselt GNSS sensoriga mõõtmistele. Kontrollseadmega mõõdeti RTK meetodil, kusjuures parandite saamiseks kasutati ESTPOS püsijaamade võrku. Kontrollseade valis automaatselt lähima ESTPOS püsijaama baasjaamaks, millest edastati kontrollseadmesse parandid. Kontrollandmete eeldatav horisontaalne täpsus on 1–2 cm ning vertikaalkomponendi täpsus on 2–3 cm (Metsar *et al.*, 2018). Leica Viva GS15 mõõdetud kontrollandmetele tehti järeltöötlus tarkvaraga RTKLIB. 16.12.2021, 08.03.2022 ja 12.03.2022 kontrollandmed töödeldi kinemaatilisel ning baasjaamana andmetena kasutati GNSS Mustamäe tee püsijaama andmeid. Arvutustel kasutati täpseid efemeriide ja kellaparandeid. Täpsed efemeriidid ja kellaparandid saadi CDDIS kodulehelt https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/orbit_products.html.

Tulemusfailidest (*.pos) filtreeriti välja fikseeritud alg tundmatute lahendusega punktide koordinaadid (WGS84), kõrgused (ellipsoidist) ja mõõtmiste kellaajad (GPST). Koordinaadid konverteeriti geodeetilistest koordinaatidest L-EST97 koordinaatsüsteemi,

kasutades Maa-ameti koordinaatide kalkulaatorit (<https://gpa.maaamet.ee/calc/geolest/>).

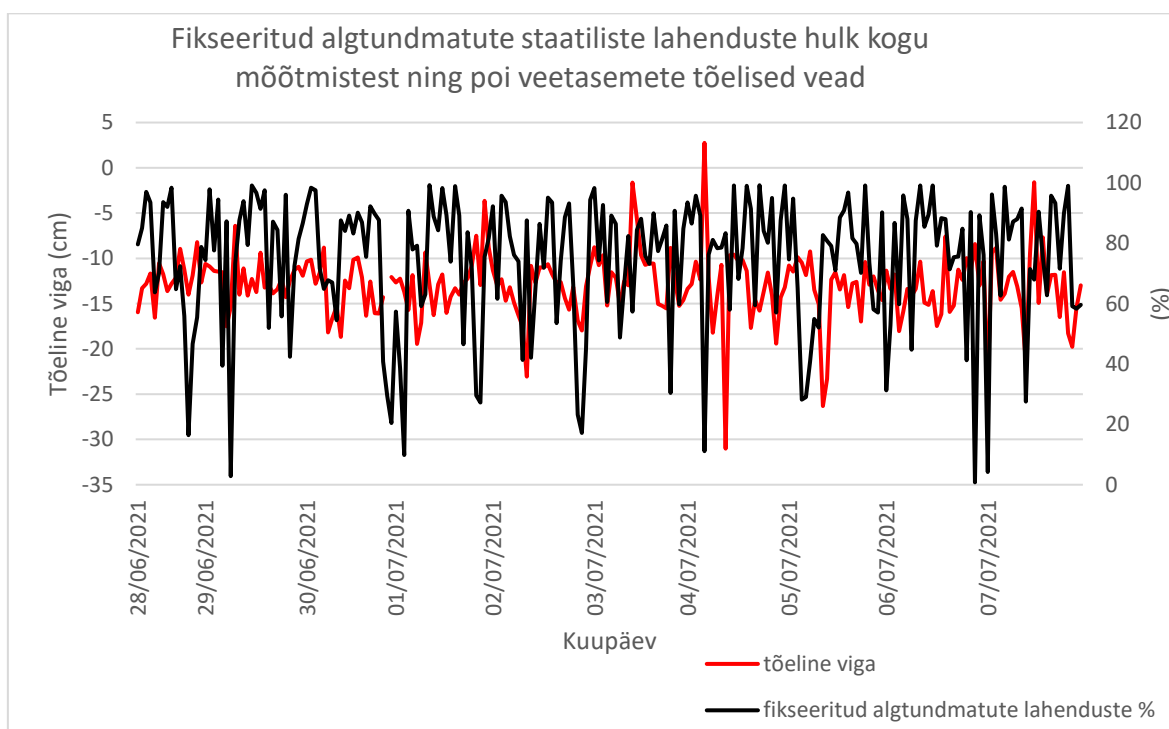
Järgmiseks korrigeeriti punktide kõrgused. Sensori antenni kõrgustest lahutati 1,735 m ning kontrollandmete kõrgustest 1,737 m. Nii saadi võrreldavad kõrgused. Seejärel viidi sensori ja kontrollseadme andmed kokku kellaaegade põhjal. Seejärel leiti samal kellaajal mõõdetud punktide vahemaa ($\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$) ning kõrguslik erinevus tõelise vea valemiga (Valem 4.1). Vahemaast lahutati 1,236 m, et saada sensori antenni asukoha tõeline viga. Mõõtmistulemuste põhjal anti ka hinnang GNSS sensori ajamõõtmise täpsusele.

5. ANALÜÜS

5.1 Veetaseme mõõtmistulemused

5.1.1 Mõõtmistulemused kontrollitud keskkonnas

Jaotises 4.3.1 mainiti, et perioodi 28.06-07.07.2022 mõõtmisandmeid töödeldi nii staatiliselt kui ka kinemaatiliselt. Järgnevalt on esitatud staatiliselt töödeldud mõõtmistulemuste analüüs. Staatilise andmetöötluse eesmärgiks on tulemuste analüüsi kaudu välja selgitada, kas sensori antennil on faasitsentri nihe. Nihke olemasolu korral saab staatiliselt töödeldud andmete põhjal määrata võimalikult täpselt sensori faasitsentri nihke väärtuse, kuna staatiliselt järeltöödeldud andmed on eeldatavasti stabiilsemad kui kinemaatiliselt töödeldud andmed. Joonisel 5.1 on kõrvutatud fikseeritud alg tundmatute lahenduste hulk kogu mõõtmiste arvust ning poi veetaseme mõõtmiste tõelised vead.



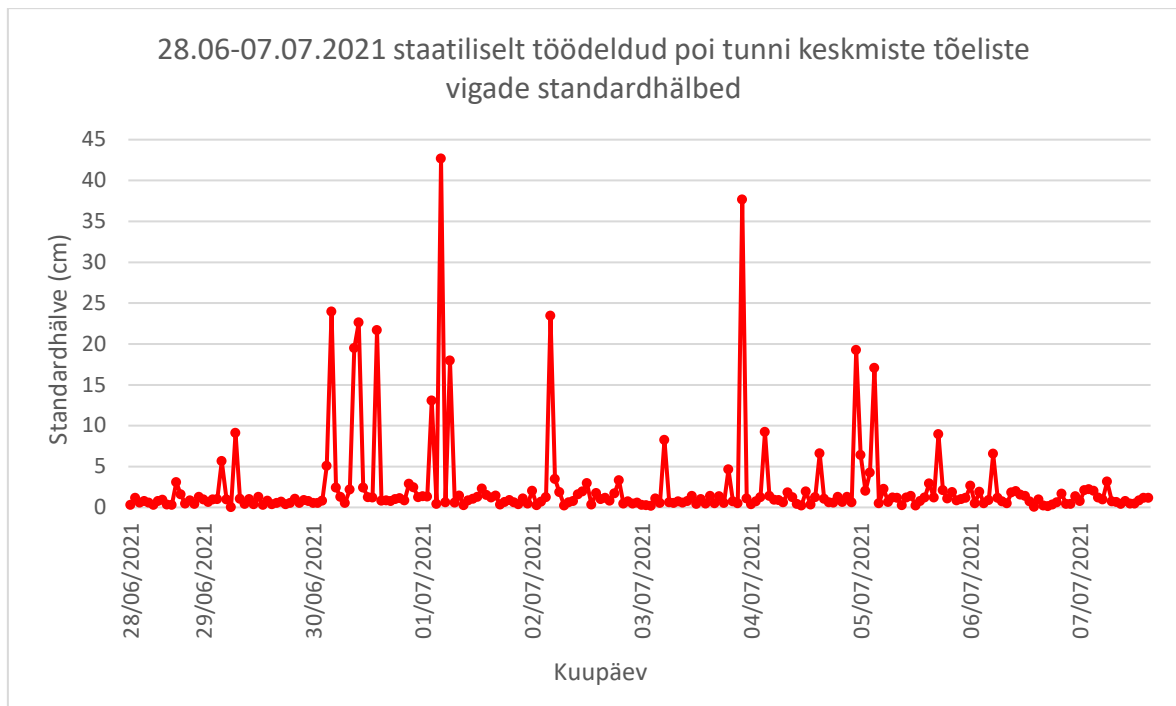
Joonis 5.1. Fikseeritud alg tundmatute staatiliste lahenduste hulk kogu mõõtmistest ning poi veetasemete tõelised vead

Fikseeritud alg tundmatute lahendustega punktide hulk on arvatud protsentuaalselt ühe 15 minutilise mõõtmisessiooni kogu mõõtmiste hulgast, milleks oli 900 mõõtmispunkti. GNSS sensori tõelised vead on arvatud ainult fikseeritud alg tundmatute lahendustega mõõtmispunktide põhjal. Tõeliste vigade väärtused on

arvutatud valemiga 4.1 ning kajastavad 15 minutiliste mõõtmisessioonide tõelisi keskmisi vigasid. Lihtsuse mõttes on need üldistatud tunni keskmisteks tõeliste vigade väärtusteks. Joonisel 5.1 pole kajastatud andmepunkte mõõtesessioonidel, mille fikseeritud alg tundmatute lahenduste hulk kogu mõõtmistest oli 0%, seega puuduvad ka nendel ajahetkedel kõrgusväärtused. Keskmiste tõeliste vigade andmetest on eemaldatud ka üks jäme viga. Jämeda veaga andmepunkt oli kuupäeval 30.06.2021 kell 20:00 (UTC), mille suurusjärg oli paar meetrit. Jämeda vea põhjus võib peituda mõõtmisessiooni fikseeritud alg tundmatute lahenduse hulgas. Nimelt 30.06.2021 kella 20:00 (UTC) ajal oli fikseeritud alg tundmatute lahenduste hulk kogu mõõtmistest vaid 29,4%.

Jooniselt 5.1 on näha, et tõelised vead on enamuses negatiivsete väärtustega ja need väärtused jäävad suures osas -10 kuni -15 cm vahele. Kuna väärtused on enamuses samamargilised ning samas suurusjärgus, siis võib sellest järeldada, et GNSS sensori antennil on faasitsentri nihe. Täpse faasitsentri nihke määramiseks arvutati kogu perioodi 28.06-07.07.2021 staatiliselt töödeldud mõõtmistulemuste põhjal keskmine tõeline viga, milleks oli -12,5 cm. See väärtus on eeldatav antenni faasitsentri vertikaalnihke väärtus.

Joonisel 5.2 on kujutatud iga tunni jooksul mõõdetud kõrguste tõeliste vigade standardhälbed, mis iseloomustavad GNSS sensori mõõtmistäpsust perioodil 28.06-07.07.2021. Tunnipõhised standardhälbe väärtused on arvutatud ainult fikseeritud alg tundmatute lahendustega mõõtmispunktide tõeliste vigade põhjal. Staatiliste mõõtmiste fikseeritud alg tundmatute osakaal kogu mõõtmisperioodist (28.06-07.07.2021) oli 72%. Perioodi 28.06-07.07.2021 kogu mõõtmiste standardhälve oli 12,3 cm, kuid Jooniselt 5.2 selgub, et enamuse mõõtmisessioonide standardhälbed jäävad alla 5 cm. Kui arvutada mõõtmisperioodi 28.06-07.07.2021 standardhälve kogu perioodi kõikide tundide keskmiste tõeliste vigade põhjal, on mõõtmisperioodi staatiliselt töödeldud mõõtmistulemuste standardhälbe väärtuseks 4,3 cm. Siinkohal tuleb arvestada, et kogu mõõtmisperioodi üksikutest punktides ei eemaldatud jämedaid vigasid (igat tunni jooksul tehtud mõõtmisi arvestades). Üks jäme viga eemaldati ainult tunni põhiste väärtustena saadud andmetest.

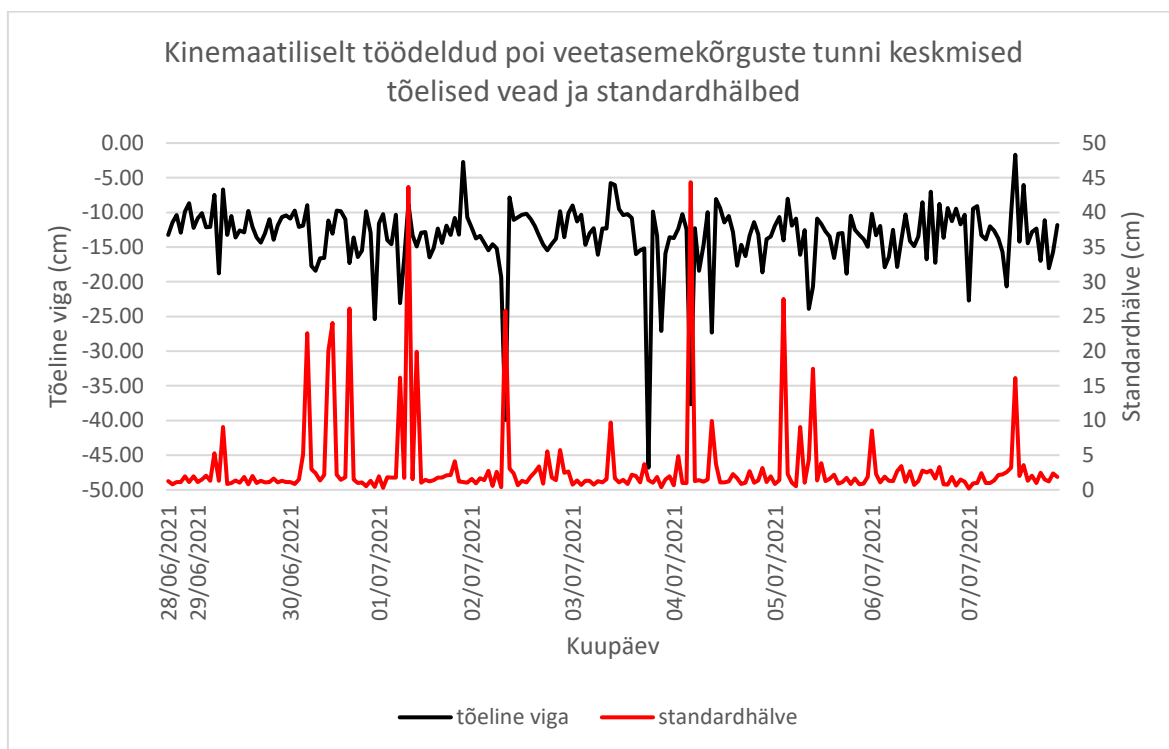


Joonis 5.2. Perioodi 28.06-07.07.2021 fikseeritud alg tundmatute staatiliste lahenduste poi tunni tõeliste vigade standardhälbed

Joonisel 5.3 on esitatud kinemaatilisel töödeldud poi andmete tunni keskmised tõelised vead ja iga tunni seesmised standardhälbed. Ka kinemaatilisel töödeldud andmete puhul kasutati tõeliste vigade leidmiseks ainult fikseeritud alg tundmatute lahendustega mõõtmispunktide kõrgusi. Kinemaatilisel töödeldud mõõtmisandmete fikseeritud alg tundmatute osakaal kogu mõõtmistest oli 67%, mis on madalam kui staatiliselt töödeldud andmete puhul (72%). Samuti eemaldati visuaalse meetodiga andmetest jämedad vead (kogu mõõtmisperioodis oli kinemaatilisel töödeldud tulemustes kaks jämedat viga). Võrreldes Jooniseid 5.1 ja 5.3 nähtub, et ka kinemaatilisel töödeldud mõõtmisandmete kõrgusväärtuste tõelised vead on peamiselt negatiivsed, ning jäävad reeglina -10 kuni -15 cm vahele. Kusjuures, kogu mõõtmisperioodi 28.06-07.07.2021 fikseeritud alg tundmatute lahenduste põhjal arvatud keskmine tõeline viga, ehk sellel juhul faasisentri nihe, on $-12,3$ cm, mis on ligilähedane staatilise andmetötluse tulemustest saadud väärtusele $-12,5$ cm.

Perioodi 28.06-07.07.2021 kogu kinemaatilisel töödeldud mõõtmisandmete standardhälve oli 13,0 cm, kuid jooniselt 5.3 selgub, et mõõtmisessioonide standardhälbed jäävad enamuses alla 5 cm. Kui arvutada mõõtmisperioodi 28.06-07.07.2021 standardhälve kogu perioodi kõikide tundide keskmiste tõeliste vigade põhjal, on mõõtmisperioodi kinemaatilisel töödeldud mõõtmistulemuste standardhälbe väärtuseks 4,9 cm. Siinkohal tuleb arvestada, et kogu mõõtmisperioodi üksikutest

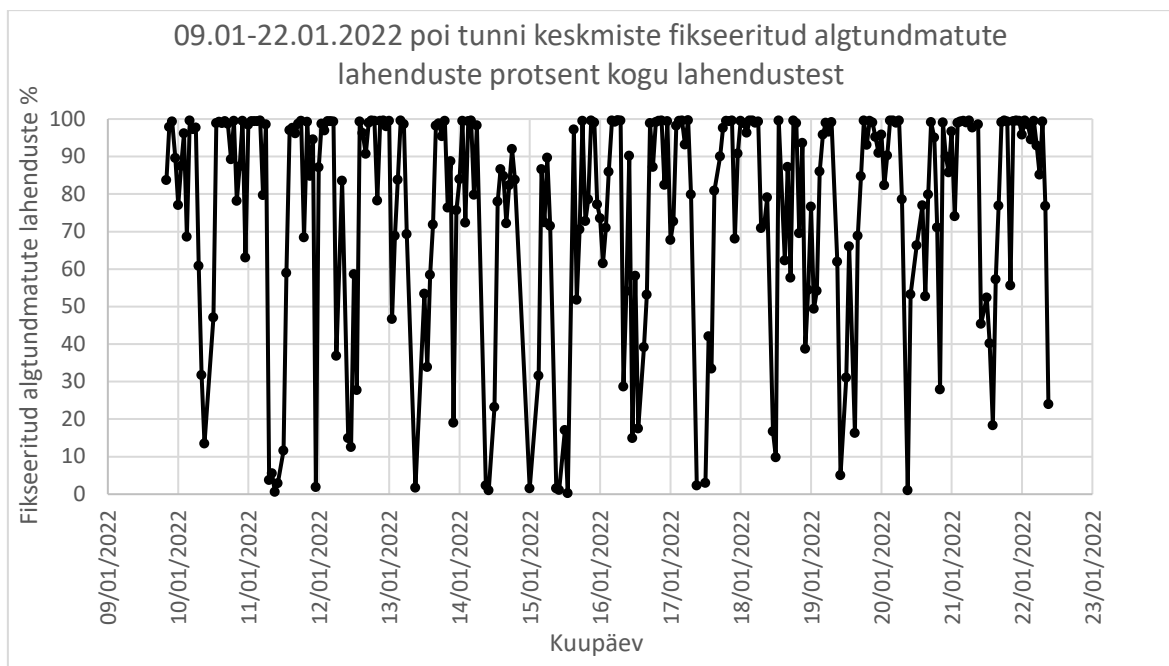
punktidest ei eemaldatud jämedaid vigu (iga tunni sees), vaid jämedad vead eemaldati ainult tunni põhiste väärtustena saadud andmetest. Jaotise alguses mainiti, et eeldatavasti on staatiliselt järeltöödeldud andmed stabiilsemad võrreldes kinemaatiliselt töödeldud andmetega. Seda eeldust kinnitavad joonistel 5.1 ja 5.3 esitatud tõeliste vigade väärtused. Staatilisel töötlusel tõeliste vigade väärtused varieeruvad vähem kui kinemaatilise töötuse käigus saadud tõelised vead.



Joonis 5.3. Fikseeritud algundmatute kinemaatiliste lahenduste poi veetasemekõrguste tunni keskmised tõelised vead ja standardhälbed

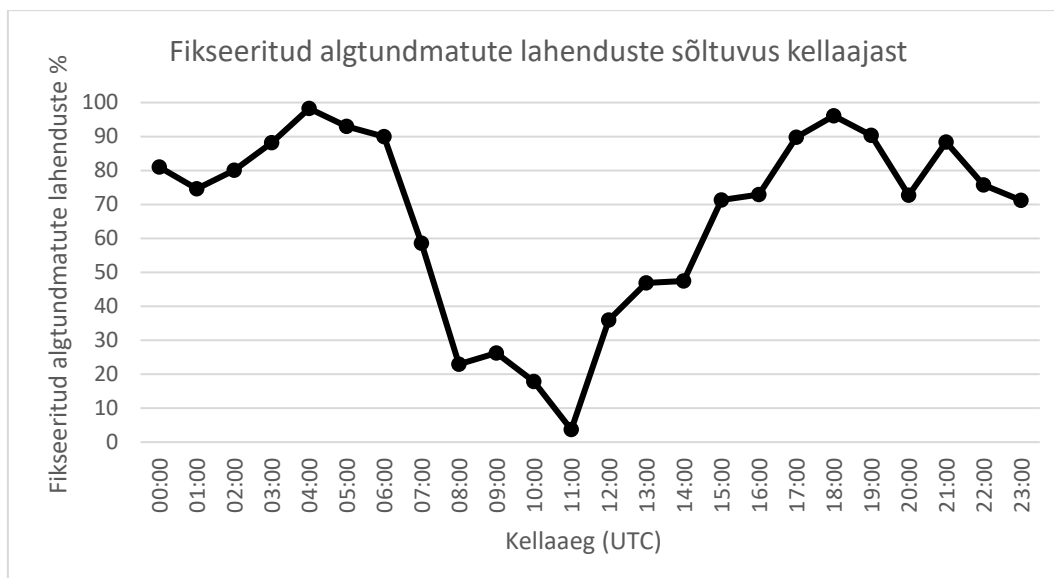
5.1.2 Mõõtmistulemused merel

Antud jaotises esitatud andmed on saadud kinemaatilise järeltöötuse tulemusena. Joonisel 5.4 on toodud poi tunni keskmiste fikseeritud algundmatute lahenduste hulk kogu lahendustest. Fikseeritud algundmatute lahendustega punktide hulk on arvatud protsentuaalselt kogu mõõtmiste hulgast, milleks oli 1800 mõõtmispunkti.



Joonis 5.4. Perioodil 09.01-22.01.2022 poi tunni keskmiste fikseeritud alg tundmatute kinemaatiliste lahenduste protsent kogu lahendustest

Joonisel 5.4 on näha suurt varieeruvust fikseeritud alg tundmatute lahendusprotsentides. Kontrollimaks, kas on teatud korrapärasus fikseeritud alg tundmatute lahenduste hulga ja kindlate kellaegade vahel, arutati perioodi vastavad kellaajalised tunni keskmised fikseeritud alg tundmatute lahenduste protsendid. Joonisel 5.5 esitatud tulemused kujutavad perioodi 09.01-22.01.2022 keskmistatud päeva fikseeritud alg tundmatute lahenduste protsendi sõltuvust kellaajast. Näiteks, et leida, mis on keskmiselt antud perioodi kella 12:00 ajal fikseeritud alg tundmatute lahenduste hulk kogu mõõtmistest, summeeriti iga päeva kella 12:00 vastavad fikseeritud alg tundmatute lahenduste protsendid ning jagati päevade arvuga.



Joonis 5.5. Fikseeritud algandmed lahenduste sõltuvus kellaajast

Jooniselt 5.5 on näha, et perioodil 09.01-22.01.2022 olid keskmiselt kellaaja vahemikus 7:00-14:00 (UTC) madalad fikseeritud algandmed lahenduste protsendid kogu lahenduste hulgast. Madalaim fikseeritud algandmed lahenduste protsent oli kell 11:00 (UTC).

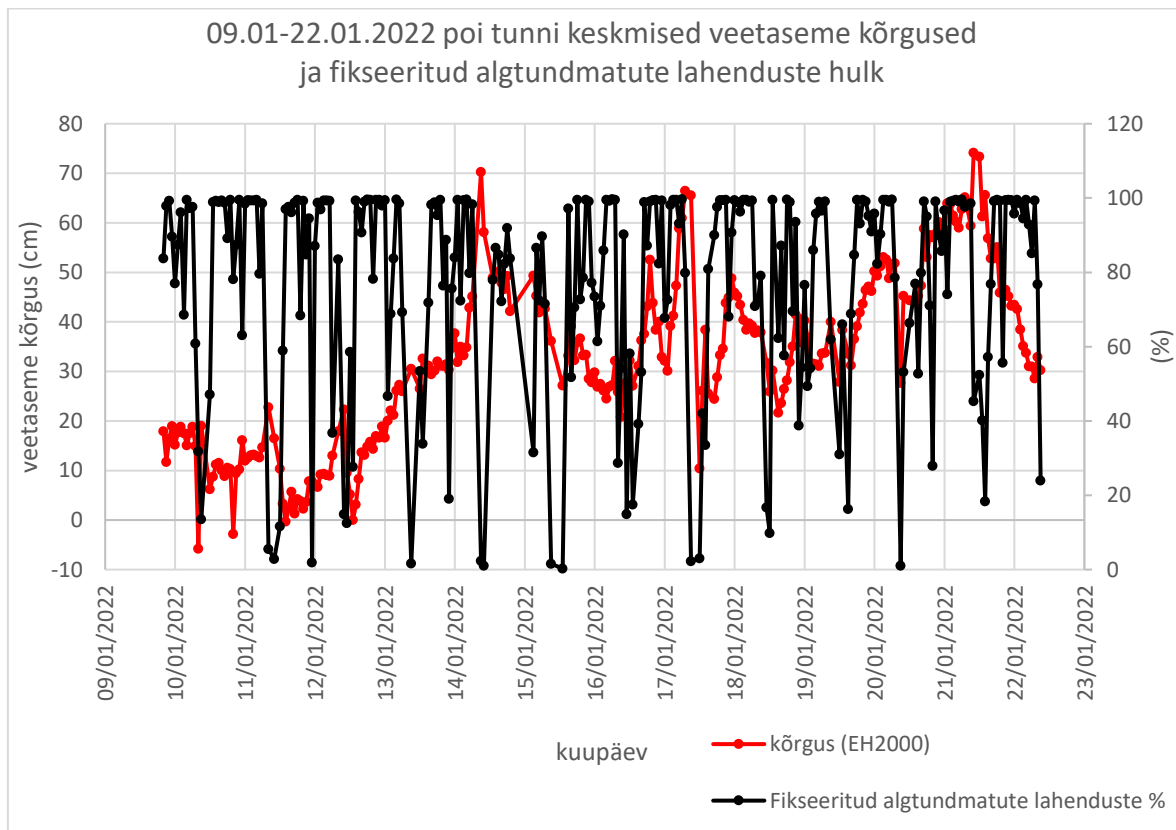
Perioodi 09.01-22.01.2022 poi mõõdetud mereveetasemete mõõtmistulemustes olid sarnaselt 28.06-07.07.2021 perioodile samuti sees jämedad vead. Perioodi 09.01-22.01.2022 jämedad vead eristati visuaalselt ning eemaldati manuaalselt. Jämedad vead tuvastati tabelis 5.1 esitatud järgmistel kuupäevadel ja kellaegadel.

Tabel 5.1. Perioodil 09.01-22.01.2022 esinenud jämedate vigade toimumisajad

Kuupäev	Kellaeg (UTC)
11.01.2022	7:00 9:00
13.01.2022	14:00
14.01.2022	12:00
15.01.2022	00:00 10:00 12:00
19.01.2022	10:00

Tabelist 5.1 on näha, et jämedad vead jäävad peamiselt vahemikku 7:00-14:00 (UTC), mis on ühtlasi ajavahemik, kus on madalad fikseeritud algandmed lahenduste protsendid. Seega on näiline seos madalate fikseeritud algandmed hulgast ja mõõtmisaegade vahel ning jämedate vigade ja madalate fikseeritud algandmed

lahenduse hulga vahel. 15.01.2022 kell 00:00 saadud jämeda veaga kõrgusväärtuse puhul on jooniselt 5.4 näha, et sellel ajahetkel saadud kõrguseväärtuse ajal oli fikseeritud alg tundmatute lahenduste protsent väga madal. Võttes arvesse joonistel 5.4 ja 5.5 ning tabelis 5.1 esitatud andmeid, võiks järeldada, et väheste fikseeritud alg tundmatute lahendustega võivad kaasuda vigased kõrgusväärtused. Järelduse kontrolliks on joonisel 5.6 kõrvutatud poi mereveetasemete tunni keskmised kõrgused ning tunni keskmised fikseeritud alg tundmatute lahenduste protsendid. Mereveetaseme tunni keskmistest kõrgustest on eemaldatud jämedad vead (Tabel 5.1). Mereveetaseme kõrgused on antud EH2000 kõrgussüsteemis, kuna veemõõdujaamade andmed, mida käsitletakse kontrollväärtustena poi veetaseme mõõdetud andmete valideerimiseks (vt jaotis 5.1.3), on samuti selles süsteemis.

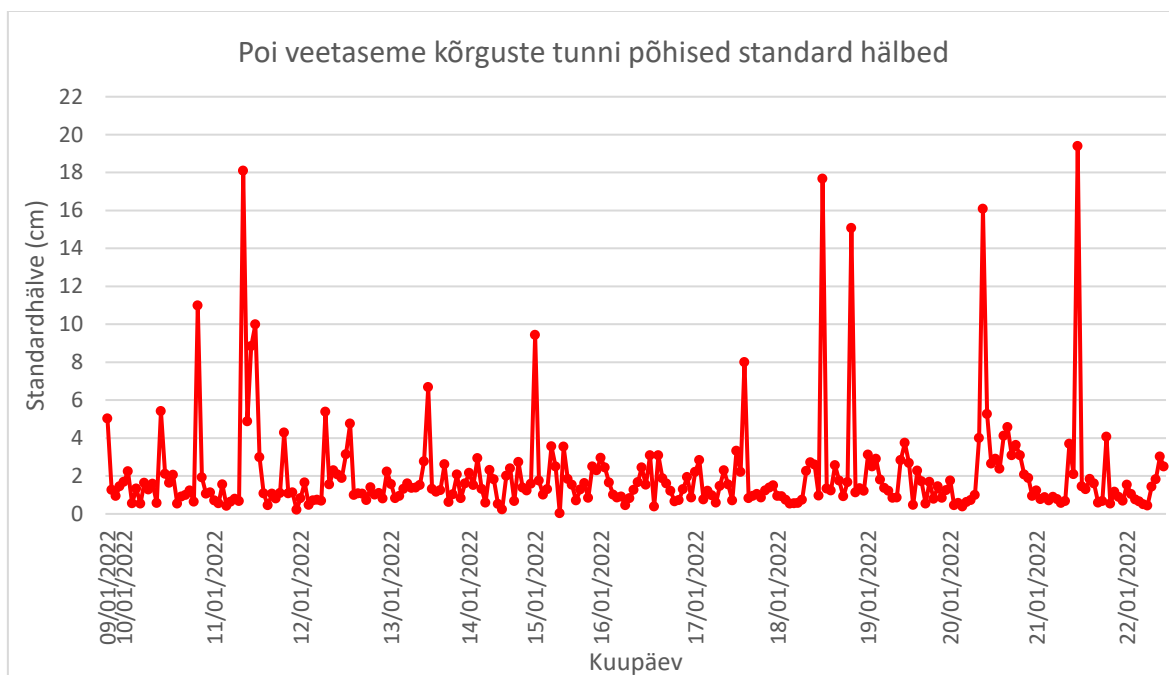


Joonis 5.6. Perioodi 09.01-22.01.2022 fikseeritud alg tundmatute kinemaatiliste lahenduste poi tunni keskmised veetaseme kõrgused ja fikseeritud alg tundmatute lahenduste hulk 15 minutiliste sessioonide kestel

Jooniselt 5.6 on näha, et mõningatel juhtudel, kus on mereveetase järsk muutus, on ka vastaval ajal madal fikseeritud alg tundmatute lahenduste hulk. Kuid on ka juhuseid, kus on madalad fikseeritud alg andmete lahenduste protsendid, aga mereveetaseme kõrgustes ei peegeldu sellega seonduvalt anomaaliaid. Seega ei saa kindlalt väita, et madal fikseeritud alg tundmatute lahenduste hulk tooks endaga kaasa ebatäpsed

mõõtmistulemused. Näilist seost madalate fikseeritud alg tundmatute lahenduste hulga ja mõõtmisaegade vahel saaks põhjendada halva satelliitide geometriaga taevalaotuses. Kõige madalam fikseeritud alg tundmatute lahenduste protsent oli kell 11:00 (UTC).

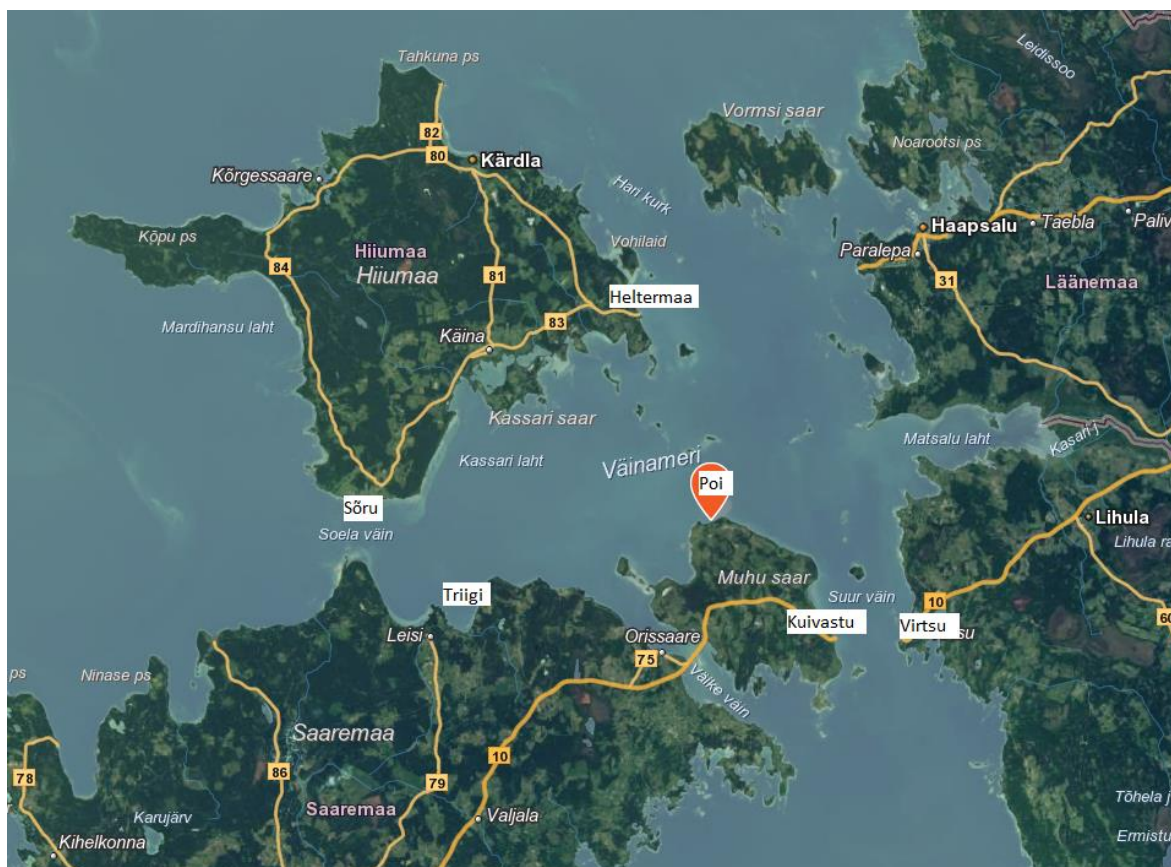
Joonisel 5.7 on kujutatud iga tunni jooksul mõõdetud kõrguste standardhälbed, kust on eemaldatud jämedate vigadega andmepunktid. Perioodi 09.01-22.01.2021 kogu mõõtmiste standardhälve oli 17,5 cm. Kui arvutada mõõtmisperioodi 09.01-22.01.2022 standardhälve kogu perioodi kõikide tundide mereveetasemete kõrguste põhjal, oleks mõõtmisperioodi standardhälve väärtuseks 16,8 cm. Siinkohal tuleb arvestada, et antud olukorras on tegemist dünaamilise keskkonnaga, kus standardhälvete väärtused kajastavad koos vigadega ka muutusi mõõdistuskeskkonnas. Seetõttu on otstarbekam anda mõõtmistäpsuse hinnang jääkväärtuste põhjal, mida on käsitletud jaotises 5.1.3.



Joonis 5.7. Fikseeritud alg tundmatute kinemaatiliste lahenduste poi veetaseme kõrguste tunni põhised standardhälbed

5.1.3 Võrdlused veemõõdujaama andmetega

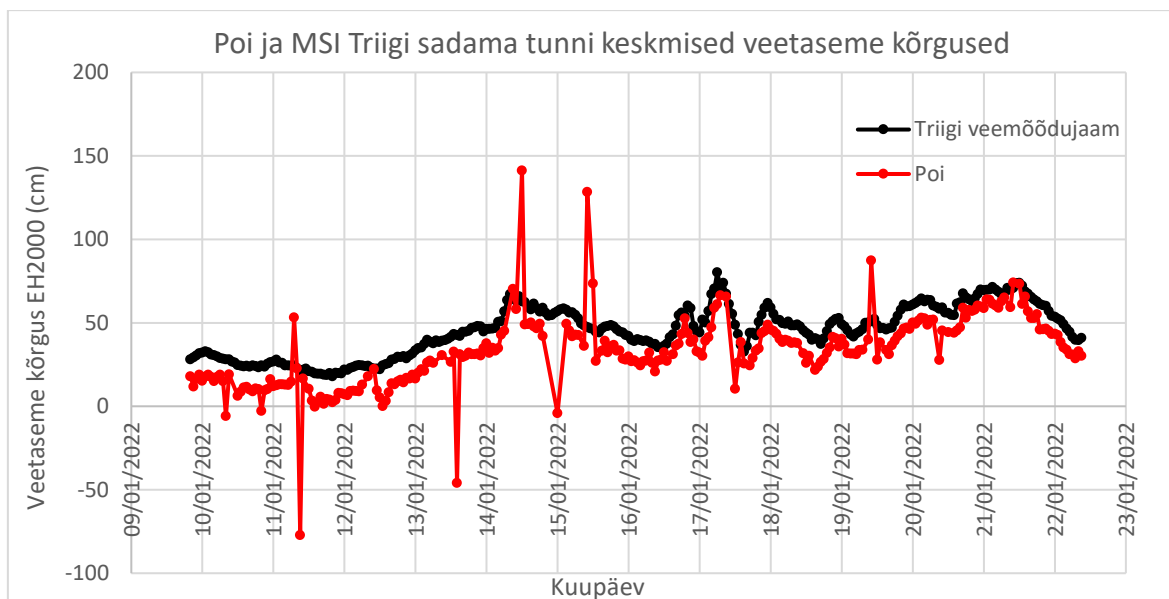
Joonisel 5.8 on näidatud Meresüsteemide Instituudi (MSI) veemõõdujaamade asukohad ning veetaseme mõõtmispoi asukoht.



Joonis 5.8. MSI merevaatlusjaamade ja veetaseme mõõtmispoi asukoht (X-GIS2.0, Maa-amet).

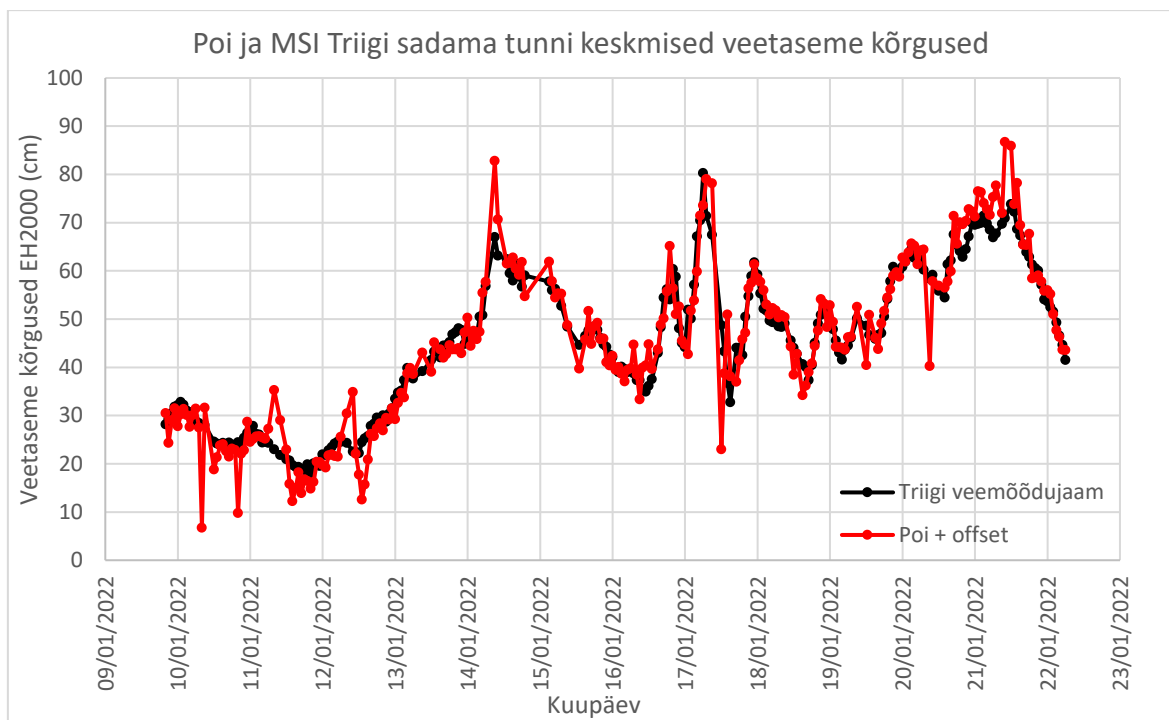
Antud jaotises on võrreldud poi mõõtmistulemusi ühe veemõõdujaama suhtes. Selleks veemõõdujaamaks valiti Triigi veemõõdujaam, mis asub Saaremaa põhjakaldal. Triigi veemõõdujaam valiti võrdlusjaamaks, kuna selles sadamas on sarnased mereveetaseme tingimused kui poi asukohas. Virtsu, Kuivastu ja Heltermaa veemõõdujaamad asuvad alas, kus neid mõjutavad Läänemere hoovused (vt hoovuste kaart <https://www.ilmateenistus.ee/meri/mereprognoosid/merevee-hoovused/>) ning Sõru veemõõdujaam asub kaugemal kui Triigi veemõõdujaam. Võrdlevad andmed teiste veemõõdujaamade kohta on esitatud lisa 5.

Joonisel 5.9 on kajastatud perioodi 09.01-22.01.2022 poi mõõdetud mereveetasemete tunni keskmised kõrgused ning MSI Triigi sadama veemõõdujaama mõõdetud veetaseme kõrgused. Jooniselt 5.9 ei ole eemaldatud jämedaid vigu ega parandatud algseid poi mõõdetud kõrgusi faasisentri nihke väärtusega, näitamaks millised näevad välja algsed järeltöödeldud madala hinnaklassi GNSS sensori mõõtmistulemused.



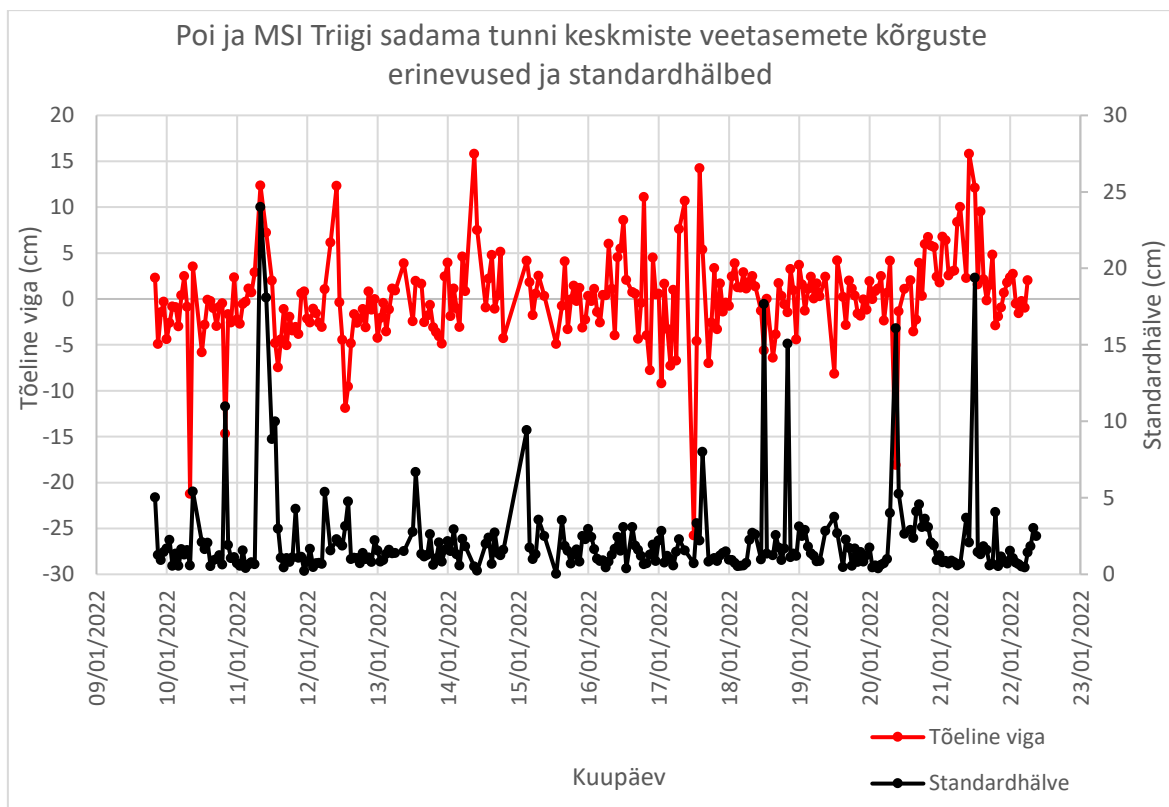
Joonis 5.9. Poi ja MSI Triigi sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused

Joonisel 5.9 on näha, et poi mõõdetud mereveetasemed on nihkes võrreldes Triigi veemõõdujaama mõõdetud kõrgusväärtustega. See nihe on negatiivse väärtusega. Perioodi 28.06-07.07.2021 andmete analüüsist (Jaotis 5.1.1) selgus, et GNSS sensori antennil on eeldatav faasisentri nihe väärtusega $-12,5$ cm. Ka Virtsu, Kuivastu, Heltermaa ja Sõru sadamates asuvate MSI veemõõdujaamade mõõdetud mereveetasemete võrdlemisel poi mõõdetud mereveetasemete kõrgustega nähtub faasisentri vertikaalsuunaline nihe (Lisa 5). Joonisel 5.10 on kõrvutatud poi mereveetaseme kõrgused, millest on eemaldatud jämedad vead (Tabel 5.1) ning lisatud eeldatav faasisentri nihe, ja MSI Triigi sadama veemõõdujaama mõõdetud mereveetaseme kõrgused.



Joonis 5.10. Poi ja MSI Triigi sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused, millele on lisatud sensori eeldatav faasisentri nihke väärtus ning eemaldatud on jämedad vead

Joonisel 5.10 esitatud andmed viitavad, et sensori antenni eeldatav faasisentri nihe väärtusega $-12,5$ cm peab paika, kuna faasisentri nihke paranduse sisse viimisel poi mõõtmistulemustesse kattuvad poi ja Triigi veemõõdujaama mõõdetud mereveetasemed. Sarnast tendentsi näeb ka teiste sadamate veemõõdujaamade võrdlustest (Lisa 5). Joonisel 5.11 on välja toodud poi mereveetaseme parandatud kõrguste ja MSI Triigi sadama veemõõdujaama mõõdetud veetaseme kõrguste erinevused, mis on arvatud tõelise vea valemiga (Valem 4.1). Jooniselt 5.11 on näha, et suur osa tõelistest vigadest jäävad vahemikku ± 5 cm. Joonisel 5.11 on esitatud ka iga tunni põhised jääkväärtuste standardhälbed, mis on arvatud tõeliste vigade põhjad (poi mereveetaseme mõõdetud kõrgus - veemõõdujaama poolt mõõdetud mereveetaseme kõrgus). Jääkväärtuste põhjal arvatud standardhälbed jäävad suures osas alla 5 sentimeetri. Kogu perioodi tunnipõhiste keskmiste tõeliste vigade standardhälve on 4,8 cm, mida võib pidada lõplikuks täpsushinnanguks.

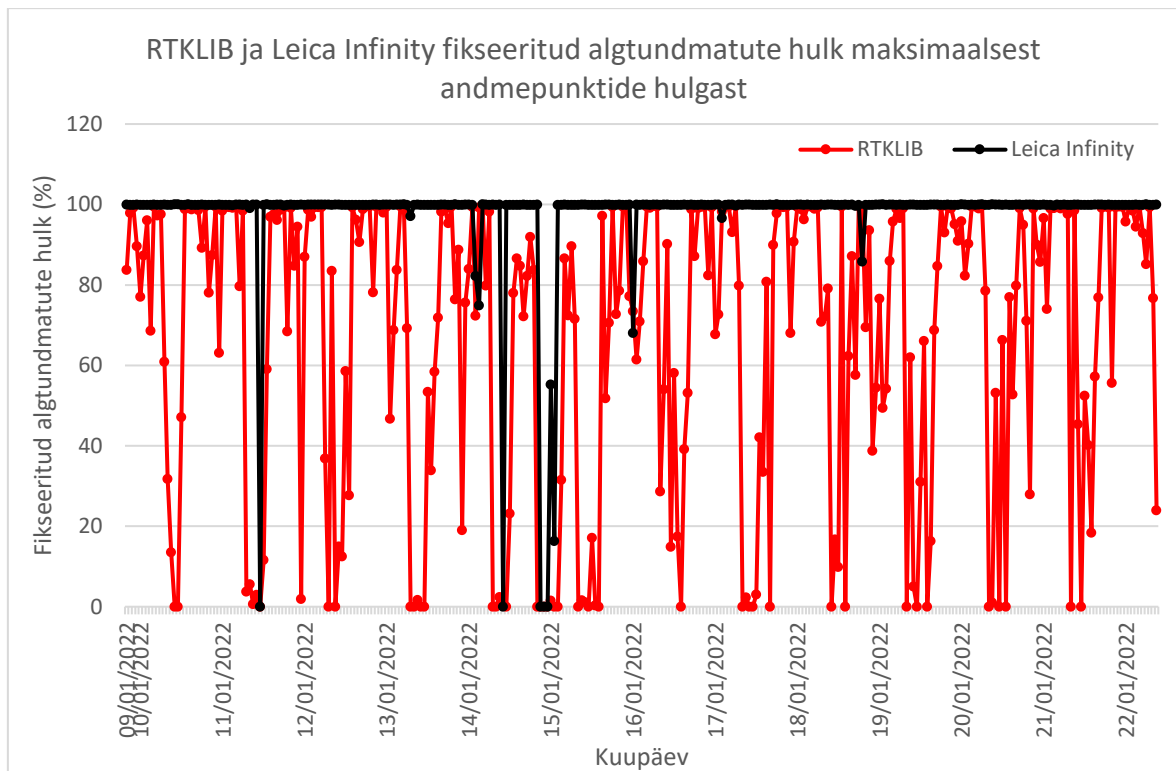


Joonis 5.11. Poi ja MSI Triigi sadama tunni keskmiste veetasemete kõrguste erinevused ja tunni põhised standardhälbed

5.1.4 Arvutused programmiga Leica Infinity

Üheks magistritöö eesmärgiks oli analüüsida vabavara tarkvara ja kommertstarkvara võimekust sensori andmeformaadi töötlemisel.

Joonisel 5.12 on kajastatud vabavara programmi RTKLIB ja kommertstarkvara Leica Infinity perioodil 09.01-22.01.2022 mõõdetud andmete fikseeritud algundmatute hulk maksimaalsest andmepunktide hulgast, milleks oli 1800 mõõtmispunkti. Jooniselt 5.12 ilmneb, et kahe tarkvaraga arvutatud fikseeritud algundmatute hulkade vahel on suur erinevus, kusjuures RTKLIB tarkvara fikseeritud algundmatute hulk on palju madalam kui Leica Infinity tarkvaraga saadud samade väärtuste hulk.



Joonis 5.12. RTKLIB ja Leica Infinity fikseeritud alg tundmatute hulk maksimaalsest andmepunktide hulgast

Jaotises 4.1.2 sai mainitud, et tarkvara Leica Infinity võtab mõõtmisandmed otse mõõtmisandmete algformaadist (*.ubx), kuid RTKLIB tarkvara kasutades tuleb enne andmed algformaadist RINEX formaati konverteerida (vt jaotis 4.1.1). Seega võib RTKLIB tarkvara poolt madalamate fikseeritud alg tundmatute hulga põhjuseks olla andmete kadu mõõtmisandmete algformaadist (*.ubx) RINEX formaati teisendamisel. Kusjuures, tarkvaraga Leica Infinity andmetöötluse keskmine fikseeritud alg tundmatute protsent mõõteperioodil 09.01-22.01.2022 on 98% ning RTKLIB tarkvaral vastavalt 63%. Kui eeldada, et andmete kaotus tuleneb RTKLIB tarkvara puhul andmeformaadi konverteerimisest, tähendab see, et RTKLIB tarkvara kasutades kaob 35% kvaliteetsetest mõõtmisandmetest. Joonisel 5.13 on välja toodud (*.ubx) formaadist konverteeritud RINEX (*.obs) faili väljavõte. Jooniselt 5.13 on näha, et arvutustesse on kaasatud satelliitsüsteemide GPS (G), GLONASS (R), Beidou (B), QZSS (J) ja SBAS (S) satelliidid.


```

3.04 OBSERVATION DATA M: Mixed RINEX VERSION / TYPE
CONVBIN demo5 b34b 20220201 182444 UTC PGM / RUN BY / DATE
log: 2022-01-10--22-00-59-010953000.ubx COMMENT
format: u-blox UBX COMMENT
format: u-blox UBX COMMENT
log: 2022-01-10--22-00-59-010953000.ubx COMMENT

MARKER NAME
MARKER NUMBER
MARKER TYPE
OBSERVER / AGENCY
REC # / TYPE / VERS
ANT # / TYPE
APPROX POSITION XYZ
ANTENNA: DELTA H/E/N
SYS / # / OBS TYPES
SYS / # / OBS TYPES
SYS / # / OBS TYPES
SYS / # / OBS TYPES
SYS / # / OBS TYPES
SYS / # / OBS TYPES
TIME OF FIRST OBS
TIME OF LAST OBS
SYS / PHASE SHIFT
SYS / PHASE SHIFT
SYS / PHASE SHIFT
SYS / PHASE SHIFT
SYS / PHASE SHIFT
SYS / PHASE SHIFT
SYS / PHASE SHIFT
SYS / PHASE SHIFT
SYS / PHASE SHIFT
SYS / PHASE SHIFT
GLONASS SLOT / FRQ #
GLONASS SLOT / FRQ #
GLONASS COD/PHS/BIS
END OF HEADER

3055397.2286 1307924.0015 5425528.2069
0.0000 0.0000 0.0000
G 8 C1C L1C D1C S1C C2X L2X D2X S2X
R 8 C1C L1C D1C S1C C2C L2C D2C S2C
J 8 C1C L1C D1C S1C C2X L2X D2X S2X
S 4 C1C L1C D1C S1C
C 8 C2I L2I D2I S2I C7I L7I D7I S7I
2022 01 10 22 01 11.9910000 GPS
2022 01 10 22 16 10.9910000 GPS
G L1C
G L2X 0.00000
R L1C
R L2C
J L1C
J L2X 0.00000
S L1C
C L2I
C L7I
9 R01 1 R02 -4 R08 6 R09 -2 R15 0 R16 -1 R17 4 R18 -3
R24 2
C1C 0.000 C1P 0.000 C2C 0.000 C2P 0.000

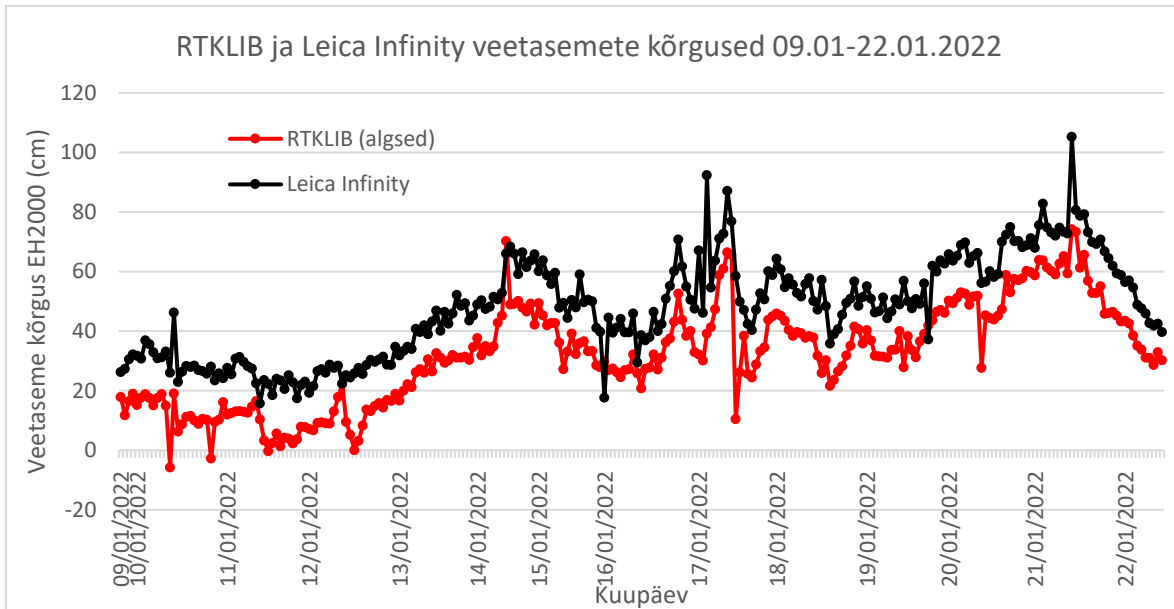
> 2022 01 10 22 01 11.9910000 0 33
G07 21659860.332 1 113823327.12212 -975.325 40.000 21659858.525 4 88693485.59213 -759.810 37.000
G08 19995425.833 1 105076663.26212 2595.543 40.000 19995428.426 1 81877935.89312 2022.685 42.000
G10 19417663.189 1 102040500.85811 2346.919 46.000 19417664.567 2 79512101.29112 1828.765 41.000
G15 20220619.440 1 106260066.31712 29.967 40.000 20220619.962 2 82800084.04013 23.163 39.000
G16 19076674.057 1 100248589.55411 -2786.958 43.000
G18 18792093.671 1 98753110.24111 -2961.162 45.000 18792092.784 2 76950468.97411 -2307.183 44.000
C25 23169735.214 1 1206500891.16712 -3413.094 43.000
C34 19028111.228 1 99084367.82811 132.444 46.000
C08 36633042.450 1 190757864.96014 -1691.365 34.000 36633036.468 1 147506071.63214 -1307.994 36.000
C11 19878155.206 1 103510766.82511 1419.579 44.000 19878151.461 1 80041075.75712 1098.237 41.000
C12 19234152.044 1 100157275.17612 -1572.716 42.000 19234148.728 1 77447946.57012 -1215.884 42.000
R02 19504746.777 1 104081063.89211 3722.245 47.000
R18 19040742.727 1 101640773.88211 2953.341 45.000 19040753.875 2 79053985.24512 2296.968 40.000
R09 20592865.468 1 109964753.21311 2830.105 46.000
R15 19452034.224 1 103945772.59011 -4271.563 50.000 19452045.201 1 80846757.32612 -3322.374 42.000
R01 17755379.918 1 94912681.82011 -214.396 46.000 17755392.453 2 73821054.90514 -166.672 36.000
G23 18125995.314 1 95252743.78811 290.570 44.000 18125995.690 2 74222935.93711 226.147 45.000
G26 21217421.237 1 111498294.85813 -4114.240 37.000 21217425.190 2 86881823.51512 -3205.920 40.000
G27 17821699.250 1 93633658.48811 916.078 47.000 17821700.205 2 72976884.36611 713.918 44.000
G30 22157051.651 1 116436085.10213 355.615 37.000 22157052.032 8 90729437.91115 277.301 35.000
J01 40479229.368 1 212719787.33613 -604.346 38.000
S25 37230980.758 1 195650109.94313 -183.020 36.000
C22 20636732.735 1 107460882.23511 -339.968 45.000
C13 35840992.885 1 186633453.76113 -1487.651 37.000 35840994.611 1 144316831.73513 -1150.566 36.000
C21 21618986.666 1 112575736.54412 2479.540 40.000
R24 18150415.627 1 97058429.93511 -3433.459 50.000 18150421.376 2 75489905.27513 -2670.319 38.000
R17 16346443.922 1 87473122.78711 137.189 50.000 16346450.665 2 68034678.95213 106.410 38.000
R08 19750026.586 1 105760494.29511 -3585.489 45.000 19750041.991 2 82258289.74114 -2788.658 36.000
S36 36621513.991 1 192447352.49013 -465.989 38.000
G13 21023790.190 1 110480760.12212 -776.215 41.000
S23 36486506.556 1 191737884.31732 -461.957 40.000
S26 36988390.337 1 194375295.17833 -501.592 36.000
C19 22574378.982 1 117550713.83212 -3100.212 40.000
> 2022 01 10 22 01 12.4910000 0 33
G07 21659953.194 1 113823815.095 2 -976.823 40.000 21659950.773 4 88693865.843 3 -761.218 37.000

```

Joonis 5.13. RINEX (*.obs) formaati konverteeritud (*.ubx) fail

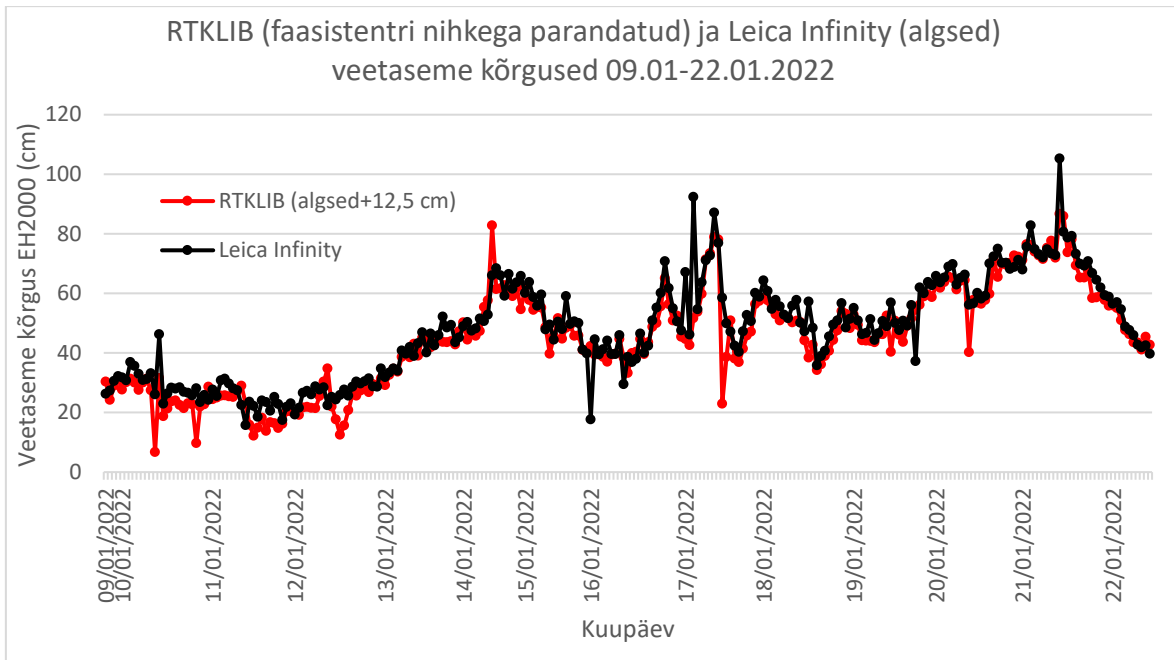
Joonisel 5.14 on välja toodud vabavaraprogrammi RTKLIB ja kommertstarkvara Leica Infinity töödeldud perioodi 09.01-22.01.2022 mereveetaseme kõrgusandmed. Kõrgusandmed on esitatud tunni keskmiste kõrgustena, mis on saadud fikseeritud algtundmatute lahendusega mõõtmispunktidelt. Joonisel 5.14 on kujutatud mõõtmispunktid, kus nii RTKLIB kui ka Leica Infinity tarkvaraga andmetöötamise tulemusel on saadud kõrgusväärtused samadel ajahetkedel (ühe tunni põhised). Kui näiteks RTKLIB tarkvaraga töötusel ei saadud 15.01.2022 kell 10:00 keskmist

mereveetaseme kõrgust, siis ka Leica Infinity poolt arvatatud punkti ei kaasatud joonisele 5.14. Joonisel 5.14 olevatest andmetest on välja võetud jämedad vead, kusjuures Leica Infinity tarkvaraga saadud tulemustes tuvastati 3 jämedat viga, mis kahel juhul olid samadel ajahetkedel kui RTKLIB andmetöötlusel eemaldatud jämedad vead (vt tabel 5.1).



Joonis 5.14. RTKLIB ja Leica Infinity arvatud mereveetasemete kõrgused 09.01-22.01.2022

Jooniselt 5.14 ilmneb, et kõrgusväärtustes on süstemaatiline erinevus RTKLIB ja Leica Infinity poolt töödeldud andmete vahel. Süstemaatiline erinevus jääb 10-20 cm vahele ning RTKLIB tarkvaraga arvatud mereveetaseme kõrgused on madalamad kui Leica Infinity tarkvaraga arvatud kõrgused. Joonisel 5.14 kujutatud RTKLIB tarkvaraga töödeldud kõrgusväärtustes ei ole arvestatud faasisentri nihet -12,5 cm. Arvestades asjaolu, et faasisentri nihke väärtus jääb tarkvaradega arvatud kõrguste süstemaatilise erinevuse suurusjärku, võib järeldada, et Leica Infinity tarkvara poolt töödeldud tulemustesse on GNSS sensori antenni faasisentri nihe kuidagimoodi juba sisse arvestatud. Järelduse kinnituseks on joonisel 5.15 esitatud vabavara programmi RTKLIB ja kommertstarkvara Leica Infinity töödeldud perioodi 09.01-22.01.2022 mereveetaseme kõrgusandmed, kusjuures RTKLIB programmi andmetöötlusena saadud kõrguste korral on nüüd arvesse võetud eeldatavat faasisentri nihet -12,5 cm.



Joonis 5.15. RTKLIB (faasitsentri nihkega parandatud) ja Leica Infinity (algsed) veetaseme kõrgused 09.01-22.01.2022

Joonisel 5.15 toodud andmed kinnitavad joonise 5.14 põhjal tehtud järeldust, et Leica Infinity tarkvara poolt töödeldud tulemustesse on GNSS sensori antenni faasitsentri nihe juba sisse arvestatud. Leica Infinity tarkvarast ei selgu, kuidas on nihe arvutatud ning mille põhjal antud nihe on arvesse võetud.

Leica Infinity tarkvaras on võimalik koostada GNSS töötluse raport. Joonisel 5.16 on esitatud kuupäeva 10.01.2022 GNSS töötluse raporti osa, mis puudutab faasitsentri vertikaalset nihet. Jooniselt 5.16 on näha, et faasitsentri nihe on millegipärast antud püsijaama antennile. Selle põhjuseks on ilmselt asjaolu, et tarkvaras pole määratud sensori antenni andmeid (st tegemist on tundmatu antennitüübiga). Võiks eeldada, et juhul kui programmis oleks olemas sensori antenni andmed, siis vastav parand oleks antud sensori antenni kohta.

Phase Center Offset

GPS	Reference - LEIAR25.R4 LEIT		Rover - Unknown	
	L1	L2	L1	L2
East	0.0010 m	0.0001 m	-	-
North	0.0006 m	0.0001 m	-	-
Up	0.1583 m	0.1540 m	-	-

GLONASS	L1	L2	L1	L2
East	0.0010 m	0.0001 m	-	-
North	0.0006 m	0.0001 m	-	-
Up	0.1583 m	0.1540 m	-	-

Joonis 5.16. Kuupäeva 10.01.2022 GNSS töötluse raport (Leica Infinity kuvatõmmis)

Leica Infinity tarkvaraga arvatud mereveetaseme tunnipõhistest kõrgustest leiti tõeline viga kasutades Triigi sadama veemõõdujaama mõõdetud mereveetaseme kõrgusi tegelike väärtustena (Valem 4.1). Leica Infinity tarkvaraga töödeldud andmete jääkväärtuste (tõelised vead) põhjal arvatud perioodi tunnipõhiste keskmiste tõeliste vigade standardhälve on 5,6 cm, kusjuures RTKLIB tarkvaraga töödeldud andmete põhjal leitud väärtus oli 4,8 cm.

5.1.5 Järeldused

Kasutatud antennil näib olevat faasitsentri nihe väärtusega $-12,5$ cm, mis leiti perioodi 28.06-07.07.2021 andmete põhjal. Tulemust toetavad ka perioodi 09.01-22.01.2022 mõõtmisandmed. Seda on näha näiteks Triigi veemõõdujaama veetaseme kõrguste ja poi veetaseme kõrguste joonistelt (Joonis 5.10), kus algseid poi veetaseme kõrgusi on parandatud faasitsentri nihke väärtusega. Faasitsentri nihke väärtuse sattumine mõõtmistulemustesse võib tuleneda asjaolust, et GNSS sensori antenni andmeid ei ole kirjeldatud IGS (*International GNSS Service*) poolt peetavas ANTEX (*ANTenna EXchange format*) failis (*.atx). Kuna sensori antenni andmed polnud kättesaadavad kasutatud programmis RTKLIB, siis arvutusprogramm ei osanud sensori faasitsentri nihet arvutustes arvesse võtta, mistõttu jäi vertikaalne nihe lõpptulemustesse sisse. Selleks, et faasitsentri nihet saaks järeltöötuse käigus arvesse võtta, on esmalt vaja individuaalset kalibreerida GNSS sensorite antennid. Antennide kalibreerimine on töö- ja ajamahukas protsess ning kahandab oluliselt sensori madalast maksumusest tulenevat eelist.

Joonisel 5.14 on näha, et vabavara programmi RTKLIB ja kommertstarkvara Leica Infinity töödeldud kõrgusväärtused järgivad sarnast tendentsi, kuid algsed RTKLIB programmiga arvatud kõrgused on kindla väärtuse võrra madalamal Leica Infinity programmiga saadud kõrgusväärtustest. Jooniselt 5.15 on näha, et see kõrguste erinevuste väärtus kaob, kui arvestada faasitsentri nihet $-12,5$ cm, mis ühtib eelmises lõigus kirjeldatuga. Seega arvestab tarkvara Leica Infinity andmetöötlusel faasitsentri nihke väärtust, kuid pole selge, kuidas see parand on arvatatud.

Jooniselt 5.12 selgub, et kommertstarkvaraga Leica Infinity töödeldud andmete fikseeritud alg tundmatute hulk maksimaalsest andmepunktide hulgast on palju kõrgem kui vabavaratarkvaraga RTKLIB töödeldud andmete korral. Põhjuseks võib olla asjaolu, et Leica Infinity töötleb andmeid otse *.ubx andmeformaadist, kuid RTKLIB vajab

andmetöötluks RINEX formaadis andmeid. Seega 35% andmekadu RTKLIB tarkvara kasutades võib tuleneda andmete konverteerimisest.

Tabelis 5.2 on välja toodud kogu 09.01-22.01.2022 perioodi poi veetaseme kõrguste keskmised tõelised vead ning perioodi tunnipõhiste keskmiste tõeliste vigade standardhälbed (iga kasutatud veemõõdujaama suhtes; vt ka Lisa 5). Tabelist 5.2 nähtub, et Triigi ei ole poi asukohale kõige lähedasem veemõõdujaam, kuid poi ja Triigi sadamas mõõdetud mereveetasemete kõrguste keskmine tõeline viga on väiksem võrreldes teiste veemõõdujaamadega. Samasugust tendentsi näeb ka tõeliste vigade põhjal arvatud standardhälbe väärtusest. Seega võib järeldada, et merevee dünaamilised protsessid on poi asukohas ja Triigi sadamas sarnased. Küll aga ei nähtu Tabeli 5.2 põhjal, et veemõõdujaama asukoha kauguse ja standardhälbe väärtuste vahel oleks seaduspära. Seaduspärasuse puudumine võib tuleneda asjaolust, et meri on dünaamiline keskkond, ning mõõtmisolud on erinevad igas sadamas. Näiteks mõjutavad Virtsu, Kuivastu ja Heltermaa sadamates asuvaid veemõõdujaamasid Läänemere hoovused.

Tabel 5.2. Perioodi 09.01-22.01.2022 poi veetaseme kõrguste keskmised tõelised vead ning perioodi tunnipõhiste keskmiste tõeliste vigade standardhälbed

Veemõõdujaam	Poi kaugus veemõõdujaamast (km)	Poi ja veemõõdujaama kõrguste keskmine tõeline viga (cm)	Poi - (-12,5) cm ja veemõõdujaama kõrguste keskmine tõeline viga (cm)	Standardhälve (cm)
MSI Virtsu sadam	23,0	-14,5	-1,9	9,7
MSI Kuivastu sadam	18,0	-15,6	-3,0	8,3
MSI Triigi sadam	28,0	-12,5	0,1	4,8
MSI Sõru sadam	37,5	-9,4	3,1	8,3
MSI Heltermaa sadam	21,5	-11,6	0,9	5,2

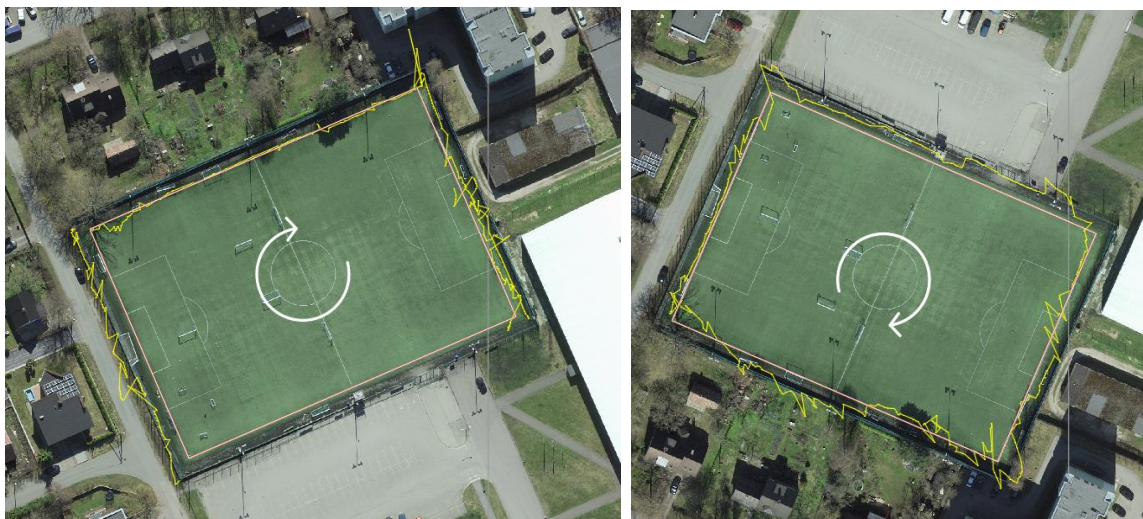
5.2 Kindla geomeetriaga kontuuride mõõtmistulemused

Jalgpalliväljakute mõõtmistulemuste põhjal arvutati väljaku külgede sirgjoonte pikkused nii sensori kui ka kontrollseadmega. Joonte pikkuste arvutamisel kasutati kahte meetodit:

- 1) mõõdetud algus- ja lõpp-punktide põhjal arvutatud sirgete pikkused (arvestatud on ainult joonte otspunkte);
- 2) kõikide mõõdetud punktide põhjal arvutatud sirgete pikkused (arvestatud on lisaks joonte otspunktidele ka vahepealseid punkte).

5.2.1 Kotka jalgpallistaadion

Kotka jalgpallistaadionil mõõdeti väljaku välimised küljejooned. Joonisel 5.17 on näidatud Kotka jalgpallistaadioni mõõtmiste trajektoor mõlemas suunas 20.02.2022 (st esimene ja teine käik).



Joonis 5.17. 20.02.2022 mõõdetud Kotka jalgpallistaadioni trajektoori esimene (vasakul) ja teine käik (paremal)

Joonisel 5.17 kujutatud arvutuslikud trajektoorid ei ole paraku sirged. Halbade mõõtmistulemuste põhjus tuleneb kõige tõenäolisemalt suletud taevalaotusest mõõtmiste ajal. Näiteks varjasid vastuvõtja taevalaotust väljakut ümbritsev traataed ning suured hooned väljaku kõrval. Mõõtmistäpsust võis mõjutada ka antenni madal asetus mõõtmistel (vt jaotis 4.4).

Tabelis 5.3 on esitatud kontrollsirgete pikkuste väärtused ning madala hinnaklassi GNSS sensoriga mõõdetud mõõtmispunktide põhjal arvutatud sirgete pikkused mõlema käigu kohta kasutades kahte erinevat meetodit (Jaotis 5.2). Tabelis 5.4 on toodud kontrollseadme ning sensoriga mõõdetud väärtuste erinevused.

Tabel 5.3. Kontrollseadmega vs sensoriga mõõdetud tulemused (20.02.2022)

Sirge	Kontrollväärtus	Esimene käik		Teine käik	
		Algus- ja lõpp-punkti põhjal arvatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvatud sirge	Algus- ja lõpp-punkti põhjal arvatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvatud sirge
s1	70,16	76,72	154,33	66,21	89,27
s2	100,11	101,16	125,10	94,04	211,67
s3	70,08	71,77	149,80	71,94	131,78
s4	100,15	108,24	-	103,41	126,45

Tabel 5.4. Erinevused kontrollseadmega ja sensoriga mõõdetud väärtuste vahel (20.02.2022)

Sirge	Esimene käik		Teine käik	
	Algus- ja lõpp-punkti põhjal arvatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvatud sirge	Algus- ja lõpp-punkti põhjal arvatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvatud sirge
Erinevus (m)				
s1	6,56	84,18	-3,94	19,11
s2	1,05	24,99	-6,07	111,56
s3	1,69	79,72	1,86	61,70
s4	8,09	-	3,26	26,30
Erinevus (%)				
s1	9,4	120,0	-5,6	27,2
s2	1,0	25,0	-6,1	111,4
s3	2,4	113,8	2,7	88,0
s4	8,1	-	3,3	26,3

Tabelitest 5.3 ja 5.4 järeldub, et sensoriga saadud tulemused erinevad oluliselt tõelistest tulemustest. Näiteks tabelist 5.4 nähtub, et erinevused sirgete pikkustes mõõdetuna alg- ja lõpp-punktide vahel jäävad vahemikku -6% kuni +10%. Erinevused arvestades sirgete pikkuste arvutamisel kõiki punkte on aga kordades suuremad. Sellest võib järeldada, et osaliselt antenni madala asukoha tõttu, kuid peamiselt varjatud taevalaotuse tõttu, ei olnud võimalik saavutada täpseid mõõtmistulemusi.

5.2.2 Kuressaare jalgpallistaadion

Kuressaare jalgpallistaadionil mõõdeti täisväljak, poolväljak ja keskring. Joonisel 5.18 on toodud Kuressaare jalgpalliväljaku täisväljaku mõõtmiste trajektoor (20.03.2022).



Joonis 5.18. Kuressaare jalgpalliväljaku täisväljaku mõõtmiste trajektoori (20.03.2022) esimene (vasakul) ja teine käik (paremal)

Jooniselt 5.18 on näha, et mõlema käigu trajektoorid järgivad jalgpalliväljakute joonte kuju. 20.03.2022 tehtud mõõtmistel paigutati antenn kõrgemale, kuna 20.03.2022 mõõtmistulemustest selgus, et madal antenni asukoht võib pärssida oluliselt mõõtmistäpsust. Samuti tuleks tähele panna, et joonisel 5.18 kujutatud jalgpalliväljaku ümbruses pole kõrgeid hooneid ega rajatisi, mis varjaksid suurel määral taevaalaotuse avatust. Siiski ümbritses väljakut metallaad, mis võis põhjustada osalist taevaalaotuse suletust.

Tabelis 5.5 on toodud kontrollsirgete pikkuste väärtused ning sensori mõõtmispunktide põhjal erinevate meetoditega arvatud sirgete pikkused. Tabelis 5.6 on esitatud kontrollseadme ning sensori mõõtmispunktide erinevused kontrollsirgete pikkustest.

Tabel 5.5. Kontrollseadmega vs sensoriga mõõdetud tulemused (20.03.2022, täisväljak)

Sirge	Kontrollväärtus	Esimene käik		Teine käik	
		Algus- ja lõpppunkti põhjal arvatatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvatatud sirge	Algus- ja lõpppunkti põhjal arvatatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvatatud sirge
s1	63,92	63,99	69,37	63,79	63,97
s2	99,88	101,95	114,44	94,24	95,11
s3	63,90	64,97	65,17	58,47	59,48
s4	99,90	100,78	102,00	99,39	99,45

Tabel 5.6. Erinevused kontrollseadmega ja sensoriga mõõdetud väärtuste vahel (20.03.2022, täisväljak)

Sirge	Esimene käik		Teine käik	
	Algus- ja lõpp-punkti põhjal arvatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvatud sirge	Algus- ja lõpp-punkti põhjal arvatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvatud sirge
Erinevus (m)				
s1	0,07	5,44	-0,13	0,05
s2	2,07	14,55	-5,64	-4,77
s3	1,07	1,27	-5,43	-4,43
s4	0,89	2,11	-0,51	-0,44
Erinevus (%)				
s1	0,1	8,5	-0,2	0,1
s2	2,1	14,6	-5,6	-4,8
s3	1,7	2,0	-8,5	-6,9
s4	0,9	2,1	-0,5	-0,4

Tabelis 5.6 väljatoodud mõõtmistulemuste erinevused reaalistest väärtustest on paremad kui 20.02.2022 mõõtmistulemuste korral (vt tabel 5.4). Tabelist 5.6 nähtub, et erinevused sirgete pikkustes mõõdetuna alg- ja lõpp-punktide vahel jäävad vahemikku -9% kuni +15%. Erinevused kõikide punktide põhjal arvatud sirgete pikkustes on sarnases suurusjärgus. Tabelist 5.6 nähtub süstemaatilisus erinevustes. Esimese käigu puhul on erinevused positiivsed ja teise käigu puhul negatiivsed.

Joonisel 5.19 on näidatud Kuressaare jalgpalliväljaku poolväljaku mõõtmiste trajektoor (20.03.2022). Jooniselt selgub, et mõõtmiste trajektoorid ei järgi täpselt jalgpalliväljaku jooni, kuigi tingimused olid samad kui täisväljaku mõõtmisel, kus trajektoorid jälgisid väljaku kuju.



Joonis 5.19. Kuressaare jalgpalliväljaku poolväljaku mõõtmiste trajektoor (20.03.2022), esimene käik (vasakul) ja teine käik (paremal)

Tabelis 5.7 on toodud kontrollväärtused sirgete pikkustele ning sensori mõõtmispunktide põhjal erinevate meetoditega arvutatud sirgete pikkused. Tabelis 5.8 on toodud kontrollseadme ning sensori mõõtmispunktide erinevused kontrollsirgete pikkustest.

Tabel 5.7. Kontrollseadmega vs sensoriga mõõdetud tulemused (20.03.2022, poolväljak)

Sirge	Kontrollväärtus	Esimene käik		Teine käik	
		Algus- ja lõpp-punkti põhjal arvutatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvutatud sirge	Algus- ja lõpp-punkti põhjal arvutatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvutatud sirge
s1	63,91	65,88	82,03	64,18	64,47
s2	49,95	51,54	51,73	47,16	72,90
s3	63,90	62,03	62,10	58,27	61,29
s4	49,97	49,62	49,78	44,43	47,46

Tabel 5.8. Erinevused kontrollseadmega ja sensoriga mõõdetud väärtuste vahel (20.03.2022, poolväljak)

Sirge	Esimene käik		Teine käik	
	Algus- ja lõpp-punkti põhjal arvatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvatud sirge	Algus- ja lõpp-punkti põhjal arvatud sirge	Kõikide punktide põhjal arvatud sirge
Erinevused (m)				
s1	1,96	18,12	0,26	0,55
s2	1,58	1,78	-2,80	22,95
s3	-1,88	-1,80	-5,64	-2,62
s4	-0,35	-0,18	-5,54	-2,51
Erinevused (%)				
s1	3,1	28,3	0,4	0,9
s2	3,2	3,6	-5,6	45,9
s3	-2,9	-2,8	-8,8	-4,1
s4	-0,7	-0,4	-11,1	-5,0

Tabelist 5.8 nähtub, et erinevused sirgete pikkustes mõõdetuna alg- ja lõpp-punktide vahel jäävad vahemikku -11% kuni -4% . Erinevused kõikide punktide põhjal arvatud sirgete pikkustes on sarnases suurusjärgus, kuid kahel juhul on erinevused oluliselt suuremad (näiteks s1 puhul 28% ja s2 puhul 45%).

Joonisel 5.20 on näidatud Kuressaare jalgpallistaadioni keskringi mõõtmiste trajektoori. On näha, et mõõtmistel on saadud tajutav ringi kujuline trajektoori, kuigi trajektoori kujud pole ideaalsed ringid.



Joonis 5.20. Kuressaare jalgpallistaadioni keskringi mõõtmiste trajektoori (20.03.2022) esimene (vasakul) ja teine käik (paremal)

Tabelis 5.9 on toodud kontrollseadme ja sensori mõõtmispunktide põhjal arvatud keskringide übermõõtu väärtused. On näha, et übermõõtu erinevus jääb vahemikku 1 kuni 3%. Ringjoone mõõtmisel on saadud kõige väiksemad protsentuaalsed erinevused tegelikest väärtustest, mis võib olla tingitud avatud taevaotusest väljaku keskel.

Tabel 5.9. Jalgpalliväljaku keskringi übermõõtu arvutused ja nende erinevused mõõdetuna kontrollseadmega vs sensoriga (20.03.2022)

		Esimene käik	Teine käik
	Kontroll väärtus	Kõikide punktide põhjal arvatud	Kõikide punktide põhjal arvatud
Übermõõt (m)	57,32	58,81	58,00
Erinevus			
Meetrites (m)		1,49	0,67
Protsentides (%)		2,6	1,2

5.2.3 Järeldused

20.02.2022 mõõtmistulemused on kehvemad kui 20.03.2022 tehtud mõõtmised. Kõige tõenäolisem põhjus selleks on madal antenni asetus 20.02.2022 teostatud mõõtmisel. Seega järgnevalt tehakse järeldused 20.03.2022 teostatud mõõtmiste põhjal.

Kotka jalgpallistaadionil teostatud mõõtmisel asus andmetöötlusel baasjaamana kasutatav püsijaam 2 km kaugusel. Kuressaare jalgpallistaadionil teostatud mõõtmisel, asus baasjaam 800 m kaugusel. Kuigi Kotka jalgpallistaadionil teostatud mõõtmiste tulemused olid kehvemad kui Kuressaare jalgpallistaadionil teostatud mõõtmised ei ole tõenäoline, et 1,2 km erinevus baasjaamade kauguses oleks kaasa toonud niivõrd suured erinevused mõõtmisvigades.

Kuigi 20.03.2022 täisväljaku ja keskringi mõõdetud trajektooride joonised andsid lootust headele tulemustele, siis võrreldes mõõtmistulemusi reaalsete väärtustega on näha, et see nii päris ei ole. Üksikute sirgete mõõtmisel jäävad mõõtmisvead reeglina mõne meetri suurusjärku, kuid esineb ka väga suuri erinevusi kontrollväärtustest.

Täisväljaku esimese käigu ning poolväljaku esimese ja teise käigu puhul on näha, et sirgete pikkused, mis on arvatud mõõtmiste algus- ja lõpupunkti põhjal, on lähedasemad kontrollmõõtmiste käigus saadud sirgete pikkustele. Täisväljaku teise

käigu puhul on näha vastandlikku tendentsi, kõikide mõõtmispunktide omavaheliste vahemaade põhjal arvatud sirgete pikkuste erinevused kontrollväärtustest on väiksemad kui esimesel meetodil. Ka keskringi mõõtmistulemustest on näha, et mõõtmispunktide omavaheliste vahemaade põhjal saadud väärtused on sarnased kontrollväärtustele.

Mõõtmistulemuste analüüs näitab, et sensor ei ole võimeline määrama suure täpsusega suhtelistel mõõtmistel GNSS sensori poolt läbitud teekonna pikkust. Mõõtmiste ebaõnnestumise peamiseks põhjuseks oli varjatud taevalaotus mõõdistus aladel. Seda näitas ka asjaolu, et Kuressaare jalgpallistaadioni keskringi mõõtmisel, kus taevalaotus oli avatud, saadi väikseimad erinevused tegelikkest väärtustest. Teiseks põhjuseks võib nende mõõtmiste puhul olla asjaolu, et mõõtmisessiooni ajad olid väga lühikesed, näiteks oli väljaku pikemate joonte mõõtmisessiooni pikkuseks vaid 2 minutit. Lühikese aja jooksul ei pruugi GNSS sensor suuta lahendada kõiki alg tundmatuid, et määrata oma asukohta. Seega sarnase iseloomuga mõõtmistel võiks näiteks rakendada *stop and go* mõõtmismeetodit, kus punktidel liikudes peatutakse igal punktil lühikeseks ajaks.

5.3 Liikuvplatvormi mõõtmistulemused

Transpordivahendiga teostatud mõõtmiste tulemused on esitatud joonistel 5.21 – 5.26 ja tabelis 5.10. Joonistel 5.21, 5.22 ja 5.23 on kujutatud vastavalt 16.12.2021, 08.03.2022 ja 21.03.2022 sensoriga teostatud mõõtmiste horisontaalsed ja vertikaalsed tõelised vead. Tõelised vead on arvatud valemiga 4.1, kusjuures GNSS sensori ja kontrollseadme andmed viidi kokku kellaaegade põhjal. Horisontaalsed tõelised vead on leitud samal kellaajal mõõdetud punktide vahemaa ($\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$) põhjal, millest on lahutatud GNSS sensori ja kontrollseadme tegelik vahemaa (1,236 m). Joonistel 5.21, 5.22 ja 5.23 on kujutatud horisontaalsed ja vertikaalsed vead on antud absoluutväärtustena.



Joonis 5.21. 16.12.2021 mõõtmistulemuste horisontaalsed vead (vasakul) ja vertikaalsed vead (paremal)



Joonis 5.22. 08.03.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsed vead (vasakul) ja vertikaalsed vead (paremal)

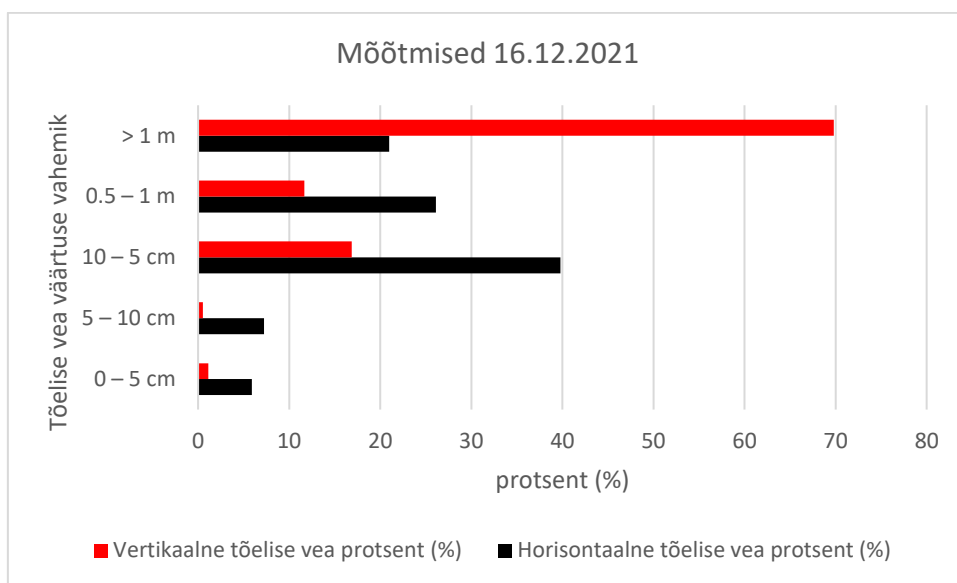


Joonis 5.23. 12.03.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsed vead (vasakul) ja vertikaalsed vead (paremal)

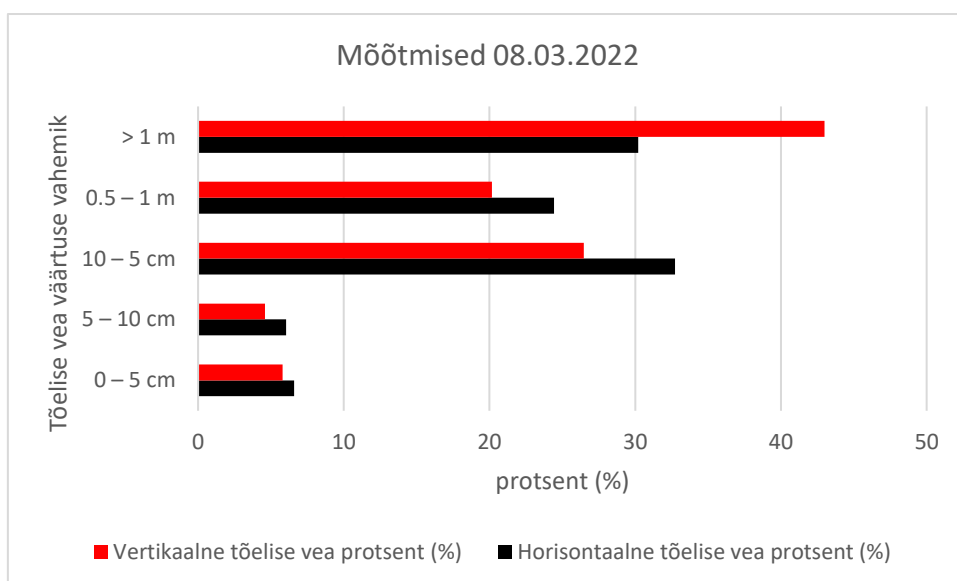
Joonistelt 5.21, 5.22 ja 5.23 on näha, et absoluutsed vertikaalsed tõelised vead on suuremad kui absoluutsed horisontaalsed tõelised vead. Seda oli oodata, kuna GNSS

seadmed tavaliselt suudavad plaanilist asukohta täpsemini määrata kui kõrguslikku komponenti. Siiski on mõõtmistulemuste vead oodatust suuremad.

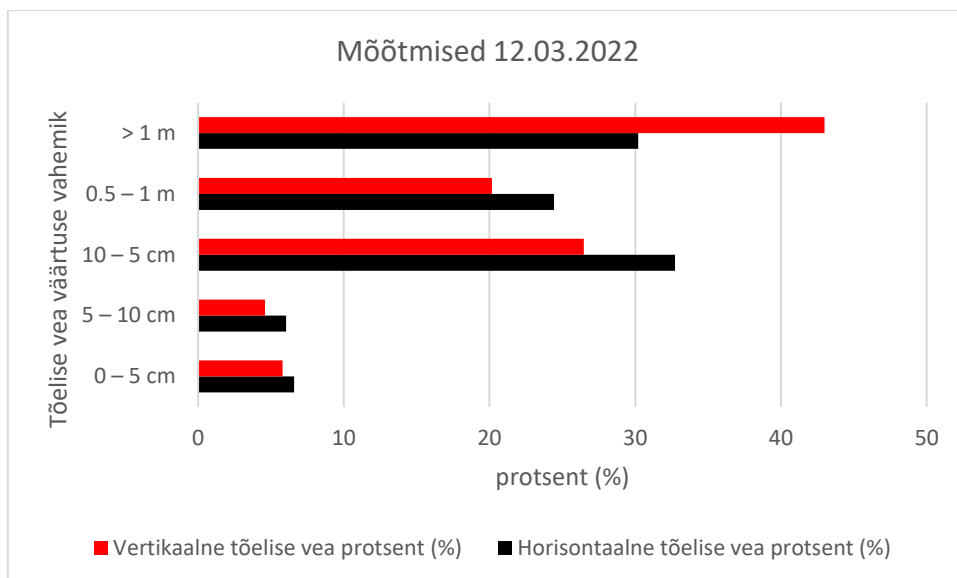
Joonistel 5.24, 5.25 ja 5.26 on kujutatud vastavalt 16.12.2021, 08.03.2022 ja 12.03.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsete ja vertikaalsete vigade protsentuaalne jaotus tõelise vea vahemiku järgi. Tabelis 5.10 on toodud 16.12.2021, 08.03.2022 ja 12.03.2022 tehtud mõõtmiste kõikide alg tundmatute lahenduste horisontaalsed ja vertikaalsed keskmised tõelised vead ja standardhälbed.



Joonis 5.24. 16.12.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsete ja vertikaalsete vigade protsentuaalne jaotus tõelise vea vahemiku järgi



Joonis 5.25. 08.03.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsete ja vertikaalsete vigade protsentuaalne jaotus tõelise vea vahemiku järgi

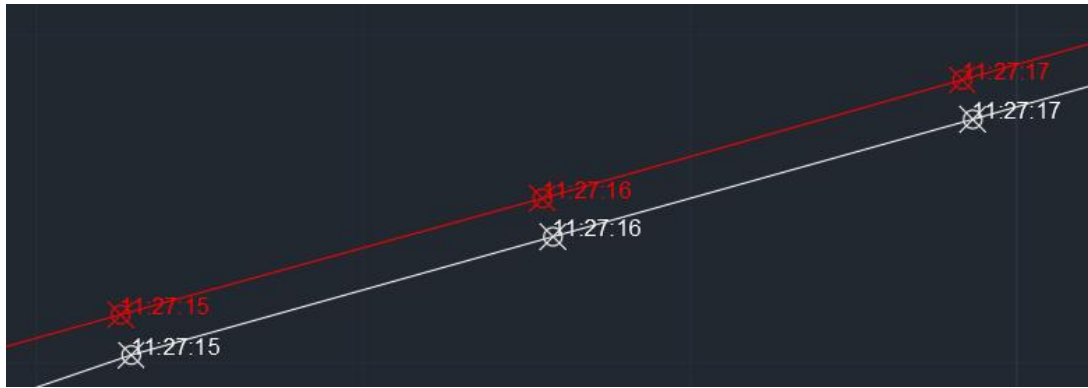


Joonis 5.26. 12.03.2022 mõõtmistulemuste horisontaalsete ja vertikaalsete vigade protsentuaalne jaotus tõelise vea vahemiku järgi

Tabel 5.10. Kinemaatiliste mõõtmiste (16.12.2021, 08.03.2022 ja 12.03.2022) kõikide alg tundmatute lahenduste horisontaalsed ja vertikaalsed keskmised tõelised vead ja standardhälbed

Kuupäev	keskmine horisontaalne tõeline viga (m)	horisontaalne standardhälve (m)	keskmine vertikaalne tõeline viga (m)	Vertikaalne standardhälve (m)
16.12.2021	0,744	1,952	2,113	2,344
08.03.2022	0,595	1,187	0.818	2,860
12.03.2022	0,493	2,411	1,177	4,049

Transpordivahendilt tehtud mõõtmistulemuste põhjal sai anda hinnangu ka madala hinnaklassi GNSS sensori vastuvõtja ajamõõtmisele. GNSS sensori vastuvõtja kellaaja *a priori* mõõtmistäpsus on nanosekundi suurusjärgus (U-blox, 2022a). *A priori* hinnangud ei ole empiiriliselt määratud ning ei vasta tihti reaalsusele. Joonisel 5.27 on näha 12.03.2022 sõidu kontrollseadme ja GNSS sensori trajektooride punktid, millele on lisatud punkti mõõtmise kellaage. Jooniselt 5.27 nähtub, et madala hinnaklassi GNSS vastuvõtja suudab aega määrata piisava täpsusega. Kontrollseadme ja madala hinnaklassi GNSS vastuvõtja samal kellaajal mõõdetud punktid paiknevad üksteise suhtes risti. Kui madala hinnaklassi GNSS vastuvõtjal sensoril oleks kellaviga, siis oleksid samal kellaajal mõõdetud punktid omavahel nihkes või kohakuti olevatel punktidel oleksid erinevad kellaajad.



Joonis 5.27. Kontrollseadme ja GNSS sensori trajektooripunktid kellaaegadega (AutoCAD kuvatõmmis)

5.3.1 Järeldused

16.12.2021, 08.03.2022 ja 12.03.2022 kinemaatiliste mõõtmiste kõikide alg tundmatute lahenduste horisontaalsetest ja vertikaalsetest keskmistest tõelistest vigadest (Tabel 5.10) on näha, et GNSS sensor määrab täpsemini plaanilist asukohta kui kõrguslikku asukohta. Mõõtmistulemustest on näha, et horisontaalsete koordinaatide määramise viga jääb kõige tõenäolisemalt vahemikku 10 – 50 cm ning vertikaalne tõeline viga suurusjärku ca 1 m. Kuigi standardhälvete põhjal tuleb arvestada paarimeetrises suurusjärgus oleva mõõtmisveaga. Võttes arvesse siinkohal ka kõikide alg tundmatute lahenduste horisontaalsed ja vertikaalsed keskmisi tõeliseid vigasid võib väita, et GNSS sensor ei taga geodeetilist täpsust kinemaatilistel mõõtmistel.

16.12.2021, 08.03.2022 ja 12.03.2022 teostatud mõõtmistel oli väga väike fikseeritud alg tundmatute protsent kogu mõõtmistest (1-7 %). See võib olla üheks põhjuseks, miks on saadud vead suures suurusjärgus. Siinkohal tuleb ka arvestada, et kinemaatilised mõõtmised transpordivahendiga on tehtud linnakeskkonnas, kus mõõtmisi mõjutavad signaali mitmeteelisus ja vähese avatusega horisont. Signaali mitmeteelisus mõjutab GNSS sensorit tugevalt, kuna GNSS sensori antenn ei ole polariseeritud, ei ole sensoril võimalik vähendada mitmeteelisuse efekti mõju (Romero-Andrade *et al.*, 2021). Ka antud GNSS sensori antenni puhul ei ole antenni kirjelduses väljatoodud, et antennil oleks võime vähendada mitmeteelisuse efekti (Taoglas, 2022a). Üheks võimaluseks sellisel juhul oleks kasutada madala hinnaklassi GNSS vastuvõtja ja geodeetilise antenni kombinatsiooni, mis on andnud mõõtmistel paremaid tulemusi (Cina ja Piras, 2015; Poluzzi, 2020).

Antud mõõtmiste tõeliste vigade põhjal polnud võimalik välja selgitada, kas ka nendes mõõtmistes esineb faasitsentri nihke väärtus, kuna eelnevalt leitud faasitsentri nihke väärtus (vt jaotist 5.1) on väiksem kui antud mõõtmistel saadud vead (standardhälbed).

Transpordivahendilt tehtud mõõtmistulemuste põhjal võib järeldada, et madala hinnaklassi GNSS vastuvõtja suudab aega määrata piisava täpsusega. See järeldus on tehtud kontrollseadme ja madala hinnaklassi GNSS vastuvõtja samadel kellaaegadel mõõdetud punktide paiknemise põhjal. Kuigi mõõtmistäpsus ei olnud antud mõõtmistel piisav, ei ole see tõenäoliselt tingitud vastuvõtja ajamääramise veast, kõige tõenäolisemaks vigade põhjuseks on suletud taevalaotus linnakeskkonnas ja mitmeteelisuse mõju.

KOKKUVÕTE

Magistritöö käsitleb madala hinnaklassi GNSS mõõteseadmega saavutatavat mõõtmistäpsust kõrguslikul ja plaanilisel asukoha määrangul. Antud magistritöö eesmärgid olid:

1. GNSS sensori antenni faasitsentri nihke olemasolu ja selle väärtuse tuvastamine.
2. Selgitada välja GNSS sensori mõõtmistäpsus kinemaatilistel kõrgusmõõtmisel ning plaanilisel asukohamäärangul.
3. Analüüsida vabavara tarkvara ja kommertstarkvara võimekust GNSS sensori andmete töötlusel.

Eesmärkide saavutamiseks teostati kolme tüüpi mõõtmisi: veetaseme mõõtmised, kus mõõdeti veetaseme kontrollitud keskkonnas ja merel, kindla geomeetriaga kontuuride mõõtmised jalgpalliväljakute näitel ja mõõtmised liikuvplatvormilt linnaliikluse tingimustes. Kõikide mõõtmiste puhul oli põhimõtteliselt tegemist kinemaatiliste mõõtmistega. Veetaseme mõõtmistel keskenduti kõrgusväärtuste määramisele, jalgpalliväljakute mõõtmistel keskenduti trajektoori mõõtmistele ning mõõtmistel transpordivahendilt keskenduti nii plaanilise kui kõrguskomponendi määramisele.

Veetaseme mõõtmiste andmetöötlustest selgus, et GNSS sensori antennil on faasitsentri vertikaalsuunaline nihe. Veetaseme kontrollitud keskkonnas teostatud mõõtmiste tulemuste põhjal on näha, et antennil on faasitsentri nihe väärtusega -12,5 cm, seega on GNSS sensori mõõdetud kõrgused on tegelikest kõrgustest madalamad. Seda järeldust kinnitavad ka mereveetaseme mõõtmistulemuste võrdlused erinevate veemõõdujaamade kontrollväärtustega.

Teiseks eesmärgiks oli välja selgitada madala hinnaklassi GNSS sensori mõõtmistäpsus erinevatel kinemaatilistel kõrgusmõõtmisel ning plaanilisel asukohamäärangul. GNSS sensori kõrguslikku mõõtmistäpsust kinemaatilistel mõõtmistel analüüsiti mereveetaseme mõõtmisandmete põhjal, võttes arvesse eelnenud veetaseme mõõtmistulemusi kontrollitud keskkonnas. Nende tulemuste põhjal on GNSS sensori täpsushinnanguks jääkväärtuste (tõeliste vigade) standardhälve ± 5 cm, kui arvestada sensori antenni faasitsentri nihet. Siinkohal tuleb silmas pidada, et mereveetaseme mõõtmised on küll kinemaatilised, kuid sarnanevad iseloomult staatilistele mõõtmistele.

Jalgpalliväljakutel teostatud kinemaatiliste mõõtmistulemuste analüüs näitab, et GNSS sensor ei ole võimeline määrama suure täpsusega suhtelistel mõõtmistel sensori poolt läbitud teekonna pikkust ega kontuuride täpset geomeetriat. Põhjus selleks võivad olla nende mõõtmiste puhul lühikesed mõõtmisessiooni pikkused. Madala hinnaklassi GNSS

sensori kõrguslikku ja plaanilist asukoha mõõtmistäpsust hinnati ka kinemaatilistel mõõtmistel transpordivahendiga. Mõõdetud tulemuste analüüsi põhjal jääb plaaniline mõõtmistäpsus ning kõrguslik täpsus (standardhälve) paari meetri suurusjärku. Siinkohal tuleb silmas pidada, mõõtmised toimusid linnakeskkonnas, kus mõõtmistäpsust mõjutavad signaali mitmeteelisus, mille mõju GNSS sensorid ei suuda vähendada, ja vähese avatusega horisont.

Viimaseks eesmärgiks oli analüüsida vabavara tarkvara ja kommertstarkvara võimekust GNSS sensori andmeformaadi töötlusel. Selleks analüüsiti mereveetaseme kinemaatilisi mõõtmisandmeid. Andmete analüüsist selgus, et kommertstarkvaraga on võimalik saada algandmete formaadist kätte väiksemate andmekadudega mõõtmistulemused. Samuti on kommertstarkvaraga töödeldud andmetes suurem hulk fikseeritud algtundmatute lahendustega mõõtmistulemusi kui vabavara tarkvaraga töödeldud mõõtmistulemustes.

Saadud lõputöö tulemused vastasid ootustele, kuna tegemist on GNSS sensoriga, mille hinnaklass on kordades madalam kui geodeetilise täpsusega GNSS seadmel. Sellest tulenevalt eeldati GNSS sensorilt ka madalamat mõõtmistäpsust. Antud töös kasutatud GNSS sensori maksumuseks oli umbes 350 eurot. Seega on GNSS sensori peamiseks eeliseks madal maksumus. Siiski tuleb arvestada, et sensori antennidele on vajalik õigete mõõtmistulemuste saamiseks teostada individuaalne kalibreerimine. Antennide individuaalse kalibreerimisega seonduv aja- ja töökulu vähendab oluliselt sensori madalast maksumusest tulenevat eelist.

Antud magistritöö tulemuste põhjal saab väita, et GNSS sensor annab parima täpsuse staatilistel mõõtmistel ja ka kinemaatilistel mõõtmistel, mis sarnanevad iseloomult staatilistele mõõtmistele, näiteks antud töös käsitletud mereveetaseme mõõtmiste puhul. Mõõtmistulemuste põhjal võib väita, et GNSS sensoriga ei ole võimalik saavutada suurt täpsust linnakeskkonnas teostatud kinemaatilistel mõõtmistel. Madalama hinnaklassi antennidel puudub mitmeteelisuse efekti vähendamise võimekus, seetõttu on ka mõõtmistäpsus linnakeskkonnas madalam. Siinkohal on soovituslik kasutada geodeetilisi antenne kombineerituna madala hinnaklassi GNSS vastuvõtjatega, mis tagab ka suurema täpsuse GNSS mõõtmistel.

Magistritöö jooksul teostatud mõõtmistulemuste põhjal saab väita, et madala hinnaklassi GNSS sensorit on võimalik kasutada kinemaatilistel mõõtmistel, kus on võimalik objekti pikaajaline jälgimine ning mõõtmistulemuste keskmistamine. Üheks selliseks rakenduseks on ka antud töös teostatud veetasemete monitooring või muud

sarnased rakendused. Madala hinnaklassi GNSS sensoril võib olla rohkem kasutust kui erinevates rakendusvaldkondades tehakse järelandmisi mõõtmistäpsuses. Samuti on üheks võimaluseks kombineerida GNSS sensorit teiste sensoritega, näiteks IMU sensoriga. Madala hinnaklassi sensor integreerituna IMU-ga võib linnakeskkonnas kinemaatilistel mõõtmistel pakkuda suuremat täpsust, kuna IMU võimaldab rakendada lisaparameetreid asukohamäärangul. Kui kombineerida GNSS sensorit teiste sensoritega, mille eesmärgiks ei ole asukohamäärang, vaid muude andmete kogumine (näiteks keskkonnaseisund, müra saastatus jms), siis annaks mõõtmistele lisaväärtust GNSS sensorist tulev asukoht ning ajamäärang. Sellistes rakendustes oleks GNSS sensorite kasutusvõimalused laiemad.

SUMMARY

The scope of this master's thesis was to determine the achievable accuracy in height and coordinate measurements with a low-Cost GNSS sensor. The aims of this master's thesis were:

1. To determine if the low-Cost GNSS antenna has a phase centre offset and to determine its value.
2. To determine the measurement accuracy of a Low-Cost GNSS sensor for kinematic height and coordinate measurements.
3. To analyse the capability of freeware software and commercial software in low-Cost GNSS sensor data processing.

To achieve these objectives, three types of measurements were carried out: water level measurements, which measured the water level in a controlled environment and at sea, measurements of football field and measurements from a vehicle. All measurements were in principle kinematic measurements. Water level measurements focused on height values, football field measurements focused on trajectory and area measurements, and measurements from the vehicle focused on both coordinates and height determination.

The post-processing of the water level data revealed that the antenna of the low-Cost GNSS sensor had a phase centre offset. Based on the results of measurements performed in a controlled environment, it was identified that the antenna has a phase centre offset of -12.5 cm, so the measured heights of the low-cost GNSS sensor are lower than the actual heights. This conclusion is also confirmed by the comparisons of the sea level measurement data with the reference values of tide gauge stations.

The second goal was to determine the measurement accuracy of a low-Cost GNSS sensor for different kinematic height and planar positioning. The height component accuracy of the sensor with kinematic measurements was analysed on the basis of sea tide gauge data, where the previous results of water level measurements in a controlled environment were taken into account. Based on these results, the accuracy (standard deviation of residuals) of the low-cost GNSS instrument is estimated to be ± 5 cm when the instruments phase centre offset has been taken into account. It should be noted that sea level measurements are kinematic but similar in nature to static measurements. Analysis of kinematic measurements on football fields shows that the Low-Cost GNSS sensor is unable to determine the length of the measured trajectory or area. This may be due to the short measurement session lengths for these measurements. The height

and coordinates measurement accuracy of the sensor were evaluated based on kinematic measurements with a vehicle. Based on the analysis of the results, the coordinates measurement accuracy and the height accuracy (standard deviation) remain in the order of a few meters. It should be considered that the measurements took place in an urban environment, where the accuracy of the measurements is affected by multipath, which cannot be reduced by Low-Cost GNSS antennas, and also by the low-open horizon.

The final goal was to analyse the capability of freeware software and commercial software in the data format processing of a low-Cost GNSS sensor. To this end, kinematic measurement data of sea level were analysed. The analysis of the data revealed that it is possible to obtain measurement results with smaller data losses than the original data format with commercial software. Also, the data processed with commercial software contains a larger number of fixed measurement results with unknown solutions than the measurement results processed with free software.

The results of the thesis met the pre-set expectations. Since the low-Cost GNSS sensor is at a lower price range than GNSS sensors with geodetic accuracy it was expected that the low-cost GNSS sensor would have lower measurement accuracy. The sensor used for measuring cost around 350 euros. Thus, the main advantage of a low-cost GNSS sensor is its price. However it should be noted that individual antenna calibrations are required to obtain correct measurement results. The time and labour required for individual antenna calibration significantly reduces the sensor's advantage of a lower cost.

Based on the results of this master's thesis, it can be stated that the low-cost GNSS sensor provides the best accuracy for static measurements as well as kinematic measurements that monitor a single object displacement over a longer period time, such as the sea level measurements discussed in this work. Based on kinematic measurements performed in an urban environment, it can be stated that it is not possible to achieve high accuracy with a low-cost GNSS sensor in this application. Lower priced antennas do not have the ability to reduce the multipath effect, so the measurement accuracy is lower in an urban environment. In this instance, it is recommended to use geodetic antennas in combination with the low-cost GNSS receivers, which also ensures greater accuracy in measurements.

Based on the measurement results performed during the master's thesis, it can be stated that the low-cost GNSS sensor can be used for kinematic measurements that are

similar in nature to static measurements. One such application is the monitoring of water levels as performed in this master thesis or in other similar applications. The low-cost GNSS sensor could be used in wider applications if lower measurement accuracy can be accepted. However, if one does not want to compromise on measurement accuracy, one could also consider combining a low-cost GNSS receiver with a geodetic GNSS antenna. Low-cost GNSS sensor accuracy can also be improved by integrating it with other sensors, one of such sensors is IMU. A low-cost GNSS sensor paired with IMU could offer higher accuracy when measuring in an urban environment, IMU measures additional parameters that can be implicated in positioning. If the GNSS sensor were to be combined with other sensors, which primary purpose is not positioning but rather other type of data collection (for example, the state of environment, noise pollution, etc), then the positioning and timing capabilities of the GNSS sensor would add value to such data collection. This sort of application could offer a wider use for GNSS sensors.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

ESA (2022a) The European Space Agency. URL:

<https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Overview>. Vaadatud 07.05.2022.

ESA (2022b) The european Space Agency URL:

https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_a_constellation_of_navigation_satellites. Vaadatud 08.05.2022.

Bakula, M.; Uradzinski, M.; Krasuski, K. (2022). Performance of DGPS Smartphone Positioning with the Use of P(L1) vs. P(L5) Pseudorange Measurements. Remote Sensing. 2022, 14, 929. DOI: 10.3390/rs14040929.

GALILEO (2019) Open Service Service definition document. URL:

https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/Galileo-OS-SDD_v1.1.1.pdf

Geoportaal (2022a). Maa-ameti Geoportaal – ESTPOS. URL:

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/ESTPOS-riiklik-GNSS-satelliitandmete-keskus-p838.html>. Vaadatud 25.05.2022.

Geoportaal (2022b). Maa-ameti Geoportaal – Geodeetilised andmed. URL:

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geodeetilised-andmed/Geodeetilised-vorgud/GNSS-pusijaamade-vork-p571.html>. Vaadatud 24.04.2022.

Geoportaal (2022c). Maa-ameti Geoportaal – Eesti geodeetiline süsteem. URL:

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geodeetilised-andmed/Eesti-geodeetiline-susteem-p223.html>. Vaadatud 25.05.2022.

GLONASS (2022). URL: https://www.glonass-iac.ru/en/about_glonass/. Vaadatud 08.05.2022.

GNSS product line card (2022). URL: [https://www.u-](https://www.u-blox.com/sites/default/files/GNSS_LineCard_UBX-13004717.pdf)

[blox.com/sites/default/files/GNSS_LineCard_UBX-13004717.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/GNSS_LineCard_UBX-13004717.pdf). Vaadatud 15.05.2022.

GPS (2022a). URL: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>. Vaadatud 08.05.2022.

GPS (2022b).URL: <https://www.gps.gov/systems/gnss/>. Vaadatud 08.05.2022.

Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., Turk, G., Sterle, O. (2020). Testing Multi-Frequency Low-Cost GNSS Receivers for Geodetic Monitoring Purposes. *Sensors*. 20(16):4375. DOI: 10.3390/s20164375.

Hamza, V., Stopar, B., Sterle, O. (2021). Testing the Performance of Multi-Frequency Low-Cost GNSS Receivers and Antennas. *Sensors*. 21(6):2029. DOI:10.3390/s21062029.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J (1994). *Global Positioning System. Theory and Practice*. Springer-Verlag, Wien, New York, 1994.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E (2007). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. SpringerWienNewYork, 2007.

Hoque, M.M., Jakowski, N. (2007). Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning. *J Geod* 81, 259–268. DOI: 10.1007/s00190-006-0106-0.

HUAWEI (2022). URL: <https://consumer.huawei.com/en/phones/p40-pro/specs/>. Vaadatud 15.05.2022.

Kala, V. (2009), *Geodeetiliste mõõtmiste andmetötluse teooria alused*. TTÜ Kirjastus, Tallinn, 2009.

Kinematic GPS/GNSS Methods Manual (2021). URL: https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/getsi/teaching_materials/high-precision/kinematic_gnss_survey_methods.v5.pdf. Viimati vaadatud 08.05.2022.

Knight, P.J., Bird, C.O., Sinclair, A., Plater, A.J. (2020). A low-cost GNSS buoy platform for measuring coastal sea levels. *Ocean Engineering*, Volume 203, 2020, 107198. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107198.

Kollo, K., Ellmann, A. (2008). *Satelliitgeodeetilise asukohamäärangu loengukonspekt*. Tallinn, 2008.

Lapadat, A. M. (2020) *Precise Monitoring of Horizontal Displacement of Large-Scale Structures using Low-Cost Dual Frequency GNSS Receivers*. URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:de176138-2620-498d-91da-f5f727388287>

Leica Geosystems (2022). Leica Infinity Survey Software. URL: <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/software/leica-infinity>. Vaadatud 28.04.2022.

Leica Viva (2022a). Leica Viva GS15 Data sheet. URL: https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_viva_gs15_ds.ashx?la=de-de. Vaadatud 22.04.2022.

Leica Viva (2022b). Galaxy Top Industry, Leica Viva GS15. URL: <https://galaxytopindustry.com/product/leica-viva-gs15-gnss-rtk-rover/>. Vaadatud: 18.05.2022.

Meguro, J., Arakawa, T., Mizutani, S., Takanose, A. (2018). Low-cost Lane-level Positioning in Urban Area Using Optimized Long Time Series GNSS and IMU Data. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2018, pp. 3097-3104. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569565.

Metsar, J., Kollo, K., Ellmann, E. (2018). Modernization of The Estonian National GNSS Reference Station Network. Geodesy and Cartography, 2018 Volume 44 Issue 2: 55-62. DOI: 10.3846/gac.2018.2023.

NASA (2022) National Aeronautics and Space Administration. URL: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.htm. Vaadatud 07.05.2022.

NEO-6 series (2011). NEO-6 series Versatile u-blox 6 GPS modules. URL: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_ProductSummary_%28GPS.G6-HW-09003%29.pdf

NOAA (2022). Ionosphere. Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/ionosphere>. Vaadatud 16.04.2022.

Oguntuase, J. O., Wells, D., Bisnath, S. (2020). Vertical Accuracies of Mass-Market GNSS Receivers and Antennas in Ellipsoid Reference Survey Strategy for Marine Applications. Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast, 2020, pp. 1-6. DOI: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389454.

Pepe, M. (2018). CORS architecture and evaluation of positioning by low-cost GNSS receiver. *Geodesy and Cartography*, 44(2), 36-44. DOI: 10.3846/gac.2018.1255.

Poluzzi, L., Tavasci, L., Corsini, F., Bararella, M., Gandolfi, S. (2020). Low-cost GNSS sensors for monitoring applications. *Applied Geomatics* 12, 35–44 (2020). DOI: 10.1007/s12518-019-00268-5.

Romero-Andrade, R., Trejo-Soto, M.E., Vázquez-Ontiveros, J. R., Hernández-Andrade, D., Cabanillas-Zavala, J. L. (2021). Sampling Rate Impact on Precise Point Positioning with a Low-Cost GNSS Receiver. *Applied Sciences*. 11(16):7669. DOI : 10.3390/app11167669.

RTKLIB (2013). RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. URL: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf

Sanna, G., Pisanu, T., Garau, S. (2022). Behavior of Low-Cost Receivers in Base-Rover Configuration with Geodetic-Grade Antennas. *Sensors* 2022, 22(7), 2779. DOI: 10.3390/s22072779.

Kumar, G. S., Rao, G. S. B., Kumar, M. N. V. S. S. (2013). GPS Signal Short-Term Propagation Characteristics Modeling in Urban Areas for Precise Navigation Applications. *Positioning*, 2013, 4, 192-199. DOI: 10.4236/pos.2013.42019.

SPS standard (2020). Global Positioning System Standard Positioning Service performance standard. 5th Edition. URL: <https://www.gps.gov/technical/ps/2020-SPS-performance-standard.pdf>. Vaadatud 16.04.2022.

Static GPS/GNSS Survey Methods Manual (2018). URL: https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/getsi/teaching_materials/high-precision/static_gnss_survey_methods.v4.pdf. Viimati vaadatud 08.05.2022
ZED-F9P (2022a). URL: <https://www.sparkfun.com/products/16481>. Vaadatud 22.04.2022.

ZED-F9P (2022b). u-blox F9 high precision GNSS module. URL: <https://www.snapeda.com/parts/ZED-F9P-01B/U-Blox/datasheet/>

ZED-F9P (2022c). URL: <https://www.u-blox.com/en/press-releases/u%E2%80%91blox-announces-first-high-precision-gnss-module-based-u%E2%80%91blox-f9-technology>. Vaadatud 15.05.2022

Zhang, X., Zhang, Y. & Zhu, F. (2020). A method of improving ambiguity fixing rate for post-processing kinematic GNSS data. *Satell Navig* 1, 20 (2020). DOI: 10.1186/s43020-020-00022-y.

Takasu, T. and Yasuda, A. (2008) Evaluation of RTK-GPS Performance with Low-Cost Single-Frequency GPS Receivers. *Proceedings of International Symposium on GPS/GNSS, Tokyo, 11-14 November 2008*, 852-861. URL: [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453ed%20snp55rrgjct55\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2502277](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453ed%20snp55rrgjct55))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2502277)

Taoglas (2022a). Taoglas MAGMA X2 Datasheet. <https://www.taoglas.com/datasheets/AA.175.301111.pdf>

Taoglas (2022b). Mouser Electronics, Taoglas MAGMA X2. URL: <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Taoglas/AA.178.301111?qs=QNEbhJQKvaU7kLU6eg4bA%3D%3D>. Vaadatud 18.05.2022.

U-blox (2022a). u-blox GNSS product overview. URL: https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GNSS-product_Overview_UBX-14000426.pdf. Vaadatud 22.04.2022.

U-blox (2022b). URL: <https://www.u-blox.com/en/history-0>. Vaadatud 15.05.2022.

Yang, S., Xu, Y., Xu, T., Jiang, N. (2022). Analysis on the PPP Performance of Android Smart-Phone: A Case Study of Huawei P40 Pro. In: Yang, C., Xie, J. (eds) *China Satellite Navigation Conference (CSNC 2022) Proceedings*. CSNC 2022. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 908. Springer, Singapore. DOI : 10.1007/978-981-19-2588-7_34.

Yuwono, Handoko, E. Y., Cahyadi, M. N. Rahmadiansah, A., Yudha, I. S., Sari, A. (2019). Assessment of the Single Frequency Low Cost GPS RTK Positioning. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 280 (2019) 012025, DOI: 10.1088/1755-1315/280/1/012025.

LISAD

Tähistades kaks punkti vastavalt A ja B ja satelliidi indeksiga j , ning kirjutades valemi (Hofmann-Wellwnhof *et al.*, 1994, 181):

$$\phi_i^j(t) - f^j \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_i^j(t) + N_i^j - f^j \delta_i(t), \quad (\text{L1.1})$$

kus

$\phi_i^j(t)$ on mõõdetud kandelaine faas,

$\delta^j(t)$ on teadaolev satelliidi kellaviga,

f^j on satelliidi signaali sagedus,

λ on lainepikkus,

$\rho_i^j(t)$ on geomeetiline kaugus satelliidi ja vaatluspunkti vahel,

N_i^j on täisarvuline algundmatu,

$\delta_i(t)$ on vastuvõtja kellaviga.

põhjal välja faasimõõtmiste võõrandi kahe punkti jaoks (Hofmann-Wellwnhof *et al.*, 1994, 184):

$$\phi_A^j(t) - f^j \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_A^j(t) + N_A^j - f^j \delta_A(t) \quad (\text{L1.2})$$

$$\phi_B^j(t) - f^j \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_B^j(t) + N_B^j - f^j \delta_B(t) \quad (\text{L1.3})$$

ja nende kahe valemi vahe on (Hofmann-Wellwnhof *et al.*, 1994, 184):

$$\phi_B^j(t) - \phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda} [\rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)] + N_B^j - N_A^j - f^j [\delta_B(t) - \delta_A(t)]. \quad (\text{L1.4})$$

Valemi saab kirjutada lihtsustatud vormis (Hofmann-Wellwnhof *et al.*, 1994, 184):

$$\phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j \delta_{AB}(t), \quad (\text{L1.5})$$

mis on faasimõõtmiste üksikvahe lõplik võrrand.

L.2.1. RTKCONV seadistus

The screenshot shows the 'Options' dialog box for RTKCONV. The 'RINEX Ver' is set to 3.04, and 'Station ID' is 0000. There are checkboxes for 'Sep NAV' and 'RINEX2 Name'. The 'RunBy/Obsrv/Agency' field is empty. The 'Comment' field is empty. The 'Maker Name/#/Type' field is empty. The 'Rec #/Type/Vers' field is empty. The 'Ant #/Type' field is empty. The 'Approx Pos XYZ' field has three input boxes, all containing 0.0000. The 'Antenna Delta H/E/N' field has three input boxes, all containing 0.0000. There are checkboxes for 'Phase Shift', 'Half Cyc Corr', 'Iono Corr', 'Time Corr', and 'Leap Sec'. The 'Satellite Systems' section has checkboxes for GPS (checked), GLO (checked), GAL, QZS, BDS, NavIC, and SBS. The 'Excluded Satellites' field is empty. The 'Observation Types' section has checkboxes for C (checked), L (checked), D (checked), and S (checked). The 'GNSS Signals ?' section has checkboxes for L1 (checked), L2/E5b (checked), L5/E5a, and L6. There are 'Mask...' and 'FCN...' buttons. The 'Receiver Options' field is empty. The 'Time Tolerance (s)' is 0.005, and the 'Debug' option is OFF. There are 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

L.2.2. RTKPOST seadistus (Settings 1)

The screenshot shows the 'Options' dialog box for RTKPOST, with the 'Setting1' tab selected. The 'Positioning Mode' is set to Kinematic. The 'Frequencies' are set to L1+L2/E5b. The 'Filter Type' is set to Forward. The 'Elevation Mask (°) / SNR Mask (dBHz)' is set to 10. The 'Rec Dynamics / Earth Tides Correction' is set to ON. The 'Iono/Tropo Correction' is set to Broadcast. The 'Satellite Ephemeris/Clock' is set to Broadcast. There are checkboxes for 'Sat PCV', 'Rec PCV', 'PhWU', 'Rej Ed', 'RAIM FDE', and 'DBCrr'. The 'Excluded Satellites (+PRN: Included)' field is empty. There are checkboxes for GPS (checked), GLO (checked), Galileo, QZSS, SBAS, BeiDou, and IRNSS. There are 'Load...', 'Save...', 'OK', and 'Cancel' buttons at the bottom.

L.2.3. RTKPOST seadistus (*Setting 2*)

Options

Setting1 Setting2 Output Statistics Positions Files Misc

Integer Ambiguity Res (GPS/GLO/BDS) Fix and Fix i OFF

Min Ratio to Fix Ambiguity / GLO HW Bias 3 0

Min Lock / Elevation (°) to Fix Amb 0 15

Min Fix / Elevation (°) to Hold Amb 20 15

Outage to Reset Amb/Slip Thres (m) 20 0.050

Max Age of Diff (s) / Sync Solution 30.0 ON

Reject Threshold of GDOP/Innov (m) 30.0 30.0

of Filter Iter 1

Baseline Length Constraint (m) 0.000 0.000

Min Fix Sats / Min Hold Sats 4 5

Min Drop Sats / Use Rcv StdDevs 10 OFF

Max Pos Var for AR / AR Filter 0.1000 ON

Hold Amb Var / Hold Amb Gain 0.1000 0.0100

Load... Save... OK Cancel

L.2.4. RTKPOST seadistus (*Output*)

Options

Setting1 Setting2 Output Statistics Positions Files Misc

Solution Format Lat/Lon/Height

Output Header / Process Options / Vel ON ON OFF

Time Format / # of Decimals hh:mm:ss GPST 3

Latitude Longitude Format / Field Separator ddd.dddddd

Output Single if Sol Outage / Max Sol Std (m) OFF 0

Datum / Height WGS84 Ellipsoidal

Geoid Model Internal

Solution for Static Mode All

NMEA Interval (s) RMC/GGA, GSA/GSV 0 0

Output Solution Status / Output Debug Trace Residuals OFF

Load... Save... OK Cancel

L.2.5. RTKPOST seadistus (*Statistics*)

The 'Options' dialog box has the following settings in the 'Statistics' tab:

Measurement Errors (1-sigma)	
Code/Carrier-Phase Error Ratio L1/L2	100.0 300.0
Carrier-Phase Error a+b/sinE1 (m)	0.003 0.003
Carrier-Phase Error/Baseline (m/10km)	0.000
Doppler Frequency (Hz)	1.000
Process Noises (1-sigma/sqrt(s))	
Receiver Accel Horiz/Vertical (m/s ²)	3.00E+00 1.00E+00
Carrier-Phase Bias (cycle)	1.00E-04
Vertical Ionospheric Delay (m/10km)	1.00E-03
Zenith Tropospheric Delay (m)	1.00E-04
Satellite Clock Stability (s/s)	5.00E-12

Buttons at the bottom: Load..., Save..., OK, Cancel.

L.2.6. RTKPOST seadistus (*Positions*)

The 'Options' dialog box has the following settings in the 'Positions' tab:

Rover

- Lat/Lon/Height (deg/m): 90.000000000, 0.000000000, -6335367.6285
- Antenna Type (*: Auto): []
- Delta-E/N/U (m): 0.0000, 0.0000, 0.0000

Base Station

- Lat/Lon/Height (dms/m): 59 25 16.127580, 24 41 52.914910, 44.5380
- Antenna Type (*: Auto): [x] LEIAR25.R4 LEIT
- Delta-E/N/U (m): 0.0000, 0.0000, 0.0000

Station Position File: []

Buttons at the bottom: Load..., Save..., OK, Cancel.

Lisa 3. u-center 2 satelliitide nähtavusgraafikud



Joonis L3.1. Kuvatõmmis u-center 2 ühe päeva satelliitide nähtavusgraafikust (mõõtmised Ehituse Mäemaja katusel)



Joonis L3.2. Kuvatõmmis u-center 2 ühe päeva satelliitide nähtavusgraafikust (mõõtmised Muhus)

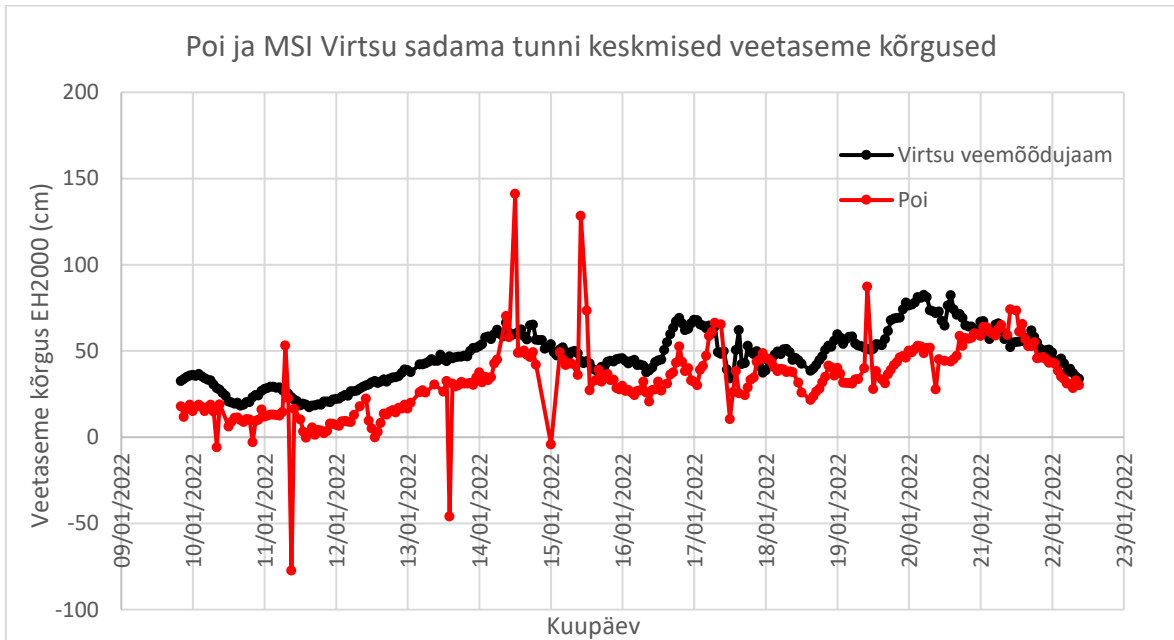
L.4.1. Leica Infinity *Advanced Settings* arvutuste parameetrite seadistus

Advanced Processing Strategy	
Frequency	Automatic <input checked="" type="checkbox"/> L1/E1/B1 <input checked="" type="checkbox"/> L2/B2 <input checked="" type="checkbox"/> L5/E5a/B3 <input checked="" type="checkbox"/> E6 <input checked="" type="checkbox"/> E5b <input checked="" type="checkbox"/> E5ab/B2a
Frequency to use in Iono Minimised	Automatic
Min. Distance for Iono Minimised	15 km
Possible Ambiguities Fix up to	300 km
Min. Duration for Float Solution (static)	5'
Allow Widelane Fix	No
Analysis Tools	
Process & Analyse Output	Observation & Position Residuals
Virtual RINEX Download	
From Multiple Points	Create one VRS in the middle
Name	VRNX
Sampling Rate	Automatic

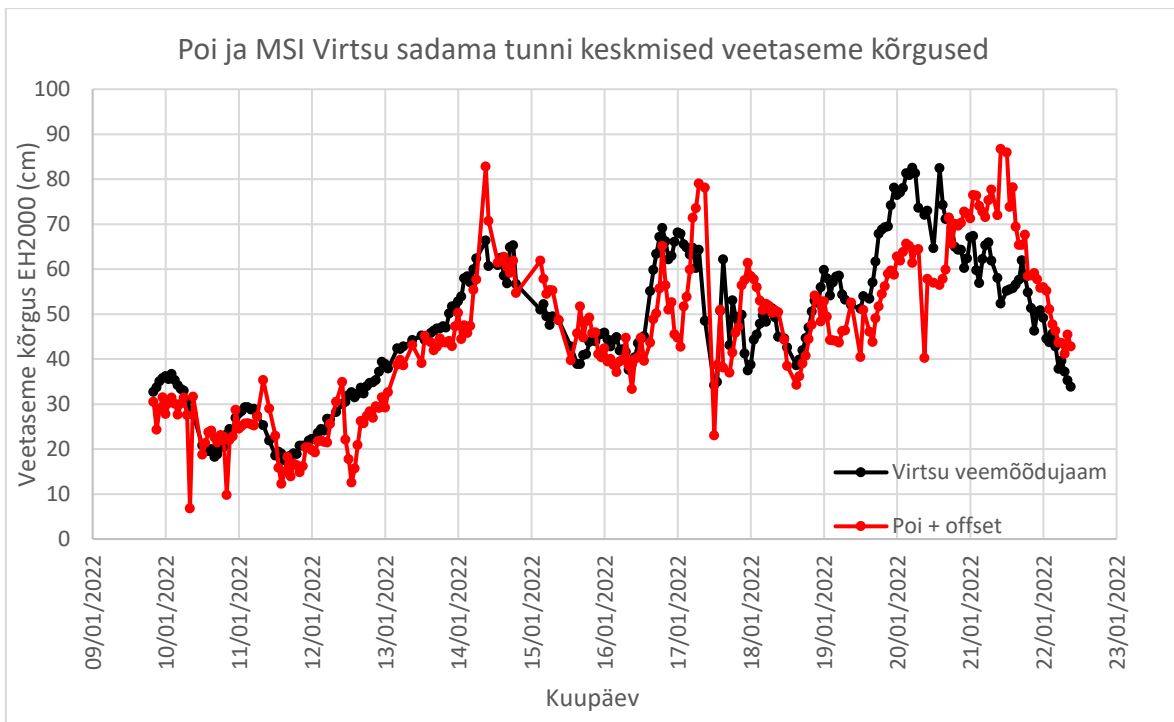
L.4.2. Leica Infinity *Processing Strategy* arvutuste parameetrite seadistus

Solution Type	Phase Fixed
Solution Optimisation	Automatic
Tropospheric Model	Automatic
Ionospheric Model	Automatic

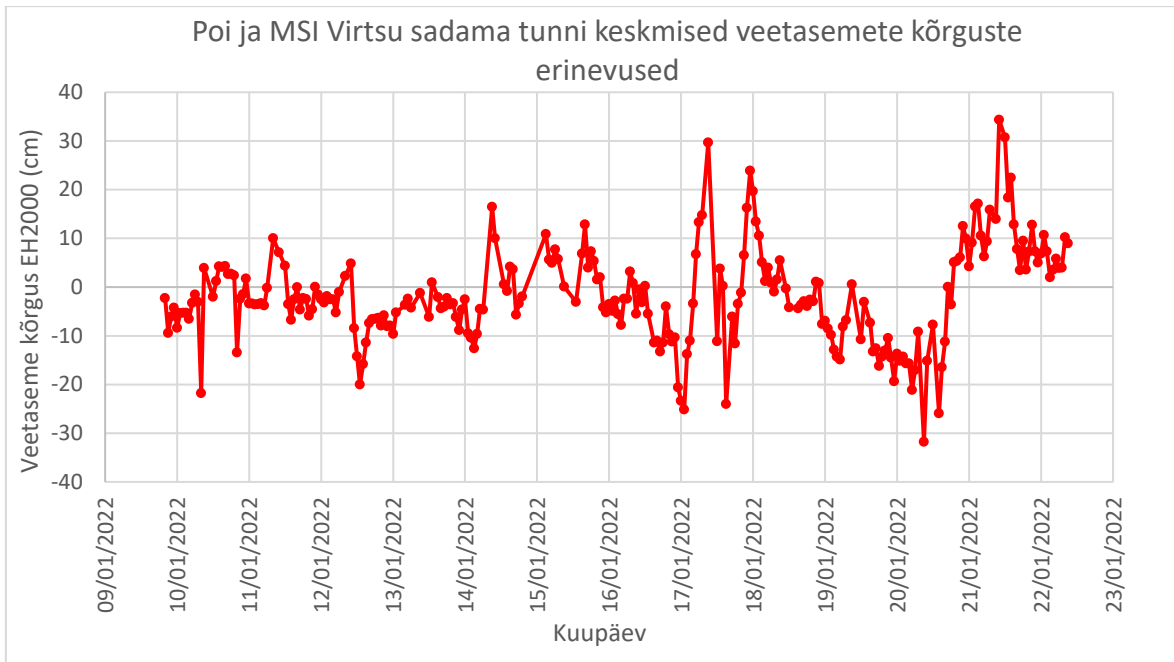
L5.1. Virtsu veemõõdujaam



Joonis L5.1. Poi ja MSI Virtsu sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused

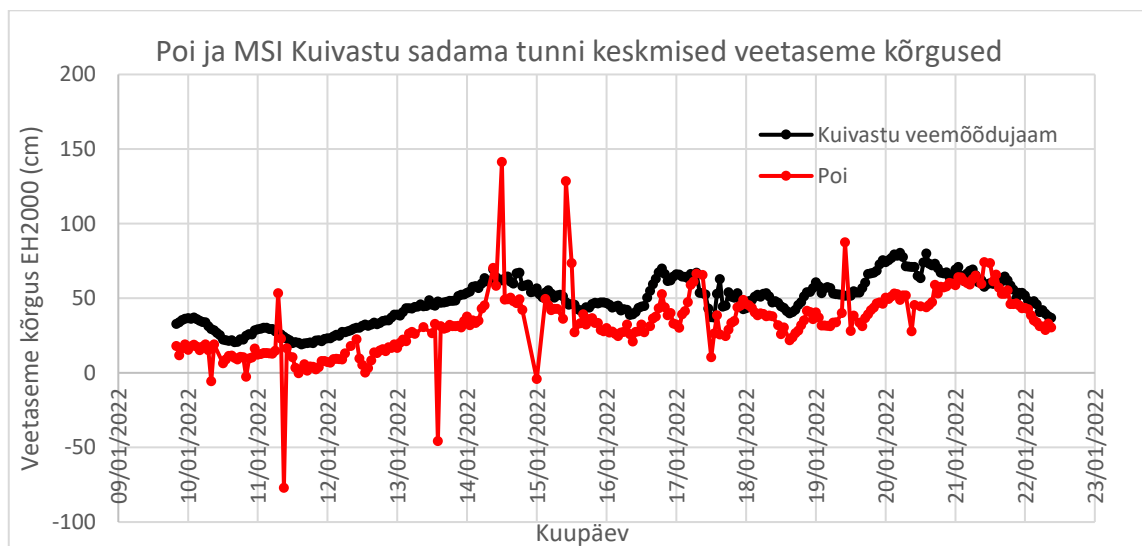


Joonis L5.2. Poi ja MSI Virtsu sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused. Andmeteale on lisatud sensori antenni eeldatav faasisentri nihke väärtus ning eemaldatud on jämedad vead.

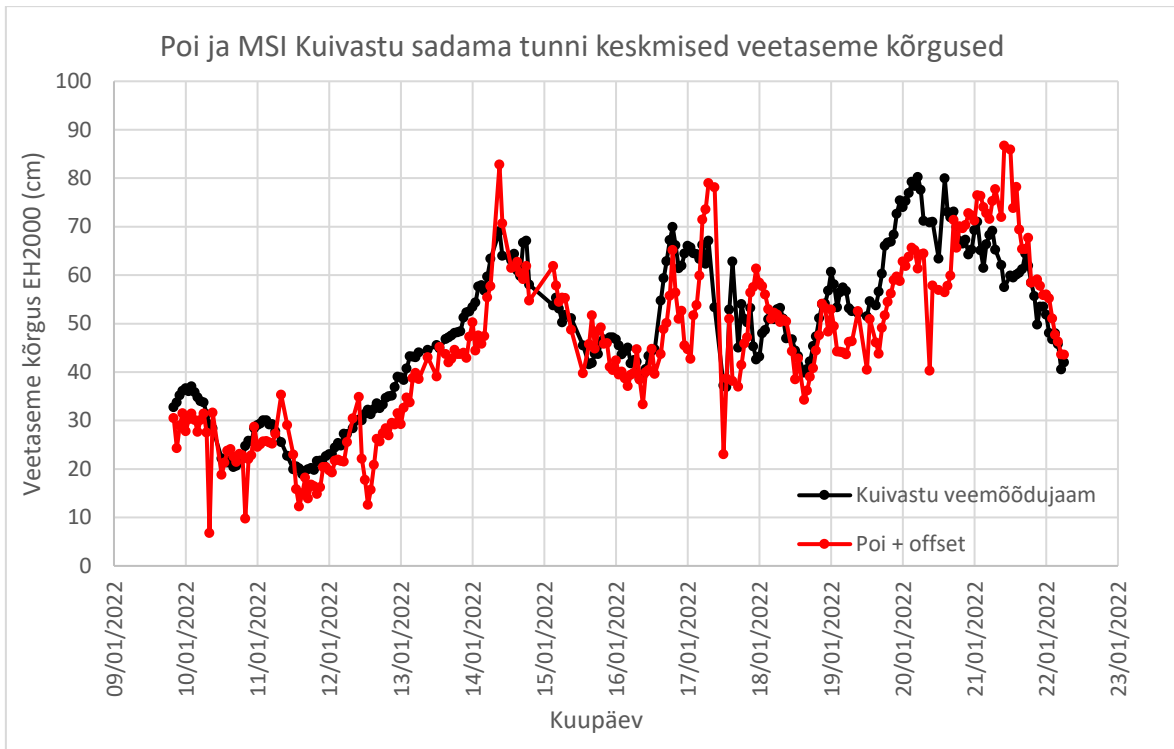


Joonis L5.3. Poi ja MSI Virtsu sadama tunni keskmised veetasemete kõrguste erinevused, arvutatud tõelise vea valemiga (Valem 4.1)

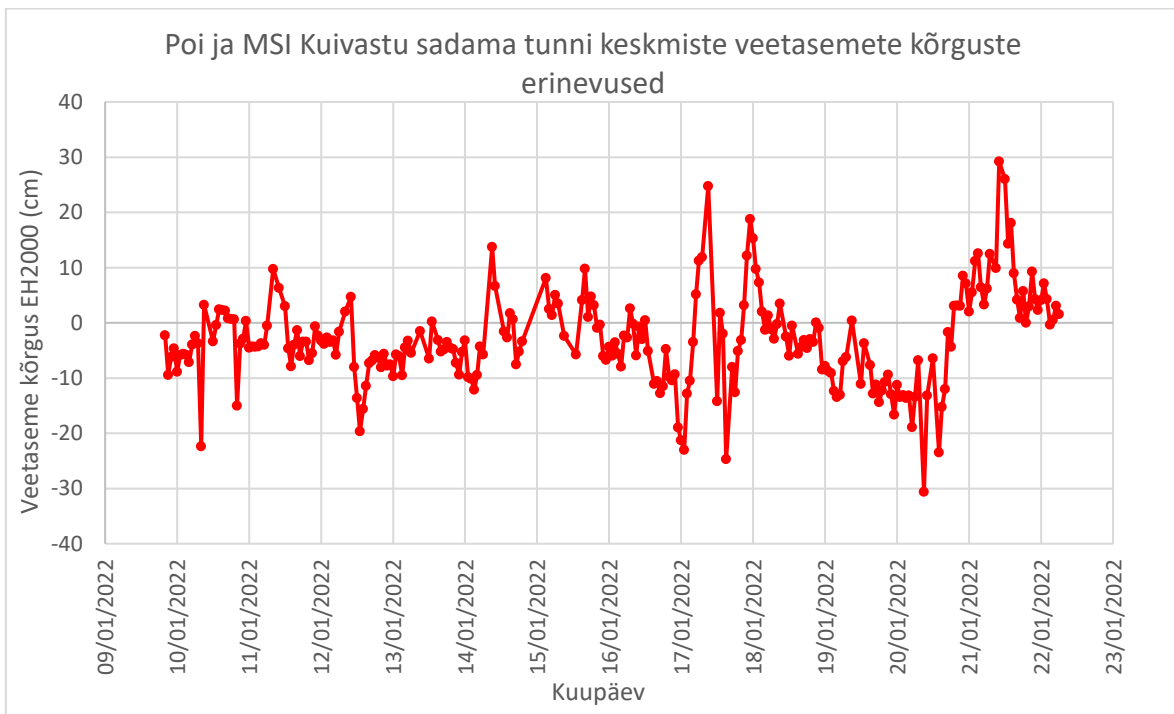
L5.2. Kuivastu veemõõdujaam



Joonis L5.4. Poi ja MSI Kuivastu sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused

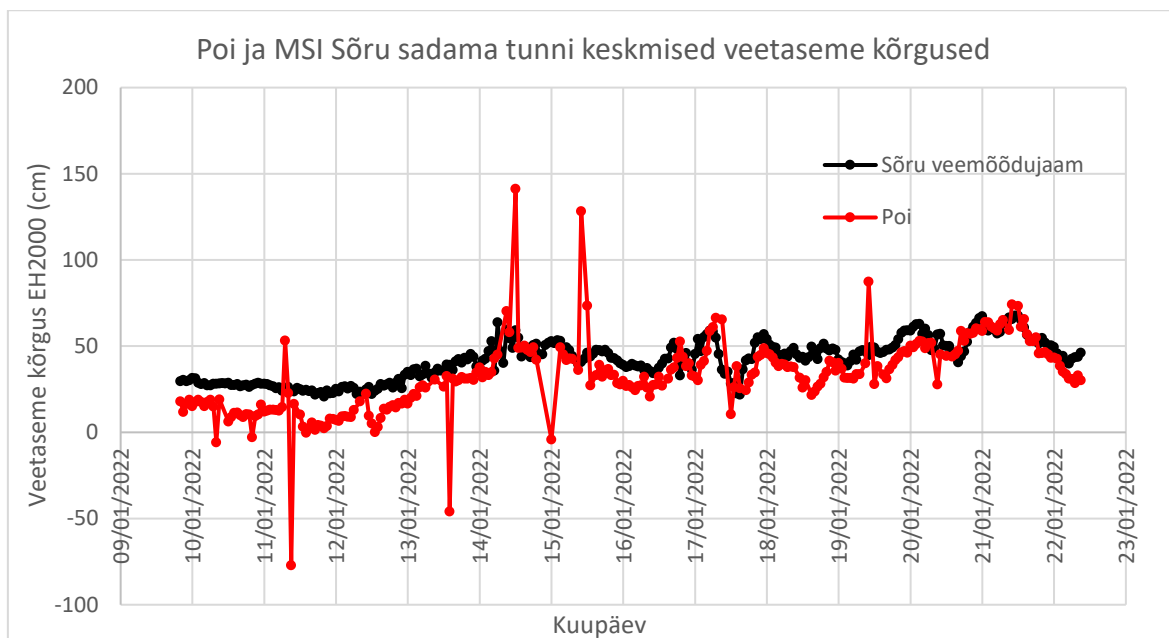


Joonis L5.5. Poi ja MSI Kuivastu sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused, millele on lisatud sensori antenni eeldatav faasisentri nihke väärtus ning eemaldatud on jämedad vead

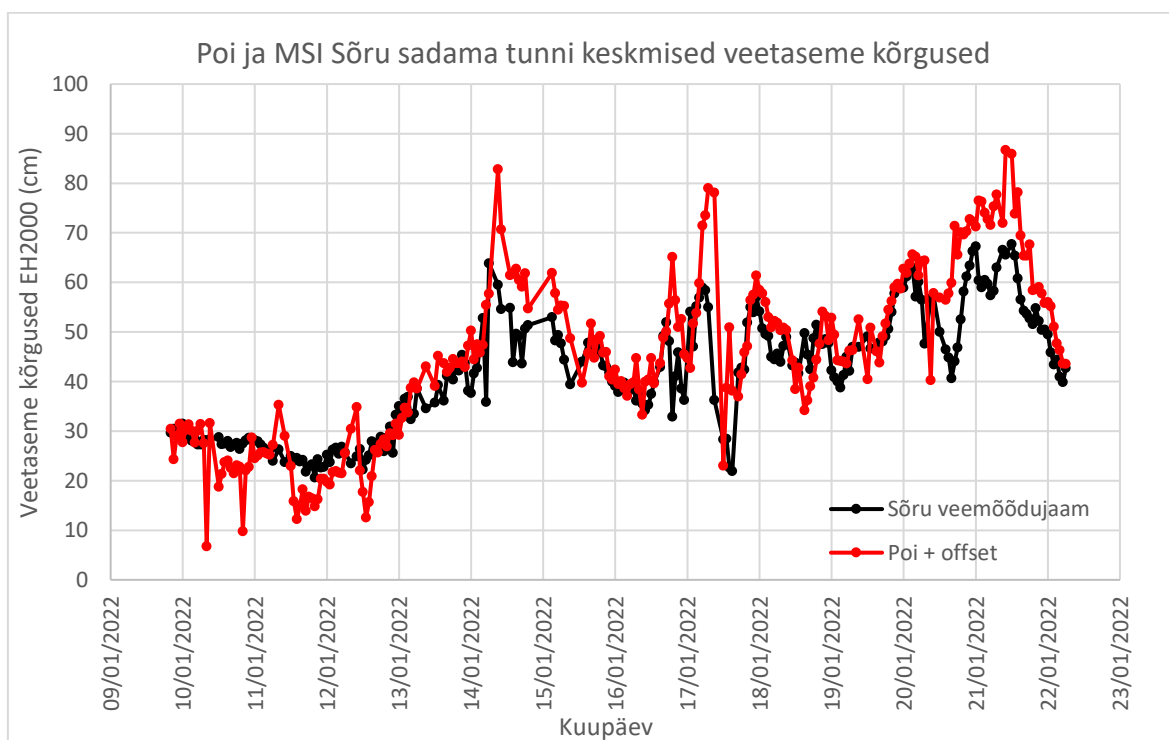


Joonis L5.6. Poi ja MSI Kuivastu sadama tunni keskmiste veetasemete kõrguste erinevused, arvutatud tõelise vea valemiga (Valem 4.1)

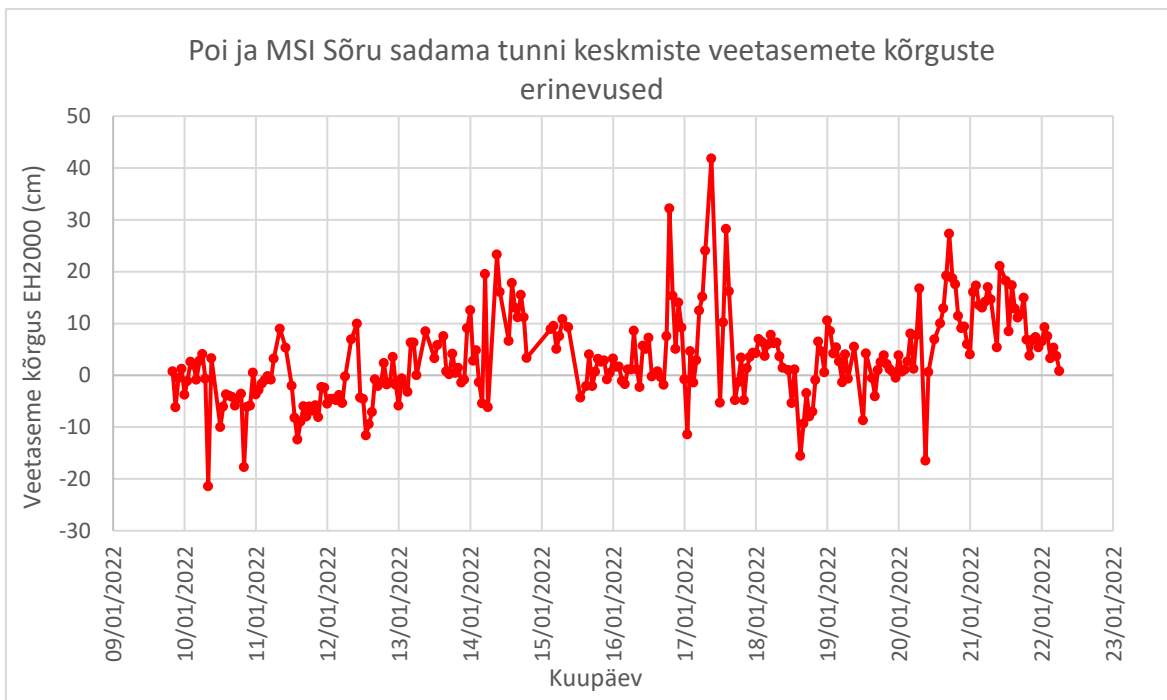
L5.3. Sõru veemõõdujaam



Joonis L5.7. Poi ja MSI Sõru sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused

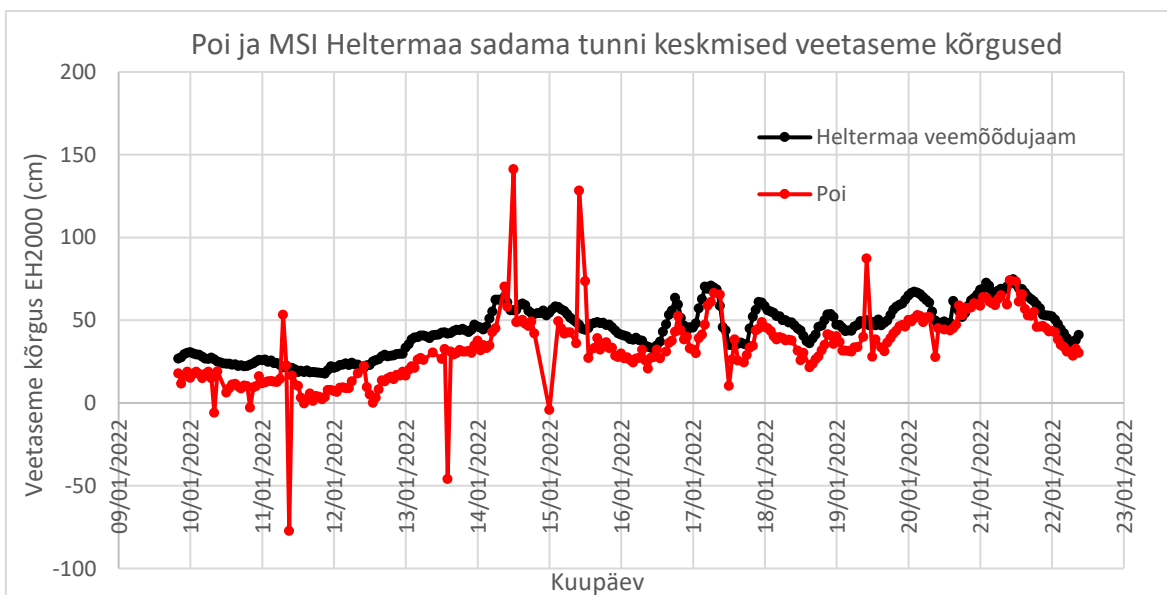


Joonis L5.8. Poi ja MSI Sõru sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused, millele on lisatud sensori antenni eeldatav faasisentri nihke väärtus ning eemaldatud on jämedad vead

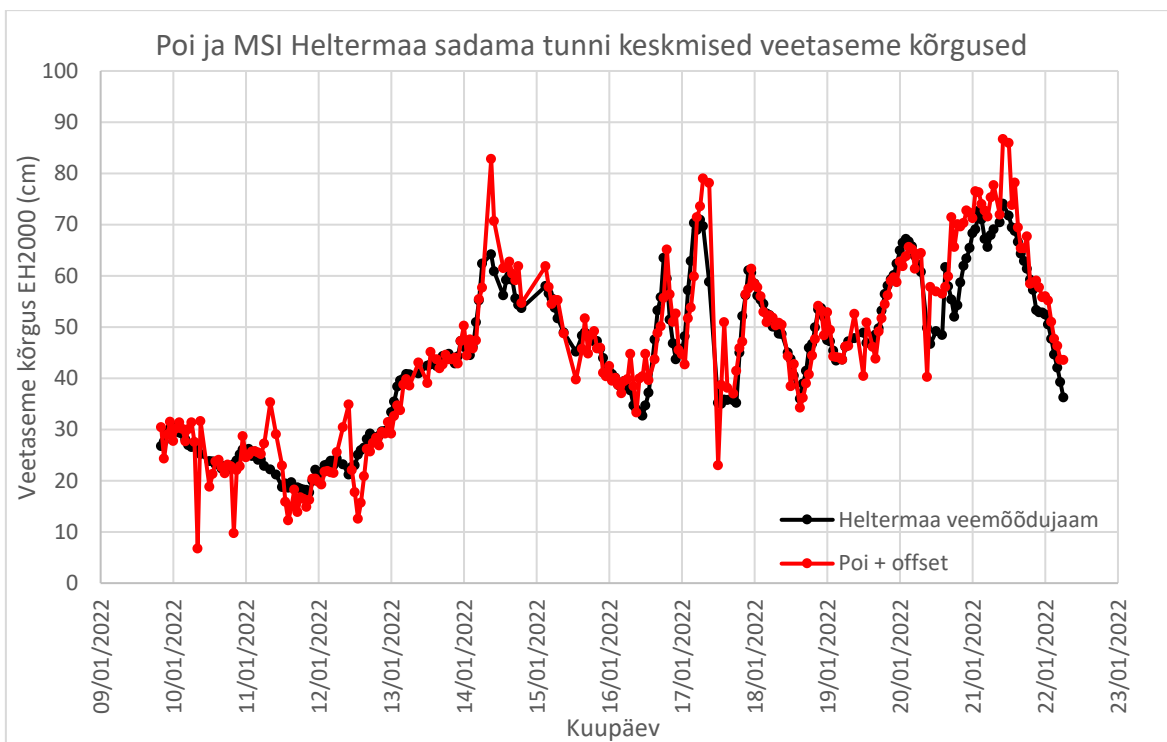


Joonis L5.9. Poi ja MSI Sõru sadama tunni keskmiste veetasemete kõrguste erinevused, arvutatuna tõelise vea valemiga (Valem 4.1)

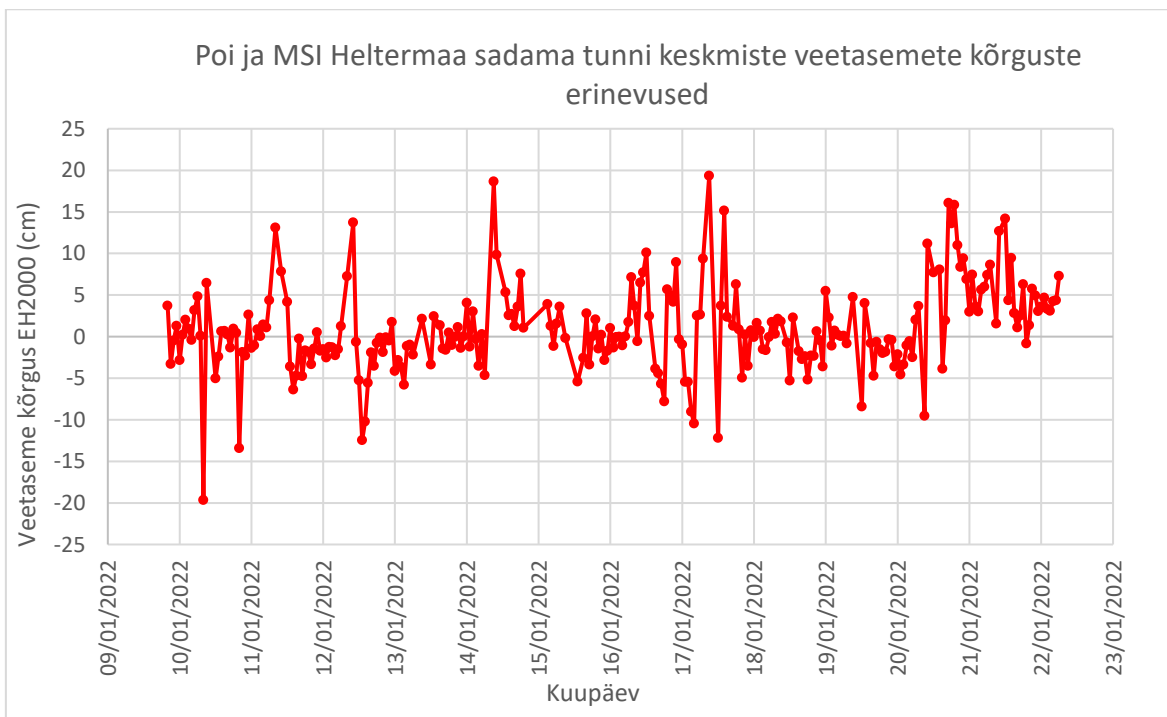
L4.4. Heltermaa veemõõdujaam



Joonis L5.10. Poi ja MSI Heltermaa sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused



Joonis L5.11. Poi ja MSI Heltermaa sadama tunni keskmised veetaseme kõrgused, millele on lisatud sensori antenni eeldatav faasisentri nihke väärtus ning eemaldatud on jämedad vead.



Joonis L5.12. Poi ja MSI Heltermaa sadama tunni keskmiste veetasemete kõrguste erinevused, arvatatuna tõelise vea valemiga (Valem 4.1)