



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Karel Kõre

**RTK GNSS MÕÕTMISTE STABIILSUS JA TÄPSUS
ERINEVATES PÜSIJAAMADE VÕRKUDES**

**RTK GNSS NETWORK MEASUREMENT STABILITY AND
ACCURACY IN DIFFERENT REAL TIME NETWORKS**

Bakalaureusetöö
Geodeesia ja maakorraldus õppekava

Juhendaja: dotsent Aive Liibusk, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Karel Kõre		Õppekava: Geodeesia ja maakorraldus (379)	
Pealkiri: RTK GNSS mõõtmiste stabiilsus ja täpsus erinevates püsijaamade võrkudes			
Lehekülgi: 48	Jooniseid: 25	Tabeleid: 4	Lisasid: 0
<p>Osakond: Geomaatika ETIS-e teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika (geodeesia) CERCS-i kood: P515 Juhendaja(d): dotsent Aive Liibusk, <i>PhD</i> Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2018</p>			
<p>Bakalaureusetöö eesmärgiks on välja selgitada, kui stabiilsed ja täpsed on RTK GNSS mõõtmised erinevates Eesti püsijaamade võrkudes. Eesmärgi saavutamiseks teostati RTK GNSS seadmega kolmetunnised mõõtmised riiklikul geodeetilisel II klassi punktil Lemmatsi97. Parandite saamiseks kasutati Maa-ameti, Geosoft OÜ ja Hades Invest OÜ püsijaamade GNSS võrke. Kokku teostati mõõtmisi viiel korral, millest 3 mõõtmist viidi läbi Hades Invest OÜ võrgus.</p> <p>Mõõtmiseks tsentreeriti GNSS vastuvõtja väga täpselt kindelpunktile. Mõõtmiseks kasutati Eesti Maaülikooli GNSS seadmeid Trimble R4- 2 vastuvõtjat ning TSC2 väliarvutit.</p> <p>Analüüsides selgus, et kõige täpsem ja stabiilsem VRS võrk on Geosoft OÜ poolt pakutav Trimble VRS Now. Geosoft OÜ võrk saavutas nii plaanilises kui ka kõrguslikus täpsuses parima tulemuse. Paremuselt järgmine on Maa-ameti võrk. Suurimad vead esinesid Hades Invest OÜ võrgus mõõdistades. Kõige suurem kõrguslik viga saadi Hades Invest OÜ võrgus mõõdistades, tulemusega -8,5 cm. Kõige paremini töötasid Geosoft OÜ ja Maa-ameti võrgud, kus plaaniline täpsus oli keskmiselt 2 cm ning kõrguslik 2,5 cm.</p>			
Märksõnad: VRS, RTK, GNSS täpsus			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Karel Kõre		Curriculum: Geodesy and land management (379)	
Title: RTK GNSS network measurement stability and accuracy in different real time networks			
Pages: 48	Figures: 25	Tables: 4	Appendixes: 0
Department: Geomatics Field of research and: 4. Natural Sciences and Engineering (geodesy) (CERCS) code: P515 Supervisors: Associate professor Aive Liibusk, <i>PhD</i> Place and date: Tartu, 2018			
<p>The objective of this bachelor thesis is to examine the level of stability and accuracy of the measurements of RTK GNSS network in different Estonian real time networks. To fulfil this objective, RTK GNSS equipment was used for measurements with the duration of 3 hours at a class II national geodetic point Lemmatsi97. Base stations of the GNSS networks of the Maa-amet and the companies Geosoft OÜ and Hades Invest OÜ were used to get correction information. A total of five measurements were carried out, three of these were conducted in the network of Hades Invest OÜ.</p> <p>For measurements, the GNSS receiver was centered on the known point with high accuracy. The GNSS equipment of the Estonian University of Life Sciences was used for measurements, i.e. Trimble R4-2 receiver and TSC2 data collector.</p> <p>The analysis showed that the most accurate and stable of the VRS networks was the Trimble VRS Now network offered by Geosoft OÜ, which had the best results both in terms of vertical as well as horizontal accuracy. The next best was the network of the Maa-amet, while most errors occurred in the measurements in Hades Invest network. The biggest vertical error -8.5 cm was achieved while measuring in the network of Hades Invest. The networks of Geosoft OÜ and the Maa-amet were most reliable, with the average horizontal accuracy of 2 cm and vertical accuracy of 2.5 cm.</p>			
Keywords: VRS, RTK, accuracy of GNSS			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. GNSS-SÜSTEEMID JA VRS KONTSEPTION	6
1.1. GPS-süsteemi ülevaade.....	6
1.2. GLONASS-süsteemi ülevaade	8
1.3. Erinevad RTK võrkude kontseptsioonid.....	10
1.3.1. VRS (<i>Virtual Reference Station</i>).....	10
1.3.2. MAX (<i>Master Auxiliary Corrections</i>).....	12
1.3.3. iMAX (<i>Individualized Master Auxiliary Corrections</i>).....	13
1.3.4. FKP (<i>Flächen-Korrektur Parameter</i>).....	13
1.4. RTK GNSS andmeedastusformaadid	14
2. EESTI RTK GNSS VÕRGUD	17
2.1. Maa-ameti GNSS püsijaamade võrk.....	17
2.2. Geosoft OÜ GNSS püsijaamade võrk Trimble VRS Now	20
2.3. Hades Invest OÜ GNSS püsijaamade võrk HadNet	21
3. METOODIKA	23
3.1. Välitööde kirjeldus.....	23
3.2. Satelliitide arv mõõtmispäevadel.....	26
3.3. Tulemuste analüüs	29
KOKKUVÕTE	43
KASUTATUD KIRJANDUS	45

SISSEJUHATUS

Käesoleva bakalaureusetöö teemaks valiti Eestis kasutusel olevate püsijaamade RTK (*Real Time Kinematic*) GNSS (*Global Navigation Satellite System*) mõõtmiste stabiilsus ja täpsus erinevates püsijaamade võrkudes. Uurimistöö eesmärgiks on välja selgitada, kui stabiilsed ja täpsed on RTK GNSS mõõtmised erinevates püsijaamade võrkudes, mida sageli kutsutakse ka VRS (*Virtual Reference Station*) võrkudeks. Teema valik oli ajendatud asjaolust, et mitmed maamõõtjad küsivad samu küsimusi ja otsust vastust pole suudetud neile anda. Seega viidi lõputöö käigus läbi kolmetunnised RTK GNSS mõõtmised riiklikul geodeetilisel II klassi punktil Lemamtsi97, mis asub Tartu linna piiril. VRS võrkudena kasutati Maa-ameti, Geosoft OÜ ja Hades Invest OÜ võrke.

Töö teoreetilises osas antakse ülevaade GNSS süsteemidest. Kirjeldatakse GPS (*Global Positioning System*) ja GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) süsteemi. Tuuakse välja nende kahe süsteemi ülesehitus ja areng. Võrreldakse kahe süsteemi täpsusi. Lisaks kirjeldatakse erinevaid RTK võrkude kontseptsioone ja RTK GNSS andmeedastusformaate. Järgnevalt antakse ülevaade GNSS püsijaamade võrkudest (Maa-amet, Geosoft OÜ ja Hades Invest OÜ), mis praegusel hetkel Eestis töötavad.

Bakalaureusetöö praktilise osa mõõtmised viidi läbi kellaajaliselt täpselt samal ajal, kella 12-15. Seda sellepärast, et mõõtmised oleksid võrreldavad ning et satelliitide arv oleks sarnane. Mõõtmisi kindelpunktil teostati viiel korral. Hades Invest OÜ võrgus mõõdistati kolmel korral. Metoodika peatükis kirjeldatakse detailselt välitööde tegevust. Antakse ülevaade mõõtmistel kasutatud mõõteseadmetest ja GNSS vastuvõtja täpsusest. Kirjeldatakse Maa-ameti, Geosoft OÜ ja Hades Invest OÜ võrkudes läbi viidud katseid üldiselt. Lisaks on koostatud taevakaardid igale katsemõõtmisele, et näha satelliitide arvu, DOP-ide väärtuseid ja nende mõju mõõtmistulemustele. Iga teostatud mõõtmise kohta on koostatud kaks graafikut, mille alusel on teostatud analüüs. Tulemuste analüüsi lõpus on statistiline tabel, mis annab ülevaate mõõtmiste täpsuste ja stabiilsuse kohta. Kokkuvõtte lõpus on ettepanek edaspidiseks.

1. GNSS-SÜSTEEMID JA VRS KONTSEPTSION

1.1. GPS-süsteemi ülevaade

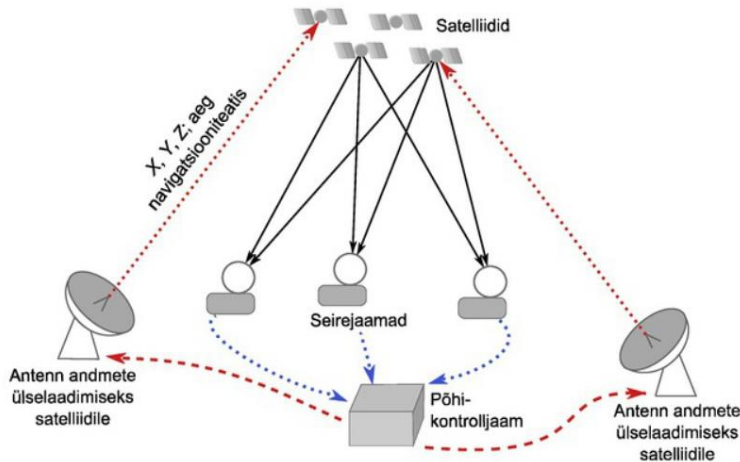
GPS-süsteem kuulub Ameerika Ühendriikidele, selle korrashoidmise ja arendamisega tegelevad USA õhujõud (*United States Air Force – USAF*). Esimesed satelliidid saadeti orbiidile 1978. aastal. Esialgu loodi see süsteem sõjalisel eesmärgil, kuid 1983. aastal lubati seda kasutada ka USA tsiviilisikutel. Möödus kümme aastat ning siis otsustati, et asukohamääramissüsteem peab olema tasuta kättesaadav üle kogu maailma (GPS General Introduction 2011). GPS satelliidid tiirlevad ca 20 200 km kõrgusel maapinnast ning nad teevad ühes ööpäevas kaks tiiru ümber Maa. Tänu 24 satelliidile on maakera igas punktis vähemalt neli satelliiti igal ajahetkel. GPS-süsteemi satelliidid tiirlevad kuuel erineval orbiidil (tabel 1). Kõik GPS-süsteemi tehiskaaslased edastavad signaale kahel erineval sagedusel (L1 ja L2, uuemad L5 ja L2C) (Eissfeller *et al.* 2007: 186).

Tabel 1. GPS ja GLONASS-süsteemide konstellatsioonide võrdlus

	GPS	GLONASS
Satelliitide arv	32	25
Orbiidid	6	3
Satelliitide kalle orbiidil	55°	64,8°
Orbiidi kõrgus	20 180 km	19 140 km
Satelliidi tiirlemisperiood	11 h 58 min	11 h 15 min
Esimene satelliit orbiidil	22.02.1978	02.10.1982
Koordinaatide daatum	WGS-84	PZ-90.11

Satelliitide korrasoleku ja süsteemi töösolekuga tuleb vaeva näha. Tehiskaaslaste asukohta mõjutavad nii Päikese-, Kuu- kui ka teiste planeetide külgetõmbejõud. Satelliidid kalduvad oma liikumistrajektorilt kõrvale, seega tuleb neile anda erinevaid parandeid ja juhtida need tagasi oma trajektorile. Lühidalt öeldes toimib kontroll satelliitide trajektorile järgmiselt. Maale on rajatud jälgimisjaamad, mis „teavad“ oma asukohta väga täpselt, selle abil arvutatakse

satelliitidele täpsed asukohad (Control Segment). Joonisel 1 on kujutatud GPS-süsteemi kontrollsegmendi põhimõtteline skeem.



Joonis 1. GPS-süsteemi maapealse kontrollsüsteemi põhimõte [Allikas: Rüdja, Sander 2013]

Süsteemi maapealsesse kontrollsüsteemi kuulub põhikontrolljaam, mis asub Colorados, alternatiivne põhikontrolljaam, mis asub Californias, 12 juhtimis- ja kontrollsüsteemi antenni ning 16 seirejaama. Seirejaamad saavad info satelliitidelt. Seirejaamade info koondatakse edasi põhikontrolljaama. Põhikontrolljaam saadab kellaparandid ja satelliitide täpsed asukohad edasi juhtimis- ja kontrollsüsteemi antennidele, mis edastavad andmed satelliitidele. Selle süsteemi kasutaja saab tulemusel navigatsiooniteatise vahendusel (Control Segment).

26.04.2018 seisuga on GPS-süsteemi konstellatsioonis 32 satelliiti. Töökorras on 31 satelliiti, üks satelliit on hoolduses. GPS-süsteemil on hetkel kasutusel kolme põlvkonna satelliidid. Esimese põlvkonna (Block IIA saadeti orbiidile aastatel 1990-1997) viimane satelliit kõrvaldati kasutusest 2016. aastal. Block IIR satelliite on saadeti orbiidile aastatel 1997-2004. Hetkel on selle põlvkonna satelliite orbiidil 12. Tehiskaaslased edastavad tsiviilkasutajale C/A koodist L1 signaali. Satelliidid edastavad ka P(Y) koodist L1 ja L2 signaale. Block IIR-M satelliitide orbiidile saatmine toimus aastatel 2005-2009. Orbiidil tiirleb selle põlvkonna satelliite hetkel 7. Satelliidid edastavad tsiviilkasutajale ka L2 (L2C) signaali. See signaal aitab mõõtetäpsust märgatavalt suurendada. Block IIR-M põlvkonna satelliidid edastavad uut militaar M koodi

signaale, mida tavakasutaja kasutada ei saa. Block IIF põlvkonna satelliite on orbiidil 12. Satelliite saadeti orbiidile aastatel 2010-2016. Satelliidid edastavad lisaks eelmise põlvkonna signaalidele veel ka L5 signaale, mis on mõeldud tsiviilkasutajale. GPS III/IIIF põlvkonna satelliite hetkel veel orbiidil ei ole. Esimene satelliit saadetakse orbiidile käesoleval aastal, kasutusele tuleb järjekordne tsiviilsignaali L1C (Space Segment).

1.2. GLONASS-süsteemi ülevaade

GLONASS-süsteemi haldab Venemaa. 1967. aastal saadeti orbiidile esimene Tsiklon süsteemi satelliit. Kuni 1978. aastani saadeti orbiitidele 31 Tsiklon süsteemi satelliiti. Esimene GLONASS-süsteemi satelliit (prototüüp) saadeti orbiidile 1982. aastal. Aastatel 1982-1991 saadeti orbiitidele kokku 43+5 satelliiti, kuid 1991. aastaks oli töökorras neist vaid 12 satelliiti. Venelaste süsteem hakkas tööle aastal 1993 ja esialgu testfaasis. Kogu GLONASS-süsteem saavutas planeeritud konstellatsiooni kaks aastat hiljem. Süsteemi kuulus 24 satelliiti. Sellisel satelliitide arvul kaua aega ei saadud töötada, sest puudus piisav rahastus sellele. 24 töötava satelliidini jõuti taas alles 2011. aasta lõpuks. Samal aastal hakati nutitelefonides GLONASS tuge pakkuma (GLONASS General Introduction 2011).

Võrreldes GPS süsteemiga on GLONASS-süsteemi satelliidid orbiidil madalamal (19 000 km kõrgusel maapinnast) (vt tabel 1). Orbiite on GLONASS-süsteemil kokku 3. Igal orbiidil on 8 satelliiti, mis on võrdselt paigutatud. Kuna Venemaa asub rohkem polaaraladel kui Ameerika Ühendriigid, on ka satelliidid orbiidil vastava nurga all ekvaatori suhtes- $64,8^\circ$, see teeb süsteemi kasutamise sobilikumaks just polaaraladel. Ka GLONASS-süsteemi satelliidid lähetavad signaale L1 ja L2 sagedusel, uuemad satelliidid ka sagedusel L3 (Eissfeller *et al.* 2007: 190).

GLONASS-süsteemi kontrolljaamad paiknevad põhiliselt ainult Venemaal, kaks jälgimisjaama on ainult väljaspool Venemaad (Antarktika ja Brasiilia). Maapealne kontrollsüsteem koosneb: põhikontrolljaamast (Krasnoznamensk), telemeetria-, jälgimis- ja käsujaamadest, laserlähetusjaamadest ning monitooringu- ja mõõtmisjaamadest.

26.04.2018 seisuga on GLONASS-süsteemi konstellatsioonis 25 satelliiti. Töökorras on 23 satelliiti, üks satelliit on lennukatsetuse faasis (*In flight tests phase*) ning üks on hoolduses.

Hetkel on süsteemil kasutusel kahe erineva põlvkonna satelliidid. Esimese generatsiooni on GLONASS ehk Uragan, mis lõpetas töötamise 2005. aastal. Selle põlvkonna satelliite hakati orbiidile saatma 1982. aastast. GLONASS generatsiooni viimane satelliit saadeti orbiidile 2005. aastal. GLONASS põlvkonna satelliidid edastasid signaale L1SF, L2SF, L1OF, FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). GLONASS-M generatsiooni satelliite hakati orbiidile saatma 2003. aastast. Selle põlvkonna satelliidid edastavad lisaks eelmise põlvkonna satelliitide signaalidele veel ka L2OF signaali ning alates aastast 2014 lisandus ka L3OC signaal. Samuti on GLONASS-M põlvkonna satelliitidel parem aatomkellade stabiilsus võrreldes eelneva põlvkonnaga, mis tagab täpsema asukohamääramise. Viimane GLONASS-M põlvkonna satelliit saadeti orbiidile 2017. aasta septembris. GLONASS-K1 on hetkel kõige uuem põlvkond, mille satelliidid realselt töötavad. Selle põlvkonna esimene satelliit saadeti orbiidile 2011. aastal. Järgmine satelliit saadeti orbiidile 2014. aasta novembris. Hetkel ongi sellest generatsioonist orbiidil vaid 2 satelliiti, mis edastavad GLONASS-M põlvkonnaga samasid signaale. Täpsus on GLONASS-K1 generatsiooni tehiskaaslastel parem kui eelneval põlvkonnal. See on tingitud aatomkellade stabiilsuse tõstmisest. GLONASS-K2 generatsiooni satelliite hetkel veel orbiidil ei ole. K2 põlvkonna satelliidid saadetakse orbiitidele aastatel 2018-2024. GLONASS-süsteemil on uuringufaasis veel ka GLONASS-KM põlvkonna satelliidid (An introduction...).

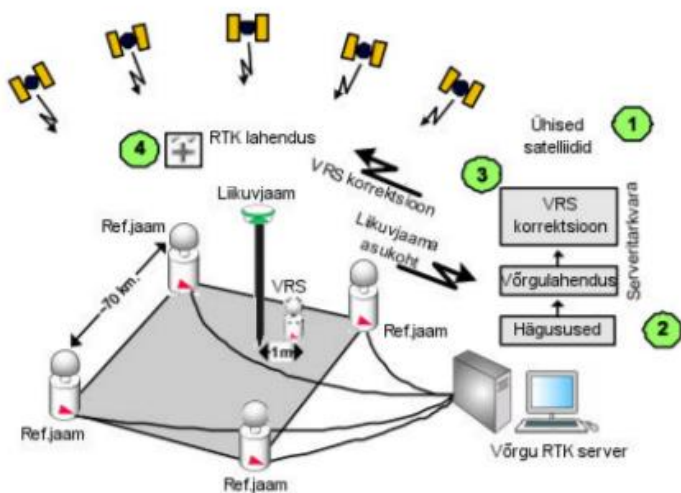
GLONASS-süsteemi täpsus on vähesel määral madalam kui GPS-süsteemil. Seevastu kõrgetel laiuskraadidel (põhjas ja lõunas) on GLONASS-süsteemil täpsus parem. See on tingitud satelliitide asendist orbiidil, milleks on $64,8^\circ$ ekvaatori suhtes. GLONASS-süsteemi ebatäpsused on tingitud mitmetest teguritest. Üheks veaks on satelliitide pardal olevad aatomkellad, mis on ebatäpsemad kui GPS-süsteemil. Teine viga tuleneb GLONASS-süsteemi väiksemast täpsusest efemeriidide edastamisel (*less accuracy in GLONASS broadcast ephemeris*) (GLONASS Performances 2011).

1.3. Erinevad RTK võrkude kontseptsioonid

Selles peatükis antakse ülevaade RTK võrkude kontseptsioonidest. Hetkel on olemas neli RTK võrgu kontseptsiooni: VRS (Trimble), MAX (Leica), iMAX (Leica) ning FKP (Geo++). Nendest kõige vanem on FKP kontseptsioon. Antakse ülevaade kontseptsioonide tööpõhimõttest. Lisaks antakse ülevaade Dubais läbi viidud katsemõõtmistest, kus uuriti sealse DVRS võrgus mõõtmiste täpsust.

1.3.1. VRS (*Virtual Reference Station*)

VRS kontseptsioon on välja töötatud Trimble poolt. VRS meetodil toimub algselt satelliitidelt pärineva info kogumine, samal ajal saadab liikuvjaam oma umbkaudse asukoha serverisse. Andmed saadetakse NMEA (*National Marine Electronics Association*) formaadis. Järgmisena toimub vaatlusandmete töötlemine ja alg tundmatute lahendamine. Seejärel server saadab liikuvjaamale RTCM parandid. Liikuvjaam töötleb saadud informatsiooni ja saadab serverisse uuesti päringu. Seejärel tekib liikuvjaama lähedale virtuaalne referentsjaam ning edaspidi saab liikuvjaam parandid sellest virtuaaljaamast (joonis 2) (Landau *et al.* 2002: 138).



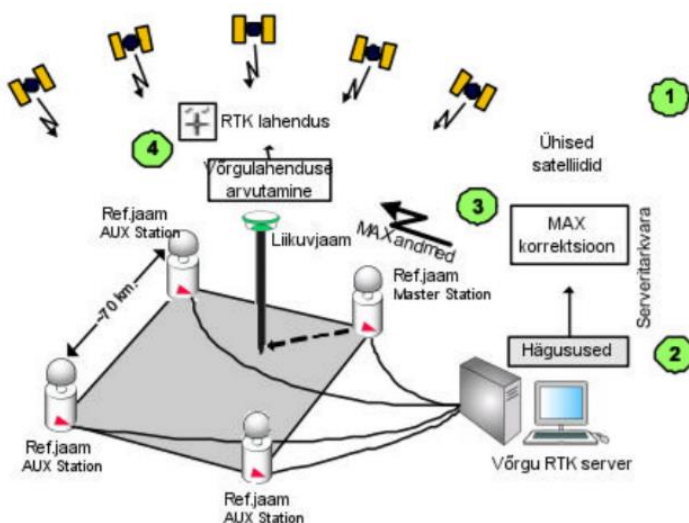
Joonis 2. VRS mõõtmise põhimõtteline skeem [Allikas: RTK võrgud... 2009]

VRS kontseptsioon eeldab kahesuunalist andmesidet. Sellel meetodil on omad plussid ja miinused. Üks kõige suurem pluss peitub selles, et virtuaalne referentsjaam asub liikuvjaama lähedal, mistõttu vahemaast sõltuvad vead on minimaalsed. Mõõtjal puutub vajadus ise oma referentsjaam ülesse panna, mis hoiab kokku raha kui ka aega. Parandite täpsus on suur, kuna andmeid saadakse paljudelt tugijaamadelt. VRS kontseptsiooni kasutamise miinuseks on mõõtmiste mittekorratavus, kuna liikuvjaama ja referentsjaama vahelist vektorit ei saa hiljem üle mõõta (RTK võrgud... 2009).

2009. aastal uuriti Dubais sealset VRS võrku. Võrgu nimi on Dubai Virtual Reference System (DVRS). DVRS võrgus on 5 püsijaama. Püsijaamades on kasutusel Leica vastuvõtjad. DVRS võrgu kättesaadavust ja üldist täpsust uuriti kolmes erinevas asukohas. Igas asukohas mõõdeti GNSS seadmega kümne erineva kindelpunkti peal. Eelnevalt olid kindelpunktid tahhümeetrilise mõõdistamisviisiga rajatud. Esimene katse viidi läbi linnaosas, mis asub püsijaamast (Al Qusies) mõne kilomeetri kaugusel. Teine katse toimus püsijaama (Al Lusali) lähedal ning samuti DVRS võrgu keskel. Kolmas katse viidi läbi võrgu leviala lõunapiiril, mis on umbkaudu 11,5 km eemal lähimast püsijaamast. Kolm katsemõõtmist teostati 1-2 tunnise ajavahemiku jooksul, et muutused satelliitide asukohas ja atmosfääris oleks olemas. PDOP väärtused olid vahemikus 1,9 – 3,9. Tulemuste analüüsis võrreldi omavahel esimese ja teise mõõtekatse koordinaatide erinevust ning esimese ja kolmanda mõõtekatse koordinaatide erinevust. Esimeses ja teises mõõtekatses jäid plaaniliselt koordinaatide vead 5 cm piiridesse, kõrguslik viga oli keskmiselt 6 cm. Esimese ja teise mõõtekatse Y-koordinaatide maksimaalne väärtus oli 5 cm, keskmine väärtus oli 4 mm. X-koordinaatide maksimaalne väärtus oli 6 mm, keskmine väärtus oli -9 mm. Kõrgusliku vea maksimaalne väärtus oli 6,9 cm, keskmine väärtus oli 2,1 cm. Esimese ja kolmanda mõõtekatse Y-koordinaatide maksimaalne väärtus oli 3,8 cm, keskmine väärtus oli -1,1 cm. X-koordinaatide maksimaalne väärtus oli -7 mm, keskmine väärtus oli -1,8 cm. Kõrgusliku vea maksimaalne väärtus oli 10,2 cm, keskmine väärtus oli 2,7 cm. Selle uuringuga tõestati, et kui soovitakse 1 cm täpsusega mõõta, siis peaks referentsjaamad olema lähemal kui 25 km (Al Marzooqi *et al.* 2009).

1.3.2. MAX (*Master Auxiliary Corrections*)

MAX meetod on välja töötatud aastal 2001 Leica Geosystems ja Geo++ poolt. Selle meetodi põhimõte on see, et tugijaamade võrgust on välja valitud üks põhi-tugijaam ja teised tugijaamad jäävad abijaamadeks. Liikuvjaamale saadetakse kõikidest tugijaamadest parandeid, mida rohkematest jaamadest parandeid saadakse, seda täpsemalt enda asukoht määratakse. MAX meetodi kasutamisel on neli etappi (joonis 3). Liikuvjaam saab põhi-tugijaama vaatlusandmed ja koordinaadid. Veel saab liikuvjaam abijaamade koordinaatide erinevused põhijaama suhtes ning algitudmatud. Liikuvjaamale saadetakse parandid põhi-tugijaama suhtes ning abijaamade parandite erinevused põhi-tugijaama suhtes (Brown *et al.* 2005).



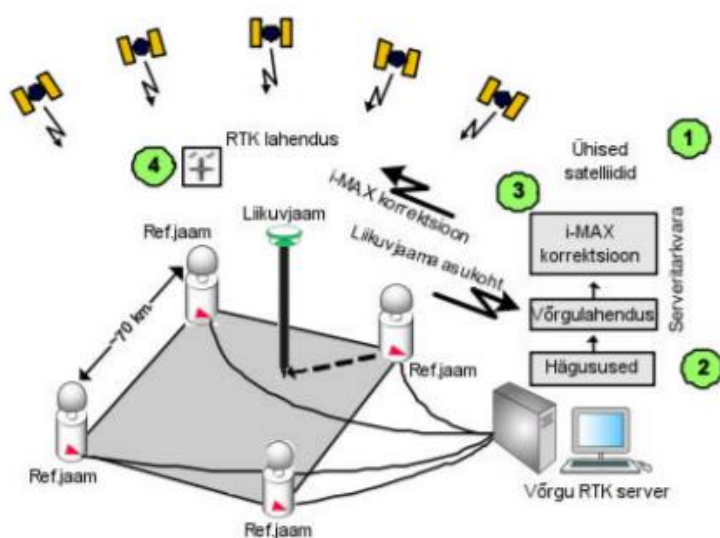
Joonis 3. MAX mõõtmise põhimõtteline skeem [Allikas: RTK võrgud... 2009]

Esmalt toimub serveris satelliitidelt vaatlusandmete kogumine. Peale seda on serveris vaatlusandmete töötlemine ja algitudmatute lahendamine. Järgnevalt genereeritakse ja saadetakse liikuvjaamale parandid. Saadud parandite põhjal arvutab liikuvjaam enda asukoha.

MAX meetodi plussiks on see, et liikuvjaama ja põhijaama vahelist baasjoont on võimalik mõõta, s.t mõõtmisi on võimalik korrata. Samuti on MAX ainukesena rahvusvaheliselt standardiseeritud võrgu RTK meetod.

1.3.3. iMAX (*Individualized Master Auxiliary Corrections*)

iMAX meetod on samuti Leica Geosystems poolt välja arendatud. See meetod on arendatud vanematele mõõteseadmetele, mis ei võimalda kasutada MAX meetodit. iMAX kontseptsiooni puhul ei lange liikuvjaamale nii suurt arvutamise koormust kui MAX kontseptsioonil. iMAX meetodil interpoleerib server parandid vastavalt liikuvjaama asukohale (Brown *et al.* 2005). iMAX meetodi põhimõtteline lahendus on joonisel 4.



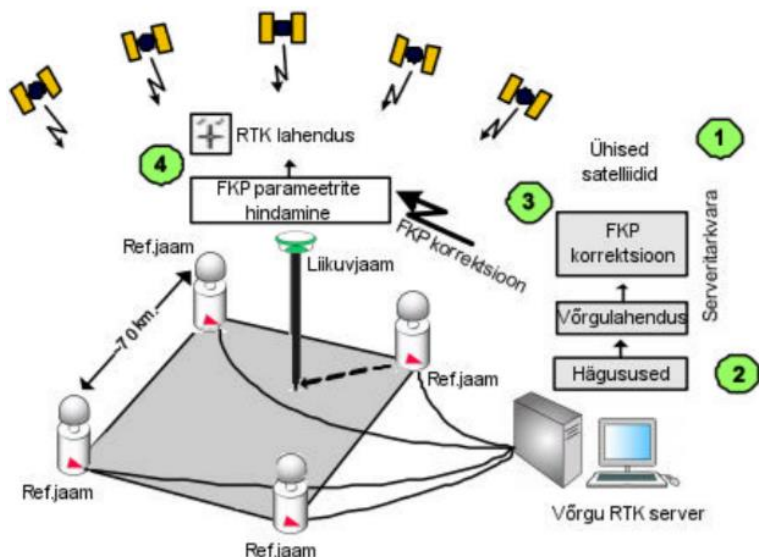
Joonis 4. iMax mõõtmise põhimõtteline skeem [Allikas: RTK võrgud... 2009]

Esmalt toimub serveris satelliitidelt vaatlusandmete kogumine ning liikuvjaam saadab serverisse enda umbkaudse asukoha. Seejärel toimub serveris vaatlusandmete töötlemine ja algundmatute lahendamine. Server saadab liikuvjaamale töödeldud andmed. Liikuvjaam arvutab vahe peajaama ja liikuvjaama vahel, et saada teada enda lõplik asukoht.

1.3.4. FKP (*Flächen-Korrektur Parameter*)

FKP on vanim RTK meetod, mille arendas välja Geo++ 1990-ndate aastate keskel. FKP meetodil arvutatakse liikuvjaamas välja orbiidi ja atmosfääri parandeid lineaarse

interpoleerimise teel. Andmeside on ühesuunaline, mistõttu pole vastuvõtja asukoht parandite saamise protsessi käigus oluline. Kasutaja saab kogu võrgu lahenduse, kust interpoleerib parandi oma asukohast lähtuvalt (Wübbena *et al.* 2001). FKP meetodi põhimõtteline lahendus on joonisel 5.



Joonis 5. FKP mõõtmise põhimõtteline skeem [Allikas: RTK võrgud... 2009]

Esmalt toimub serveris satelliitidelt vaatlusandmete kogumine. Järgnevalt toimub serveris vaatlusandmete töötlemine ning algundmatute lahendamine. Peale seda genereeritakse ja saadetakse liikuvjaamale parandid. Parandid hõlmavad kogu võrku. Viimases osas toimub saadud informatsiooni hindamine, misjärel saavutatakse RTK lahendus.

1.4. RTK GNSS andmeedastusformaadid

RTK parandite edastamiseks baasjaamast või GNSS võrgust kasutatakse erinevaid andmeformaate. Kõige tuntum ja enam kasutust leidev on RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*). RTCM on teadus- ja haridusorganisatsioon, mis on asutatud 1947. aastal

Ameerikas. Organisatsioon tegeleb merendusside ning raadionavigatsiooniga ja sellega seotud tehnoloogiatega. Algselt loodi RTCM SC-101 (*Digital Selective Calling - DSC*), millele järgnes SC-104 (*Differential Global Navigation Satellite Systems - DGNSS*) erikomitee (RTCM's special committees). RTCM SC-104 loodi 1983. aastal, algselt selleks, et saavutada navigeerimise täpsuseks 5 m (Wübbena *et al.* 2006).

RTCM SC-104 formaadiga toimub GNSS parandite edastamine baasjaamast vastuvõtjasse ning on mõeldud RTK/DGNSS mõõtmisteks. Iga andmerida sisaldab mitmeid erineva sisuga andmeliike ning iga andmeliik sisaldab päist ja põhiosa. Päis sisaldab: andmeliik, aeg, andmete pikkus. Põhiosa sisaldab: andmeliigi spetsiifilised andmed. Andmete liike on kokku 63 (joonis 6). Andmeedastuseks kasutatakse GSM mobiilsidet. Tänapäeval kasutatakse 4,5G internetti, 5G interneti testimine on juba alanud.

Message type identifier	Message Name
1	Differential GPS Corrections
2	Delta Differential GPS Corrections
3	Reference Station Parameters
4	Surveying
5	Constellation Health
6	Null Frame
7	Beacon Almanacs
8	Pseudolite Almanacs
9	Partial Satellite Set Differential Corrections
10	P-Code Differential Corrections (all)
11	C/A-Code L1, L2 Delta Corrections
12	Pseudolite Station Parameters
13	Ground Transmitter Parameters
14	Surveying Auxiliary Message
15	Ionosphere (Troposphere) Message
16	Special Message
17	Ephemeris Almanac
18	Uncorrected Carrier Phase Measurements
19	Uncorrected Pseudorange Measurements
20	RTK Carrier Phase Corrections
21	RTK Pseudorange Corrections
22-58	Undefined
59	Proprietary Message
60-63	geMultipurpose Usa

Joonis 6. RTCM andmeliigid ja nende sisu [Allikas: DGNSS Standards 2011]

RTCM on levinum andmeformaad RTK korrektsioonisignaali edastamiseks. See korrektsioonisignaali on universaalne ja seda toetab suurem osa vastuvõtjatest. RTCM 2.x andmeedastusformaad on edasi arendatud algsest RTCM formaadist. Versioon 2.1-le lisati RTK tugi. Versioonile 2.2 lisati GLONASS-süsteemi tugi ning viimane 2.3 versioon on täiendatud

versioon, mis lisab mõõtetäpsust RTK mõõtmistel. RTCM 2.x andmeedastusformaati kasutatakse vanemates vastuvõtjates, mis ei võimalda kasutada RTCM 3.x tuge (Wübbena *et al.* 2006). RTCM 3.x andmeformaad on uusim RTCM formaad, millel on parem andmete kokkupakkimise suutlikkus kui RTCM 2.x formaadil, mis võimaldab sama andmehulga juures edastada rohkem infot. Versioonile 3.1 on lisatud MAX kontseptsiooni kasutamise võimalus. Versioonile 3.2 on lisatud BeiDou, Galileo, QZSS ja SBAS tugi (*Ibid.*).

CMR (*The Compact Measurement Record*) andmeformaad on arendatud Trimble poolt 1992. aastal. Algselt oli see andmeformaad patenteeritud, kuid rivaalid mõistsid, kuidas seda formaati analüüsida ning seejärel otsustas Trimble CMR andmeformaadi spetsifikatsioonid avalikustada. CMR formaati kasutatakse vaid vanemates vastuvõtjates, mis ei võimalda uuemaid andmeformaate kasutada. CMR andmeformaad oli välja töötatud meetodina kasutamaks püsijaamade kompaktses vormingus koodi- ja faasisageduse parandite edastamiseks liikuvjaamadele (CMRx: A New... 2009). Trimble täiendatud andmeformaad on **CMR+**, mis võeti kasutusele 1997. aastal. CMR+ andmeformaad on parem kui CMR, kuna sellel on ühtlasem signaalipikkus ja vähem juhuslikkust ning info on kokkupakitum. 2005. aastal lisas Trimble CMR+ andmeformaadile ka GLONASS-süsteemi parandite saamise võimaluse (*Ibid.*). **CMRx** on Trimble uusim andmeedastusformaad. CMRx eesmärk on parandada initsialiseerimisaja pikkust. Selles versioonis kasutatakse lisaks vanadele satelliitide signaalidele ka uusimaid. Tulemuseks on see, et sellel andmeedastusformaadil on suurem jõudlus linnasisestel mõõtmistel, kus on palju takistusi (RTK Standards 2011).

Leica andmeedastusformaad on binaarne andmeformaad, mille on arendanud Leica. See andmeformaad toetab nii GPS kui ka GLONASS-süsteemi L1 ja L2 signaale. Seda formaati on soovitatav kasutada ainult Leica instrumentidega (Leica Captivate... 2015: 169). **Leica 4G** andmeformaad on uusim Leica andmeformaad. Sellel versioonil on võimalik kasutada GPS-süsteemist veel ka L5 signaali. GLONASS-süsteemist saab kasutada endiselt L1 ja L2 signaale. Leica 4G toetab veel ka Galileo E1, E5a, E5b ning Alt-BOC signaale. Samuti toetab see BeiDou B1 ja B2 signaale. Ka Leica 4G andmeformaad on kokkupakitum kui Leica formaad, saades rohkem infot edastada sama andmehulga juures. Leica 4G andmeformaati on soovitatav kasutada vaid Leica instrumentidega (*Ibid.*).

2. EESTI RTK GNSS VÕRGUD

2.1. Maa-ameti GNSS püsijaamade võrk

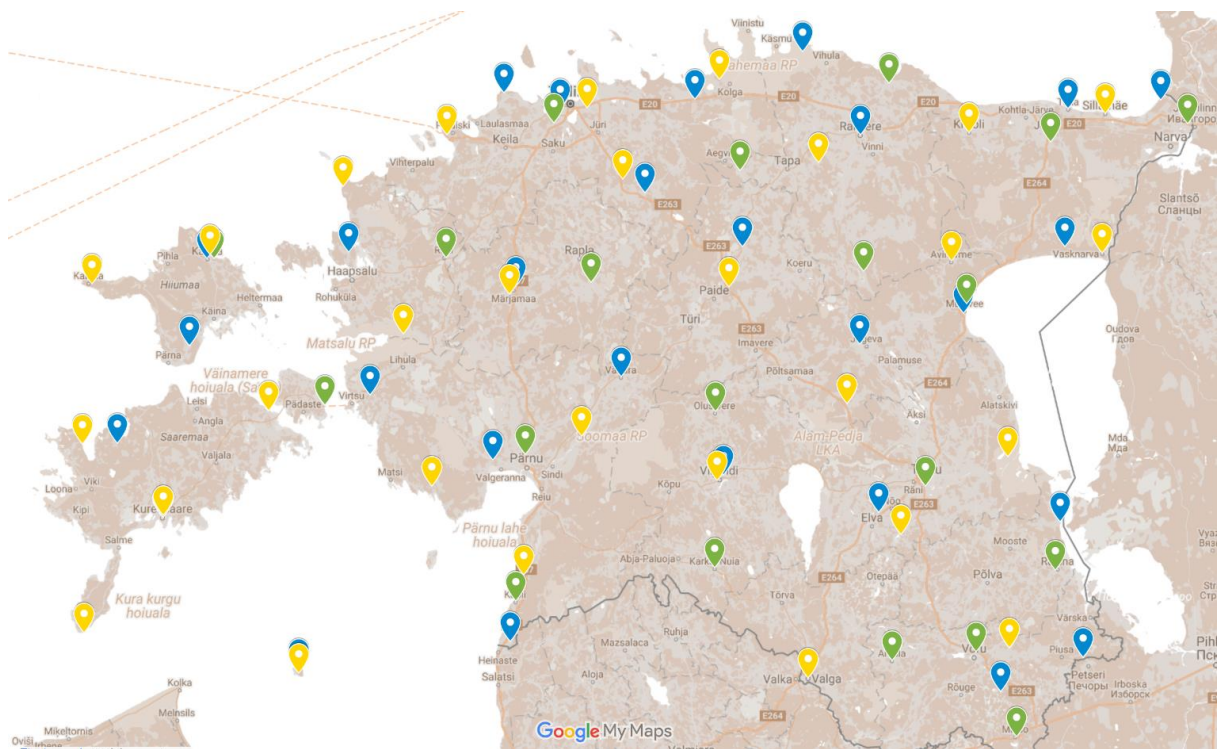
1994. a juunis toimus Helsingis geodeesia-alane nõupidamine, kus otsustati rajada Tallinna lähedale esimene Eesti riiklik GNSS püsijaam. Püsijaama asukohaks valiti Suurupi tule torn (joonis 7). Reaalselt hakkas esimene riiklik püsijaam tööle 1996. aasta novembris (GNSS püsijaamad 2018).



Joonis 7. Suurupi GNSS püsijaam [Allikas: GNSS püsijaamad 2018]

2006. aastal paigaldati uus püsijaam Tallinnasse Maa-ameti hoone (Mustamäe tee 51) katusele. Järgmisel aastal rajati viiest GNSS püsijaamast koosnev referentsjaamade võrk. Sinna võrku

kuulusid Suurupi, Kuressaare, Audru, Tõravere ja Toila püsijaamad. Aastal 2008 püstitati püsijaamad Kärdlasse, Mustveesse ja Võrru. Eesti-Šveitsi koostööprogrammi toel toimus aastatel 2014-2016 GNSS püsijaamade võrgu rekonstrueerimine, mille käigus vahetati välja 9 GNSS püsijaama seadmestik ja rajati 19 uut püsijaama. Maa-ameti peahoonesse rajati GNSS reaallaja mõõtmiste jaoks tarvilik juhtimiskeskus. Maa-ameti püsijaamade võrgus on 2018. aasta seisuga 28 püsijaama (joonis 8) (*Ibid.*).



Joonis 8. Maa-ameti 28 (sinine), Geosoft OÜ 21 (roheline) ja Hades Invest OÜ 29 (kollane) GNSS püsijaama asukohad [Allikas: Google Maps]

Maa-ameti püsijaamade võrgus on kasutusel Leica GR25 GNSS vastuvõtjad ja AR25 GNSS Choke Ring tüüpi antennid koos antennikattega LEIS (joonis 9). Lisaks on 13 püsijaama varustatud meteosensoriga Vaisala WXT520, mis võimaldab fikseerida täpseid ilmastikunähtusi püsijaama asukohas.



a)



b)

Joonis 9. (a) Leica AR25 Choke Ring antenn ja (b) Leica GR25 GNSS vastuvõtja [Allikas: Leica-Geosystems, Smart Office]

Maa-ameti struktuuriüksused kasutavad püsijaamade võrku järgmistel toimingutel:

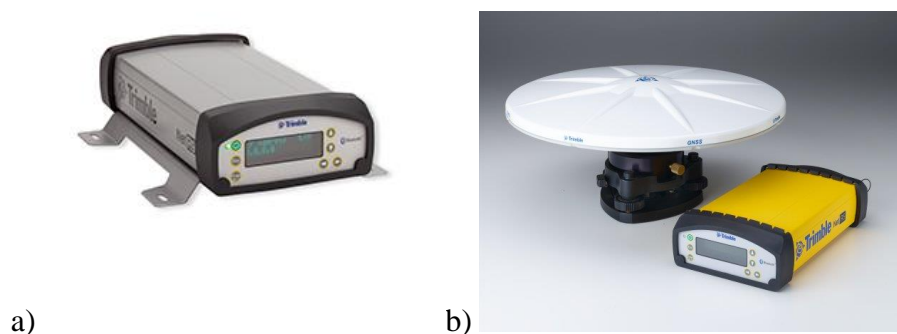
- Katastriüksuste kontrollmõõdistused
- Aeropildistamine ja laserskanneerimine (vajaminevate märkide koordineerimiseks)
- Välikaardistamine
- Rannajoone kontrollmõõdistamine
- Geodeetiliste punktide kontrollmõõdistamine

Maa-ameti püsijaamade infot kasutavad veel ka Põllumajanduse Registre ja Informatsiooni Amet (PRIA), Keskkonnaministeerium, Riigi Metsamajandamise Keskus (RMK), Eesti Taimekasvatuse Instituut (ETKI), Veeteede Amet (VTA) jt. Teaduslikel ja õppetööga seonduvatel eesmärkidel on lubatud juurdepääs veel ka Tallinna Tehnikaülikoolile ja Eesti Maailikoolile (GNSS püsijaamad 2018). Eelnevalt loetletud asutustele on teenus tasuta. Tavakasutajale teenust ei jagata.

Maa-amet pakub mõõtmisteks erinevaid andmeside võimalusi ehk *Mount Point*-e. *Mount Point* jaotus põhineb võrguparandi meetodil (VRS, MAX, iMAX, FKP) ja edastusformaadil (RTCM2.3, RTCM 3.X, CMR, Leica). Samuti edastab Maa-amet ka parandit lähimast GNSS-püsijaamast.

2.2. Geosoft OÜ GNSS püsijaamade võrk Trimble VRS Now

Geosoft OÜ alustas Eestis VRS võrgu rajamist 2006. aastal, kui paigaldati esimene püsijaam Tallinnasse. Aastal 2007 algas võrgu I etapi ehitus, kus püstitati 4 püsijaama. 2008. aastal installeeriti võrgule tarkvara ja jätkati II etapi referentsjaamade ehitamist, püstitati 16 uut püsijaama. 2009. aastal püsijaamade ehitamine lõpetati ja käivitati Trimble VRS Now Eesti teenus koostöös Trimble Europe B.V-ga. 2018 aasta seisuga on referentsjaamasid kokku 21 (vt joonis 8). VRS võrgu tarkvaraks on Trimble VRS³Net™. Püsijaamades on kasutusel NetR5 ja NetR9 vastuvõtjad ja Zephyr Geodetic II antennid (joonis 10). NetR9 vastuvõtja on uuemat tüüpi vastuvõtja. Geosoft OÜ on volitatud Trimble tugi- ja hooldusteenuse pakkuja. Geosoft OÜ kasutab oma püsijaamade võrgus Trimble seadmeid, seega paljud inimesed kutsuvad seda võrku ka Trimble võrguks (Valdmaa 2010).



Joonis 10. Geosoft OÜ püsijaamades kasutusel olev (a) Trimble NetR9 ja (b) NetR5 vastuvõtja ning Zephyr Geodetic II antenn [Allikas: Trimble, Impexgeo]

Geosoft OÜ pakub VRS kontseptsiooni mõõtmisteks kaheksat erinevat *Mount Point*-i. Nendeks on: RTCM_23, RTCM_31, RTCM_31_GPS_Only, CMR_PLUS, CMR_X, DGPS, H-STAR ning DGPS_GIS. Andmeedastusformaatidest on kasutusel RTCM 2.3, RTCM 3.1, CMR, CMR+ ning CMRx. Kasutatavad on GPS L1/L2/L2c ja GLONASS signaalid (Geosoft OÜ tehniline...). Tabelis 2 on välja toodud Geosoft OÜ võrgu teenuste täpsus ja rakendusala.

Tabel 2. Trimble VRS Now Eesti teenuste täpsus ja rakendus [Allikas: Valdmaa 2010]

Trimble VRS Now Eesti	Täpsus	Rakendus
Trimble VRS Now RTK	1-3 cm horisontaalne 1-5 cm vertikaalne	-Geodeesia -Ehitus -Põllumajandus
Trimble VRS Now H-Star	10-30 cm horisontaalne	-Kaardistamine -GIS
Trimble VRS Now DGNSS	50-100 cm horisontaalne	-Navigeerimine -Andmekogumid

Trimble VRS Now teenus on tasuline. 2018. aastal on piiramatult RTK hind alates 1195 EUR/aasta. Eesti 100 hind on alates 695 EUR/100 h ning Trimble VRS Now Europe Unlimited hind on alates 2995 EUR/aasta. Trimble VRS H-STAR teenuse hind on alates 595 EUR/aasta ja Trimble VRS Now H-STAR 100 teenus hind on alates 295 EUR/aasta. Net-dGNSS hind on alates 295 EUR/aasta (Geosoft OÜ hinnakiri).

2.3. Hades Invest OÜ GNSS püsijaamade võrk HadNet

Hades Invest OÜ kasutab püsijaamade võrgus Topcon seadmeid. Hades Invest OÜ alustas püsijaamade paigaldamisega 2008. aastal. Läbi aastate on võrku tihendatud. Hades Invest OÜ otsustas, et püsijaamade vahekaugused ei tohi ületada 50 km. Põhjuseks oli 2010. aastal suurenenud päikeseaktiivsus (Kirs, 2017). 2017. aasta seisuga on Hades Invest OÜ võrgus 29 püsijaama (vt joonis 8). Püsijaamades kasutatakse Topcon Legacy ja Topcon Net G3 seeria vastuvõtjaid. Antennidena on kasutusel Topcon PG-A1 (joonis 11).



Joonis 11. HadNet püsijaamades kasutusel olevad (a) Topcon Legacy ja (b) Net G3 vastuvõtjad ning (c) Topcon PG-A1 antenn [Allikas: Topconcare, Topconpositioning, Precision-geosystems]

HadNet võrgu kasutajad kasutavad VRS kontseptsiooni. Hades Invest OÜ võrgus on saadaval edastusformaatidest RTCM, CMR ja CMR+. Võrgu teenus on tasuline. Parandite saamine üheks päevaks maksab 2018. aastal 15 EUR. Nädalapikkune litsents maksab 50 EUR, kuuajaline 100 EUR ning aastane litsentsitasu on 80 EUR/kuu ehk 960 EUR/aasta (GNSS võrgu hinnakiri).

3. METOODIKA

3.1. Välitööde kirjeldus

RTK GNSS mõõtmised viidi läbi 2017 a. 4. ja 18. november, 20. ja 21. jaanuar ning 7. aprill 2018 a. Mõõtmisteks kasutati Eesti Maaülikooli RTK GNSS vastuvõtjat Trimble R4-2 ja Trimble väliarvutit TSC2. Trimble R4-2 spetsifikatsioonis on öeldud, et RTK mõõtmiste horisontaaltäpsus on $8 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}^1 \text{ RMS}^2$ ning vertikaaltäpsus on $15 \text{ mm} + 1 \text{ ppm RMS}$ (Datashet - Trimble R4... 2015). Kompleti kuulus veel puitstatiiv, treeger, pikenduspulk ning adapter (joonis 12). Mõõtmised teostati riigi II klassi geodeetilisel punktil Lemmatsi97 koordinaatidega: X- 6470080,362 m; Y- 656449,101 m; h (ellipsoidi kõrgus)- 85,863 m. Kõikide mõõtmiskatsete parameetrid on välja toodud tabelis 3. Tabelis on nimetatud võrk, kus mõõdeti, mõõtmiste alguskellaeg ja kuupäev, mõõtesessiooni pikkus, tõusunurk (oli igal mõõtmisel sama), maksimaalne ja minimaalne satelliitide arv, salvestuse intervall (oli igal mõõtmisel sama), salvestatud punktide arv, *Mount Point* ning õhutemperatuur.

Mõõtmiste alustamiseks läbiti järgmised sammud:

1. Statiiv tsentreeriti ja horisonteeriti põhivõrgu punktil
2. Statiivile asetati GNSS antenn-vastuvõtja
3. GNSS antenni kõrgus mõõdeti kolmest küljest kaldkõrgusena punkti tsentrist antenni küljeni (*Center of bumper*)
4. Väliarvutisse loodi uus töö
5. Valiti menüüst: Mõõtmine - Pidev topomõõdistus (*Survey – Continuous topo*)
6. Sisestati GNSS seadme kõrgus: Mõõdetud – Antenni äär (*Measured to - Center of bumper*)
7. Mõõtmise meetodiks valiti: Fikseeritud aeg (*Fixed time*) intervalliga 1 sekund

¹ PPM (*Part Per Million*) tähendab seda, et iga kilomeetriga, mis liikuvjaam liigub baasjaamast eemale lisandub 1 mm viga mõõtmistele. $1 \text{ ppm} = 1 \text{ mm}/1 \text{ km}$ ehk $10 \text{ km} = 1 \text{ cm}$

² RMS (*Root Mean Square*) - keskmine ruutviga.



Joonis 12. Töös kasutatud GNSS vastuvõtja Trimble R4-2 põhivõrgupunktil Lemmati97

Esimesel mõõtepäeval 04.11.2017 teostati mõõtmisi Maa-ameti võrgus ning *Mount Point*-iks valiti VRS-CMR+. *Mount Point*-iks valiti CMR+, kuna see edastab struktuuriliselt paremat signaali, kui tavaline CMR. Väliarvutis vaadati Maa-ameti võrgu profiilis üle tõusunurk, milleks oli 15°, samuti vaadati üle PDOP arv. Mõõtmiste alguskellaajaks fikseeriti 11.55 (vt tabel 3). Mõõtmine lõpetati kell 14.55. Kokku salvestati 10 801 punkti. Sarnaste tingimustega mõõtmised teostati veel neljal korral.

Järgnevad kolm mõõtmist teostati Hades Invest OÜ võrgus. Mõõtmised teostati 18.11.2017, 20.01.2018 ja 21.01.2018. *Mount Point*-i valis väliarvuti, kuna see oli eelnevalt selliselt seadistatud. Tõusunurk jäi esimese mõõtmiskatse järel samaks. Ilmad kahel viimasel mõõtepäeval olid jahedad ning GNSS vastuvõtja akud tühjenesid kiiresti. Umbes 1,5 tundi pärast mõõtmiste alustamist oli akud 10%-i peale langenud.

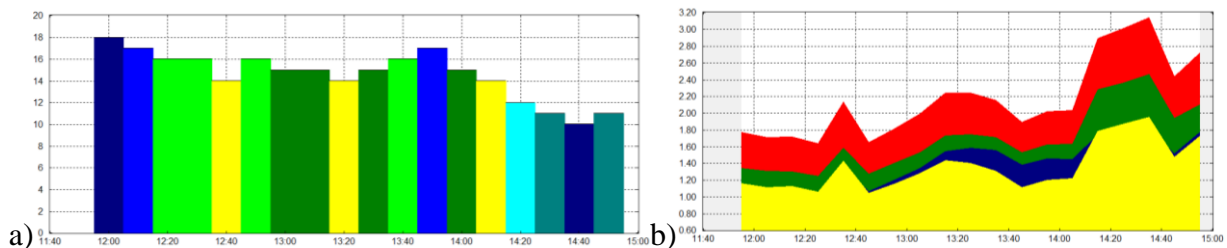
Tabel 3. Mõõtmiste parameetrid

Kuupäev	Võrk	Algus- kella- aeg	Mõõtesessiooni pikkus (minutit)	Tõusu- nurk	Max sat. arv	Min sat. arv	Salvestuse intervall	Salvestatud punktide arv	Mount Point	Temp.
04.11.2017	Maa- amet	11:55	180	15°	17	5	1 sek	10801	VRS-CMR+	+8° C
18.11.2017	Hades Invest OÜ	12:21	78,5	15°	17	15	1 sek	4714	VRSX	+5° C
20.01.2018	Hades Invest OÜ	11:57	117	15°	10	6	1 sek	7020	VRSX	-1° C
21.01.2018	Hades Invest OÜ	11:52	117,9	15°	11	6	1 sek	7075	VRSX	-2° C
07.04.2018	Geosoft OÜ	11:56	180	15°	18	12	1 sek	10800	TVN_CM_ PLUS	+8° C

Viimane mõõtmine teostati Trimble VRS Now võrgus 07.04.2018. Sellel mõõtmiskatsel mõõdistati kolm tundi Lemmatsi97 kindelpunktil. Valida sai kolme erineva *Mount Point*-i vahel. Nendeks *Mount Point*-ideks olid CMR_PLUS, CMR_X ning CMR_X_GPS_GLO. Valituks osutus CMR+, kuna selle *Mount Point*-iga mõõdeti ka Maa-ameti võrgus. GNSS vastuvõtja aku langes mõõtmise lõpus 20%-le.

3.2. Satelliitide arv mõõtmispäevadel

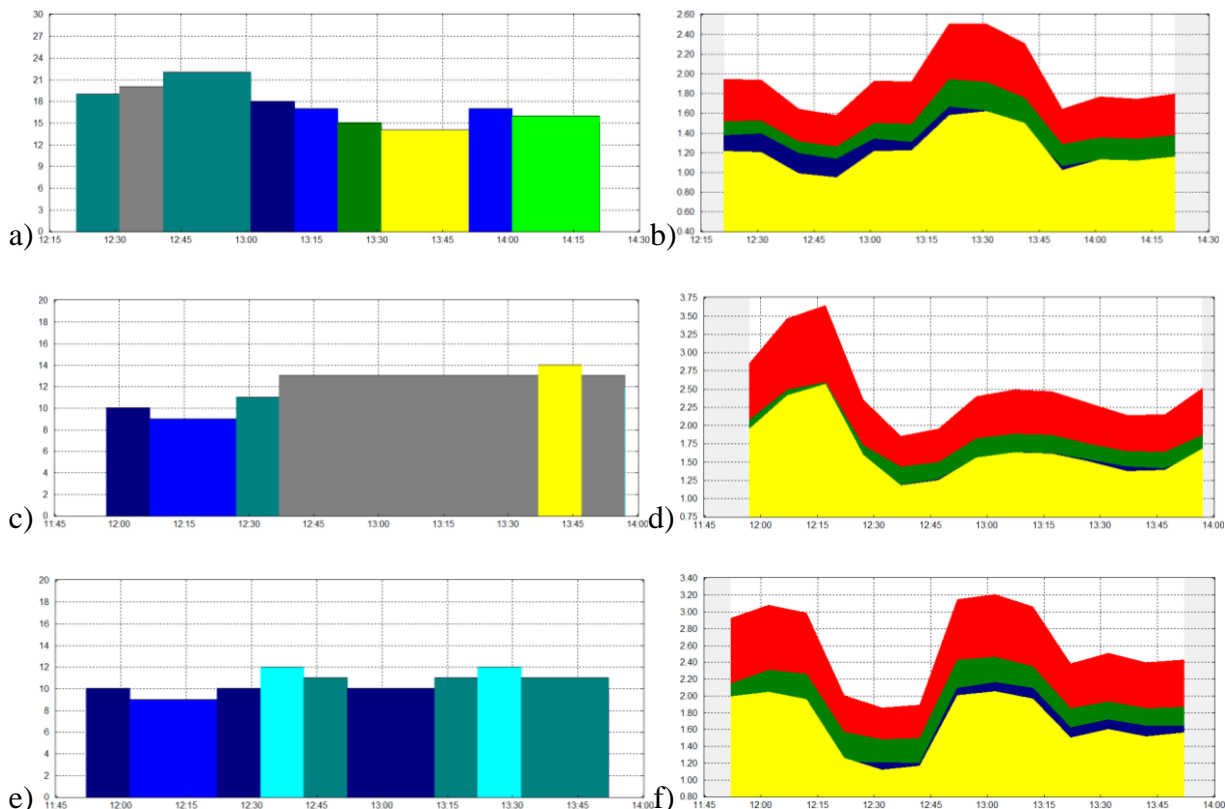
Selles peatükis antakse ülevaade satelliitide arvust mõõtmispäevadel. Satelliitide arvu esitamiseks on koostatud taevakaart. Katsemõõtmiste kohta on koostatud joonised, kus on näha satelliitide arvu ning DOP-ide väärtusi. Graafikud on koostatud Trimble Planning programmiga, kus asukohaks valiti Tartu linn ($58^{\circ}23' N$, $26^{\circ}43' E$). Programmis määrati satelliitide tõusunurgaks 15° . Esimene mõõtmine toimus Maa-ameti võrgus. Joonisel 13 on kujutatud selle katsemõõtmise karakteristikud.



Joonis 13. Maa-ameti võrgu katsemõõtmise (a) satelliitide arv ja (b) DOP-väärtused 04.11.2017

Parempoolne graafik kujutab DOP-ide väärtust katsemõõtmise aja jooksul. Punane joon on geomeetiline DOP (GDOP), roheline joon on positsiooni DOP (PDOP), sinine joon on vertikaalne DOP (VDOP), kollane on horisontaalne DOP (HDOP). Vasakpoolne graafik kujutab satelliitide arvu. On näha, et nende kahe graafiku vahel on seos. Mida rohkem on satelliite, seda väiksem on DOP-ide väärtus. Katsemõõtmise lõpus langes satelliitide arv ning sellest tingituna langes mõõtetäpsus. Maksimaalselt oli satelliite nähtaval 18, minimaalselt oli korra nähtaval

10 satelliiti. GDOP väärtus jäi vahemikku 3,1 – 1,6. Joonisel 14 on kujutatud Hades Invest OÜ võrgu katsemõõtmiste karakteristikud.



Joonis 14. Hades Invest OÜ võrgu katsemõõtmiste (a, c, e) satelliitide arv ja (b, d, f) DOP-väärtused vastavalt 18.11.2017, 20.01. ja 21.01.2018

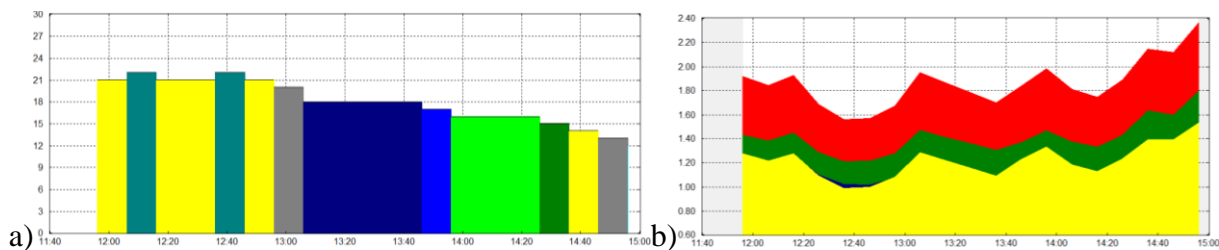
18. novembri katsemõõtmisel (a, b) kell 13.30 satelliitide arv langes 14-ne peale ning DOP-ide väärtused tõusid märgatavalt. Parempoolset (b) DOP-ide graafikult on näha, et isegi satelliitide vähenemisel ei tõusnud PDOP väärtus üle 2. Maksimaalselt oli satelliite nähtaval 22. Minimaalselt oli nähtaval 14 satelliiti. GDOP väärtused jäid vahemikku 2,5 – 1,6.

20. jaanuari katsemõõtmise (c, d) satelliitide arvu joonisel (c) on näha, et satelliitide arv sellel katsemõõtmisel on madalam kui eelmisel kahel katsemõõtmisel. Eelneva mõõtmisega on vahet 9 nädalat. Maksimaalselt oli saadaval hetkeks 14 satelliiti. Minimaalselt oli satelliiti 9 ning

põhiline aeg katsemõõtmisest oli saadaval 13 satelliiti. GDOP väärtus oli maksimaalselt 3,6, umbes kella 13.37 ajal langes see väärtus katse miinimum tasemeni, milleks oli 1,8.

21. jaanuari katsemõõtmise (e, f) DOP väärtuse jooniselt (f) on näha, et DOP-ide väärtused varieeruvad suuresti. Sarnaselt eelmisele katsemõõtmisele on ka sellel katsemõõtmisel satelliitide arv madal, minimaalselt oli saadaval 9 satelliiti, maksimaalselt oli saadaval vaid 3 satelliiti rohkem ehk 12 satelliiti. See põhjustas suure GDOP väärtuse, milleks oli 3,2. Minimaalne GDOP väärtus oli 1,9.

Joonisel 14 saab järeldada, et 9-nädalase ajavahemiku jooksul muutub satelliitide arv märgatavalt. Vaadates näiteks kell 13.00 satelliitide arvu, siis selgub, et 18. novembri katsemõõtmisel oli sellel ajahetkel saadaval 21 satelliiti, 20. jaanuari katsemõõtmisel kell 13.00 oli saadaval 13 satelliiti ning 21. jaanuari katsemõõtmisel oli sellel ajahetkel saadaval kõigest 10 satelliiti. Joonisel 15 on kujutatud Geosoft OÜ võrgu katsemõõtmise karakteristikud.



Joonis 15. Geosoft OÜ võrgu katsemõõtmise (a) satelliitide arv ja (b) DOP-väärtused 07.04.2018

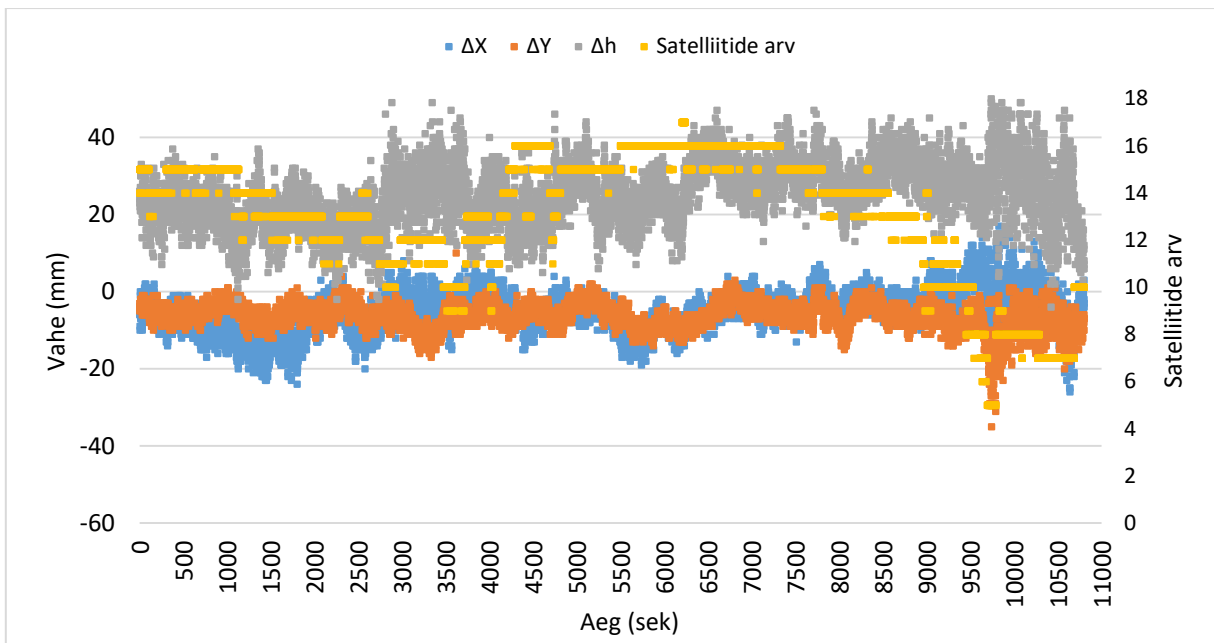
Joonisel 15 on näha, et sellel katsemõõtmisel on satelliitide arv kõrgem kui eelneval kahel katsemõõtmisel. Maksimaalselt oli saadaval 22 satelliiti ning minimaalselt 13. Eelnevast katsemõõtmisest on möödas 11 nädalat. Tänu sellele, et satelliitide katsemõõtmise lõpus oli 13, tõusid DOP-ide väärtused. GDOP väärtused jäid vahemikku 2,3 – 1,6. Sellel katsemõõtmisel kell 13.00 oli saadaval 20 satelliiti. Sellest saab järeldada, et satelliitide kättesaadavus ajavahemiku jooksul taastub.

3.3. Tulemuste analüüs

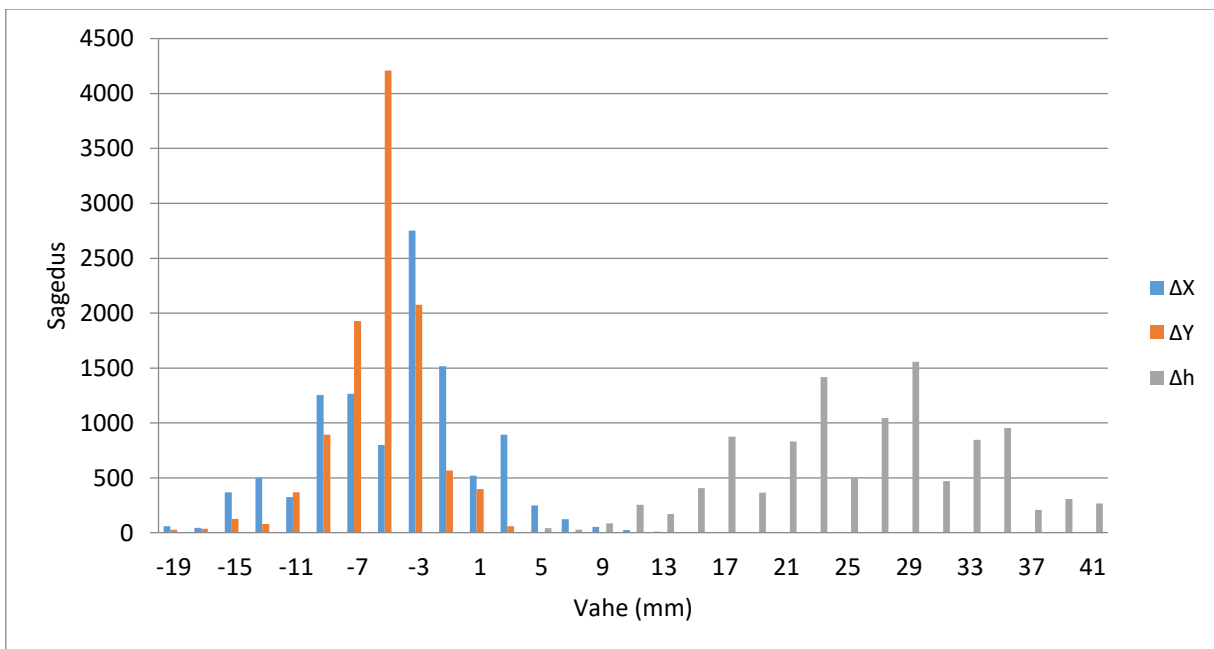
Tulemuste analüüsi peatükis antakse ülevaade teostatud mõõtmiste tulemustest. Välja on arvutatud punktide ΔX , ΔY ja Δh . Iga mõõtesessiooni kohta on koostatud kaks joonist. Esimene joonis on punktdiagramm, mis näitab mõõtmistulemuste erinevust Lemmatsi97 kindelpunktist ning satelliitide arvu. Teine on histogramm, mis näitab vigade esinemise sagedusi. Vajalik raport koordinaatide, satelliitide arvu ning PDOP-ide saamiseks tehti Trimble Business Center-is.

Maa-ameti võrk

Jooniselt 16 on näha, et katse alguses, esimesed ca 500 sekundit olid vead üsna väikesed. ΔX oli maksimaalselt -14 mm, sellel ajal oli satelliite 15, kui aga vaadata graafiku lõpu poole, siis seal on näha, et vead lähevad kohati väga suureks, ΔY isegi kuni -35 mm-ni välja. Sellel ajahetkel oli satelliitide arv 5. Seega katsemõõtmise lõpus ei olnud võrk stabiilne. On näha, et ΔY vead on stabiilsemad kui ΔX vead, kõikumised on väiksemad. Plaanilised vead on rohkem miinus poole peal. Kõrguse vead on enamasti pluss märgiga Maa-ameti ametlikust kõrgusest. Katse lõpus, kui satelliitide arv langes 8-5-ni, tulid ka suured vead sisse. Satelliitide arv varieerus 17-st 5-ni (vt joonis 13). PDOP väärtused jäid vahemikku 6,2 kuni 1,3. Kui satelliite oli 5, siis viga selle juures oli maksimaalselt ΔY -35 mm ja Δh +60 mm, ΔX väärtus jäi +17 mm juurde. Kõige suurem ΔX viga oli -26 mm, seejuures satelliitide arv oli siis 7 (vt tabel 4). Alates 4000-st kuni 9000-de sekundini oli mõõtmine kõige stabiilsem, sellel ajavahemikul oli satelliite saadaval rohkem kui 11.



Joonis 16. Maa-ameti VRS võrgus tehtud mõõtmiste erinevused punkti Lemmatsi97 koordinaatidest



Joonis 17. Vigade esinemise sagedus Maa-ameti VRS võrgus, väärtuse vahemik 2 mm

Joonisel 17 on kujutatud ΔX , ΔY ja Δh vigade esinemise sagedus Maa-ameti võrgus. Selgelt on näha, et Δh vead on kõik pluss poolel. Kõrguste vigade sageduse vahemik on +5 kuni +43 mm, vead jäävad seega ca 5 cm sisse. Δh vigade haripunkt on +29 mm juures, kuhu jääb ca 1600 mõõdistuspunkti, mõlemale poole seda vahet hakkab vigade sagedus langema. Vigade suurem esinemise sagedus jääb vahemikku +17 kuni +35 mm ehk suuremad vead jäävad umbes 2 cm piiridesse.

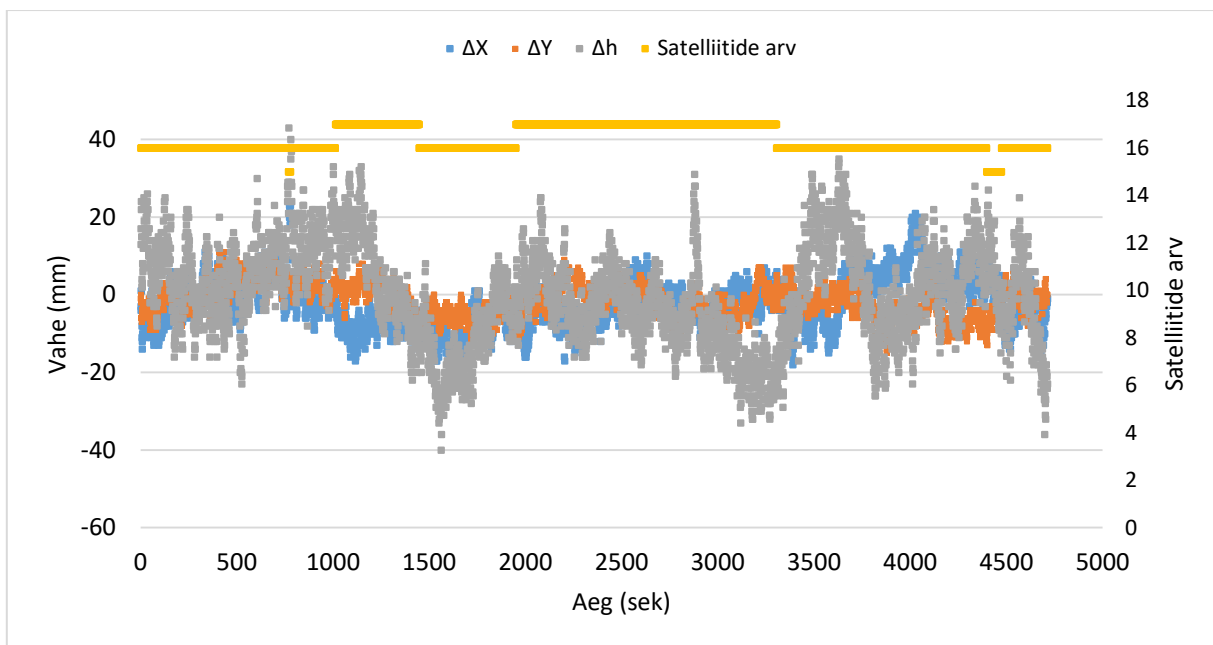
ΔY vead jäävad rohkem miinus poolele. ΔY vigade sageduste vahemik on -19 kuni +3 mm, vead jäävad seega 2,5 cm sisse. ΔY vigade haripunkt on -5 mm, sinna jääb ca 4200 punkti. Suurem osa vigadest jäävad -9 kuni -1 mm piiridesse ehk vead jäävad 1 cm sisse.

ΔX vead jäävad sarnaselt ΔY vigadega rohkem miinus poolele. Vigade sageduste amplituud jääb vahemikku -19 kuni 9 mm ehk vigade esinemise sagedus jääb 3 cm piiridesse. ΔX vigade haripunkt on -3 mm, sinna jääb ca 2700 mõõdistuspunkti. Sagedasemad vead jäävad vahemikku -9 kuni +3 mm ehk põhilisemad vead jäävad 1,5 cm sisse.

Hades Invest OÜ võrk

Teine mõõtmise toimus 18.11.2017. Selles mõõtmiskatses kasutati täpselt samu seadmeid, mis esimeses mõõtmiskatses. Väliarvutis Hades võrgu profiilis muudeti kõik parameetrid täpselt samaks, mis oli Maa-ameti profiilis. Samamoodi püstitati GNSS seade statiivile. Erinevus on selles, et seekord teostati mõõtmised Hades Invest OÜ võrgus. Hades Invest OÜ võrgus teostati mõõtmisi kolmel korral. Eesti Maaülikoolil on Hades Invest OÜ võrgus mõõtmise aeg piiratud kahele tunnile päevas.

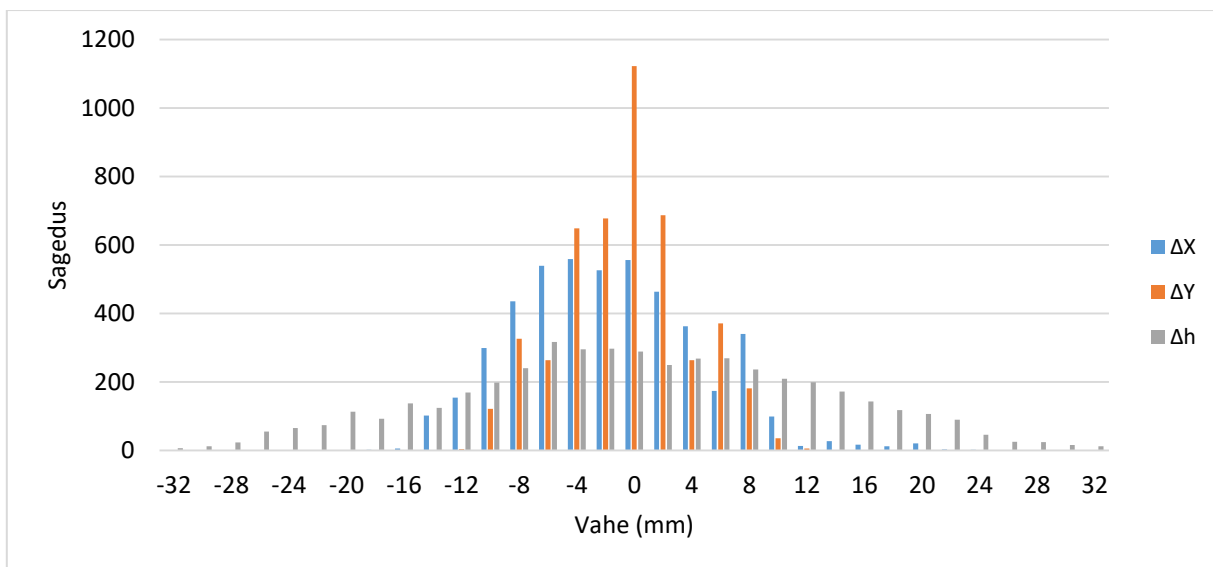
Selle mõõtesessioonil ei saadud kolmetunnist mõõtmist läbi viia. Väliarvuti andis veateate: „*The answering modem has disconnected. To check your connection settings and change them if needed, tap settings*“. Mõõtmisi oli selleks ajaks tehtud 78,5 minutit. Uuesti internetti tagasi ei saadud.



Joonis 18. Hades Invest OÜ VRS võrgus tehtud mõõtmiste erinevused punkti Lemmatsi97 koordinaatidest

Jooniselt 18 on näha, et plaaniline täpsus jääb vahemikku +15 kuni -15 mm. On näha, et ΔX ja ΔY väärtused on 0 väärtuse ümber, seega plaaniline täpsus sellel katsemõõtmisel oli stabiilne. Hades Invest OÜ võrgus jäävad Δh vead nii pluss poolele kui miinus poolele, Maa-ameti võrgus jäid need põhiliselt pluss poolele. Kõrguslikud vead jäid vahemikku -40 kuni +63 mm, kõrguslik täpsus selles võrgus ei ole väga stabiilne. Seevastu plaaniline täpsus on stabiilne. Satelliidid jäid vahemikku 17-15. Satelliitide arvu ja PDOP väärtuse vahel on tihe seos. Kui satelliite on vähe, siis on PDOP-i väärtus kõrge ning vastupidi. Kuna satelliitide arv selles katses oli kõrge, siis on selgelt näha, et ΔX , ΔY ja Δh väärtused on stabiilsemad ning vead väiksemad. PDOP väärtused jäid vahemikku 1,8 kuni 1,3.

Võrreldes kahte esimest katsed tuleb välja see, et Hades Invest OÜ võrgus tehtud katses oli satelliitide arv stabiilsem ja kõrgem. Põhilise aja oli nähtaval 16-17 satelliiti (vt joonis 14). Maa-ameti võrgus mõõtes oli nähtaval vaid hetkeks 17 satelliiti.



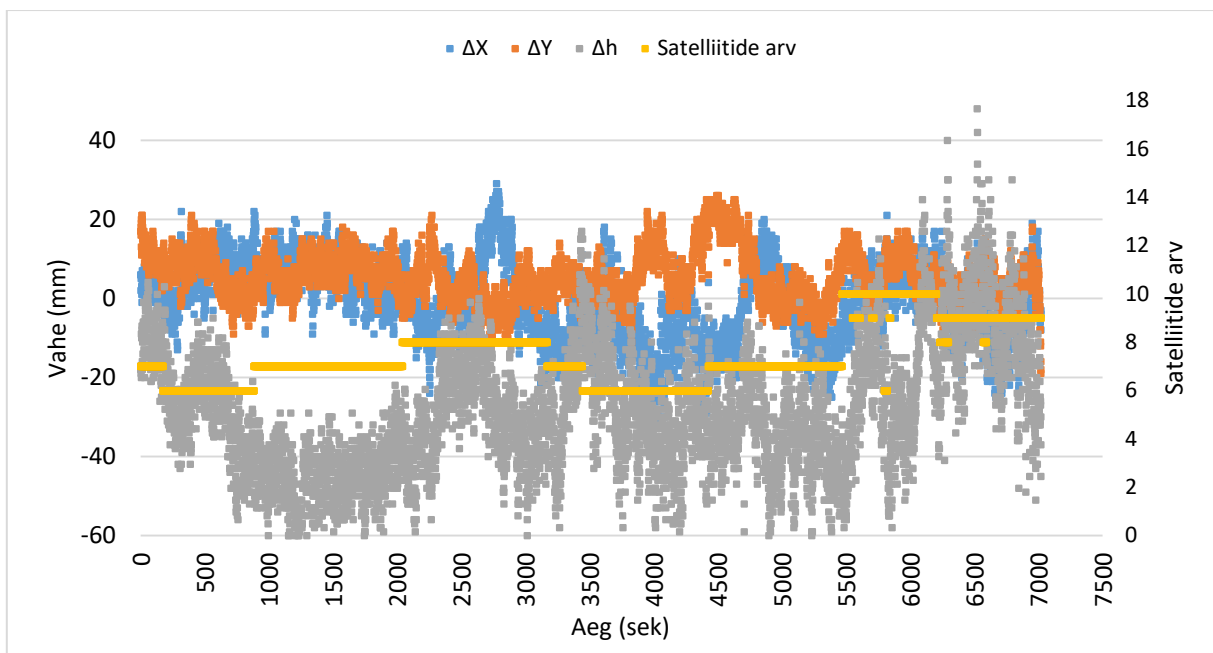
Joonis 19. Vigade esinemise sagedus Hades Invest OÜ võrgus, väärtuse vahemik 2 mm

Joonisel 19 on kujutatud ΔX , ΔY ja Δh vigade esinemise sagedus Hades Invest OÜ võrgus. Δh vigade esinemise sagedus on suur, vead jäävad -32 kuni +32 mm piiridesse, mis on ca 6,5 cm. Vigade haripunkt on -2 mm, kust mõlemale poole vigade sagedus hakkab vähenema.

ΔY vigade sagedus on koondunud kindelpunkti tsentrisse. Vigade haripunkt on 0-is. ΔY vigade vahemik on -10 kuni +10 mm. Suurem vigade sagedus jääb vahemikku -8 kuni +6 mm ehk põhilised vead jäävad 1,5 cm sisse.

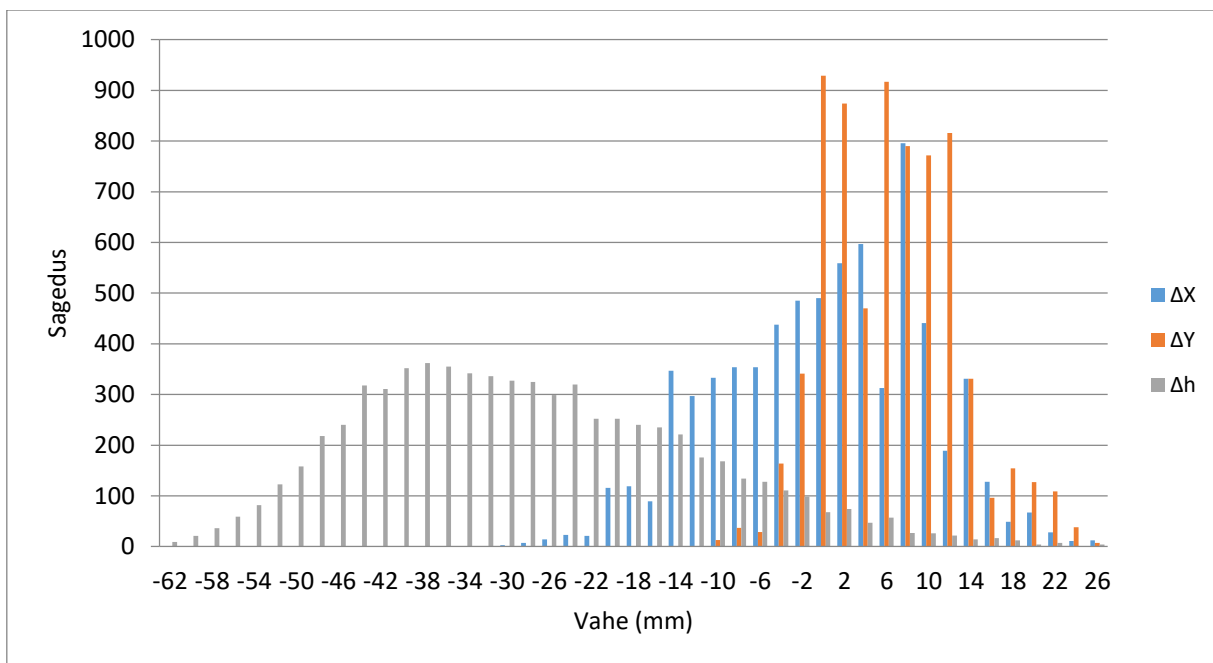
ΔX vead on vähesel määral rohkem miinus poolel. Vigade kõige sagedasem väärtus on -4 mm ning põhiliselt jäävad suurem osa mõõtmisi vahemikku -10 kuni +8 mm ehk vead jäävad 2 cm piiridesse. Üldiselt ΔX vigade amplituud on -14 kuni +20 mm, seega ΔX vead varieeruvad 3,5 cm sees.

Kolmas mõõtesessioon viidi läbi Hades Invest OÜ võrgus, kuna esimesel katsel ei õnnestunud mõõta kolm tundi järjest. Ka sellel mõõtesessioonil ei saadud kolm tundi järjest mõõta, kuna internetiühendus kadus ära, kuid sellel korral saadi mõõta peaaegu kaks tundi, mis annab suurema salvestatud punktide arvu ning on usaldusväärsem.



Joonis 20. Hades Invest OÜ VRS võrgus tehtud mõõtmiste erinevused punkti Lemmatsi97 koordinaatidest

Jooniselt 20 on näha, et Δh vead on selgelt rohkem miinus poole peal. Kõige suurem Δh viga on -85 mm, sellel hetkel oli 6 satelliiti saadaval, pluss poole peal oli suurim viga +48 mm, saadaval oli sellel hetkel 9 satelliiti. Vaadates plaanilise täpsuse vigu, siis selgub, et vead jäävad rohkem pluss poolele. ΔX vigade amplituud on suurem kui ΔY vigadel. ΔX vead jäid vahemikku -77 kuni +29 mm. ΔY vead jäid vahemikku -19 kuni +26 mm. Võrreldes esimese Hades Invest OÜ võrgus mõõdetud korraga on sellel mõõtesessioonil satelliitide arv tunduvalt väiksem, kuigi mõõdeti kellaajaliselt sarnastel aegadel. Nende kahe mõõtmiskatsete vahe on ca 2 kuud. Sellest järeldatuna võib väita, et satelliitide arv samal kellajal mõõtes muutub aja jooksul. Sellel kasemõõtmisel satelliitide arv varieerus 10-st 6-ni (vt joonis 14). PDOP väärtused jäid vahemikku 4,2 kuni 1,8. Sellel korral Hades Invest OÜ võrgu katsemõõtmised ei olnud stabiilsed.



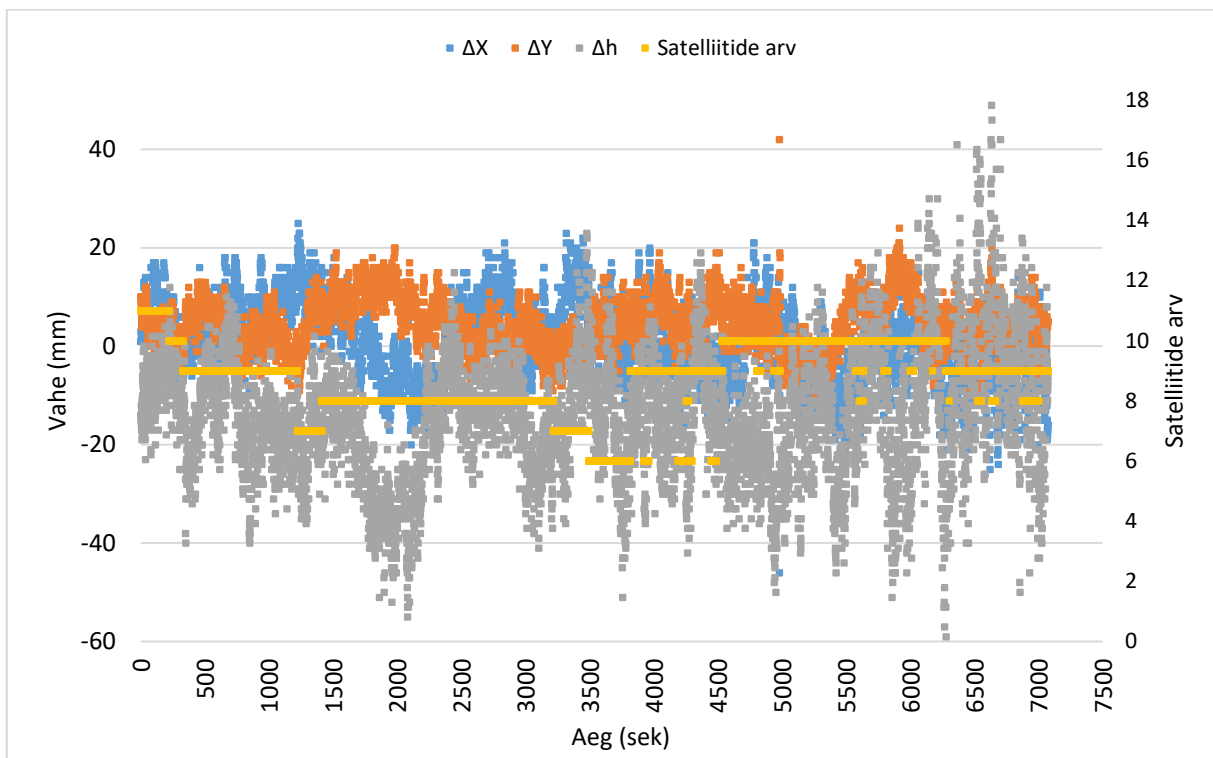
Joonis 21. Vigade esinemise sagedus Hades Invest OÜ võrgus, väärtuse vahemik 2 mm

Joonisel 21 on kujutatud ΔX , ΔY ja Δh vigade esinemise sagedus Hades Invest OÜ võrgus. Selle mõõtmise ajal oli satelliitide arv üsna madal, sellest on ka tingitud mõõtmistulemuste madalam täpsus. Jooniselt on näha, et Δh vigade sageduste vahemik on -62 kuni +18 mm ehk vead varieeruvad 8 cm sees. Kõrguslikud vead jäävad põhiliselt miinus poolele. Vigade haripunkt on -38 mm, sealt pluss poolele vigade sagedus langeb sujuvalt, kuid miinus poolele on langus järsem.

ΔY vead jäävad rohkem pluss poolele. ΔY vigade haripunktiks võib lugeda +6 mm. Vigade esinemise sagedus on vahemikus -10 kuni +24 mm, seega vead varieeruvad 3,5 cm ümber. Põhilised vead jäävad 0-st 12-ne mm-ni ehk 1,5 cm sees on suurem arv vigu.

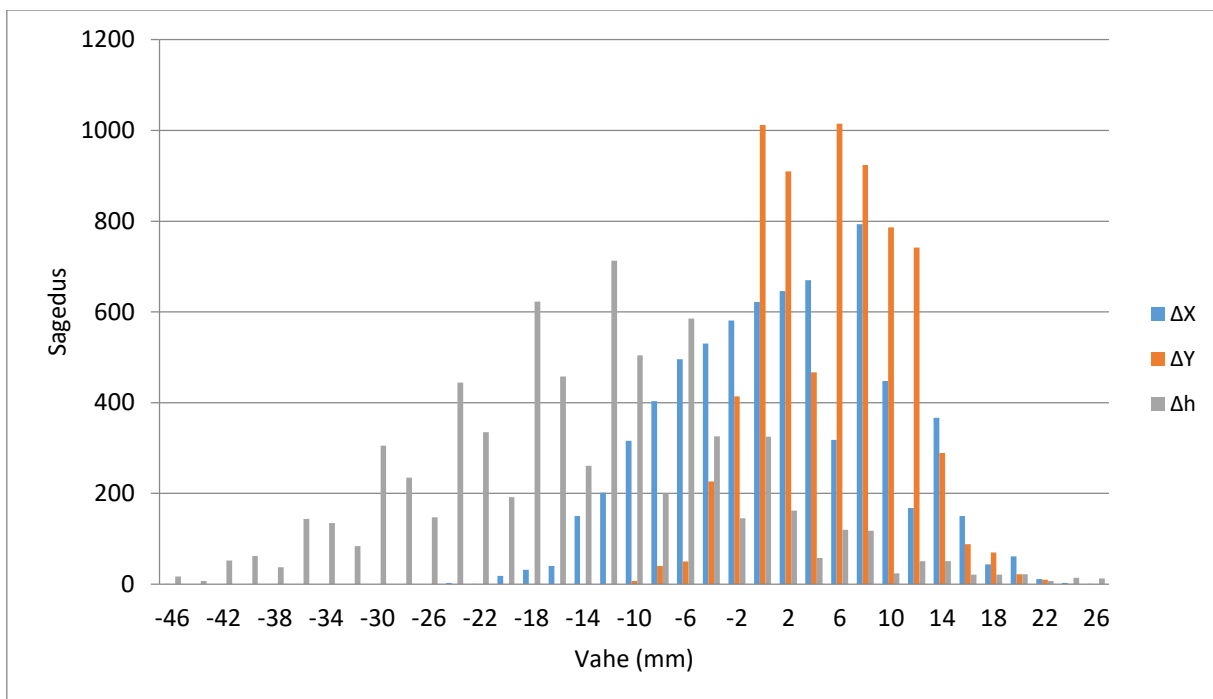
ΔX vead jäävad 0-i ümbrusesse. Kõige rohkem vigu esineb +8 mm juures. Sealt pluss poolele jäävate vigade sagedus langeb järsult, kuid miinus poole jäävad vead langevad ühtlasemalt. Vigade esinemise sagedus jääb vahemikku -30 kuni +26 mm ehk vigade arv varieerub 5,5 cm sees. Põhilised vead on vahemikus -14 kuni +14 mm.

Hades Invest OÜ VRS võrgus mõõdeti ka kolmas kord. Seda põhjustas asjaolu, et eelmisel korral selles võrgus ei õnnestunud kolmetunnist mõõtesessiooni läbi viia. Ka sellel korral ei õnnestunud kolmetunnist mõõtmist teostada. Mõõta sai 117,9 minutit.



Joonis 22. Hades Invest OÜ VRS võrgus tehtud mõõtmiste erinevused punkti Lemmatsi97 koordinaatidest

See mõõtekatse sarnaneb eelmise Hades Invest OÜ võrgus mõõdetud katsega. Satelliitide arv sellel korral oli maksimaalselt 11 ja minimaalselt oli kohati 6 satelliiti saadaval (vt joonis 14). Sellest tingituna on Δh vead suured ning varieeruvad vahemikus +69 kuni -69 mm. ΔY vead jäid vahemikku +42 kuni -13 mm. ΔX vead jäid vahemikku +25 kuni -46 mm. Plaanilise täpsuse vead jäävad rohkem pluss poolele, kuid kõrguslikud vead jäävad rohkem miinus poole peale. PDOP väärtused jäävad vahemikku 4,3 kuni 1,6. Ka sellel korral ei olnud mõõtmine stabiilne, vigade vahemik on suur.



Joonis 23. Vigade esinemise sagedus Hades Invest OÜ võrgus, väärtuse vahemik 2 mm

Joonisel 23 on kujutatud ΔX , ΔY ja Δh vigade esinemise sagedus Hades Invest OÜ võrgus. Sarnaselt eelmisele mõõtmisele, oli ka sellel mõõteperioodil satelliitide arv madal, kuid sagedasemad vead on rohkem 0-i ümber kui eelmisel korral. Kõrguslikud vead on rohkem miinus poolel. Δh vigade esinemise sageduse vahemik on -46 kuni +26 mm, seega vahemik, kus vead esinevad on ca 7,5 cm sees. Kõrguslike vigade kõige sagedasem väärtus on -12 mm, kust mõlemale poole hakkavad väärtused langema ühtlaselt. Δh vigade kõige sagedasemad väärtused on vahemikus -24 kuni 0 mm ehk vead jäävad 2,5 cm sisse.

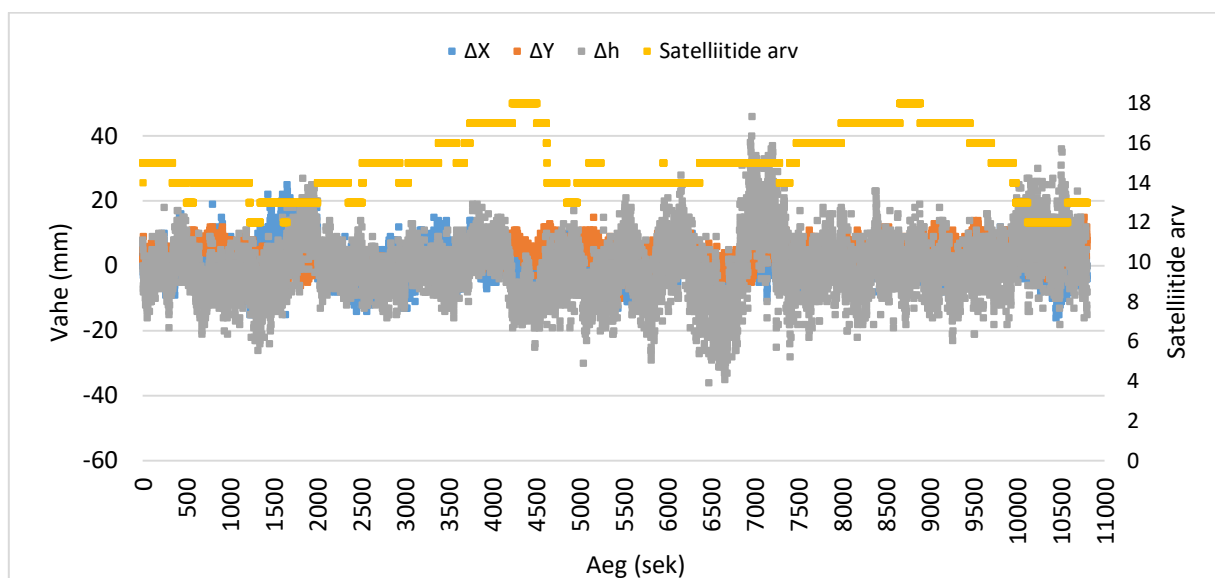
ΔY vead on väga sarnased eelmisele mõõtmisele. ΔY vigade haripunktiks on +6 mm. Vigade esinemise sageduse vahemik on -10 kuni +22 mm, seega vead varieeruvad 3,5 cm ümber. Põhilised vead jäävad 0-st 12-ne mm-ni ehk umbes 1,5 cm sees on suurem arv vigu.

Ka ΔX vead on eelmise mõõtmisele sarnased. ΔX vead jäävad 0-i ümbrusesse. Kõige rohkem vigu esineb +8 mm juures. Sealt pluss poolele jäävate vigade sagedus langeb järsult, kuid miinus poole jäävad vead langevad ühtlasemalt. Vigade esinemissageduste vahemik jääb -20 kuni +22

mm vahele ehk vigade arv varieerub 4,5 cm sees, mis on lühem, kui 20. jaanuaril sooritatud mõõtmistel. Põhilised vead on vahemikus -10 kuni +14 mm.

Geosoft OÜ võrk

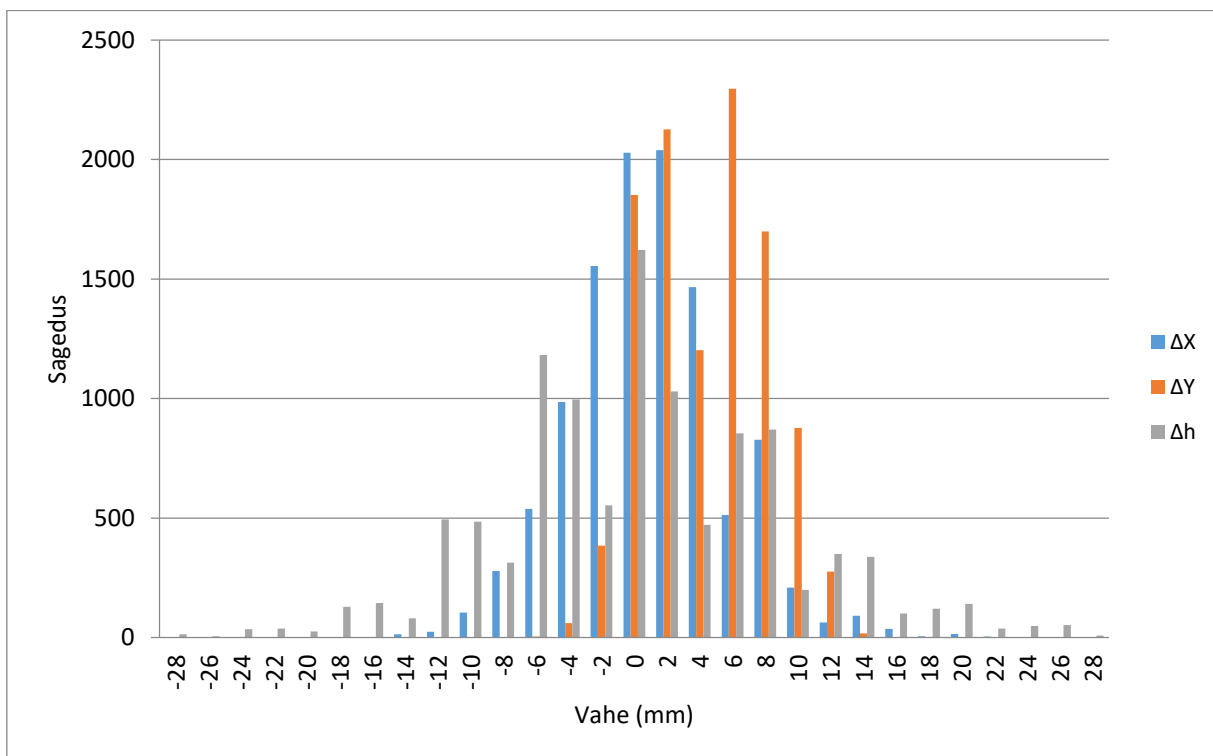
Viimane mõõtmine sooritati Geosoft OÜ võrgus 07.04.2018. Sellel mõõtesessioonil sooritati kolmetunnine katsemõõtmine, algusega 11:56. Mõõtmine möödus suures osas hästi, kuid kell 14:17 ehk umbes 8400 sekundi juures korraks mõõtmine seiskus kümneks sekundiks, väliarvutist tuli teade- „No base data“, kuid siis läks mõõtmine edasi ja rohkem insidende ei juhtunud.



Joonis 24. Geosoft OÜ võrgus tehtud mõõtmiste erinevused punkti Lemmatsi97 koordinaatidest

Jooniselt 24 on näha, et enamik vigu jäävad vahemikku -10 kuni +10 mm. Sellel mõõtesessioonil oli saadaval mõneks hetkeks 18 satelliiti (vt joonis 15). Minimaalselt oli saadaval 12 satelliiti. Δh vead varieeruvad kõige rohkem. Kõrgusliku vea vahemik on -36 kuni +46 mm, seejuures oli satelliitide arv nendel hetkedel 14-15. Kui vaadata joonist, siis on näha,

et saab eritada kolme suuremat vigade perioodi. Esimene periood on alates 1000-st sekundist kuni 2000-e sekundini. Järgmine periood on pikem, algab 6000-st sekundist ja lõpeb 7500 sekundi juures. Kolmas periood on kõige lühem, algab 10000-st sekundist ja lõpeb 500 sekundi pärast. ΔX vigade kõige suurem vahemik on 1600 sekundi juures, seal on suurim viga +25 mm. ΔY vigadel suuremat kõikumist ei esine. ΔX vigade vahemik on -16 kuni +25 mm. ΔY vigade vahemik on -10 kuni +15 mm. PDOP väärtused jäävad vahemikku 2,5 kuni 1,3. Sellel mõõtesessioonil oli mõõtmine võrreldes teise katsemõõtmistega kõige stabiilsem, kus plaaniline- ja kõrguslik täpsus on 2 cm piirides.



Joonis 25. Vigade esinemise sagedus Geosoft OÜ võrgus, väärtuse vahemik 2 mm

Joonisel 25 on kujutatud ΔX , ΔY ja Δh vigade esinemise sagedus Geosoft OÜ võrgus. Histogrammilt on näha, et vigade esinemissagedus on 0-i ümber. Δh vigade haripunktiks on 0 mm, seal on väärtuseks ca 1600 punkti. Kõrguslike vigade amplituud on -28 kuni +28 mm, seega

jäävad vead 6 cm sisse. Kõige sagedasemalt esineb vigu vahemikus -6 kuni +8 mm ehk vead varieeruvad 1,5 cm ümber.

ΔY vead jäävad mõningal määral rohkem pluss poolele. Nende vigade haripunktiks on +6 mm. Vigade esinemise vahemik on -4 kuni +14 mm ehk vead jäävad 2 cm sisse. Sagedasemad vead esinevad vahemikus 0 kuni +10 mm.

ΔX vead on koondunud 0 mm ümber. Kõige sagedasemalt esineb 0 mm ja +2 mm vigu. Üldiselt ΔX vigade vahemik on -14 kuni +20 mm ehk vead on 3,5 cm sees. Kui aga vaadata sagedasemaid vigu, siis selleks vahemikuks on -4 kuni +8 mm, seega sagedased vead jäävad 1,5 cm sisse.

Vaadates kõikide mõõtmiste tulemusi, saab teha järelduse, et kõige paremad tulemused saab Geosoft OÜ poolt pakutavas VRS võrgus. See võrk oli mõõtmiste ajal kõige stabiilsem, kuna selles võrgus mõõtes oli saadaval kõige rohkem satelliite. Samuti hea tulemuse sai kirja Hades Invest OÜ esimeses mõõtekatses, kahes järgnevas mõõtesessioonis ei olnud võrk enam nii stabiilne. Hades Invest OÜ võrgus ei saa Eesti Maaülikooli litsentsiga mõõta rohkem kui 2 tundi, seega mõõtmiskatsed ei ole päris võrreldavad. Maa-ameti võrk ei olnud samuti väga stabiilne. Selgelt oli kõrguslik viga pluss poolel, samas plaanilise täpsuse vead jäid rohkem miinus poolele. Mõõtmistulemuste täpsemaks analüüsiks ja võrdluseks arvutati iga mõõtekatsel välja keskmine ruutviga Gaussi valemi (vt tabel 4) järgi:

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}},$$

kus Δ^2 on juhuslike vigade ruutude summa ning n on mõõtmiste arv.

Keskmine ruutviga annab kõige täpsema ülevaate mõõtmistäpsuste hindamiseks. Kui mõõtmistes on suuremaid vigu keskmisest väärtusest, siis väljendub see keskmise ruutvea tulemuses. Keskmise ruutvea arvutustulemuste järgi on kõige stabiilsem võrk Geosoft OÜ-l. Selles võrgus saavutati järgmised tulemused Gaussi valemi järgi: $\Delta X=4,5$ mm, $\Delta Y=4,7$ mm ja $\Delta h=8,8$ mm. Paremuselt teise tulemuse sai Hades Invest OÜ võrk, kus mõõtmine toimus 18.11.2017. Siinkohal peab tõdema, et sellel mõõtesessioonil sai mõõta vaid 78,5 minutit ning mõõtmised ei ole päris võrdsed. Mõnevõrra üllataval kombel jäi Maa-ameti võrk neljandale kohale, kuna sealne kõrgusliku ruutvea tulemus oli 26,3 mm.

MS Excel programmiga arvatati igale katsemõõtmisele ka standardhälve, milleks kasutati funktsiooni STDEVP. Standardhälve iseloomustab erinevust üldisest keskmisest. Mida väiksem on standardhälbe väärtus, seda rohkem on väärtused keskmise väärtuse lähedal ning vastupidi. Parimad standardhälbe väärtused saavutas Maa-ameti võrk tulemustega: $\Delta X=5,3$ mm, $\Delta Y=3,4$ mm ja $\Delta h=7,8$ mm. Paremusest järgmine on Geosoft OÜ võrgu mõõtmiste standardhälbed tulemustega: $\Delta X=4,5$ mm, $\Delta Y=3,4$ ja $\Delta h=8,8$ mm. Samas on Geosoft OÜ võrgus mõõtmistel plaanilise täpsuse standardhälbed paremad kui Maa-ametil. Kõige halvemad standardhälvete tulemused saadi Hades Invest OÜ võrgus mõõtes (vt tabel 4).

Arvestades kõiki mõõtmistulemusi, siis kõige suuremad vead esinesid kõrguslikes vigades. 20.01.2018 mõõtesessioonil Hades Invest OÜ võrgus saavutati -85 mm suurune viga ning 21.01.2018 mõõtesessioonil Hades Invest OÜ võrgus saavutati +69 mm suurune viga. Samuti ka ΔX vead olid Hades Invest OÜ võrgul kõige suuremad. ΔY vigadest saavutas miinuspoolel kõige suurema vea (-35 mm) Maa-ameti võrk ning plusspoolel jällegi Hades Invest võrk tulemusega +42 mm. Seega siit järeldatuna saab väita, et Hades Invest OÜ võrk on kõige ebastabiilsem. Usaldusväärsemate tulemuste saamiseks tuleks mõõtesessioonide pikkused võrdsustada. Lisaks tuleks erinevad katsemõõtmised läbi viia väiksema ajavahemiku järel, näiteks ühe kuu jooksul katsemõõtmised teostada. Autori piiratud ajamahu tõttu polnud võimalik seda põhimõtet järgida.

Tabel 4. Teostatud mõõtmiste koordinaatide keskmised-, minimaalsed- ja maksimaalsed vead ning keskmine ruutviga. Ühikud mm

Võrk	Keskmine (aritmeetiline)			Min			Max			Keskmine ruutviga			Standardhälve		
	ΔX	ΔY	Δh	ΔX	ΔY	Δh	ΔX	ΔY	Δh	ΔX	ΔY	Δh	ΔX	ΔY	Δh
Maa- amet	-5,1	-6,4	25,1	-26	-35	-4	17	10	61	7,3	7,2	26,3	5,3	3,4	7,8
Hades 1	-2,2	-1,7	-0,2	-18	-15	-40	23	15	63	6,7	4,7	12,8	6,3	4,4	12,8
Hades 2	-0,5	5,4	-28,8	-77	-19	-85	29	26	48	9,7	8,2	32,8	9,6	6,1	15,8
Hades 3	0,7	4,4	-14,7	-46	-13	-69	25	42	69	8,0	6,9	19,5	8,0	5,3	12,8
Geosoft	0,4	3,3	-0,5	-16	-10	-36	25	15	46	4,5	4,7	8,8	4,5	3,4	8,8

*Roheline on parima tulemuse saanud mõõtekatse, punane on halvima tulemuse saanud mõõtekatse

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja selgitada, kui stabiilsed ja täpsed on RTK GNSS mõõtmised erinevates püsijaamade võrkudes. Eesmärgi saavutamiseks teostati mõõtmised RTK GNSS seadmetega riiklikul geodeetilised II klassi punktil Lemmatsi97, mis asub Tartu linna piiril. Mõõtmised viidi läbi ajavahemikul november 2017 – aprill 2018. Mõõtesessioonide pikkus oli kolm tundi, punktid salvestati 1 sekundilise intervalli järel. VRS võrkudena kasutati kolme Eesti teenusepakkujat: Maa-amet, Geosoft OÜ ja Hades Invest OÜ. Mõõtmisi teostati viiel korral. Hades Invest OÜ võrgus teostati mõõtmisi kolmel korral ning selles võrgus saadi maksimaalselt 117,9 minutit mõõta. See on tingitud sellest, et Eesti Maaülikoolil on võimalik selles võrgus päevas ainult 2 tundi mõõta. RTK GNSS meetodiga mõõdeti X- ja Y- koordinaate ning kõrgusi. Raportid koostati Trimble Business Centeris, andmeid töödeldi Excel programmiga. Mõõtmistel kasutati Eesti Maaülikooli GNSS seadmeid Trimble R4- 2 vastuvõtjat ning TSC2 väliarvutit.

Iga katsemõõtmise kohta on koostatud kaks graafikut. Nende jooniste alusel on koostatud lühianalüüs. Uuringust selgus, et kõige stabiilsemad ja täpsamad mõõtmistulemused saavutati Geosoft OÜ pakutavas Trimble VRS Now võrgus. Analüüsi käigus selgus, et mõõtmiste stabiilsus sõltub satelliitide arvust. Selles võrgus mõõtes saavutati plaaniline täpsus keskmiselt 1,5 cm ning kõrguslik täpsus samuti 1,5 cm. Paremuselt teine võrk on Maa-ametil. Maa-ameti võrgus mõõdistades saadi plaaniline täpsus keskmiselt 2 cm ning kõrguslik täpsus jäi 2,5 cm sisse. Suurimad vead esinesid Hades Invest OÜ võrgul. Kõige suuremad vead esinesid Hades Invest OÜ võrgus teistkordsel mõõtmisel, kus satelliitide arv (10 satelliiti) oli madal, võrreldes Geosoft OÜ katsemõõtmisega, kus oli saadaval 18 satelliiti. Uuringust selgus, et satelliitide arv mõõtetäpsuses ja stabiilsuses on olulisel kohal. Mida rohkem on satelliite, seda väiksemad on DOP-ide väärtused. Kõigis kolmes võrgus saavutati vähemalt hetkeks madalaimaks PDOP väärtuseks 1,3. Kõige suurem PDOP väärtus saadi Maa-ameti võrgus, milleks oli 6,2. Analüüsi käigus jõuti järeldusele, et satelliitide arv ühel kindlal kellaajal muutub aja jooksul. Seda ilmestas hästi kolmas ja neljas katsemõõtmine Hades Invest OÜ võrgus, kus satelliitide arv oli madal, maksimaalselt oli saadaval 11 satelliiti. Seevastu teistel katsemõõtmistel oli saadaval keskmiselt 18 – 15 satelliiti.

Täpsuse tulemusi kinnitasid ka statistilised näitajad. Igale katsemõõtmisele arvutati välja keskmine ruutviga ja standardhälve. Parim mõõtetäpsus on Geosoft OÜ võrgul, saavutades keskmisteks ruutvigadeks järgmised tulemused: $\Delta X=4,5$ mm, $\Delta Y=4,7$ mm ning $\Delta h=8,8$ mm, standardhälbe väärtused olid vastavalt 4,5 mm, 3,4 mm ja 8,8 mm. Maa-ameti võrgu KRV-d olid järgmised: $\Delta X=7,3$ mm, $\Delta Y=7,2$ mm ning $\Delta h=26,3$ mm, standardhälbe väärtused olid vastavalt 5,3 mm, 3,4 mm ja 7,8 mm. Hades Invest OÜ võrgus mõõtes esimene katsemõõtmine saavutas järgmised KRV-d: $\Delta X=6,7$ mm, $\Delta Y=4,7$ mm, $\Delta h=12,8$, standardhälbe väärtused olid vastavalt 6,3 mm, 4,4 mm ja 12,8 mm. Teine katsemõõtmine andis järgmised KRV-d: $\Delta X=9,7$ mm, $\Delta Y=8,2$ mm, $\Delta h=32,8$ mm, standardhälbe väärtused olid vastavalt 9,6 mm, 6,1 mm ja 15,8 mm. Kolmas kord Hades Invest OÜ võrgus mõõtes andis järgmised KRV-d: $\Delta X=8,0$ mm, $\Delta Y=6,9$ mm, $\Delta h=19,5$ mm, standardhälbe väärtused olid vastavalt 8,0 mm, 5,3 mm ja 12,8 mm.

Ettepanek edaspidiseks: andmete kogumine usaldusväärsemaks. Mõõtmised võiksid toimuda sarnastes keskkonnatingimustes. Samuti võiksid katsemõõtmised toimuda väiksema ajavahemiku järel, näiteks mõõtmised teostada ühe kuu jooksul. Lisaks tuleks mõõtesessioonide pikkused võrdsustada.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Al Marzooqi, Y., Fashir, H., Babiker, T.** (2009). Establishment & Testing of Dubai Virtual Reference System (DVRS) National GPS-RTK Network. [WWW] <https://www.geospatialworld.net/article/-establishment-testing-of-dubai-virtual-reference-system-dvrs-national-gps-rtk-network/> (10.04.2018)
- An introduction to GNSS. GLONASS. (s.a). Novatel. [WWW] <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-3-satellite-systems/glonass/> (27.04.2018)
- Brown, N., Keenan, R., Richter, B., Troyer, L. (2005). Advances in ambiguity resolution for RTK applications using the new RTCM V3.0 MasterAuxiliary messages [WWW] <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6196> (27.04.2018)
- CMRx: A New Correction Format From Trimble. (2009). Trimble. [WWW] http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-469944/WhitePaper_HeavyHighway_CMRxrev1.pdf (09.05.2018)
- Control Segment. (s.a). GPS.gov. [WWW] <https://www.gps.gov/systems/gps/control/> (27.04.2018)
- Datasheet - Trimble R4 GNSS – English. (2015). Trimble. [WWW] <https://community.trimble.com/docs/DOC-1243> (09.04.2018)
- DGNSS Standards. (2011). Navipedia. [WWW] http://www.navipedia.net/index.php/DGNSS_Standards (09.05.2018)
- Eissfeller, B., Ameres, G., Kropp, V., Sanroma, D.** (2007). Photogrammetric Week '07. Performance of GPS, GLONASS and Galileo. [WWW] <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo07/220eissfeller.pdf> (26.04.2018)
- Geosoft OÜ hinnakiri. (s.a). Geosoft [WWW] <http://www.geosoft.ee/hinnakiri> (02.03.2018)
- Geosoft OÜ tehniline info. (s.a). Geosoft [WWW] <http://www.geosoft.ee/node/219> (02.03.2018)
- GLONASS General Introduction. (2011). Navipedia. [WWW] http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_General_Introduction (09.04.2018)
- GLONASS Performances. (2011). Navipedia. [WWW] http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_Performances (27.04.2018)
- GNSS püsijaamad. (2018). Maa-ameti geoportal. [WWW] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Geodeetilised-andmed/Geodeetilised-vorgud/GNSS-pusijaamad-p571.html> (24.03.2018)
- GNSS võrgu hinnakiri. (2012). Topcon. [WWW] http://topcon.ee/uploads/file/GNSS%20vorgu%20Hinnakiri_04.06.2012.pdf (09.04.2018)

GPS General Introduction. (2011). Navipedia. [WWW]
http://www.navipedia.net/index.php/GPS_General_Introduction (09.04.2018)

Kirs, Even. 2017. Eesti RTK GNSS võrkude täpsuse hindamine. Bakalaureusetöö. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 17 lk

Landau, H., Vollath, U., Chen, X. (2002). Virtual Reference Station Systems. – Journal of Global Positioning Systems. Vol.1, No. 2, pp 137-143. [WWW]
http://file.scirp.org/pdf/nav20090200008_97580842.pdf (10.04.2018)

Leica AR25 antenn. (2018). Leica-Geosystems. [WWW] <https://leica-geosystems.com/products/gnss-reference-networks/antennas> (02.03.2018)

Leica Captivate. Technical Reference. Manual. (2015). Leica Geosystems. [WWW] http://www.gefos-leica.cz/ftp/Totalni_stanice/Navody/Captivate_TechRef/832702_Leica_Captivate_TechRef_v1-0-0_en.pdf (09.05.2018)

Leica GR25 GNSS vastuvõtja. (2018). Smart Office. [WWW] <http://soffice.lt/leica-gr25.html> (02.03.2018)

Maa-ameti, Geosofti ja Hades Invest GNSS püsijaamade võrgu kaart. (s.a). Google Maps. [WWW] <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1EUSsq7wiNUClvQ34-kOjRX9KZoaAwzta&ll=58.631033765238584%2C23.82190439531246&z=8> (05.05.2018)

RTCM's special committees. (s.a). rtcm. [WWW] <http://www.rtcmm.org/about.html> (09.05.2018)

RTK Standards. (2011). Navipedia. [WWW] http://www.navipedia.net/index.php/RTK_Standards (09.05.2018)

RTK võrgud – erinevad meetodid. (2009). Ivaleon. [WWW] <http://www.ivaleon.ee/wp-content/pildid/erinevad-rtk-meetodid.pdf> (10.04.2018)

Rüdja, A., Sander, J. (2013). Globaalne asukohamääramine. Tallinn. SA INNOVE. 287 lk. [WWW]
<https://www.digar.ee/viewer/et/nlib-digar:187790/119995/page/1> (10.04.2018)

Space Segment. (s.a). GPS.gov. [WWW] <https://www.gps.gov/systems/gps/space/> (27.04.2018)

Topcon G3. (s.a). Topconpositioning. [WWW]
<https://www.topconpositioning.com/support/products/net-g3g3a> (09.04.2018)

Topcon Legacy. (s.a). Topconcare. [WWW] <http://topconcare.com/en/hardware/gnss-receivers/gb-3/> (09.04.2018)

Topcon PG-A1. (s.a). Precision-geosystems. [WWW] <https://www.precision-geosystems.com/product/topcon-pg-a1-gnss-antenna/?v=a57b8491d1d8> (09.04.2018)

Trimble NetR5, Trimble Zephyr Geodetic II antenn. (s.a). Impexgeo. [WWW] <http://impexgeo.pl/nowa-stacja-referencyjna-trimble-netr5> (02.03.2018)

- Trimble NetR9 GNSS Reference Receiver. (2018). Trimble. [WWW]
<http://www.trimble.com/Infrastructure/Trimble-NetR9.aspx> (02.03.2018)
- Valdmaa, R.** (2010). Trimble VRS Now Eesti. [WWW]
http://www.alphagis.ee/data/img/esri10/ESRIpaevad10_Valdmaa.pdf (02.03.2018)
- Wübbena, G., Bagge, A., Schmitz, M.** (2001). Network-Based Techniques for RTK Applications.
[WWW] http://www.geopp.de/pdf/gpsjin01_p.pdf (27.04.2018)
- Wübbena, G., Schmitz, M., Bagge, A. (2006). Real-Time GNSS Data Transmission Standard RTCM 3.0. [WWW] http://www.geopp.com/pdf/gppigs06_rtc_m_f.pdf (09.05.2018)

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Karel Kõre,

(sünnipäev 26/09/1995)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö RTK GNSS mõõtmiste stabiilsus ja täpsus erinevates püsijaamade võrkudes, mille juhendaja on dotsent Aive Liibusk,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

_____ allkiri

Tartu, 23.05.2018

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ (juhendaja nimi ja allkiri)

_____ (kuupäev)

_____ (juhendaja nimi ja allkiri) (kuupäev)