

Ismo Mehtälä

Yhden vastaanottimen tarkka paikannus

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Maanmittaustekniikka
Insinööri
10.5.2012

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Ismo Mehtälä Yhden vastaanottimen tarkka paikannus 57 sivua + 2 liitettä 10.5.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	professori Markku Poutanen yliopettaja Vesa Rope
<p>Tämän insinööriyön aiheena oli tutkia Precise Point Positioning -satelliittimittausmenetelmää, jota suomeksi voi kutsua yhden vastaanottimen tarkaksi paikannukseksi. Työssä oli kolme vaihetta: teoria, koordinaattijärjestelmät ja muunnokset sekä laskenta ja ionosfäärin vaikutuksen tutkiminen.</p> <p>GNSS-järjestelmä tarkoittaa globaaleja satelliittinavigaatiojärjestelmiä. Niitä on tällä hetkellä käytössä yhdysvaltalainen GPS sekä venäläinen GLONASS. Satelliittipaikannus perustuu etäisyyksien mittaukseen satelliiteista vastaanottimeen. Maanmittauksessa käytössä olevat perusmittaustavat ovat staattinen suhteellinen, RTK-, verkko-RTK- ja VRS-mittaus. RTK-mittauksissa käytetään yhtä tukiasemaa ja verkko-RTK- ja VRS-mittauksissa tukiasemaverkkoa. Precise Point Positioning -menetelmässä ei käytetä tukiasemaa lainkaan. PPP-menetelmä perustuu tarkkoihin rata- ja kellotietoihin, joita saa esimerkiksi IGS:lta (International GNSS Service.) PPP-menetelmällä voidaan saavuttaa senttimetriluokan tarkkuus. PPP-menetelmän etuja on tukiasemista riippumattomuuden lisäksi tarvittavan laskennan vähyys. PPP-menetelmän haittapuolia ovat pitkät konvergenssiaperiodit, heikko tarkkuus suhteelliseen mittaukseen verrattuna sekä liitokset paikallisiin koordinaattijärjestelmiin.</p> <p>Suomessa ollaan siirtymässä vanhenevasta kartastokoordinaattijärjestelmästä EUREF-FIN-koordinaatistoon, joka on kansallinen realisaatio eurooppalaisesta ETRS89-järjestelmästä. Julkisen hallinnon suosituksissa 153 ja 154 on määritetty muunnokset KKJ:n ja EUREF-FINin välillä. Koska satelliittien tarkat rata- ja kellotiedot ovat aina ITRF-koordinaatistossa, täytyy PPP-menetelmää käytettäessä käyttää koordinaattimuunnoksia jotta päästään paikalliseen koordinaatistoon. Tähän ei ole vielä rutiinimuunnosta. Tässä työssä selvitettiin tarvittavat muunnoskaavat mittaushetken ITRF-epookista EUREF-FIN-koordinaatteihin.</p> <p>Laskentaan käytettiin Metsähovin tutkimusasemalta vuosina 2000 ja 2010 kerättyä GPS-havaintodataa. Ionosfääriaktiivisuus oli korkealla vuonna 2000 ja rauhallinen vuonna 2010. Laskennassa käytettiin kanadalaista PPP Direct -palvelua, joka on vapaasti käytettävissä internetissä. Laskennassa havaittiin, että vuoden 2010 virhearvot ovat noin 20 prosenttia pienemmät kuin vuoden 2000 virhearvot.</p>	
Avainsanat	PPP, GNSS, GPS, GLONASS, RTK, VRS, koordinaatistot, koordinaattimuunnokset, ITRF, EUREF-FIN, ionosfääri, PPP Direct

Author Title	Ismo Mehtälä Precise Point Positioning
Number of Pages Date	57 pages + 2 appendices 10 May 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Markku Poutanen, Professor Vesa Rope, Principal Lecturer
<p>The purpose of this final year project is to study a satellite positioning method called Precise Point Positioning (PPP.) This work includes three chapters. In chapter one, satellite positioning in general and Precise Point Positioning in particular are explained. Chapter two includes coordinate systems and transformations. Chapter three includes calculations and conclusions on effects of ionosphere activity on the accuracy of the PPP solution.</p> <p>GNSS (Global Navigation Satellite System) systems currently in use are the American GPS and Russian GLONASS. Satellite positioning is based on measuring distances from satellites to the receiver. Traditional land surveying methods using satellites are relative static, Real-Time Kinematic and Virtual Reference Station methods. These methods use reference stations. Precise Point Positioning is a technique that does not use reference stations. PPP requires precise satellite ephemerides and clock corrections, such as provided by IGS (International GNSS Service.) Long convergence periods, relatively weak accuracy and a need for transformation to the local reference frame are downsides of the PPP method.</p> <p>In Finland, the old map grid coordinate system (KKJ) is being replaced by the EUREF-FIN –system which is the national realization of the European ETRS89. The necessary transformations are specified in the public administration recommendations (JHS) 153 and 154 created by the Finnish Geodetic Institute. Because the precise ephemerides of the satellites are given in ITRF coordinates, coordinate transformations from ITRF to local coordinates are an essential part of using PPP. In this project, necessary formulas for transformations between ITRF and EURE-FIN were studied.</p> <p>For calculations, data from the FGI Metsähovi research station was used. Data were collected during years 2000 and 2010. The ionosphere activity was high in year 2000 and low in year 2010. Only GPS data was used in this project. For calculations, Canadian online service called PPP Direct was used. From calculations it was concluded that the accuracy was approximately 20 percent better during the year 2010 than in 2000.</p>	
Keywords	PPP, GNSS, GPS, GLONASS, RTK, VRS, reference frames, coordinate transformations, ITRF, EUREF-FIN, ionosphere

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	PPP-tekniikka	1
2.1	GNSS ja GNSS-järjestelmät	1
2.1.1	Mikä on GNSS?	1
2.1.2	GPS	2
2.1.3	GLONASS	3
2.1.4	Galileo	4
2.1.5	COMPASS	4
2.2	Satelliittipaikannuksen periaatteet	5
2.3	Satelliittimittausten perusmittaustavat	5
2.3.1	Absoluuttinen paikannus	5
2.3.2	Differentiaalinen paikannus	6
2.3.3	Vaihehavaintoihin perustuva suhteellinen mittaus	7
2.4	Perinteiset mittaustavat maanmittauksessa	8
2.4.1	RTK	8
2.4.2	Verkko-RTK	9
2.4.3	VRS ja Smartnet	10
2.4.4	Staattinen mittaus	11
2.5	Virhelähteet satelliittimittauksissa	12
2.5.1	Ilmakehä	12
2.5.2	Kello- ja ratavirheet	13
2.5.3	Vastaanottimen virheet	13
2.5.4	Satelliittigeometria	14
2.5.5	Monitieheijastukset	14
2.6	Kaksoiserotusmenetelmä	15
2.7	PPP – Precision Point Positioning	16
2.7.1	PPP-menetelmän taustaa	16
2.7.2	PPP-menetelmän teoria	17
2.8	Virhelähteet PPP-menetelmässä	18
2.8.1	Vaiheaallon kiertyminen (phase wind-up)	18

2.8.2	Satelliitin antennin vaihekeskipiste ja satelliitin orientaatio	18
2.8.3	Satelliitin kello	19
2.8.4	Maan vuoksi	19
2.8.5	Vuoroveden vaikutus	19
2.8.6	Ilmakehän vaikutus	20
2.9	PPP-menetelmä suhteelliseen mittaukseen verrattuna	20
2.9.1	PPP-menetelmän tarkkuus	20
2.9.2	PPP-menetelmän edut ja haitat verrattuna perinteiseen tarkkaan mittaukseen	21
3	Koordinaattijärjestelmät ja muunnokset	22
3.1	Yleistä koordinaattijärjestelmistä	22
3.1.1	Geoidi	23
3.1.2	Pyörähdysellipsoidi	23
3.1.3	Maantieteellinen koordinaattijärjestelmä	24
3.1.4	Suorakulmainen koordinaattijärjestelmä	25
3.1.5	Karttaprojektiot	25
3.1.6	Geodeettinen datum	26
3.2	Koordinaattijärjestelmiä	27
3.2.1	ITRS/ITRF	27
3.2.2	WGS84	28
3.2.3	ETRS-89/ETRF	28
3.2.4	EUREF-FIN	29
3.2.5	KKJ	30
3.3	Suomen korkeusjärjestelmät	31
3.3.1	NN-järjestelmä	31
3.3.2	N43-järjestelmä	31
3.3.3	N60-järjestelmä	32
3.3.4	N2000-järjestelmä	32
3.4	Koordinaattimuunnostyypit	32
3.4.1	Helmert-muunnos	33
3.4.2	Affiininen muunnos	33
3.5	Julkisen hallinnon suositukset	34
3.5.1	JHS 153	34
3.5.2	JHS 154	35
3.6	Koordinaattimuunnospalvelut Suomessa	35
3.6.1	Geodeettisen laitoksen muunnospalvelu	35
3.6.2	Maanmittauslaitoksen muunnospalvelut	36

3.7	PPP ja koordinaattimuunnokset	37
3.7.1	PPP-paikannuksessa käytetty koordinaatisto	37
3.7.2	NKG_RF03 (NKG Reference Frame 2003)	37
3.7.3	NKG_RF03vel	37
3.7.4	Muunnos mittaushetken epookista ITRF-2000-realisaation epookkiin 2003.75	39
3.7.5	Muunnos NKG_RF03-koordinaateista EUREF-FIN-koordinaatteihin	39
4	PPP – tarkkuus ja ionosfäärin vaikutus	41
4.1	Havainnot	41
4.1.1	Metsähovin tutkimusasema	41
4.1.2	Havaintodata	42
4.2	Laskentaohjelmia	42
4.2.1	PPP Direct	42
4.2.2	GrafNav	43
4.3	Laskenta ja laskennan tarkoitus	44
4.4	Laskennan tulokset	45
4.4.1	Vuosien 2000 ja 2010 koko vuoden tulokset	45
4.4.2	Vuosien 2000 ja 2010 tammikuiden tulokset	48
4.4.3	Vuorokausiotokset	53
4.4.4	Keskiarvokoordinaattien muunnokset	53
5	Yhteenveto	54
	Lähteet	56
	Liitteet	
	Liite 1. Pdf-tulostiedosto 30.5.2010	
	Liite 2. Vuorokausiotosten virhearvojen graafiset esitykset	

Lyhenteet

CTRS	Conventional Terrestrial Reference System, konventionaalinen maakeskinen koordinaattijärjestelmä.
DOP	Dilution of Precision, paikannustarkkuuden heikentyminen.
ED50	European Datum 1950, Länsi-Euroopan kattava koordinaattijärjestelmä, joka perustuu kolmioverkon mittauksiin.
EPN	European Permanent GNSS Network, eurooppalainen pysyvien GNSS-asemien verkko.
ETRF	European Terrestrial Reference Frame, eurooppalainen ETRS-koordinaattijärjestelmän realisaatio.
ETRS	European Terrestrial Reference System, eurooppalainen koordinaattijärjestelmä.
EUREF	European Reference Frame, IAG:n komissio 1:n Euroopan koordinaattijärjestelmien alakomissio.
EUREF-FIN	European Reference Frame-Finland, kansallinen ETRS-89-koordinaattijärjestelmän realisaatio.
GLONASS	GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikova Sistema, Venäjän satelliittinavigaatiojärjestelmä.
GNSS	Global Navigation Satellite System, globaali satelliittinavigaatiojärjestelmä.
GPS	Global Positioning System, Yhdysvaltain satelliittinavigaatiojärjestelmä.
IAG	International Association of Geodesy, kansainvälinen geodesian järjestö.
ICRF	International Celestial Reference Frame, kansainvälinen tähtitieteellinen koordinaatisto.
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service, kansainvälinen järjestö, jonka eräs tehtävä on ylläpitää ITRF-koordinaatistoa.
IGS	International GNSS Service, kansainvälinen GNSS-palvelu.

ITRF	International Terrestrial Reference Frame, kansainvälinen maakeskinen koordinaatisto, ITRS-järjestelmän realisaatio.
ITRS	International Terrestrial Reference System, kansainvälinen maakeskinen koordinaattijärjestelmä.
JHS	Julkisen hallinnon suositus.
KKJ	Kartastokoordinaattijärjestelmä.
NKG	Nordic Geodetic Commission, pohjoismainen geodeettinen komissio.
PPP	Precise Point Positioning, yhden vastaanottimen tarkka paikannus.
RINEX	Receiver Independent Exchange Format, GNSS-havaintodatan tiedostomuoto.
RTK	Real-Time Kinematic, reaaliaikainen kinemaattinen mittaus.
TEC	Total Electron Content, elektronipitoisuus ionosfäärissä.
UTM	Universal Transverse Mercator, karttaprojektio-tyyppi.
VLBI	Very Long Baseline Interferometry, pitkäkantainterferometria.
VRS	Virtual Reference Station, virtuaalinen tukiasema.
VVJ	Vanha valtion koordinaattijärjestelmä.
WGS84	World Geodetic System 1984, GPS:n käyttämä koordinaattijärjestelmä.

1 Johdanto

Tämän työn tarkoitus on tutkia Precise Point Positioning -satelliittimittaustekniikkaa, jota Suomeksi voidaan kutsua yhden vastaanottimen tarkaksi paikannukseksi. PPP-tekniikalla on runsaasti erilaisia mahdollisia mitta- ja paikannussovelluksia, mutta tässä työssä keskitytään tarkastelemaan asiaa maanmittauksen kannalta. Tämä työ koostuu kolmesta eri vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa tutkitaan itse menetelmää sekä pohditaan sen etuja ja haittoja käytössä oleviin muihin menetelmiin verrattuna. Toisessa vaiheessa perehdytään koordinaattijärjestelmiin sekä koordinaattimuunnoksiin, jotka ovat välttämättömiä PPP-tekniikkaa käytettäessä jotta päästään satelliittijärjestelmien käyttämisestä koordinaatistoista paikallisiin koordinaatteihin. Kolmannessa vaiheessa käytetään Internetin kautta saatavaa ilmaista laskentapalvelua ja tutkitaan ionosfäärin vaikutusta paikannuksen tarkkuuteen.

2 PPP-tekniikka

2.1 GNSS ja GNSS-järjestelmät

2.1.1 Mikä on GNSS?

GNSS (Global Navigation Satellite System) on nimensä mukaan globaali satelliitteihin perustuva paikannusjärjestelmä, jossa havaitsijan paikka määritetään vastaanottimesta satelliitteihin mitattujen etäisyyksien avulla. Tällä hetkellä käytössä olevat GNSS-järjestelmät ovat Yhdysvaltain GPS sekä Venäjän GLONASS. Kehitteillä olevat globaalit järjestelmät ovat yleiseurooppalainen Galileo sekä Kiinan COMPASS (BeiDou). Näiden lisäksi Intia ja Japani kehittävät omia paikallisia järjestelmiään.

2.1.2 GPS

Yleisin ja tunnetuin satelliittipaikannusjärjestelmä on Yhdysvaltain kehittämä Navstar (Navigation System using Timing and Ranging) GPS (Global Positioning System) tai lyhyesti GPS. GPS kehitettiin alun perin sotilaallisiin tarkoituksiin, minkä vuoksi oli tärkeää, että järjestelmä toimisi reaaliaikaisesti eikä se olisi häiritävissä eikä alttiina luonnonilmiöille. (2, s. 17–18.)

Ensimmäinen ensimmäisen (Block I) sukupolven testisatelliitti laukaistiin avaruuteen vuonna 1978. Kymmenes ja viimeinen Block I -satelliitti lähetettiin vuonna 1985 ja viimeinen niistä poistui käytöstä vuonna 1995. Vuonna 1989 lähetettiin kiertoradalle ensimmäinen Block II -sukupolven satelliitti. Block IIA- ja Block IIR -sarjan satelliitit ovat Block II:sta hieman modifioituja, ja suurin osa nykyisin käytössä olevista satelliiteista on Block IIR -sarjan satelliitteja. Järjestelmä oli valmis täydessä laajuudessaan vasta vuonna 1995. Valmiissa GPS-konstellaatiossa on satelliitteja 24, mutta käytännössä avaruudessa on aina useita varasatelliitteja. Seuraava avaruuteen lähetettävä sarja on Block IIF johon on mm. lisätty kolmas taajuus. Noin vuonna 2014 lähetetään ensimmäiset Block III -sukupolven satelliitit. (1, s. 23–25.)

GPS-järjestelmään kuuluu kolme osaa: satelliitit, kontrolliverkko ja käyttäjät. Kontrolliverkko tarkkailee satelliittien tilaa, määrittää niiden kellovirheet ja rataelementit sekä päivittää satelliittien lähettämiä tietoja. Kontrolliverkon komentokeskus sijaitsee Colorado Springsissa Yhdysvalloissa. Alkuperäiset maa-asemat sijaitsevat Diego Garciasa, Ascensionissa, Kwajaleinissa ja Havaijilla. Myöhemmin seuranta-asemia on perustettu Australiaan, Argentiinaan, Bahrainiin, Ecuadoriin, Englantiin, Kiinaan ja Yhdysvaltoihin. (2, s. 18.)

GPS-satelliittien ratakorkeus on runsaat 20 000 km. Satelliittien kiertoaika on 11 h 58 min eli $\frac{1}{2}$ tähtivuorokautta. GPS-satelliittien ratatasojen inkliinaatiokulma päiväntasaajan nähden on 55° . GPS-järjestelmän satelliitit käyttävät kahta eri taajuutta (L1, 1575.42 MHz ja L2, 1227.6 MHz) kantoaallon lähettämiseen. Taajuudella L1 aallonpituus on 19 cm ja taajuudella L2 24 cm. Navigoinnissa käytettävät koodit, C/A-koodi ja P-koodi, on moduloitu kantoaaltoihin. C/A-koodi on julkinen, myös siviilikäyttöön tarkoitettu koodi ja P-koodi on pelkästään sotilaskäyttöön varattu koodi. P-koodia käytettä-

essä paikannus on huomattavasti tarkempaa. C/A-koodi on moduloitu pelkästään L1-taajuuteen, kun taas P-koodi on moduloitu sekä L1- että L2-taajuuteen. Tulevaisuudessa C/A-koodi lisätään myös L2-taajuuteen, ja sekä L1- että L2-taajuuteen tulee sotilaskäyttöön tarkoitettu M-koodi. Käyttöön on tulossa Block IIF -sarjan satelliittien myötä myös siviilikäyttöön tarkoitettu taajuus L5 (1176.45 MHz). (2, s. 19.)

2.1.3 GLONASS

Neuvostoliitto käynnisti oman satelliittipaikannusjärjestelmänsä, GLONASSin (GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikova Sistema), vuonna 1982, jolloin ensimmäinen satelliitti lähetettiin kiertoradalle. Virallisesti GLONASS julistettiin toimintavalmiiksi vuonna 1993, mutta vasta viime vuosina on satelliittikonstellaatio ollut suunnitelmien mukainen. Kuten GPS, myös GLONASS kehitettiin alun perin sotilaallisiin tarkoituksiin. GLONASSin suunniteltu satelliittikonstellaatio koostuu 24 satelliitista, mutta tähän saakka satelliitteja on ollut kiertoradalla vähemmän. 20.3.2012 radalla oli 24 satelliittia, joista yksi oli huollettavana. GLONASS-satelliitit ovat olleet GPS-satelliitteja lyhytikäisempiä, ja niitä on jouduttu lähettämään taivaalle jo lähes 90 kappaletta. GLONASSin komentokeskus sijaitsee Moskovassa, ja seuranta-asemia on neljä eri puolilla Venäjää. GLONASS on nykyisin mukana IGS:n (International GNSS Service) maailmanlaajuisessa verkossa, ja IGS:ltä saa GLONASS-satelliittien tarkat rataelementit. Nykyisin GLONASSia käytetään lähinnä GPS-mittausten täydentämiseen. (1, s. 25–26; 3, s. 10.)

GLONASSin satelliitit sijaitsevat kolmella eri ratatasolla, jotka poikkeavat toisistaan 120° . Ratatasojen inkliinaatiokulma päiväntasaajaan nähden on $64,8^\circ$. Ratakorkeus on 19 100 km, ja satelliittien kiertoaika on 11 h 15 min. GLONASS-satelliitit lähettävät kahden erilaista signaalia: Standard Precision (SP) ja High Precision (HP). HP-signaali on lähinnä sotilaskäyttöön tarkoitettu. SP-signaalia lähetetään 316–500 W:n teholla 38° kartion muodossa. Jokainen satelliitti lähettää SP-signaalia samalla koodilla mutta käyttäen eri taajuutta. L1-taajuusalueella käytetään FDMA (frequency division multiple access)-tekniikkaa, joka osoittaa taajuudet 15 eri kanavalle. Näistä kanavista keskimääräinen on 1602.0 MHz, ja muut lasketaan kaavalla $1602.0 \text{ MHz} + 0.5625 \text{ MHz} \times n$, jossa n on jokin arvo $-7:n$ ja $7:n$ välillä. HP-signaali käyttää samaa kanta-aaltoa kuin SP mutta 10 kertaa suurempaa kaistanleveyttä. HP-signaalissa käytetään myös FDMA-tekniikkaa,

mutta keskimäinen kanava on 1246 MHz, ja muut kanavat lasketaan kaavalla $1246 \text{ MHz} + 0.4375 \text{ MHz} \times n$, jossa n on jokin arvo $-7:n$ ja $7:n$ välillä. (3, s. 10–11.)

2.1.4 Galileo

Yleiseurooppalainen Galileo juontaa juurensa vuoteen 2002, jolloin Euroopan neuvosto äänesti hankkeen aloittamisesta. Hanke saa rahoituksensa useilta eurooppalaisilta julkisilta ja yksityisiltä tahoilta. Valmistuessaan Galileo tulee olemaan vaihtoehto tai täydennys olemassa oleville GPS- ja GLONASS-järjestelmille. Ensimmäinen testisatelliitti Giove-A laukaistiin vuonna 2005 ja toinen Giove-B vuonna 2007. Vuonna 2011 lähetettiin kaksi ensimmäistä Galileo-järjestelmän navigaationsatelliittia.

Valmistuessaan Galileo-satelliittikonstellaatio tulee käsittämään 27 satelliittia sekä kolme varasatelliittia. Satelliittien ratakorkeus on 23 222 km, ja niitä voidaan ohjata ratamuutoksista johtuvien virheiden minimoimiseksi. Ratatasoja on kolme, ja niiden inkliinaatiokulma on 56° . Kontrolliverkossa tulee olemaan kolme komentokeskusta sekä lukuisia maa-asemia eri puolilla maailmaa. Yksi maa-asemista sijaitsee Virolahdella. (3, s. 11–12.)

Galileo-satelliitit lähettävät kymmentä signaalia, joiden taajuus on välillä 1164–1592 MHz. Jokaisessa signaalissa on oma koodinsa, jonka avulla vastaanotin määrittää mistä satelliitista signaali on peräisin. E5a-taajuusalue on välillä 1164–1189 MHz, E5b-taajuusalue välillä 1189–1214 MHz ja E6-taajuusalue välillä 1260–1300 MHz. Viimeinen taajuusalueblokki käsittää signaalit E2-, L1- ja E1-signaalit, joiden taajuusalue on välillä 1559–1592 MHz. (3, s. 12–13.)

2.1.5 COMPASS

Kiinalla on käytössä alueellinen satelliittinavigaatiojärjestelmä nimeltään Beidou-1. Siihen kuuluu neljä satelliittia, jotka ovat geostationaarisella radalla pääasiassa Aasian yllä. Kehitysvaiheessa on globaali järjestelmä nimeltään Beidou-2 tai COMPASS. Valmistuessaan COMPASS-satelliitteja tulee olemaan radalla 35 kappaletta, joista viisi on geostationaarisella radalla. Järjestelmä käyttää taajuusalueita E1, E2, E5b ja E6. Tällä

hetkellä on valmistumassa alueellinen 12 satelliittia käsittävä järjestelmä. Globaali järjestelmä on valmistumassa noin vuonna 2020. (3, s. 13–14.)

2.2 Satelliittipaikannuksen periaatteet

Satelliittipaikannuksessa kohteen sijainti saadaan selville mittaamalla etäisyys vastaanottimesta maata kiertäviin satelliitteihin. Kun etäisyys vastaanottimesta satelliitteihin tiedetään, voidaan kohteen sijainti laskea kolmiomittauksen eli trilateraation avulla. Tarkan sijainnin määrittämiseksi tarvitaan sekä satelliittien sijainnit eli ratatiedot että kellotiedot.

Etäisyyden määrittämiseen satelliitista vastaanottimeen on kaksi eri menetelmää. Yksinkertaisin mutta epätarkin menetelmä on käyttää satelliittien lähettämän signaalin mukana kulkevaa koodia, jonka avulla voidaan laskea signaalin kulku-aika ja siten etäisyys satelliittiin. Toinen tapa on käyttää satelliittisignaalin kantoaaltoa. Koodia käytettäessä päästään muutaman metrin paikannustarkkuuteen. Havaintoihin tarvitaan vain yksi vastaanotin, ja tapaa kutsutaan myös absoluuttiseksi paikannukseksi.

Tarkempaan paikannukseen koodia käytettäessä päästään differentiaalisessa paikannuksessa, jossa käytetään kahta vastaanotinta. Toinen vastaanotin eli tukiasema sijaitsee tunnetulla kiinteällä pisteellä. Tukiasema lähettää liikkuvalla vastaanottimella korjausdataa reaaliaikaisesti radiolinkin välityksellä.

Tarkimpaan paikannukseen päästään, kun käytetään satelliittisignaalin kantoaaltoa ja suhteellista mittausta, eli sijainti lasketaan tunnetun pisteen suhteen käyttäen vähintään kahta vastaanotinta. Tällä menetelmällä voidaan saavuttaa alle senttimetrin tarkkuus. (2)

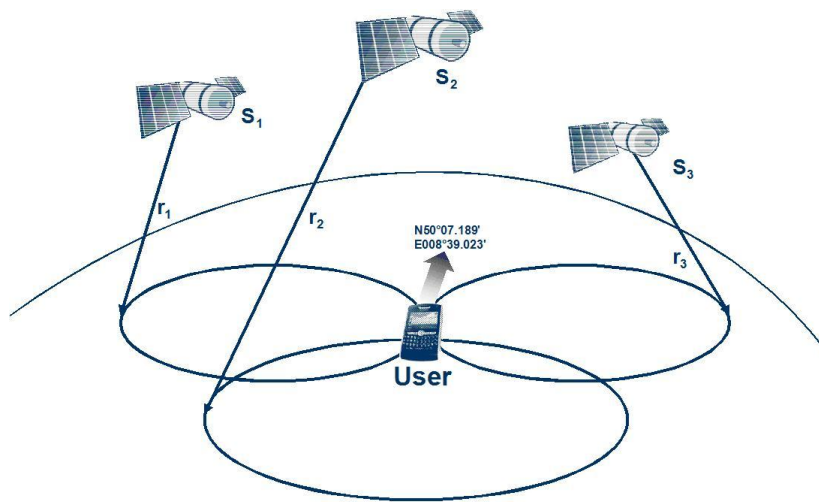
2.3 Satelliittimittausten perusmittaustavat

2.3.1 Absoluuttinen paikannus

Absoluuttinen paikannus (kuva 1) on mittaustavoista yksinkertaisin. Siinä käyttäjä tarvitsee vain yhden havaintolaitteen. Absoluuttisessa paikannuksessa etäisyyden mittaus

satelliiteista vastaanottoon perustuu satelliittisignaalin mukana kulkevan koodin käyttöön. Absoluuttisessa mittaustavassa havaitsijan sijainti lasketaan suoraan satelliittien suhteen. Sijainti on satelliittien ja etäisyyksien määrittämien pallopintojen leikkauskohdassa. Jotta sijainti voidaan määrittää, tarvitaan havainnot vähintään kolmeen satelliittiin. Vastaanottimen kellovirheen korjaamiseksi tarvitaan kuitenkin havainnot vähintään neljään satelliittiin. Absoluuttisessa paikannuksessa paikannustarkkuus on yleensä alle 20 m.

Koodiin perustuvaa paikannusta käytetään vähäistä tarkkuutta vaativissa sovelluksissa kuten autonavigaattoreissa. (4, s. 302–303.)

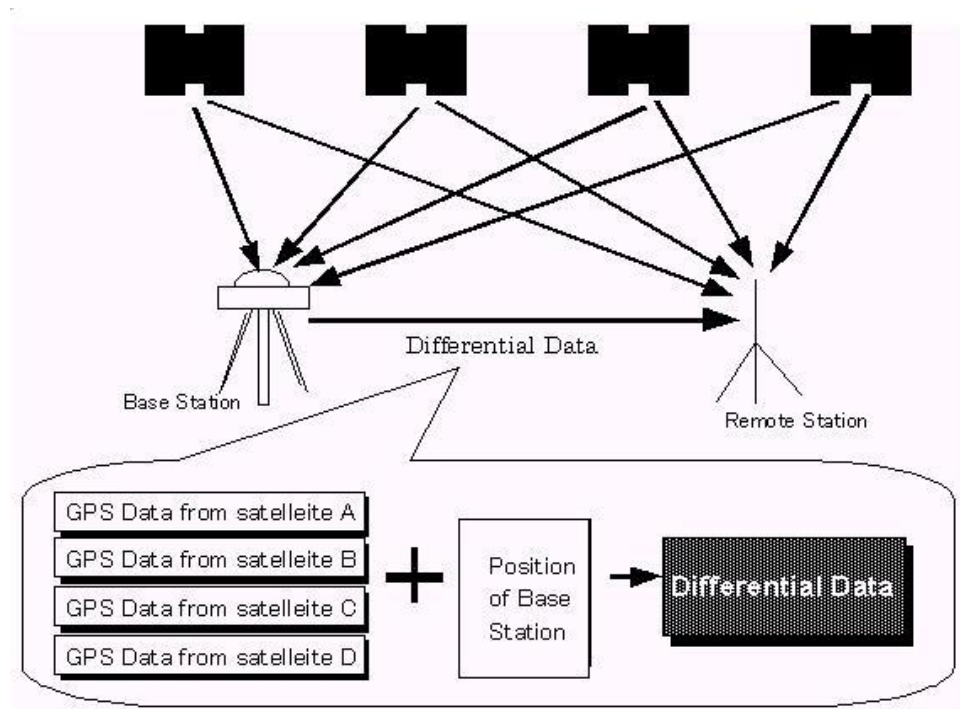


Kuva 1. Absoluuttinen paikannus (www.fidis.net)

2.3.2 Differentiaalinen paikannus

Myös differentiaalisessa paikannuksessa (kuva 2) käytetään sijainnin määrittämiseen satelliittisignaalin mukana kulkevaa koodia. Differentiaalisessa paikannuksessa vastaanottimen lisäksi on apuna tukiasema, joka sijaitsee tunnetulla pisteellä. Mitattaessa tukiasema määrittää satelliittien ratavirheiden ja ilmakehän signaalin kulkumatkaan aiheuttamia virheitä ja välittää korjausdataa reaaliaikaisesti vastaanottimelle yleensä radiolinkin välityksellä. Sijainti lasketaan satelliittien suhteen kuten absoluuttisessa paikannuksessa. Tukiaseman avulla sijainti saadaan laskettua tarkemmin kuin absoluuttisessa paikannuksessa. Samalla voidaan monitoroida satelliittisignaalin tarkkuutta ja luotettavuutta. Differentiaalisessa paikannuksessa havaitsija tarvitsee vain yhden tietoliikennelinkillä varustetun vastaanottimen, sillä tukiasemapalveluita on tarjolla sekä

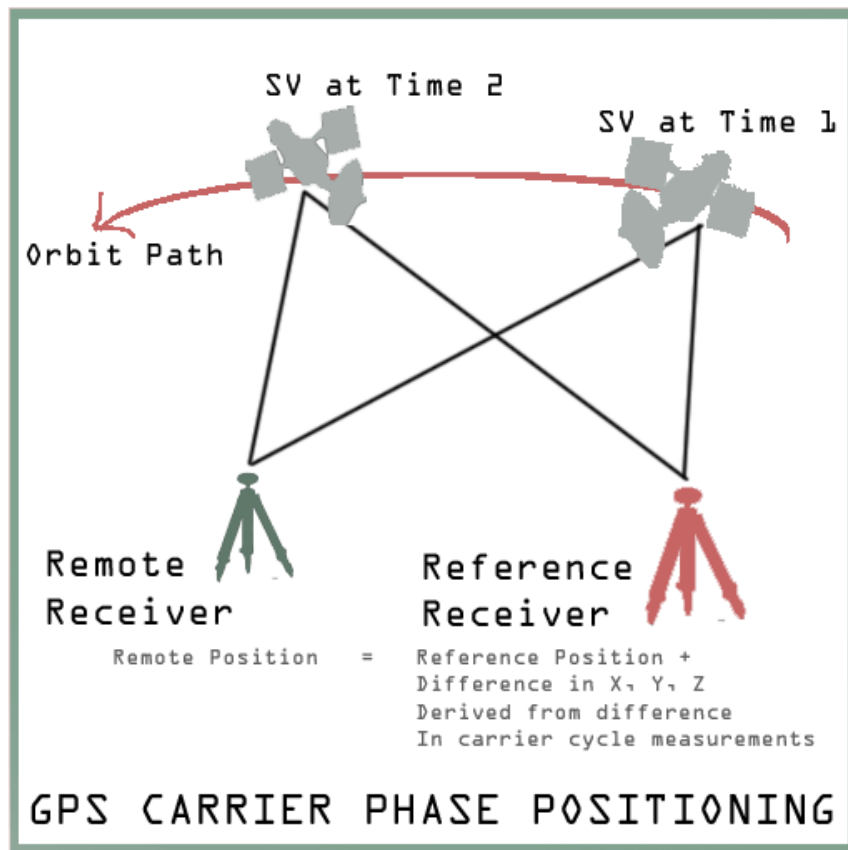
kotimaassa että ulkomailla. Paikannustarkkuus tällä mittaustavalla on parempi kuin 2 m. Tapaa käytetään muun muassa laivaliikenteessä ja ammattimaisessa ajoneuvoliikenteessä. (4, s. 305–306.)



Kuva 2. Differentiaalinen paikannus (proceedings.esri.com)

2.3.3 Vaihehavaintoihin perustuva suhteellinen mittaus

Vaihehavaintoihin perustuvassa suhteellisessa mittauksessa (kuva 3) eli interferometri- sessä mittauksessa käytetään satelliittisignaalin koodin sijasta kanta-aallon havaintoja. Toisin kuin absoluuttisessa ja differentiaalisessa paikannuksessa, vaihehavaintoihin perustuvassa suhteellisessa mittauksessa sijainti lasketaan vertailuvastaanottimen suhteeseen. Vertailuvastaanotin on yleensä tunnetulla pisteellä. Suhteellisessa mittauksessa tarvitaan aina vähintään kaksi havaintolaitetta. Suhteellisessa paikannuksessa määritetään, kuinka monta kokonaista aallonpituutta satelliitin ja vastaanottimen välissä on. Tämä mittaustapa on perusmittaustavoista tarkin, parhaimmillaan voidaan saavuttaa takymetriin verrattava tarkkuus. Vaihehavaintoihin perustuva suhteellinen mittaus on kuitenkin monimutkaisin mittaustapa ja tarvittavat laitteet kalliimpia kuin navigointivastaanottimet. Vaihehavaintoihin perustuvaa suhteellista mittausta käytetään geodesiassa sekä mittaus- ja kartoitustekniikassa, joissa vaatimuksena on mahdollisimman tarkka paikannus. (4, s. 308–309.)



Kuva 3. Vaihehavaintoihin perustuva suhteellinen mittaus (www.poultonproject.org)

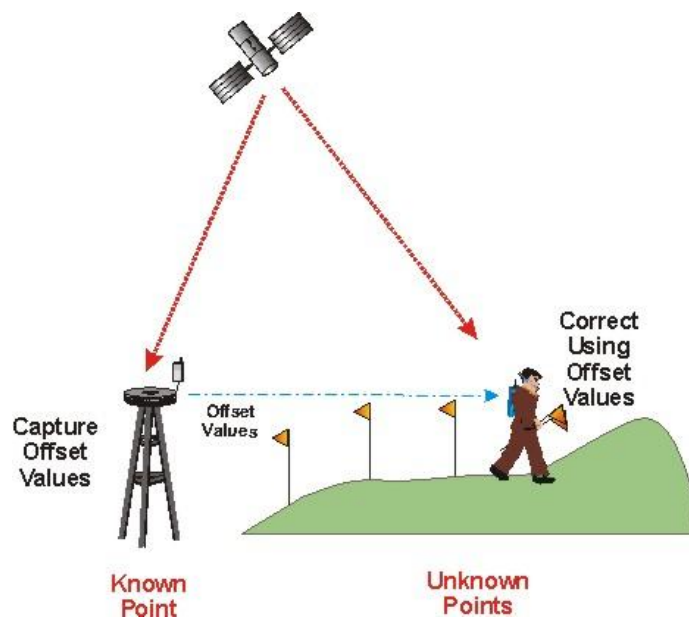
2.4 Perinteiset mittaustavat maanmittauksessa

Maanmittauksessa edellytetään yleensä suurta tarkkuutta, jonka vuoksi siinä käytetään lähes aina vaihehavaintoihin perustuvaa suhteellista mittausta. Maanmittauksessa käytetyt satelliittimittausmenetelmät ovat reaaliaikainen kinemaattinen mittaus (RTK), verkko-RTK sekä virtuaalitukiasemaverkko eli VRS. Tarkimmissa ja suurinta luotettavuutta vaativissa töissä käytetään suhteellista staattista mittausta. (4)

2.4.1 RTK

RTK-mittaus (Real Time Kinematic) on perinteinen kartoituksessa ja mittauksissa käytetty menetelmä. RTK-mittauksessa (kuva 4) on kaksi vastaanotinta: paikantava vastaanotin ja tunnetulla pisteellä sijaitseva vertailuvastaanotin. Vertailuvastaanotin mittaa vaihehavainnot ja välittää ne paikantavalle vastaanottimelle. Paikantava vastaanotin ratkaisee tarvittavat tuntemattomat suureet reaaliajassa. Menetelmä on sekä laskennallisesti että tiedonsiirrollisesti hyvin vaativa. Tiedonsiirto voidaan toteuttaa joko radio-

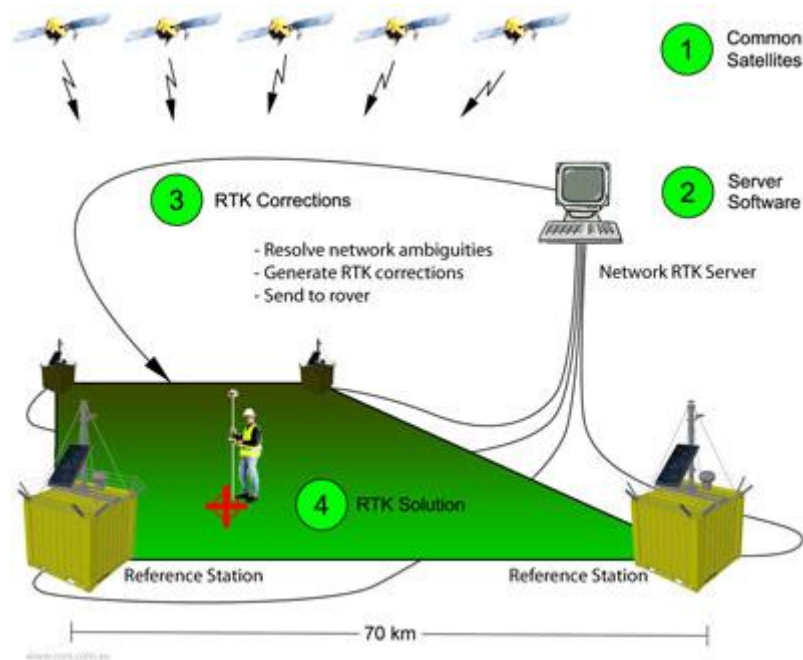
teitse tai GSM-yhteydellä. RTK-mittauksessa paikantavalla vastaanottimella ja vertailuvastaanottimella tulee olla seurannassa vähintään viisi yhteistä satelliittia. Luotettavan mittaustuloksen saamiseksi tulee yhteisiä satelliitteja olla kuitenkin vähintään 6–7. Menetelmän suurin heikkous on rajallinen toimintasäde sekä alttius muun muassa ilmakehästä johtuville virheille. Radiolinkkiä käytettäessä toimintasäde on muutamia kilometrejä. GSM-yhteys ei rajoita toimintasädettä, mutta käytännössä ionosfäärin häiriöt rajoittavat toimintasäteen kymmeneen kilometriin. Myös paikantavan vastaanottimen alustus aika kasvaa ja paikannuksen tarkkuus heikkenee etäisyyden vertailuvastaanottimeen kasvaessa. RTK-menetelmä on myös kallis, sillä vastaanottimen lisäksi käyttäjä joutuu hankkimaan oman tukiaseman. (4, s. 322–323)



Kuva 4. RTK-mittaus (withfriendship.com)

2.4.2 Verkko-RTK

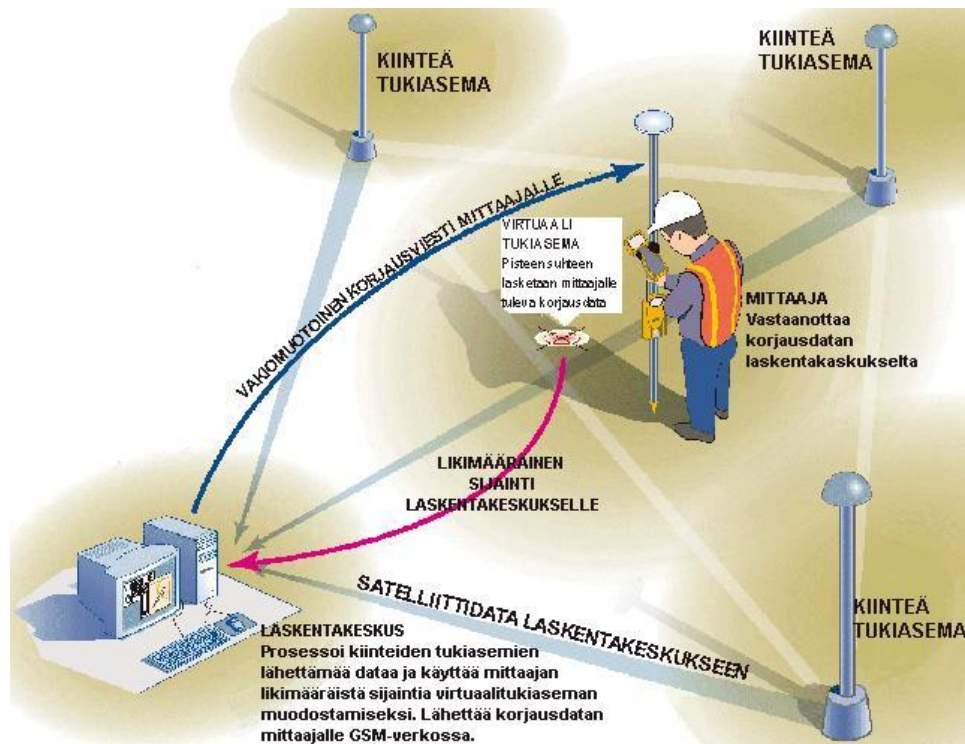
RTK-mittauksen rajallisen toimintasäteen ja kalleuden johdosta maanmittauksessa on siirrytty käyttämään yhä enemmän tukiasemaverkkoja. Tukiasemaverkossa on useita tukiasemia, jotka sijaitsevat tunnetulla pisteellä. Tukiasemaverkkoratkaisu on esitetty kuvassa 5. Tukiasemaverkon avulla voidaan mallintaa ja korjata ilmakehästä eli ionosfääristä ja troposfääristä johtuvia virheitä. Tukiasemaverkosto parantaa mittausten luotettavuutta, nopeuttaa mittaamista ja mahdollistaa mittaamisen kauempana tukiasemista. Verkko-RTK-palveluita tarjoavat kaupalliset yritykset, eli omaa verkkoa ei käyttäjän tarvitse rakentaa. Palveluntarjoajat tarjoavat valmiin verkon lisäksi myös vastaanottimet ja ohjelmiston. (4, s. 323.)



Kuva 5. Verkko-RTK (www.globalcors.com)

2.4.3 VRS ja Smartnet

VRS (Virtual Reference Station) on tukiasemaverkkoratkaisu, jossa järjestelmä laskee virtuaalisen tukiaseman lähelle paikantavaa vastaanotinta. VRS-järjestelmään (kuva 6) kuuluvat kiinteä tukiasemaverkko, laskentakeskus sekä vastaanottimet eli käyttäjät. VRS-järjestelmässä havainnot, laskenta ja tiedonsiirto tapahtuvat samanaikaisesti. VRS-verkossa mitattaessa tukiasemat lähettävät satelliittihavaintodatan laskentakeskukseen. Mittaajan vastaanotin lähettää laskentakeskukselle likimääräisen sijaintinsa käyttäen GSM-verkkoa. Laskentakeskus vastaanottaa ja käsittelee tukiasemien ja vastaanottimien lähettämän datan ja muodostaa laskemalla virtuaalitukiaseman vastaanottimen lähelle. Samalla laskentakeskus lähettää korjausdataa vastaanottimelle GSM-verkossa. Virtuaalitukiasema on siis kuvitteellinen vastaanottimen vieressä sijaitseva piste. Näin saadaan vastaanottimen etäisyydestä tukiasemaan johtuvat virheet minimoitua sekä mittaustapahtumaa nopeutettua. Suomessa ainoa tällä hetkellä käytössä oleva VRS-verkko on Geotrim Oy:n ylläpitämä Trimblen VRS-verkko. Sillä on likimain sata tukiasemaa ympäri Suomea, ja se toimii koko Suomessa, ainoastaan joillain alueilla Pohjois-Suomessa voi verkon toiminnassa olla häiriöitä. Tällä hetkellä käyttöön on tulossa Leican tarjoama Smartnet-verkko, jossa tulee olemaan yli sata tukiasemaa Suomessa. Smartnet-verkko on samankaltainen kuin kilpailijansa. (4, s. 323–325.)



Kuva 6. VRS-verkko (www.tampere.fi)

2.4.4 Staattinen mittaus

Satelliittimittauksilla voidaan mittauksen ja kartoituksen lisäksi määrittää myös tasorunkopisteitä. Kun runkoverkkoa mitataan satelliittimittauksilla vuoden 2003 kaavoitusmittausohjeiden mukaan, tulee käyttää staattista suhteellista mittausta. Myös staattisessa mittauksessa hyödynnetään satelliittisignaalin kantoaallon vaiheita. Staattisessa mittauksessa vastaanottimien ja havaintojen käsittelyohjelmien tulee olla geodeettisiin mittauksiin sopivia. Staattisella mittauksella ei määritetä yksittäisiä pisteitä, vaan vastaanottimien välisiä kolmiulotteisia koordinaattieroja eli avaruusvektoreita. Staattinen mittaus tapahtuu mittausjaksoittain, yhdessä mittausjaksossa on kaksi tai useampia samanaikaisesti havainnoivaa laitetta. Mittausjakson pituus riippuu määritettävien pisteiden luokituksesta, kaavoitusmittausohjeiden mukaan perusrunkopisteissä mittausjakson pituus on 45–90 minuuttia. Mittausjaksojen jälkeen suoritetaan jälkilaskenta, jonka tuloksena saadaan vastaanottimien antennien väliset koordinaattierot eli pisteiden väliset vektorit. Kun jälkilaskenta on suoritettu, lasketaan vapaan verkon tasoitus. Vapaan verkon tasoituksessa käytetään ainoastaan havaintoja. Vapaan verkon tasoituksessa löydetään mahdolliset karkeat virheet sekä arvioidaan satunnaisten virheiden suuruutta. Vapaan verkon tasoituksen jälkeen suoritetaan pakotettu verkkotasointus.

Pakotetussa tasoituksessa kiinnitetään lähtöpisteiksi riittävä määrä tunnettuja pisteitä. Lähtöpisteiden avulla päästään haluttuun koordinaatti- ja korkeusjärjestelmään. (4, s. 325–326.)

2.5 Virhelähteet satelliittimittauksissa

Satelliittimittausten tarkkuuteen vaikuttaa useita virhelähteitä. Nämä voivat olla satelliitista tai vastaanottimesta johtuvia, tai signaalin kulkuun vaikuttavia tekijöitä. Satelliittimittauksen haasteena onkin näiden virhelähteiden mallintaminen ja huomioiminen.

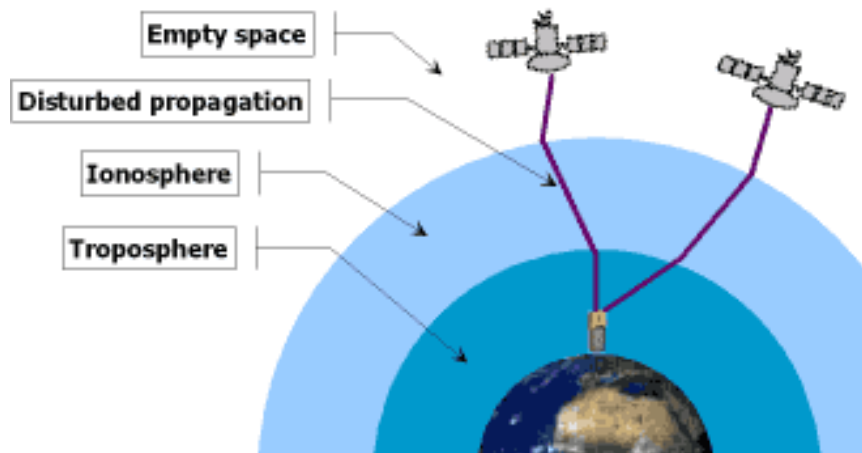
2.5.1 Ilmakehä

Satelliittisignaalit kulkevat satelliitista vastaanottimeen valon nopeudella. Ilmakehän eri kerrokset vaikuttavat signaalin kulkuun, sillä signaalin nopeus on riippuvainen ilmakehän tilasta ja ilmakehä toimii signaalin etenemisen väliaineena. Satelliittisignaalin kulkuun vaikuttaa kaksi eri kerrosta: ionosfääri, joka on 80–400 km:n korkeudella, ja troposfääri, joka on 0–15 km:n korkeudella (kuva 7.) Signaalin eteneminen ionosfäärissä riippuu aallonpituudesta. Jos voidaan käyttää kahta eri aallonpituutta, voidaan näistä muodostaa yhteinen ns. ionosfäärivapaa havaintosuure, joka käytännössä eliminoi ionosfäärin vaikutuksen. Tähän tarvitaan kaksitaajuusvastaanotinta. (1, s. 56–57; 4.)

Ionosfääri sisältää useita kerroksia, jotka heijastavat ja taivuttavat signaaleja. Tämä vaikutus on suurin silloin kun satelliitti sijaitsee lähellä horisonttia, jolloin signaali kulkee pitkän matkaa ionosfäärissä. Auringon röntgen- ja ultraviolettisäteilyn aktiivisuus vaikuttaa ionosfääriin, sillä se ionisoi atomeja ja molekyylejä. Myös auringonpurkausten mukana ionosfääriin tulee varattuja hiukkasia. Ionisoituneet hiukkaset hidastavat signaalin kulkua ja vääristävät laskettua satelliitin ja vastaanottimen välistä etäisyyttä. Kun ionosfääri on aktiivisimmillaan, signaalin kulkumatka saattaa muuttua niin nopeasti, että satelliittimittaus voi olla jopa mahdotonta.

Troposfääri on ilmakehän alin kerros. Satelliittisignaalin kulkuun vaikuttavat säätömiöt tapahtuvat juuri troposfäärissä. Troposfäärissä oleva vesihöyry aiheuttaa viivettä signaalin kulkuun. Troposfäärin aiheuttamaa virhettä ei voida poistaa kaksitaajuushavainnoillakaan, sillä signaalin kulku troposfäärissä ei riipu taajuudesta. Troposfäärin aiheut-

tama virhe voidaan suurimmaksi osaksi poistaa virhemallinnuksella, mutta troposfäärin olosuhteita erityisesti vesihöyryn määrää ei tunneta tarkasti. Toisaalta troposfääristä johtuva virhe satelliittipaikannuksessa on suhteellisen vähäinen. (1, s. 57.)



Kuva 7. Ilmakehän vaikutus (www.precisiontracking.com.au)

2.5.2 Kello- ja ratavirheet

Maapallo ja sen mukana havaitsija on jatkuvassa pyörimisliikkeessä. Myös paikannussatelliitit liikkuvat noin 4 km/s. Tästä syystä pienikin kellovirhe satelliitissa tai vastaanottimessa aiheuttaa karkeaa virhettä. Kellovirhe näkyy suoraan signaalin kulkuajassa. Suhteellisessa mittauksessa kellovirheet voidaan suurelta osin kumota kaksoiserotushavainnoilla. Virhe satelliitin sijaintitiedossa vaikuttaa tarkkuuteen. Sijaintitiedon virhe vaikuttaa suhteellisessa mittauksessa vähemmän kuin yhden vastaanottimen paikannuksessa. GPS-satelliittien lähettämät ratatiedot antavat satelliitin paikan noin metrin tarkkuudella, IGS:n tarkat radat muutaman senttimetrin tarkkuudella.

2.5.3 Vastaanottimen virheet

Vastaanottimen antennin sähköinen keskipiste, eli vaihekeskipiste, on eri asia kuin antennin fyysinen keskipiste. Laskenta suoritetaan vaihekeskipisteestä, kun taas antennin paikka mitataan fyysiseen merkkiin kiintopisteeseen nähden. Tämän vuoksi antennin vaihekeskipisteen ja fyysisen keskipisteen ero tulee tuntea. Mitä tarkemmin ero tunnetaan, sitä pienempi on antennista johtuva virhe. Vaihekeskipisteen sijainti riippuu antennin rakenteesta sekä signaalin tulosuunnasta, taajuudesta ja intensiteetistä. Tästä johtuen myös satelliittigeometria sekä vastaanottimen ympäristö vaikuttavat vaihekes-

kipisteen sijaintiin. Tämän vuoksi antennin vaihekeskipisteen aiheuttama virhe on vaikea mallintaa.

Toinen mahdollinen vastaanottimen virhelähde on ohjelmiston viallinen toimivuus. Myös inhimillinen virhe voi aiheuttaa virhettä satelliittimittauksessa. Tämän vuoksi pitäisi laitteiden käyttäjillä olla asianmukainen koulutus. (2, s. 168–169.)

2.5.4 Satelliittigeometria

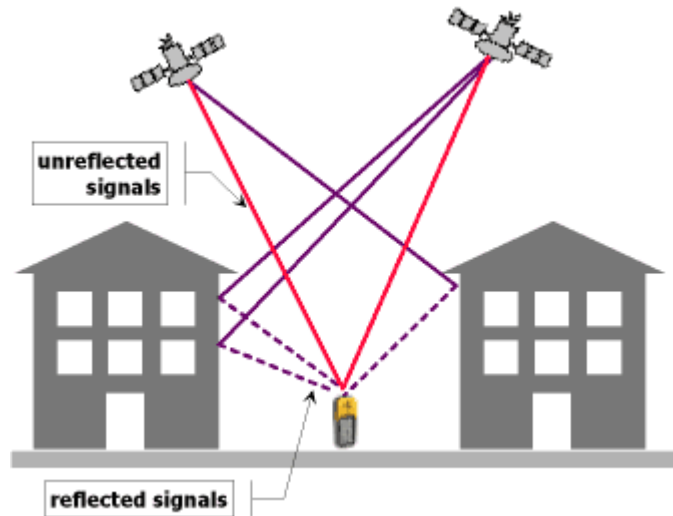
Satelliittigeometria tarkoittaa satelliittien lukumäärää ja asemaa havaitsijaan nähden. Nykyään kun sekä GPS ja GLONASS ovat toiminnassa, on satelliitteja taivaalla yleensä riittävästi. Satelliittipaikannussignaali ei kuitenkaan etene esteiden lävitse kuten matalampitaajuinen radiosignaali. Tämän vuoksi voi metsässä tai kaupunkialueella mittaaminen olla hankalaa ja joskus mahdotonta. Satelliittigeometria on hyvä silloin, kun satelliitit ovat vähintään 10° – 15° horisontin yläpuolella eivätkä pienessä ryhmässä. Paras geometria on silloin kun satelliitit ovat tasaisesti eri puolille jakautuneina.

Satelliittigeometrian vaikutus mittaustarkkuuteen esitetään DOP-lukuina (Dilution of Precision). Näillä luvuilla ilmaistaan tarkkuuden heikentymistä. DOP-lukuja on neljä. HDOP (Horizontal Dilution of Precision) ilmaisee tasotarkkuuden epävarmuutta, VDOP (Vertical Dilution of Precision) ilmaisee korkeustarkkuuden epävarmuutta ja PDOP (Position Dilution of Precision) ilmaisee yhdistettyä taso- ja korkeustarkkuuden epävarmuutta. Lisäksi GDOP (Geometric Dilution of Precision) ilmaisee satelliittigeometriasta johtuvaa tarkkuuden heikentymistä. Mitä pienempi DOP-luku on, sitä parempi on mittausgeometria. Mittausgeometria on hyvä, jos DOP-luku on alle viisi, ja huono, jos se on yli kymmenen. (4, s. 313–314.)

2.5.5 Monitieheijastukset

Jotta satelliittipaikannus olisi tarkkaa, täytyy satelliittisignaalin tulla vastaanottimeen suoraan satelliitista. Vastaanottimen ympäristössä olevat asiat ja esineet voivat kuitenkin heijastaa satelliitista tullutta signaalia vastaanottimeen. Näitä heijastuksia kutsutaan monitieheijastuksiksi. Pahimpia heijastuksia aiheuttavia asioita ovat vesi, autot ja rakennukset. Monitieheijastukset voivat aiheuttaa karkeita mittausvirheitä. Nykyaikaisissa

vastaanottimissa on monitieheijastuksien vaikutusta pyritty ehkäisemään antennitekniikalla sekä signaalinkäsittelytekniikalla. (4, s. 313.)



Kuva 8. Monitieheijastukset (www.kowoma.de)

2.6 Kaksoiserotusmenetelmä

Suhteellisessa mittauksessa vastaanottimien ja satelliittien kellovirheet voidaan poistaa käyttämällä kaksoiserotusmenetelmää (Double Difference.) Kun vastaanottimet havaitsevat samanaikaisesti ja signaalin taajuus on sama, saadaan erotushavainnot, joiden avulla kellovirheet sekä troposfäärin ja ionosfäärin vaikutus voidaan suurelta osin poistaa (kuva 9.) Havaintoyhtälöä yhdestä satelliitista kahteen vastaanottimeen voidaan kuvata seuraavilla kaavoilla, joissa A ja B ovat vastaanottimia, 1 ja 2 ovat satelliitteja, ϕ on kantoaallon osavaihe, N on vastaanottimen ja satelliitin välillä olevien kokonaisten aallonpituuksien määrä, λ on aallonpituus, $c\delta t$ on vastaanottimen ja satelliitin kellovirheiden summa, Δ^{ion} on ionosfäärirefraktio ja Δ^{trop} on troposfäärirefraktio. Vastaanottimen A ja satelliitin 1 välinen pseudoetäisyys L_A^1 voidaan kirjoittaa muodossa

$$L_A^1 = (\phi_A^1 + N_A^1)\lambda + c\delta t_A + \Delta_A^{\text{ion}} + \Delta_A^{\text{trop}} + \dots$$

Etäisyyttä L sanotaan pseudoetäisyydeksi sen vuoksi että todellisen etäisyyden $(\phi_A^1 + N_A^1)\lambda$ lisäksi siihen vaikuttavat sekä kellovirheet, signaalin kulku väliaineessa että monet muut seikat. Kaksoiserotushavainnon avulla näistä ei-toivotuista suureista pyritään pääsemään eroon tai ainakin pienentämään niiden vaikutusta. Kun kirjoitetaan vastaanottimista A ja B satelliittiin 1 laskettujen pseudoetäisyyksien erotus, saadaan yksinkertainen erotushavainto (single difference):

$$L_{AB}^1 = (\varphi_{AB}^1 + N_{AB}^1)\lambda + c\delta t_{AB} + \Delta_{AB}^{ion} + \Delta_{AB}^{trop} + \dots$$

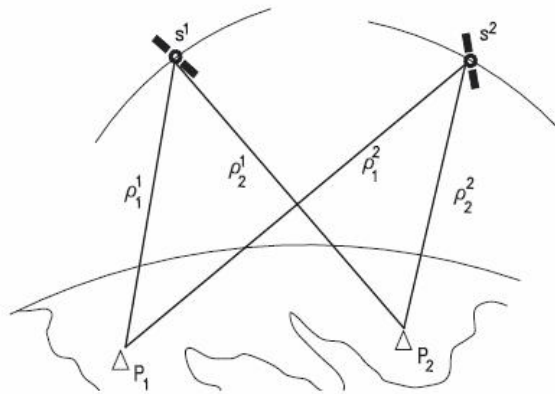
Vastaavasti muodostetaan erotushavainto satelliittiin 2:

$$L_{AB}^2 = (\varphi_{AB}^2 + N_{AB}^2)\lambda + c\delta t_{AB} + \Delta_{AB}^{ion} + \Delta_{AB}^{trop} + \dots$$

Näiden kahden yhtälön erotuksesta saadaan kaksoiserotushavainto, jota voidaan kuva-
ta seuraavalla kaavalla:

$$L_{AB}^{12} = L_{AB}^2 - L_{AB}^1 = (\varphi_{AB}^2 - \varphi_{AB}^1 + N_{AB}^2 - N_{AB}^1)\lambda + \delta\Delta_{AB}^{ion} + \delta\Delta_{AB}^{trop} + \dots$$

Kellovirheen vaikutus on kadonnut, samoin ionosfäärin ja troposfäärin vaikutus on vain niiden erotusten suuruinen, ei enää absoluuttinen määrä kuten alkuperäisessä havainnossa.



Kuva 9. Kaksoiserotushavainnot (3, s. 17)

2.7 PPP – Precision Point Positioning

Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi PPP-menetelmän tausta ja teoria.

2.7.1 PPP-menetelmän taustaa

Näihin päiviin saakka on ainoa tarkka satelliittimittausmenetelmä ollut suhteellinen mit-
taus. Sen rinnalle on kuitenkin viime aikoina tullut uusi menetelmä, Precise Point Posi-
tioning eli yhden vastaanottimen tarkka paikannus. Yhden vastaanottimen tarkkaa pai-
kannusta on teorioitu jo satelliittipaikannuksen alkuajoista lähtien. Kuitenkin vasta
1990-luvulla julkaistiin ensimmäiset jälkilaskennalla lasketut mittaustulokset yhden vas-

taanottimen senttimetriluokan paikannuksesta. IGS:n (International GNSS Service) laskemat tarkat rata-, kello- ja muut korjaustiedot ovat edellytys PPP:n käytölle.

2.7.2 PPP-menetelmän teoria

Toisin kuin suhteellisessa mittauksessa, PPP-menetelmässä ei käytetä lainkaan vertailuvastaanottimia, eli käyttäjä tarvitsee vain yhden vastaanottimen. Suhteelliseen mittaukseen verrattuna suurin ero PPP-menetelmässä on kellovirheiden ratkaisu. PPP-menetelmässä vastaanottimen kellovirheet ratkaistaan pienimmän neliösumman periaatteella kun taas suhteellisessa mittauksessa käytetään kaksoiserotusmenetelmää. Näin PPP-menetelmää käyttämällä saadaan tarkat absoluuttiset koordinaatit ilman tukiasemaa. (5)

PPP-menetelmä poikkeaa myös selkeästi perinteisestä absoluuttisesta paikannuksesta. Vaikka molemmissa menetelmissä käytetään vain yhtä vastaanotinta, PPP-menetelmässä käytetään tarkkoja rata- ja kellotietoja toisin kuin absoluuttisessa paikannuksessa. Absoluuttisessa paikannuksessa käytetään pelkkää satelliittisignaalin koodia, kun taas PPP-menetelmässä käytetään sekä koodia että kantoaallon vaihehavaintoja. Absoluuttisella paikannuksella päästään 1–10 metrin tarkkuuteen, mutta PPP-menetelmässä voidaan saavuttaa senttimetriluokan tarkkuus. Perinteisen absoluuttisen paikannuksen epätarkkuus johtuu paitsi koodin paljon pitemmästä aallonpituudesta myös osittain monista virhelähteistä, joita ei ole mallinnettu. (5)

PPP-menetelmän toimivuuden ja tarkkuuden kannalta ehdottoman tärkeitä ovat IGS:n tuottamat tarkat satelliittien rata- ja kellotiedot sekä maapallon orientaatio. Menetelmän tarkkuutta parantaa myös mahdollisimman monen eri virhelähteen mallintaminen ja korjaaminen. (6)

Koska IGS:n laskemat satelliittien tarkat radat ovat globaalissa ITRF-koordinaatistossa (International Terrestrial Reference Frame), myös PPP-menetelmää käyttävä paikannus tapahtuu samassa koordinaatistossa. ITRF on realisaatio ITRS:sta (International Terrestrial Reference System.) Tämän vuoksi PPP-menetelmää käytettäessä joudutaan käyttämään koordinaattimuunnoksia, jotta mittaustulokset saadaan paikalliseen koordinaatistoon. Koordinaattimuunnospalveluja tarjoavat useat eri tahot.

2.8 Virhelähteet PPP-menetelmässä

Suhteellisessa mittauksessa kahta vastaanotinta käyttämällä voidaan kumota suurin osa virhelähteistä. PPP-menetelmässä yhtä vastaanotinta käytettäessä ei tätä mahdollisuutta ole, joten menetelmää käytettäessä tulee monet virhelähteet ottaa huomioon. Yleiset virhelähteet satelliittimittauksissa on kerrottu luvussa 1.6, tässä luvussa käydään lisäksi läpi joitakin erityisesti PPP-paikannukseen vaikuttavia virhelähteitä.

2.8.1 Vaiheaallon kiertyminen (phase wind-up)

Kantoaallon kulku satelliitista vastaanottimeen riippuu satelliitin ja vastaanottimen antennien orientaation keskinäisestä suhteesta. Kun satelliitin tai vastaanottimen antennia kiertää akselinsa ympäri yhden täyden kierroksen, muuttuu kantaalto yhden aallonpituuden verran. Tätä ilmiötä voidaan kutsua vaiheaallon kiertymiseksi (phase wind-up.) Staattisessa mittauksessa vastaanottimen antenni on yleensä orientoitu pohjoiseen, mutta satelliitin antenni kiertyy hitaasti kun sen aurinkopaneelit kääntyvät aurinkoa kohti. Tämä ilmiö suhteellisessa mittauksessa on mitätön, mutta PPP-mittauksessa sen vaikutus on suurempi. Rata- ja kellopalveluissa tämä ilmiö on nykyisin yleensä otettu huomioon. (8)

2.8.2 Satelliitin antennin vaihekeskipiste ja satelliitin orientaatio

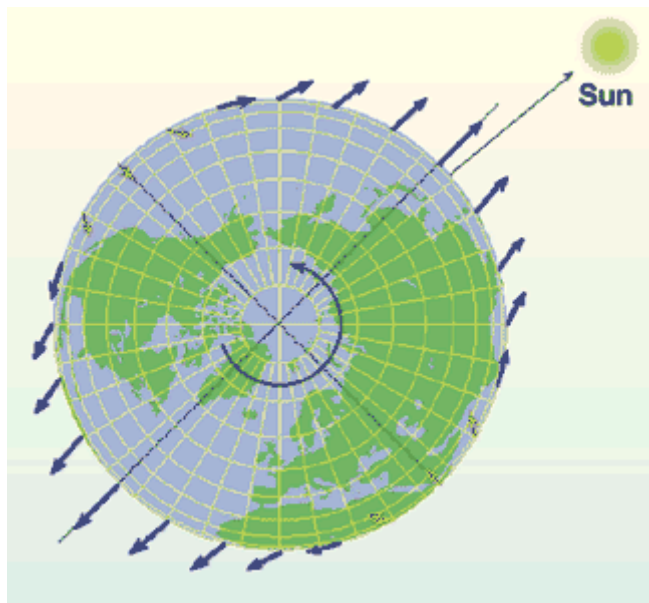
Satelliitin rata- eli sijaintitiedot viittaavat satelliitin massakeskipisteeseen antennin vaihekeskipisteen sijasta. Tämän vuoksi PPP-mittauksissa tulee ottaa huomioon satelliitin massakeskipisteen ja vaihekeskipisteen välinen poikkeama ja poikkeamavektorin liike satelliitin liikkeessa radalla. Useimmissa satelliiteissa tämä poikkeama on sekä maan että auringon suuntaan. Ongelmana on kuitenkin se, että satelliitit ovat kalibroimattomia, eli tarkkaa poikkeaman arvoa ei tiedetä. Tämän vuoksi satelliitin vaihekeskipiste ja orientaatio ovat merkittäviä virhelähteitä PPP-mittauksissa. (7)

2.8.3 Satelliitin kello

Valo kulkee tyhjiössä noin 300 000 kilometriä sekunnissa. Jos satelliitin kellossa on yhden mikrosekunnin ($0,000001$ s) virhe, on signaali siinä ajassa edennyt 300 metriä. PPP-mittaamisen ehdoton edellytys onkin tarkkojen rata- ja kellotietojen käyttäminen. Esimerkiksi IGS:n tarjoamissa palveluissa kellotarkkuus on reaaliaikaisessa palvelussa noin 3 nanosekuntia (3×10^{-9} s) ja jälkikäsitellyllä parhaimmillaan noin 75 pikosekuntia (75×10^{-12} s). (7)

2.8.4 Maan vuoksi

Kuu ja aurinko aiheuttavat vuoksivoimien vaikutuksesta maan deformatumista (kuva 10.) Tämä vaikutus on suurimmillaan päiväntasaajalla, jossa se voi olla jopa 55 cm. Tarkoissa mittauksissa tämä vaikutus tulee ottaa huomioon. Maan muodon muutos vaikuttaa myös painovoimakenttään ja sitä kautta satelliittien rataan. (8)



Kuva 10. Maan vuoksi (ilrs.gsfc.nasa.gov)

2.8.5 Vuoroveden vaikutus

Vuorovesi vaikuttaa maanpinnan korkeuteen rannikkoalueilla painamalla maata alas päin kun vuorovesi on korkealla. Vuoroveden vaikutus maanpinnan korkeuteen on huomattavasti pienempi kuin maan vuoksi. Tämä vaikutus voidaan unohtaa, kun kine-

maattisen mittauksen mittaustarkkuus on 5 cm tai huonompi, staattinen mittausjakso on yli 24 h tai jos mitattava kohde on kaukana merialueilta. Muussa tapauksessa se tulee tarkoissa mittauksissa ottaa huomioon. (8)

2.8.6 Ilmakehän vaikutus

Kuten vettä ja maata, taivaankappaleet vetävät myös ilmakehää puoleensa. Ilmamas-
sat vaikuttavat sekä meriveden että maanpinnan korkeuteen. Ilmiön vaikutus on kui-
tenkin pieni, joidenkin tutkimusten mukaan vaikutus maanpinnalla on enimmillään 25
millimetriä. Myös ilmanpaineen muutokset vaikuttavat maanpinnan korkeuteen. Ilman-
paineen muutosten vaikutus on myös hyvin pieni, noin 2–3 cm. Ilmanpaineen muutos-
ten vaikutusta ei voida huomioida, sillä muutoksia ei voida ennustaa. (7)

2.9 PPP-menetelmä suhteelliseen mittaukseen verrattuna

2.9.1 PPP-menetelmän tarkkuus

Jotta PPP-paikannus olisi mahdollisimman tarkkaa, täytyy kaikki suurimmat virhelähteet
mallintaa ja ottaa huomioon. PPP-menetelmän edellytys on tarkkojen rata- ja kellotie-
tojen sekä maapallon orientaatioparametrien käyttäminen, jotka saadaan IGS:n glo-
baalista havaintoverkosta. Jälkilaskennassa tai mittauksen yhteydessä tulisi korjata
lopun virheet, kuten kohdassa 1.9 mainitut. PPP-palvelujen tuottajilla on joko paikalli-
nen tai maailmanlaajuinen havaintoasemaverkko joiden havaintojen perusteella lasken-
takeskus laskee muut korjaustiedot. Tutkimusten mukaan paikallista verkkoa käyttä-
mällä päästään suurempaan tarkkuuteen, sillä paikallisen verkon avulla voidaan mallin-
taa paikalliset sääolosuhteet paremmin kuin maailmanlaajuisen verkon avulla. (9)

Jotta PPP-menetelmällä päästään vastaanottimen käynnistyksestä haluttuun tarkkuu-
teen, joudutaan odottamaan tietty aika. Tätä odotusaikaa kutsutaan konvergenssi-
periodiksi. Kun käytetään pelkkiä GPS-signaaleja, desimetriluokan tarkkuuteen pääsemi-
seksi on konvergenssi-
periodi tyypillisesti noin 30 minuuttia. Parempaan tarkkuuteen
pääseminen vaatii huomattavasti pidempää odotusaikaa. Jos yhteys riittävään määrään
satelliitteja katkeaa, on odotettava uudestaan, jotta päästään takaisin haluttuun tark-
kuuteen. Tämä heikentää PPP-menetelmän käytettävyyttä peitteisillä alueilla. Konver-

genssiperiodi on huomattavasti lyhyempi, jos käytössä on sekä GPS- että GLONASS-signaalit. GPS- ja GLONASS-signaalien yhteiskäyttö myös parantaa mittausten tarkkuutta. (10)

Staattisessa moodissa PPP-menetelmällä voidaan päästä senttimetriluokan tarkkuuteen. Etelä-Englannissa 60 havaintoasemalta kerättyjen havaintojen mukaan kolmen tunnin havainnoilla tarkkuus oli noin 3 senttimetriä. 12 tunnin jälkeen tarkkuus oli noin 0,5–1,5 senttimetriä. 24 tunnin jälkeen tarkkuus oli alle 1 cm horisontaalisesti ja alle 2 cm pystysuunnassa. Tutkimuksessa käytettiin GPS-signaaleja. (6)

PPP-menetelmällä päästään siis liikkuvassakin moodissa alle 10 senttimetrin tarkkuuteen ja staattisessa moodissa alle senttimetrin tarkkuuteen.

2.9.2 PPP-menetelmän edut ja haitat verrattuna perinteiseen tarkkaan mittaukseen

PPP-menetelmän suurin etu perinteisiin tarkkoihin mittauksiin verrattuna on se, että siinä ei tukiasemaa tai tukiasemaverkkoa tarvita. Käyttäjän ei tarvitse investoida omaan tukiasemaan eikä maksaa VRS-verkon käytöstä. PPP-menetelmän käyttöön tarvitaan vain kaksitaajuusvastaanotin sekä rata-, kello- ja korjauspalvelut esimerkiksi IGS:ltä.

PPP-menetelmää käytettäessä tarkkuus pysyy samana sijainnista riippumatta, kun RTK-mittauksissa tarkkuus heikkenee, kun etäisyys tukiasemaan kasvaa. PPP-mittaaminen ei ole sidottu tukiasemaan tai tukiasemaverkkoon, vaan se toimii missä tahansa. Myös tarvittavan laskennan määrä on pienempi kuin suhteellisessa mittauksessa.

PPP-menetelmän hyöty laskennan määrän suhteen tulee esille suurissa verkoissa. Kun suhteellisessa mittauksessa vektorilaskennassa laskennan määrä kasvaa verrannollisena havaintoasemien lukumäärän neliöön, PPP-mittauksessa se kasvaa vain suoraan verrattuna asemien lukumäärään.

PPP-menetelmä ei vielä tällä hetkellä kuitenkaan korvaa suhteellista mittausta. Pitkät konvergenssiperiodit ja huono toimivuus peitteisillä alueilla tekevät menetelmästä epäkäytännöllisen muilla kuin aukeilla alueilla. Siksi se ei sovellu esimerkiksi kartoitukseen. Toinen haitta menetelmän käytössä on huonompi tarkkuus ja virhekontrollin puuttumi-

nen verrattuna suhteelliseen mittaukseen. Tämän vuoksi tarkimmissa mittauksissa joudutaan käyttämään edelleen suhteellista mittausta. PPP-menetelmää ei voida myöskään käyttää kiintopistemittauksissa, sillä menetelmässä joudutaan käyttämään koordinaattimuunnoksia eikä muunnoksilla saatuja pisteitä hyväksytä kiintopistemittauksissa.

PPP-menetelmää kehitetään edelleen. Paremmilla virhemallinnuksilla voidaan lyhentää konvergenssiaikoja sekä parantaa tarkkuutta. Myös yhdistämällä RTK-mittaus PPP-mittaukseen voidaan suorituskykyä parantaa. PPP-menetelmä voidaan myös yhdistää inertianavigaatiojärjestelmään. Inertianavigaatio parantaa toimivuutta peitteisillä alueilla, sillä se lyhentää konvergenssiaikoja jos yhteys satelliitteihin katkeaa. Tämä avaa mahdollisuuden käyttää menetelmää esimerkiksi moniin käytännön kartoitussovelluksiin, joissa liikutaan usein metsäisessä tai urbaanissa ympäristössä. (10)

PPP-menetelmälle on jo lukuisia käyttökohteita, ja se on joissakin tapauksissa vaihtoehto perinteiselle suhteelliselle mittaukselle. Menetelmä sopii esimerkiksi havaintoaseman liikkeen seurantaan. Menetelmää käytetään esimerkiksi Japanin 1 500 asemaa käsittävän deformaatioverkon mittauksissa, jossa perinteistä kaksoiserotushavaintoa käytettäessä laskentamäärä kasvaisi valtavaksi PPP-menetelmään verrattuna.

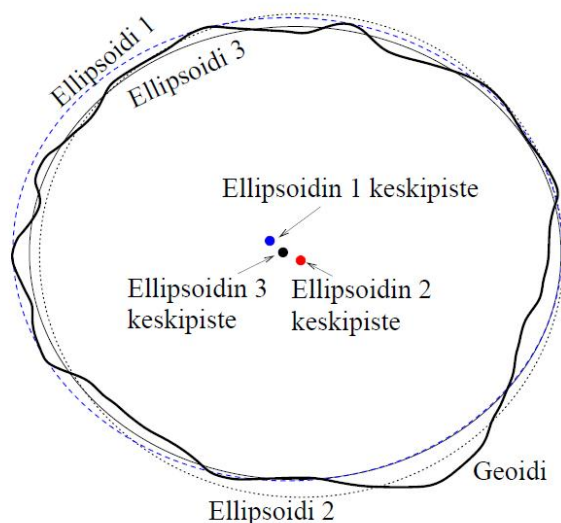
3 Koordinaattijärjestelmät ja muunnokset

3.1 Yleistä koordinaattijärjestelmistä

Koordinaattijärjestelmä esittää sijainnin lukuarvomuodossa. Koordinaattijärjestelmää tarvitaan paikantamiseen ja mittaamiseen maapallolla. Koordinaattijärjestelmä voi olla joko maantieteellinen, kolmiulotteinen suorakulmainen tai kartan suorakulmainen koordinaattijärjestelmä. Jotta koordinaattijärjestelmää voidaan käyttää, se pitää kiinnittää maahan eli realisoida. Realisointi voidaan suorittaa geodeettisten, tähtitieteellisten tai runkomittausten avulla. Koordinaattijärjestelmän realisaatiota kutsutaan koordinaatistoksi. Koska koordinaatistoja on laaja kirjo, joudutaan usein käyttämään koordinaattimuunnoksia, jotta saadaan mittaustulos haluttuun koordinaatistoon.

3.1.1 Geoidi

Maan todellisen muodon mallintaminen perustuu Maan painovoimakenttään. Tämän mallintamisen tuotteena on geoidi (kuva 11), joka on maan painovoimakentän samanarvopinta joka yhtyy valtamerien keskivedenpintaan. Geoidin muodon määräävät maan sisäiset massajakautumat. Painovoiman vaikutussuunta on aina kohtisuoraan geoidia nähden. Painovoiman potentiaali on aina vakio missä tahansa geoidin kuvitteellisen pinnan kohdassa, joten vesi asettuu geoidipinnan mukaisesti. Geoidin muoto voi poiketa pyörähdysellipsoidista ± 100 metriä. Geoidipinta voidaan periaatteessa valita mielivaltaisesti, joten niitä voi olla äärettömän monta. Suomessa käytettävät FIN2000- ja FIN2005N00-geoidimallit on sovitettu kansallisiin korkeusjärjestelmiimme niin, että niiden avulla päästään GNSS-mittauksissa suoraan N60- ja N2000-järjestelmien mukaisiin korkeuksiin. (4, s. 124.)



Kuva 11. Geoidi ja ellipsoidi (2, s. 67)

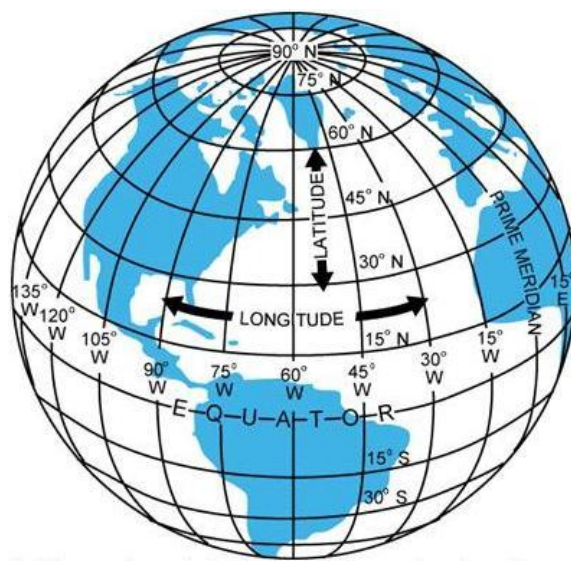
3.1.2 Pyörähdysellipsoidi

Koordinaattijärjestelmä määritellään usein suorakulmaisena XYZ-koordinaatistona, jonka origo on Maan massakeskipisteessä. Koordinaattijärjestelmään liitetään yleensä pyörähdysellipsoidi (kuva 11), joka on Maan muotoon sovitettu matemaattinen malli. Pyörähdysellipsoidi muodostuu ellipsin pyörähtäessä symmetria-akselinsa ympäri. Pyörähdysellipsoidi poikkileikattuna on ellipsi. Sen isompi puoliakseli on päiväntasaajan säde

ja pienempi puoliakseli on maan pyörimisakseli. Maantieteelliset koordinaatit (pituus ja leveys) määritellään pyörähdysellipsoidin pinnalla. Maantieteelliset ja suorakulmaiset koordinaatit voidaan yksikäsitteisesti muuntaa toisikseen. (4, s. 125.)

3.1.3 Maantieteellinen koordinaattijärjestelmä

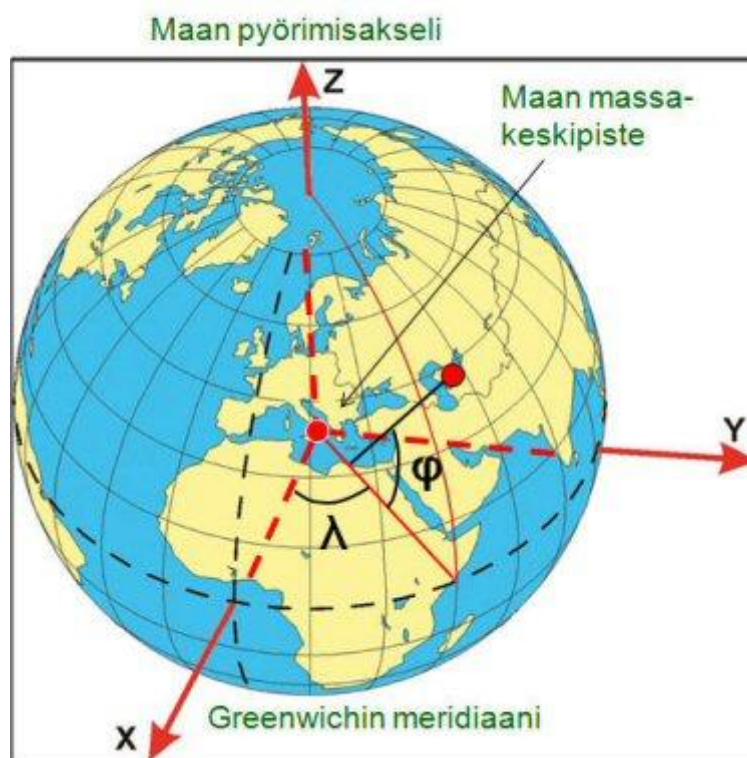
Maantieteellisessä koordinaattijärjestelmässä käytetään kulmamittoja. Maantieteellisen koordinaattijärjestelmän (kuva 12) liitoskohtia ovat navat ja Greenwichin nollameridiaani. Greenwichin meridiaani kulkee Lontoon itäisessä esikaupungissa sijaitsevan tähtitornin kautta. Sijainti maantieteellisessä koordinaattijärjestelmässä ilmoitetaan kulmien eli leveys- ja pituusasteen avulla. Leveysaste tarkoittaa havaintopaikan kautta asetetun ellipsoidin normaalin ja päiväntasaajan välistä kulmaa. Pituusaste tarkoittaa Greenwichin meridiaanitason ja havaintopaikan meridiaanitason välistä kulmaa. Sijainti ilmoitetaan pohjoisena tai eteläisenä leveytenä sekä itäisenä tai läntisenä pituutena. Kulman arvo voidaan ilmoittaa kolmella eri tavalla: asteina, minuutteina ja sekunteina tai asteina ja minuutteina tai desimaaliasteina. Maantieteellisen koordinaattijärjestelmän voi esittää asteverkolla, jonka muodostavat tasaisin astevälein sijaitsevat pituus- ja leveyspiirit. Kartan teon ja etäisyyden määrittämisen kannalta maantieteellinen koordinaattijärjestelmä on hankala, sillä kohteiden välinen etäisyys ei ole suoraan verrannollinen niiden leveys- ja pituuskulmaeroihin. Etäisyydet ilmoitetaan usein pitkin ellipsoidia laskettuina. Kahden pisteen välisen lyhimmän etäisyyden ja havaintosuuntien välisten kulmien laskeminen ellipsoidin pinnalla on matemaattisesti vaikeaa. (4, s. 128–130.)



Kuva 12. Maantieteellinen koordinaattijärjestelmä (www.yousaytoo.com)

3.1.4 Suorakulmainen koordinaattijärjestelmä

Suorakulmaisen koordinaattijärjestelmän (kuva 13) origo on Maan massakeskipisteessä. Siinä X- ja Y-akseli ovat päiväntasaajan tasossa ja kohtisuorat toisiinsa nähden. X-akseli kasvaa Greenwichin meridiaanin suuntaan ja Y-akseli itään päin. Z-akseli yhtyy maapallon pyörimisakseliin ja kasvaa pohjoisnavan suuntaan. Suorakulmainen koordinaattijärjestelmä on kartan teon kannalta hankala, sillä sen koordinaattitasot eivät yleensä yhdy maanpinnan pysty- tai vaakatasoihin. Laskut ovat kuitenkin suorakulmaisen koordinaatistossa yksinkertaisia, esimerkiksi kahden pisteen välinen etäisyys saadaan suoraan Pythagoraan lauseesta. (4, s. 130–131.)

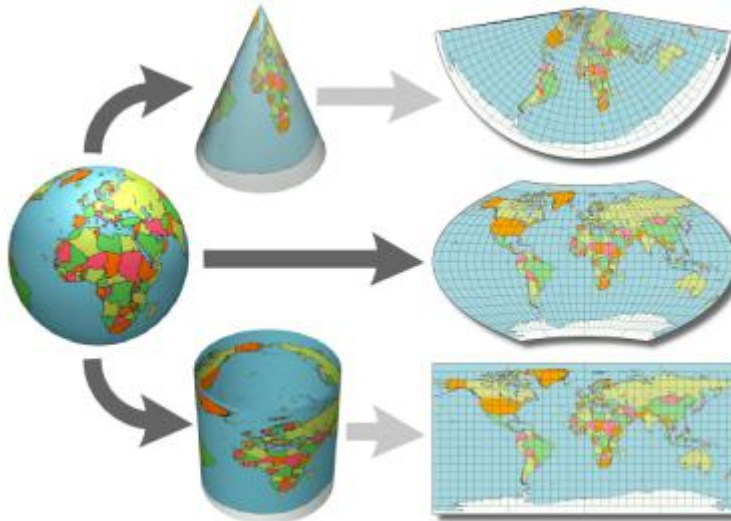


Kuva 13. Suorakulmainen koordinaattijärjestelmä (www.maanmittauslaitos.fi)

3.1.5 Karttaprojektiot

Kartan tuottamisessa maantieteellisten tai ellipsoidikeskisten koordinaatistojen käyttäminen suoraan ei onnistu, koska nämä ovat kolmiulotteisia koordinaatistoja. Suorakulmaiseen tasokoordinaatistoon pääsemiseen tarvitaan karttaprojektiota (kuva 14.) Projektio tarkoittaa kolmiulotteisen kappaleen pinnan tai pinnan osan projisoimista sellaiselle pinnalle, joka voidaan levittää tasoksi. Karttaprojektiot voidaan jakaa taso-, kartio- tai lieriöprojektiioihin tai puhtaasti matemaattisiin projektiioihin, joita on hankala ha-

vainnollistaa. Tasoprojektiossa kappaleen pinta projisoidaan suoraan tasolle. Kartioprojektioissa kuva muodostuu kartiopinnalle ja lieriöprojektioissa lieriöpinnalle. Kartio- ja lieriöprojektiot voidaan leikata auki pituussuunnassa ja näin saadaan taso. Projektiot voivat olla joko maapallon pintaa sivuavia tai leikkaavia. Projektiot voivat olla perusasentoisia tai poikittaisasentoisen. Perusasentoisessa projektiossa taso on kohtisuorassa maapallon pyörimisakseliin nähden. Poikittaisasentoisissa taso on puolestaan yhden-suuntainen pyörimisakseliin nähden. (4, s. 131–134.)



Kuva 14. Karttaprojektioita (www.maanmittauslaitos.fi)

3.1.6 Geodeettinen datumi

Koordinaattijärjestelmä kiinnitetään maahan geodeettisella datumilla eli vertausjärjestelmällä. Datumia jaetaan kahteen osaan: horisontaaliseen, joka kiinnittää koordinaatiston, ja vertikaaliseen, joka kiinnittää korkeustason. Geodeettisella datumilla määritetään koordinaatiston lähtöpiste pyörähdyssellipsoidin keskipisteen suhteen. Datumilla määritetään muun muassa pyörähdyssellipsoidin parametrit, lähtöpisteen koordinaatit ja lähtösuunta toiseen pisteeseen, luotiviivan poikkeama lähtöpisteessä sekä lähtöpisteen ellipsoidinen korkeus. Geodeettinen datumi määritetään tapauskohtaisesti sopimalla. Datumia kiinnitetään konkreettisesti maahan kiintopisteverkon avulla, joka määritetään runkomittauksilla datumin lähtöpisteestä alkaen. (4, s. 141–142.)

3.2 Koordinaattijärjestelmiä

3.2.1 ITRS/ITRF

ITRS (International Terrestrial Reference System) on maailmanlaajuinen kolmiulotteinen suorakulmainen koordinaattijärjestelmä. Sitä ylläpitää IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), joka on kansainvälisen geodeettisen assosiaation (IAG, International Association of Geodesy) palvelu. IERS:n tehtävänä on vastata kahdesta koordinaatistosta, ITRF:sta (International Terrestrial Reference Frame) ja tähtitieteellisestä ICRF:sta (International Celestial Reference Frame.) ITRF on ITRS:n realisaatio, jonka pohjana ovat satelliittilaser-, kuulaser-, VLBI-, Doris- sekä GPS- ja GLONASS-havainnot. Doris on ranskalainen Doppler-ilmiöön perustuva paikannusjärjestelmä. ITRF-koordinaatistoa käytetään erityisesti satelliittipaikannuksessa. (11, s. 20.)

ITRF-koordinaatiston ylläpitoon käytetään muun muassa IGS:n (International GNSS Service) maailmanlaajuista GNSS-havaintoasemaverkkoa. Verkkoon kuuluu yli kolmesataa havaintoasemaa eri puolilla maailmaa. Koska mannerlaatat liikkuvat jatkuvasti joi-takin senttimetrejä vuodessa, on ITRS:n realisaatiota aika ajoin uusittava. Tämän vuoksi ITRF-realisaatio on aikaan sidottu. Viimeisin ITRF-realisaatio on ITRF2008. ITRF2008 onkin tarkin CTRS:n (Conventional Terrestrial Reference System, konventio-naalinen maakeskinen järjestelmä) mukainen koordinaattijärjestelmän realisaatio. ITRF-koordinaattien yhteydessä ilmoitetaan myös epookki eli ajankohta. Epookki ilmoi-tetaan vuosilukuna ja desimaalilukuna joka lasketaan jakamalla kyseisen päivän nume-ro (vuodenpäivien järjestysnumero, jokin 365:stä) 365:llä. ITRS:n vertausellipsoidi eli pyörähdysellipsoidi on GRS80. ITRF:n origo on maapallon massakeskipisteessä, johon on otettu huomioon valtameret ja ilmakehä. (11, s. 20–21.)

Paikannussatelliittien tarkat ratatiedot ovat ITRF-koordinaatistossa. Tämän vuoksi tar-koissa satelliittimittauksissa, kuten PPP-mittauksissa, käytetään ITRF-koordinaatistoa. ITRF2008-koordinaateista päästään paikalliseen koordinaatistoon koordinaattimuun-noksilla. (2, s. 72.)

3.2.2 WGS84

WGS84 (World Geodetic System 1984) on vuodesta 1987 asti ollut käytössä GPS:n koordinaattijärjestelmänä. Myös WGS84 on maailmanlaajuinen järjestelmä. WGS84 on Yhdysvaltain puolustusministeriön luoma, ja se ja sen viimeisin realisaatio WGS84(G1150) on määritelty Yhdysvaltain armeijan karttaviraston (NGA, National Geospatial-intelligence Agency) toimesta. Realisaatio WGS84(G1150) on järjestelmän kolmas päivitys. Se laskettiin vuonna 2001 käyttäen 49:ää IGS:n havaintoasemaa, joiden havaintoja kerättiin kahden viikon ajan. (11, s. 19–20.)

Myös WGS84 on CTRS:n mukainen geosentrinen järjestelmä, eli sen origo on maan painopisteessä. WGS84 ja ITRF ovat käytännössä lähes yhtenevät. Niiden vertausellipsoidit eroavat korkeudeltaan alle millimetrin toisistaan. GPS-satelliittien ratatiedot lähetetään WGS84-järjestelmän mukaisina. Tämän vuoksi GPS-laskenta suoritetaan jossain sen kanssa yhteensopivassa järjestelmässä, kuten ITRS-, ETRS- tai EUREF-FIN -koordinaattijärjestelmässä. (2, s. 73–74.)

3.2.3 ETRS-89/ETRF

ITRF-koordinaatit ovat arkikäytössä epäkäytännöllisiä, sillä ne muuttuvat ajan kuluessa maankuoren liikkeen johdosta. Tämän vuoksi on käyttöön otettu paikallisia koordinaattijärjestelmiä, jotka on kiinnitetty mannerlaattojen kiinteisiin eli deformatumattomiin osiin. Euroopassa tällainen järjestelmä on ETRS-89 (European Terrestrial Reference System). Sen realisaatio on ETRF (European Terrestrial Reference Frame). Suomessa on valtakunnallisissa kartastotöissä ja paikkatietopalveluissa siirrytty ETRS-89-järjestelmään; mm. EU:n INSPIRE-direktiivi edellyttää tätä. ETRS-89-järjestelmän suomalaista realisaatiota kutsutaan EUREF-FIN-koordinaatistiksi.

ETRS-89 sai alkunsa vuonna 1990 kun IAG:n (International Association of Geodesy) Euroopan alakomissio EUREF (European Reference Frame) esitti eurooppalaisen Euroopan mannerlaatan deformatumattomaan osaan kiinnitetyn koordinaattijärjestelmän, ETRS-89:n käyttöönottoa. Järjestelmän ensimmäinen realisaatio mitattiin vuonna 1989. Tuolloin pisteverkkoon kuului noin 90 GPS-pistettä ja 12 VLBI-pistettä (Very Long Baseline Interferometry, pitkäkantainterferometria). VLBI-pisteiden koordinaatit pidettiin

verkkotasoituksessa kiinteinä. Koordinaatiston nimeksi tuli EUREF89. EUREF89 on yhtenevä ITRF:n kanssa ajankohtana eli epookkina 1989.0. Järjestelmää on sittemmin laajennettu. Alkuperäiset EUREF89-koordinaatit ovat nyt jo poistuneet käytöstä. Nykyisen eurooppalaisen järjestelmän rungon muodostaa Euroopan pysyvä GNSS-verkko EPN (European Permanent GNSS Network) joka käsittää n. 250 asemaa. EPN on runko, jonka kautta kansalliset realisaatiot on liitetty toisiinsa ja ITRF-verkkoon, ja jonka avulla voidaan monitoroida Euraasian laatan liikkeitä Euroopan alueella. (2, s. 75–76.)

ETRF-realisaatiosta on olemassa useita kansallisia variaatioita. Kansalliset realisaatiot poikkeavat toisistaan joitakin senttimetrejä riippuen satelliittimittauksen ajankohdasta. Erot realisaatioiden välillä ovat niin pienet, että ne eivät useimmissa käyttötarkoituksissa haittaa. (2, s. 76.)

3.2.4 EUREF-FIN

EUREF-FIN on ETRS89-koordinaattijärjestelmän suomalainen realisaatio. Sen rungoksi Geodeettinen laitos ryhtyi vuonna 1993 rakentamaan Suomeen pysyvien GPS-asemien verkkoa (FinnRef). Asemien tarkoitus oli myös olla geodynamiikan tutkimuksen apuna. Tämän vuoksi asemat pyrittiin rakentamaan kalliolle ja mahdollisimman stabiileiksi jotta maankuoren liikkeet pystytään havaitsemaan niin luotettavasti kuin mahdollista. Verkko valmistui vuonna 1996 jolloin se käsitti 12 asemaa. Vuonna 2005 verkkoon lisättiin vielä yksi Ahvenanmaalla sijaitseva asema. Näistä asemista neljä on mukana Euroopan EPN-verkossa. Vuosina 1996–1997 Geodeettinen laitos mittasi 100 pistettä käsittävän verkon, joka koostui vanhoista I-luokan kolmioverkon pisteistä. Nämä yhdessä FinnRef-verkon kanssa määrittävät EUREF-FIN-koordinaatiston. Myöhemmin erityisesti Maanmittauslaitos on mitannut useita tuhansia alemman luokan pisteitä suoraan EUREF-FIN-koordinaatistoon, jolloin esimerkiksi kunnat ja kaupungit voivat liittää omat mittauksensa EUREF-FIN-koordinaatistoon. (11, s. 23.)

EUREF-FIN on määritelty julkisen hallinnon suosituksissa. JHS 153:ssa on määritelty siirtyminen KKJ:sta EUREF-FIN:iin ja sen realisaatio. JHS 154:ssä on määritelty käytettävät karttaprojektiot, tasokoordinaatistot sekä koordinaattimuunnokset KKJ:n ja EUREF-FINin välillä. (2, s. 78.)

JHS 154:ssä suositellaan EUREF-FIN-koordinaatiston kanssa käytettäväksi UTM-projektiota (Universal Transverse Mercator.) UTM-projektio on leikkaava lieriöprojektio joka on oikeakulmainen ja poikittaisasentoinen. UTM-projektiossa karttakoordinaatit ovat suorakulmaiset. Suomalainen UTM-projektio poikkeaa standardista UTM-projektioista kaistanleveyden osalta. Koko Suomi kuvataan kotimaisessa projektiossa yhtenä kaistana. Sen keskimeridiaani on 27°E , sama kuin KKJ-koordinaatiston keskimeridiaani. Suomalaista UTM-projektiota kutsutaan ETRS-TM35FIN-projektioksi, jossa TM on Transverse Mercator ja 35 on projektiokaistan numero.

UTM-projektion lisäksi voidaan paikallisesti käyttää sivuavaa poikittaisasentoista Mercatorin projektiota, Gauss-Krügerin projektiota. Tässä tapauksessa projektiokaistan leveys on yksi aste. Keskimeridiaani määräytyy paikan lähimmän asteluvun mukaan. Gauss-Krügerin projektiioon perustuvaa realisaatiota kutsutaan ETRS-GKx:ksi, jossa x on käytetyn keskimeridiaanin asteluku. (4, s. 149.)

3.2.5 KKJ

KKJ (kartastokoordinaattijärjestelmä) on koordinaatisto, joka on ollut Suomessa käytössä noin 40 vuotta. Tällä hetkellä se on poistumassa käytöstä, kun ollaan siirtymässä EUREF-FIN-koordinaatistoon. Siirtymäprosessi on kuitenkin hidas, ja KKJ on todennäköisesti käytössä vielä pitkään joissain Suomen kunnissa.

Ennen KKJ-koordinaatistoa käytössä oli itsenäisyyden alkua ajoista lähtien Helsingin järjestelmä, jota myös VVJ:ksi (vanha valtion järjestelmä) kutsutaan. Vanha valtion järjestelmä on edelleen käytössä joissain kaupungeissa. Kartastokoordinaattijärjestelmä alkaa nykypäivänä olla vanhentunut sen epätarkkuuden ja epähomogeenisuuden takia. Epätarkkuus johtuu kolmioverkon sisäisistä virheistä. Verkon sisäiset virheet ylittävät reilusti tarkkuuden johon nykyaikaisilla mittausmenetelmillä päästään. Paitsi suorakulmaisia karttakoordinaatteja, voidaan KKJ:ssä käyttää maantieteellisiä koordinaatteja. Koordinaattimuunnoksissa KKJ-koordinaatistosta toiseen tarvitaan ellipsoidikeskisiä koordinaatteja. (4, s. 147.)

KKJ:n ja VVJ:n vertausellipsoidina on Hayfordin ellipsoidi, joka on litistyneisyydeltään $1/297$. Karttaprojektiona käytetään Gauss-Krügerin projektiota, joka on poikittaisasen-

toinen sivuvaava Mercatorin projektio. Gauss-Krügerin projektiossa Suomi on jaettu kuu-teen kolme astetta leveään projektiokaistaan mittakaavavirheen pienentämiseksi. Jos koko maa halutaan kuvata yhdessä projektiokaistassa eli yhtenäiskoordinaatistossa, käytetään kaistan 3. peruskoordinaatistoa. (4, s. 144–145.)

3.3 Suomen korkeusjärjestelmät

Viime jääkaudella 80 000–10 000 vuotta sitten Suomi oli noin 2–3 kilometriä paksun jääkerroksen alla. Jään suuri paine painoi maankuorta kuopalle. Jään sulettua alkoi Fennoskandiassa nopea maan kohoaminen, joka jatkuu edelleen. Maa kohoaa nykyhetkellä nopeimmin Merenkurkun alueella noin 9 millimetriä vuodessa, ja Etelä-Suomessa noin 3–5 millimetriä vuodessa. Tästä syystä korkeusjärjestelmä joudutaan aika ajoin uusimaan.

3.3.1 NN-järjestelmä

NN-järjestelmä oli Suomen ensimmäinen korkeusjärjestelmä. Se perustui vuosina 1892–1910 tehtyyn tarkkavaaitukseen, jonka linjojen yhteispituus oli yli 5 000 km. Järjestelmä ulottui Etelä-Suomesta linjalle Joensuu–Kajaani–Oulu–Tornio asti. Valtaosa vaaituksista suoritettiin rautateitä pitkin. Järjestelmän nollakorkeuspiste oli Katajanokan siltaan kiinnitetyn vesiasteikon nollakohta. NN-järjestelmä ei ole kokonaan poistunut käytöstä, sitä käytetään edelleen joissakin kunnissa ja esimerkiksi sisävesien syvyystiedoissa. (4, s. 155; 11, s. 31–32.)

3.3.2 N43-järjestelmä

Vuonna 1935 aloitettiin Suomen toinen tarkkavaaitus, joka kattoi koko Suomen. Tämän vaaituksen kuluessa luotiin tilapäinen järjestelmä N43. Järjestelmän lähtöpisteeksi tuli Helsingin Pasilassa oleva piste, jolle johdettiin korkeus NN-järjestelmästä. N43-järjestelmän nollakorkeus on likimain Helsingin keskivedenpinnan korkeus vuonna 1943. N43-järjestelmä otettiin käyttöön verkon ollessa vielä keskeneräinen ja sitä laajennettiin sitä mukaa kun vaaitukset etenivät. Verkkotasoitusta ei siis laskettu yhtenäiselle verkolle. Myös maan kohoaminen jätettiin huomiotta. Kuten NN, myös N43 on vielä joissain kunnissa käytössä. (11, s. 32.)

3.3.3 N60-järjestelmä

Suomen toisen tarkkavaaituksen pääverkko saatiin mitatuksi vuonna 1955, mutta koko verkko oli valmis vasta vuonna 1975, kun sekä liitos Ahvenanmaalle että Lapin toinen vaaitus valmistuivat. Kun pääverkko oli valmis, laskettiin verkkotasoitus käyttäen geopotentialilukuja. Samalla saatiin selville maannousu niillä pisteillä, jotka vaaittiin sekä ensimmäisessä että toisessa tarkkavaaituksessa. Maannousulukujen avulla saatiin korjattua korkeuskiintopisteet vuoden 1960 tasolle. Näin syntyi N60-järjestelmä. Sen lähtökorkeudeksi otettiin Helsingin keskivedenpinta vuonna 1960 joka laskettiin vuosien 1935–1954 havaintojen perusteella. N60 on nykyhetkellä Suomen yleisin korkeusjärjestelmä. N60 on valtakunnallinen järjestelmä, mutta sitä on syrjäyttämässä N2000-järjestelmä. (4, s. 155.)

3.3.4 N2000-järjestelmä

Suomen kolmas tarkkavaaitus aloitettiin vuonna 1978 ja saatiin valmiiksi vuonna 2006. Vaaituslinjojen yhteispituudeksi tuli lähes 9 200 km. Näiden vaaitusten perusteella luotiin N2000-järjestelmä. N2000-järjestelmän epookki on vuosi 2000. Järjestelmän vertailutaso on Amsterdamin taso NAP (Normal Amsterdams Peil), jonka kautta Suomi on liitetty kansainvälisiin korkeusjärjestelmiin. N2000-järjestelmän peruspiste on Kirkkonummella Geodeettisen laitoksen Metsähovin tutkimusaseman alueella. N2000-järjestelmää on suositeltu käytettäväksi sekä valtakunnallisissa että paikallisissa kartastotöissä ja paikkatietopalveluissa. (11, s. 32–33.)

3.4 Koordinaattimuunnostyypit

Usein mittaustulokset tai pistetiedot ovat eri koordinaatistossa kuin paikallisesti käytetty koordinaatisto. Esimerkiksi PPP-mittauksissa käytetään ITRF-koordinaatistoa, kun Suomessa yleisimmin käytetyt paikalliset koordinaatistot ovat KKJ ja EUREF-FIN. Tämän vuoksi joudutaan käyttämään koordinaattimuunnoksia. Koordinaattimuunnos on matemaattinen malli, jolla koordinaatit muunnetaan koordinaatistosta toiseen. Suomessa koordinaattimuunnospalveluja KKJ-järjestelmästä EUREF-FIN-järjestelmään ja päinvastoin tarjoavat Geodeettinen laitos ja Maanmittauslaitos. Tässä luvussa on käsi-

teltty yleisimmät muunnostyypit, Helmert-muunnos ja affiinen muunnos. Muunnokset eivät välttämättä sisällä maannousun aiheuttamaa korkeuden muutosta, joka siinä tapauksessa täytyy ottaa erikseen huomioon. Ennen muunnoksen tekemistä on aina katsottava sisältyykö muunnoskertoimiin myös todellinen korkeusmuunnos.

3.4.1 Helmert-muunnos

Yksi yleisesti käytetyistä koordinaattimuunnoksista on Helmert-muunnos eli yhdenmuotoisuusmuunnos. Yhdenmuotoisuusmuunnoksessa koordinaattien suhteet toisiinsa pysyvät samana. Helmert-muunnoksessa käytetään kiertomatriisia, origon siirtoa ja mittakaavan muutosta. Helmert-muunnoksesta on useita eri versioita, joita käytetään tapauskohtaisesti. Helmert-muunnosta voidaan yksinkertaisimmillaan kuvata seuraavalla kaavalla:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = (1 + m) \cdot \underline{R} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$$

jossa $1 + m$ on mittakaavakerroin, \underline{R} on kiertomatriisi ja Δx , Δy ja Δz ovat origojen väliset erot. Kiertomatriisi voidaan kuvata seuraavasti (e = akselien väliset kiertokulmat):

$$\underline{R} = \begin{pmatrix} 1 & e_z & -e_y \\ -e_z & 1 & e_x \\ e_y & -e_x & 1 \end{pmatrix}$$

(2, s. 88.)

3.4.2 Affiinen muunnos

Affiinen muunnos on toinen yleisesti käytetty koordinaattimuunnos. Affiinisessa muunnoksessa koordinaattien keskinäiset suhteet eivät säily samoina, eli jokaisella koordinaattiakselilla on oma mittakaavakertoimensa. Affiinen muunnos voidaan kuvata seuraavalla kaavalla:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_1 & e_z & -e_y \\ -e_z & m_2 & e_x \\ e_y & -e_x & m_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$$

jossa m on mittakaavakerroin, e on kiertokulma ja Δx , Δy ja Δz ovat origon siirtoja. (2, s. 89.)

Affiinista muunnosta voidaan kolmioverkossa tehdä myös kolmioittain. Tällöin etsitään matemaattisesti kolmio, jonka sisällä muunnettava piste sijaitsee. Jos kolmion kaikki kärkipisteet tunnetaan molemmissa koordinaatistoissa, voidaan laskea muunnosparametrit. Kolmioittainen affiinin muunnos ei sisällä lainkaan ylimääritystä, joten karkeatkin virheet jäävät havaitsematta. Siksi sen käyttöä yleisessä tapauksessa tulisi välttää. (11, s. 41.)

3.5 Julkisen hallinnon suositukset

3.5.1 JHS 153

Julkisen hallinnon suosituksessa numero 153 määritellään ETRS89-järjestelmän suomalaiskansallinen realisaatio EUREF-FIN. Suosituksen tarkoitus on edesauttaa siirtymistä KKJ-koordinaatistosta EUREF-FIN-koordinaatistoon. Suosituksessa on annettu muunnoskaavat maantieteellisten ja 3D-suorakulmaisten koordinaattien välillä sekä KKJ:n ja EUREF-FINin välillä. Maantieteellisistä koordinaateista suorakulmaisiin koordinaatteihin päästään seuraavalla kaavalla:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [N + h] \cos \varphi \cos \lambda \\ [N + h] \cos \varphi \sin \lambda \\ [N(1 - e^2) + h] \sin \varphi \end{bmatrix}$$

jossa X, Y ja Z ovat suorakulmaisia koordinaatteja, N on ellipsoidin poikittaiskaarevuussäde, h on korkeus ellipsoidista, φ on maantieteellinen leveys, λ on maantieteellinen pituus ja e on ellipsoidin ensimmäinen eksentrisyys. Ellipsoidin poikittaiskaarevuussäde lasketaan seuraavasti:

$$N = a(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2}$$

jossa a on ellipsoidin isoakselin puolikas. Ellipsoidin ensimmäinen eksentrisyys lasketaan kaavalla:

$$e = (2f - f^2)^{1/2}$$

jossa f on ellipsoidin litistyssuhde.

EUREF-FIN- ja KKJ-koordinaatistojen välinen muunnos on 7-parametrinen Helmert-muunnos. (12)

3.5.2 JHS 154

Julkisen hallinnon suosituksessa numero 154 on määritelty EUREF-FIN -koordinaatiston kanssa käytettävät projektiot, tasokoordinaatistot, karttalehtijako sekä muunnos KKJ-koordinaatistoon. JHS 154:ssä on annettu myös laskentakaavat projektiokorjauksille, joita tarvitaan, kun maan muoto projisoidaan tasolle. JHS 154:ssä on määritelty koordinaattikonversiot eli projisointi ellipsoidilta tasolle tai päinvastoin.

JHS 153:ssa annetut muunnoskaavat antavat likimääräiset koordinaatit. JHS 153:ssa muunnokset ovat yhdenmuotoisuusmuunnoksia, joten mahdolliset mittausvirheet siirtyvät sellaisenaan koordinaatistosta toiseen. Valtakunnan laajuisesti virheet ovat enimmillään ± 2 m. Parempaan tarkkuuteen päästään, kun käytetään kaksiulotteista tasomuunnosta. Ennen muunnosta on suoritettava koordinaattikonversio jotta saadaan koordinaatistot oikeaan muotoon. JHS 154:n suosituksen mukaan muunnos yhtenäiskoordinaatiston ja ETRS-TM35FIN:n tai ETRS-GK27:n välillä tulisi suorittaa affiinisella muunnoksella kolmioittain. Muunnoskaavoja voidaan kuvata seuraavasti:

$$x_2 = \Delta x + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot y_1$$

$$y_2 = \Delta y + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot y_1$$

joissa Δx ja Δy ovat origon siirtoja ja a ja b ovat akseleiden kiertokulmien ja mittakaavatekijöiden funktioita. Kolmioittain muunnoksella voidaan saavuttaa keskimääräisesti parempi kuin 10 cm:n tarkkuus. (13)

3.6 Koordinaattimuunnospalvelut Suomessa

Suomessa avointa koordinaattimuunnospalvelua internetissä tarjoaa kaksi tahoa, Geodeettinen laitos sekä Maanmittauslaitos. Tässä luvussa on lyhyesti esitelty koordinaattimuunnospalvelut.

3.6.1 Geodeettisen laitoksen muunnospalvelu

Geodeettisen laitoksen koordinaattimuunnosohjelmalla voidaan muuntaa KKJ-koordinaatiston koordinaatit ETRS89-järjestelmään ja päinvastoin. KKJ-koordinaatistosta voidaan valita joko tasokoordinaatisto tai maantieteellinen 2D-koordinaatisto. Tasokoordinaatiston yhteydessä tulee valita oikea projektiokaista.

Muunnosohjelmalla voidaan muuntaa myös korkeuksia, valittavissa on Suomen korkeusjärjestelmät NN-järjestelmää lukuun ottamatta.

ETRS89-järjestelmässä on valittavissa useita koordinaatistoja. EUREF-FIN-koordinaatistoista voidaan valita joko maantieteellinen 2D-, maantieteellinen 3D- tai suorakulmainen 3D-koordinaatisto. ETRS-TM- ja ETRS-GK-koordinaatistoissa voidaan valita eri projektiokaistat (kaistat 34–36 TM-koordinaatistossa ja 19-31 GK-koordinaatistossa.) Valittavissa ovat myös ETRS-LAEA (Lambert Azimuthal Equal Area, pintatarkka Lambertin projektio)- ja ETRS-LCC (Lambert Conformal Conic, kulmatarkka Lambertin projektio) -projektiot. Korkeusjärjestelmistä suomalaisten järjestelmien lisäksi on valittavissa ellipsoidinen korkeus vertausellipsoidina GRS80. (14)

3.6.2 Maanmittauslaitoksen muunnospalvelut

Maanmittauslaitoksen internetsivustolla on ladattavissa kaksi eri koordinaattimuunnosohjelmaa. Toisella ohjelmalla voidaan muuntaa KKJ-koordinaatit EUREF-FIN-koordinaateiksi. Toinen ohjelma on tarkoitettu muunnoksiin projektiokaistasta toiseen sekä maantieteellisten koordinaatistojen välisiin muunnoksiin.

EUREF-FIN–KKJ -muunnosohjelmassa voidaan valita joko suorakulmaiset tai maantieteelliset koordinaatit. Valittavissa on myös projektiokaista (KKJ-, ETRS-TM- tai ETRS-GK-kaista.) Korkeuskoordinaatteja ei ohjelmalla voi muuntaa.

Karttaprojektiomuunnosohjelmassa voidaan myös valita suorakulmaiset tai maantieteelliset koordinaatit. Vertausellipsoidiksi voidaan valita Hayford, WGS84, GRS80 tai itse määritelty ellipsoidi. Karttaprojektioksi voi valita joko UTM:n tai Gauss-Krügerin projektion. Lähtö- ja tulosprojektiokaistaksi voidaan valita 60 eri kaistaa, joilla kullakin on oma keskimeridiaanin astelukunsa. (15)

3.7 PPP ja koordinaattimuunnokset

3.7.1 PPP-paikannuksessa käytetty koordinaatisto

ITRF (International Terrestrial Reference Frame) on tarkin CTRS-järjestelmän (Conventional Terrestrial Reference System) mukainen koordinaattijärjestelmän realisaatio. Tästä syystä GPS- ja GLONASS-satelliittien tarkat ratatiedot ovat aina ITRF-koordinaatistossa. PPP-paikannus tapahtuu ITRF-koordinaatistossa, sillä PPP-paikannuksessa käytetään aina tarkkoja rata- ja kellotietoja. ITRF-järjestelmän viimeisin realisaatio on ITRF2008. Mannerlaattojen liike muuttaa ITRF-koordinaatistoa. Tästä syystä paikannus ITRF-koordinaatistossa on aina ajanhetkeen eli epookkiin sidottu.

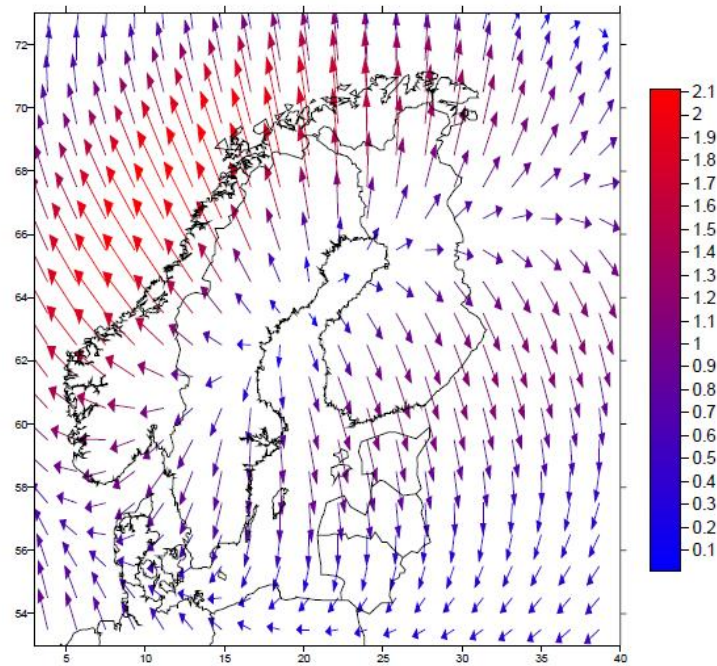
3.7.2 NKG_RF03 (NKG Reference Frame 2003)

Pohjoismainen geodeettinen komissio suoritti vuonna 2003 GPS-mittauskampanjan, jossa oli mukana yhteensä 63 havaintoasemaa Suomessa, Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa. Suomesta mukana oli 12 havaintoasemaa. Kampanjan tarkoitus oli luoda yhtenäinen Pohjoismainen ETRS89-järjestelmän koordinaatisto. Tämän kampanjan tuloksena oli koordinaatisto, jonka nimeksi annettiin NKG_RF03 (NKG Reference Frame 2003.) NKG_RF03 yhtyy ITRF2000-koordinaatistoon epookissa 2003.75. Komissio määrittä samalla myös muunnosparametrit ITRF2000-koordinaatistosta kansallisiin ETRS89-realisaatioihin. Muunnettaessa ITRF-koordinaatiston koordinaatteja EUREF-FIN-järjestelmään voidaankin käyttää ITRF2000-realisaatiota epookissa 2003.75. (16, s. 68.)

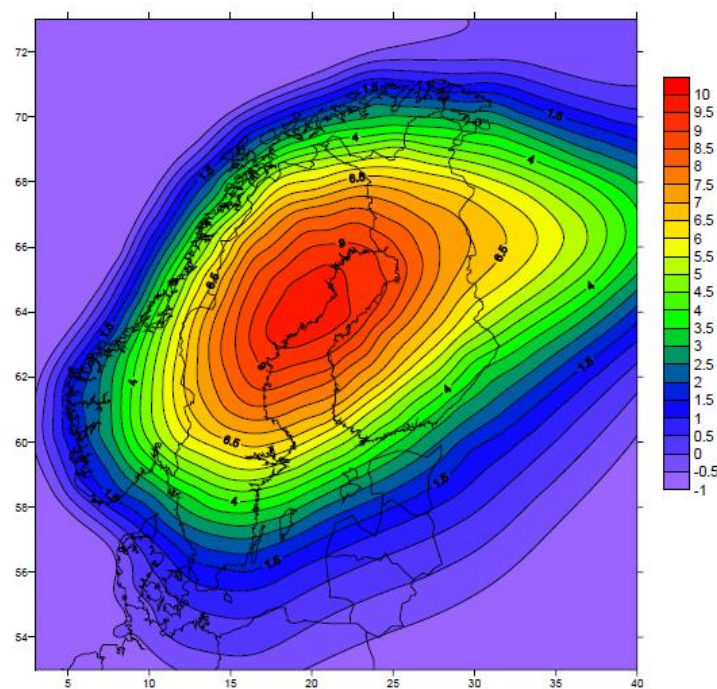
3.7.3 NKG_RF03vel

Jotta saadaan muunnoksessa tarkat koordinaatit ITRF-koordinaatistossa mitattaessa mittaushetken epookista EUREF-FIN-järjestelmään, tulee tietää maankuoren liike mahdollisimman tarkkaan. Tästä syystä Pohjoismaisen geodeettisen komission työryhmä loi vuonna 2006 matemaattisen mallin, jolla huomioidaan maankuoren liike koordinaattimuunnoksissa ITRF-järjestelmästä ETRS89-realisaatioihin. Tämän mallin nimeksi tuli NKG_RF03vel (NKG Reference Frame 2003 velocity model.) NKG_RF03vel-malli kattaa

alueen 53° – 73° pohjoista leveyttä ja 0° – 40° itäistä pituutta. Maankuoren liike Pohjoismaiden alueella on kuvattu kuvissa 15 ja 16. (16, s. 74–75.)



Kuva 15. Maankuoren horisontaalinen liike Pohjoismaissa millimetriä vuodessa (16, s. 75)



Kuva 16. Maankuoren vertikaalinen liike Pohjoismaissa millimetriä vuodessa (16, s. 75)

3.7.4 Muunnos mittaushetken epookista ITRF-2000-realisaation epookiin 2003.75

Jotta ITRF2000-koordinaatit saadaan muunnettua EUREF-FIN -koordinaateiksi, täytyy ensin korjata maankuoren liikkeen vaikutus koordinaatteihin. Tämä voidaan ratkaista käyttämällä Pohjoismaisen geodeettisen komission NKG_RF03vel-mallia. Mittaushetken epookissa saadut koordinaatit tulee siis muuntaa NKG_RF03-koordinaateiksi eli ITRF2000-koordinaateiksi epookissa 2003.75. Tämä muunnos voidaan laskea kahdella kaavalla. Ensimmäisessä kaavassa lasketaan maankuoren liikkeen vaikutus, ja toisessa kaavassa lasketaan korjatut koordinaatit.

Maankuoren liikkeen vaikutus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix}_{2003.75-t_c}^{ITRF2000} = (2003.75 - t_c) \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_3 & \dot{R}_2 \\ \dot{R}_3 & 0 & -\dot{R}_1 \\ -\dot{R}_2 & \dot{R}_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{t_c}^{ITRF2000} + (2003.75 - t_c) \begin{pmatrix} V_{X_{intra}} \\ V_{Y_{intra}} \\ V_{Z_{intra}} \end{pmatrix}_{NKG_RF03vel}^{ITRF2000}$$

jossa t_c on havaintohetken epookki, \dot{R}_1 , \dot{R}_2 ja \dot{R}_3 ovat Euraasian laatan kiertonopeuksia, V_x , V_y ja V_z ovat laatan sisäisiä liikkeitä, jotka löytyvät NKG_RF03vel-mallista.

Korjatut koordinaatit saadaan seuraavalla kaavalla:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2003.75}^{ITRF2000} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{t_c}^{ITRF2000} + \begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix}_{2003.75-t_c}^{ITRF2000}$$

Näin saadut NKG_RF03-koordinaatit voidaan muuntaa EUREF-FIN-koordinaateiksi. (16, s. 72.)

3.7.5 Muunnos NKG_RF03-koordinaateista EUREF-FIN-koordinaatteihin

NKG_RF03-koordinaateista eli ITRF2000 epookin 2003.75-koordinaateista päästään EUREF-FIN-koordinaatteihin kaksivaiheisella kaavalla. Ensimmäisessä vaiheessa korjataan laatan sisäisen liikkeen aiheuttama virhe käyttämällä NKG:n NKG_RF03vel-mallia. Toisessa vaiheessa suoritetaan 7-parametrinen yhdenmuotoisuusmuunnos.

Ensimmäistä vaihetta voidaan kuvata seuraavasti:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{t_r}^{ITRF2000} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2003.75}^{ITRF2000} + (t_r - 2003.75) \begin{pmatrix} V_{X_{intra}} \\ V_{Y_{intra}} \\ V_{Z_{intra}} \end{pmatrix}_{NKG_RF03vel}^{ITRF2000}$$

jossa t_r on ETRS89-järjestelmän kansallisen realisaation referenssiepookki, Suomessa 1997.000.

7-parametrinen muunnos suoritetaan seuraavalla kaavalla:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}^{EUREF-FIN} = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + (1 + D) \begin{pmatrix} 1 & R_Z & -R_Y \\ -R_Z & 1 & R_X \\ R_Y & -R_X & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{t_r}^{ITRF2000}$$

jossa T_X , T_Y ja T_Z ovat kansalliset siirtoparametrit, $1+D$ on mittakaavakerroin ja R_X , R_Y ja R_Z ovat kansalliset kiertoparametrit. Suomen muunnosparametrit on esitetty taulukossa 1. (16, s. 69–70.)

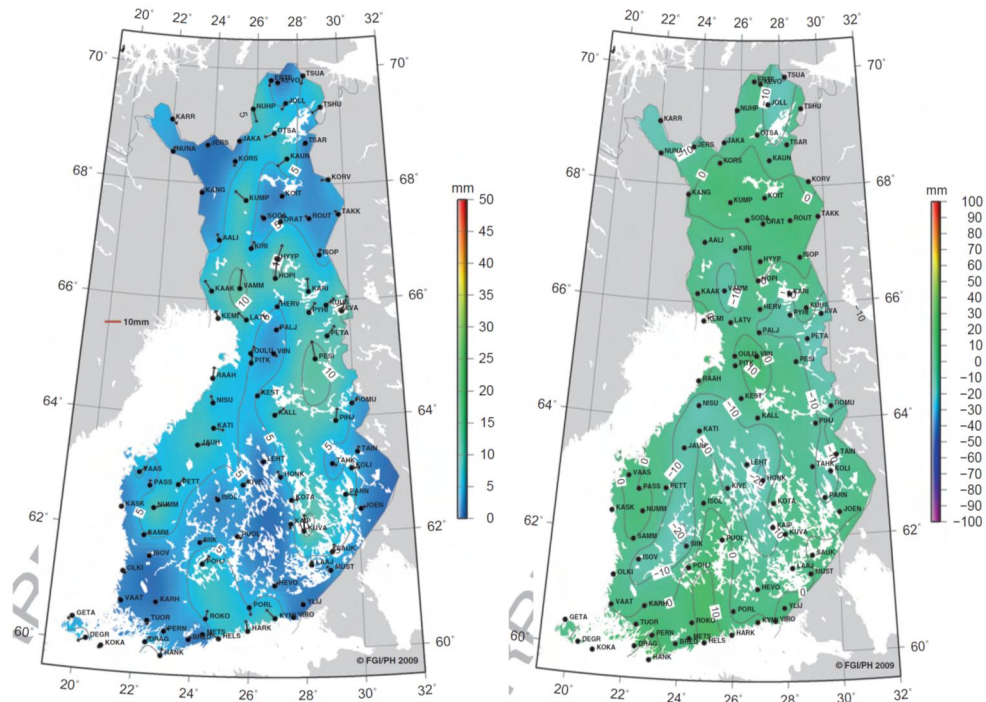
Taulukko 1. Suomen muunnosparametrit ITRF2000-järjestelmän epookissa 2003.75 (16, s. 70)

t_r	T_x (cm)	T_y (cm)	T_z (cm)	D (ppb)	R_x (mas)	R_y (mas)	R_z (mas)
1997.000	11.15	-7.78	-13.81	9.84	0.700	-4.710	8.091

Taulukossa 2 on esitetty muunnoksen virheet painoyksikön keskivirheinä. Kuvassa 17 on esitetty muunnoksen jäännösvirheet Suomessa.

Taulukko 2. Painoyksikön keskivirheet muunnoksessa (16, s. 70)

$S_{pohjoinen}$ (mm)	$S_{itäinen}$ (mm)	$S_{korkeus}$ (mm)
1.6	1.5	3.2



Kuva 17. Muunnoksen jäännösvirheet Suomessa, vasemmalla tasojäännösvirheet ja oikealla korkeuden jäännösvirheet (18, s. 84–85)

4 PPP – tarkkuus ja ionosfäärin vaikutus

4.1 Havainnot

Tässä työssä käytetty havaintodata on kerätty Geodeettisen laitoksen Metsähovin tutkimusaseman havaintoasemalta vuosina 2000 ja 2010.

4.1.1 Metsähovin tutkimusasema

Geodeettisen laitoksen Metsähovin tutkimusasema (kuva 18) on perustettu vuonna 1975 Kirkkonummen Kylmälään. Tutkimusasemalla on GNSS-havaintoaseman lisäksi avaruusgeodeettinen observatorio, painovoimalaboratorio sekä fotogrammetrinen testikenttä. Pysyvällä GPS-havaintoasemalla on tehty havaintoja vuodesta 1992 lähtien ja vuodesta 1998 lähtien on käytössä ollut myös GLONASS-vastaanotin. Metsähovin ha-

vaintoasema kuuluu Euroopan pysyvään GPS-verkkoon EPN:ään (European Permanent GPS Network) ja on mukana ITRF-koordinaatiston määrittämisessä. Metsähovin havaintoaseman havainnot lähetetään myös IGS:lle (International GNSS Service) radanlaskentaa varten.



Kuva 18. Metsähovin tutkimusasema (www.fgi.fi)

4.1.2 Havaintodata

Vuosien 2000 ja 2010 data on havaittu pelkästään GPS-vastaanottimella. Data on jaettu vuorokausittain, vuodelta 2000 havaintodataa on yhteensä 357 vuorokaudelta ja vuodelta 2010 194 vuorokaudelta. Vuoden 2010 data päättyy heinäkuussa silloisten antenniongelmien vuoksi. Havaintoväli on 30 sekuntia. Havaintodata koostuu koodi- ja vaihehavainnoista sekä Doppler-havainnoista. Vuoden 2000 havaintodatasta puuttuvat doppler-havainnot 27.5.2000 asti.

4.2 Laskentaohjelmia

4.2.1 PPP Direct

Laskenta tässä työssä suoritettiin PPP Direct -palvelua käyttäen. PPP Direct on kanadalainen laskentapalvelu, joka on tarkoitettu PPP-laskentaan. Palvelu on ilmainen ja kenen tahansa käytettävissä. Sen voi ottaa käyttöön Natural Resources Canadian internet-sivuilta (17). Palvelun käyttöönotto on helppoa ja nopeaa. Kun palvelun ottaa käyttöön,

se luo kuvakkeen tietokoneen työpöydälle, johon GNSS-havaintodatatiedostot voi yksinkertaisesti raahata ja pudottaa. Datatiedostojen tulee olla RINEX-muodossa. Datatiedostot voidaan prosessoida joko staattisessa tai kinemaattisessa moodissa. PPP Directin käyttö on äärimmäisen yksinkertaista ja nopeaa. Laskentapalvelu prosessoi lähetetyt datatiedostot ja toimittaa tulokset sähköpostiin. Tulokset saapuvat sähköpostiin yleensä sekunneissa. Datatiedostojen syöttämisessä tulee kuitenkin olla maltillinen, sillä palvelu saattaa tukkiutua, jos tiedostoja syöttää liian suuren määrän liian nopeaan tahtiin. Saadut laskentatulokset ovat valinnaisesti joko kanadalaisessa NAD83-koordinaatistossa tai ITRF-koordinaatistossa.

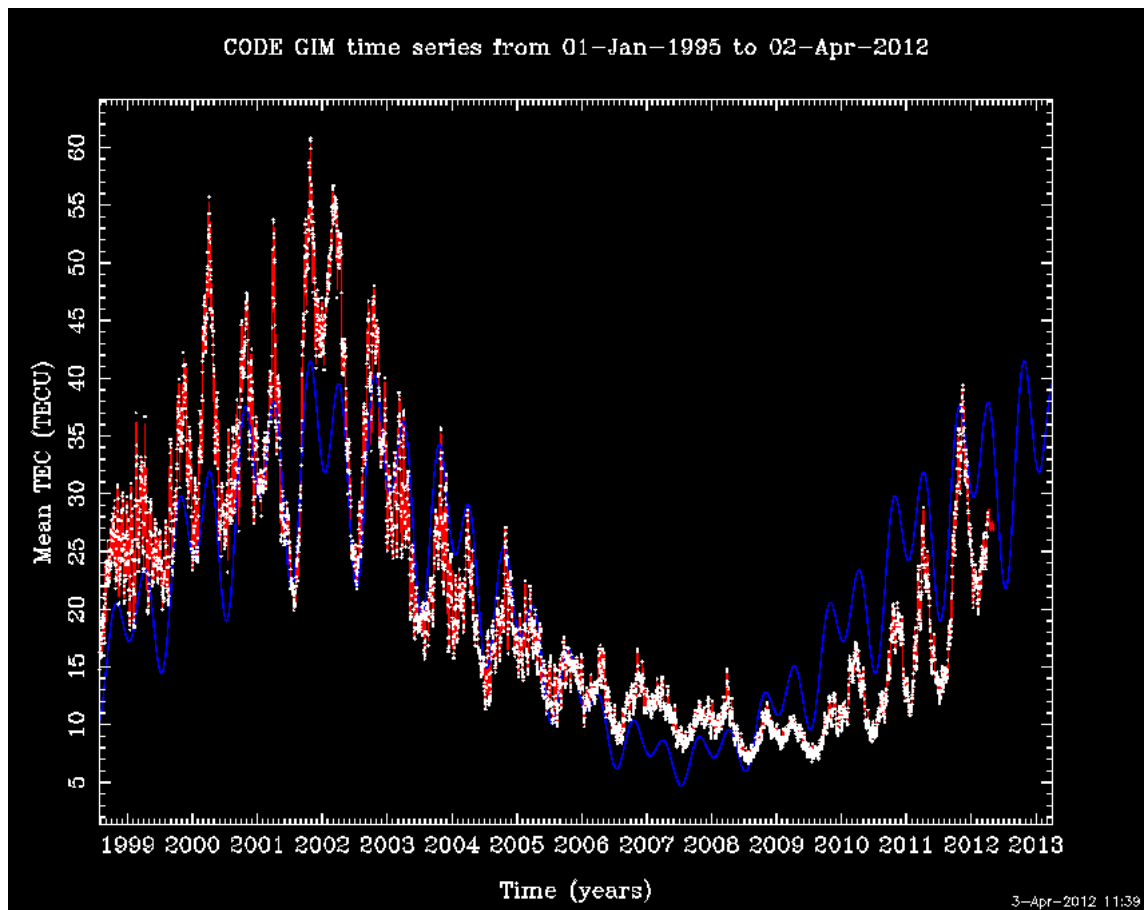
Laskentatulokset saapuvat sähköpostiin neljässä eri tiedostossa. Csv-päätteisessä tiedostossa on annettu kunkin epookin latitudi, longitudi sekä ellipsoidinen korkeus. Csv-tiedoston voi avata taulukkolaskentaohjelmalla. Pdf-tiedostossa on yleisten tietojen (kuten esimerkiksi hylättyjen epookkien määrän) lisäksi annettu arvioitu latitudi, longitudi sekä ellipsoidinen korkeus. Pdf-tiedostosta löytyy myös joitakin virhearvioita graafisesti esitettynä. Liitteessä 1 on esimerkki pdf-tulostiedostosta. Pos-päätteisessä tiedostossa on myös annettu kunkin epookin latitudi, longitudi ja ellipsoidinen korkeus. Näiden lisäksi pos-tiedostosta löytyy joitakin virhearvoja lukumuodossa. Pos-tiedosto aukeaa Notepadilla tai internet-selaimella. Neljäs ja viimeinen tulostiedosto on sum-päätteinen. Sum-tiedostossa on annettu datan yleistietojen lisäksi koordinaatit sekä NAD83- että ITRF-koordinaatistossa. Sum-tiedosto aukeaa parhaiten internet-selaimella. Mikäli käyttäjää kiinnostavat vain koordinaatit, ei muista kuin sum-tiedostoista tarvitse välittää.

4.2.2 GrafNav

Grafnav on kanadalaisen NovAtel Waypoint Products Groupin kehittämä kaupallinen GNSS-jälkilaskentaohjelma. Grafnav sisältää myös PPP-laskentamoduulin. Myös GrafNavissa data voidaan prosessoida joko staattisessa tai kinemaattisessa moodissa. RINEX-formaatin lisäksi ohjelma tukee monia muita tiedostomuotoja. Ohjelman avulla voi ladata tarkat rata- ja kellotiedot yhden päivän viiveellä. Ohjelman Multi-pass PPP-prosessoinnilla voidaan parantaa PPP-paikannuksen tarkkuutta varsinkin lyhyillä datajaksoilla. GrafNav sisältää yleisimmät käytössä olevat datumit ja projektiot, ja käyttäjä voi lisäksi luoda omia datumejaan ja projektioitaan.

4.3 Laskenta ja laskennan tarkoitus

Laskennan pääasiallinen tarkoitus tässä työssä on tutkia ionosfäärin aktiivisuuden vaikutusta PPP-paikannuksen tarkkuuteen. Kuvassa 19 on esitetty ionosfäärin aktiivisuus graafisesti ionosfäärin TEC-lukujen (elektronipitoisuuksien) avulla. Vuonna 2000 aurion aktiivisuus oli huipussaan mutta 2010 matalimmillaan, mikä näkyy suoraan myös ionosfäärin aktiivisuudessa. Molempien vuosien koko havaintodata laskettiin yhden vuorokauden havaintojaksoissa. Lisäksi laskettiin molempien vuosien tammikuun data puolen vuorokauden jaksoissa. Vielä lisäksi laskettiin vuodelta 2000 kolmen päivän ja vuodelta 2010 kahden päivän havaintodata yhden tunnin jaksoissa. Tällä pyrittiin selvittämään havaintojakson pituuden vaikutusta lopputulokseen.



Kuva 19. Auringon aktiivisuus vuodesta 1999 nykyhetkeen TEC-lukuina (aiuws.unibe.ch)

4.4 Laskennan tulokset

Tulokset on tässä työssä ilmaistu graafisesti, pisteet ilmaisevat poikkeamaa keskiarvosta ja palkit ilmaisevat datablokin sisäistä virheen suuruutta. Virhekaavioissa on käytetty latitudia, longitudia sekä ellipsoidista korkeutta.

4.4.1 Vuosien 2000 ja 2010 koko vuoden tulokset

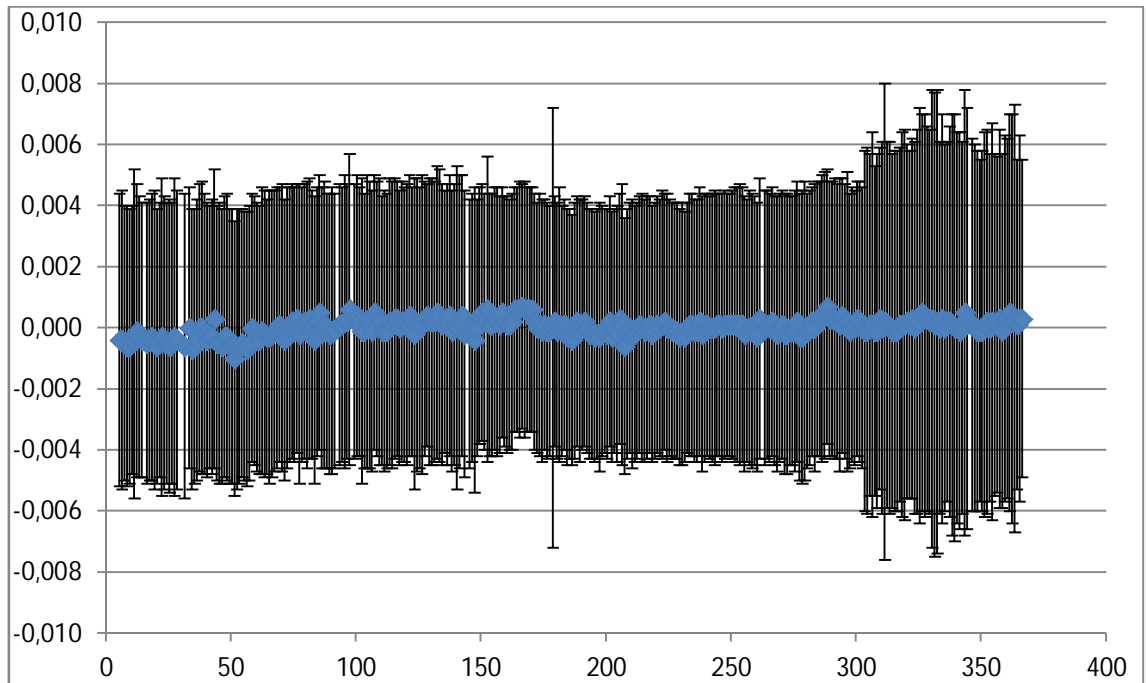
Tässä luvussa on esitetty vuosien 2000 ja 2010 laskentatulokset koko vuoden jaksoissa. Vuoden 2010 havaintodata päättyy heinäkuuhun. Tuloksista on poistettu sellaiset vuorokaudet, joiden virhearvot osoittivat PPP-ratkaisun epäonnistuneen. Tällaisia vuorokausia oli 7.4.2000 sekä 5.7.2010 alkaen koko vuoden 2010 heinäkuun vuorokaudet, mikä saattaa viitata antennin vikaantumiseen jo muutamaa viikkoa ennen sen lopullista rikkoontumista.

Tuloksia visuaalisesti tarkastellessa voidaan havaita, että vuoden 2000 laskentatuloksen virheet ovat selkeästi suurempia ja ratkaisut epähomogeenisempia kuin 2010 tulokset. Toisaalta vuoden 2010 data päättyy heinäkuuhun, joten koko vuoden kattavaa vertailua ei voi tehdä. Taulukossa 3 on esitetty koko vuosien 2000 ja 2010 koko vuoden keskivirheet metreinä.

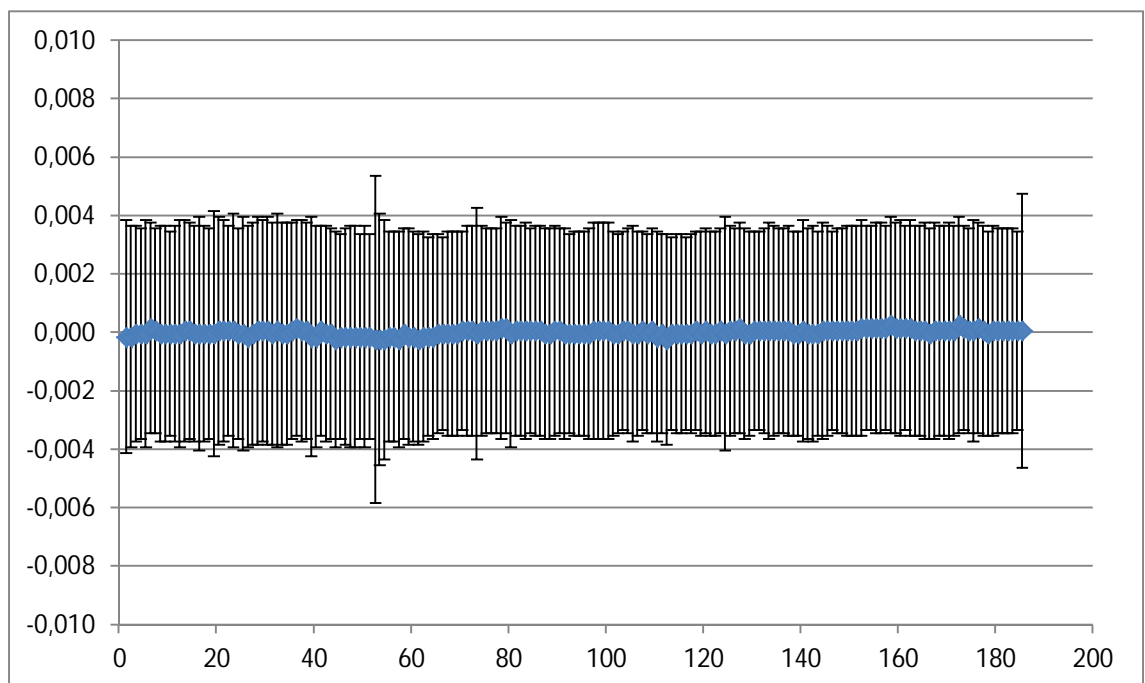
Taulukko 3. Koko vuoden keskivirheet metreinä

Vuosi	Latitudi	Longitudi	Korkeus
2000	0,0048	0,0085	0,018
2010	0,0036	0,0068	0,014

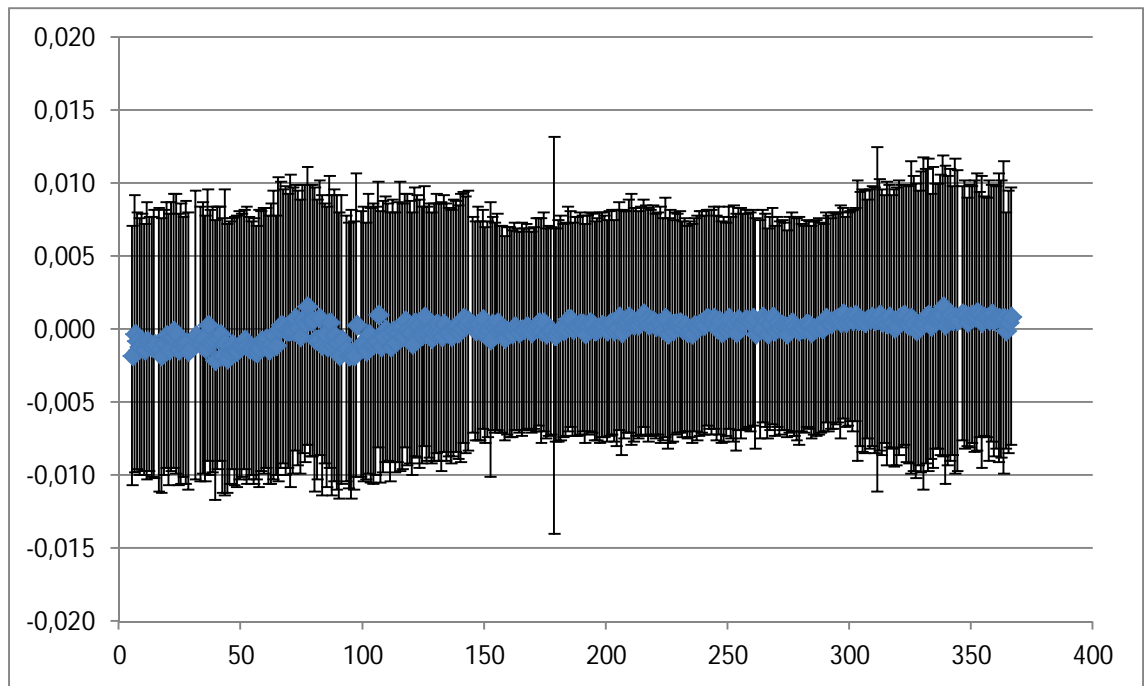
Keskivirheitä tarkastelemalla voidaan havaita, että vuoden 2010 keskivirheet ovat noin 20 prosenttia pienemmät kuin vuoden 2000 keskivirheet. Kaavioissa 1–6 on esitetty virhearvot graafisesti. Täplät kuvaavat poikkeamaa keskiarvosta ja palkit datablokin sisäistä virhettä neliöllisinä keskiarvoina.



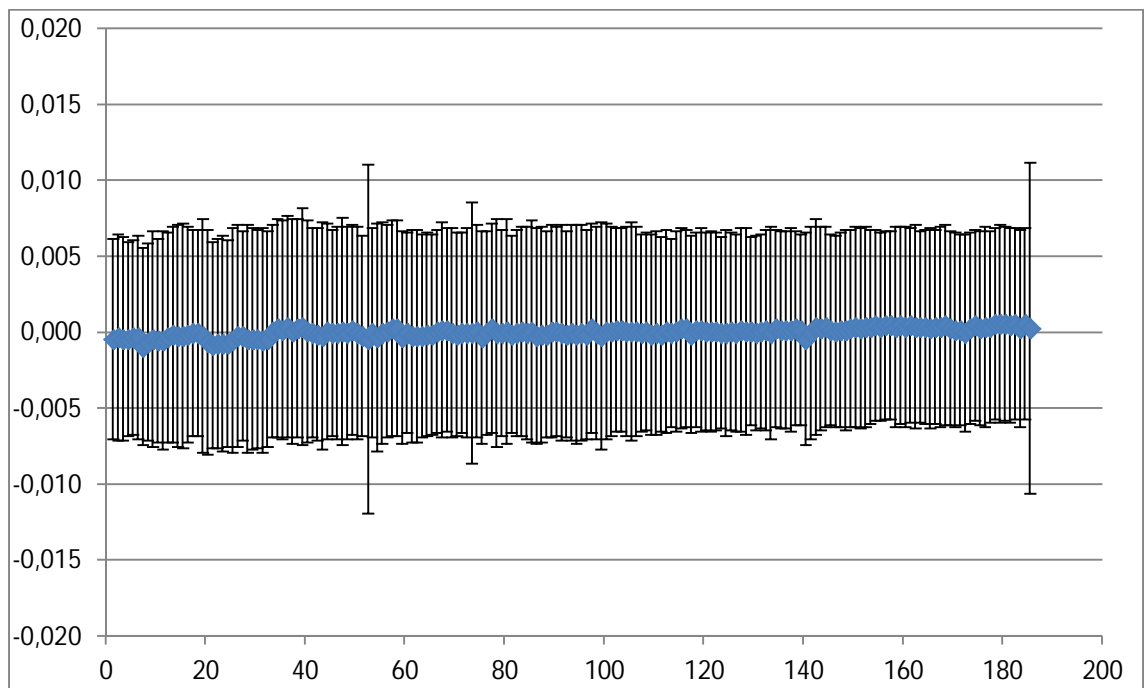
Kaavio 1. Latitudin virhearvot vuonna 2000 metreinä



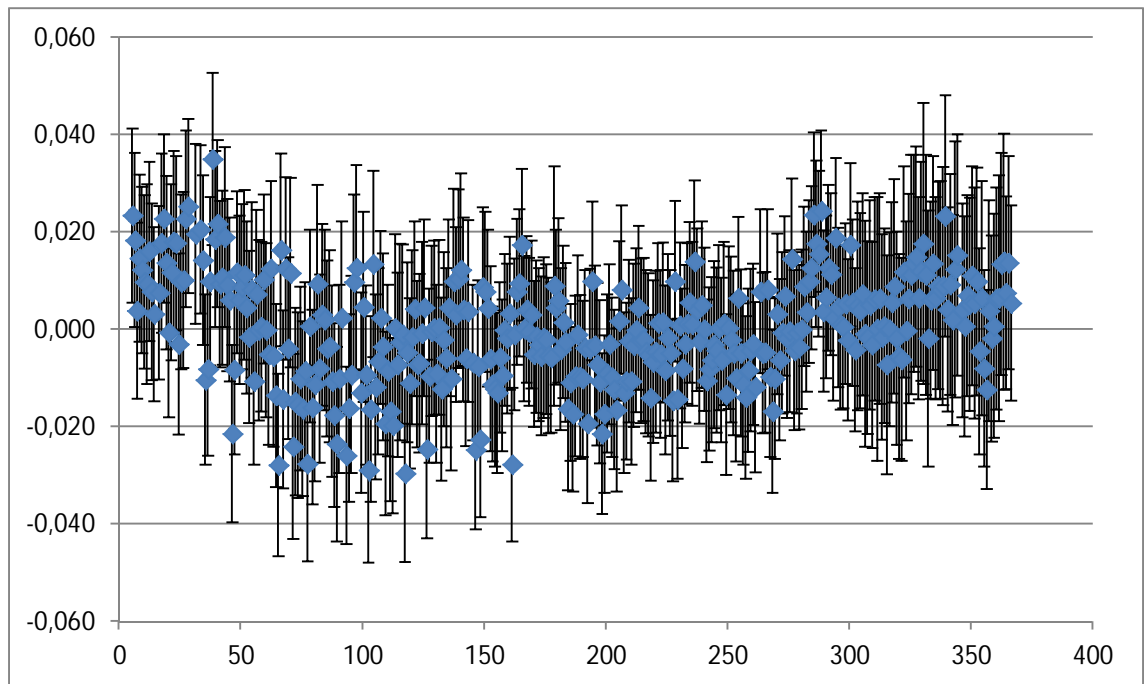
Kaavio 2. Latitudin virhearvot vuonna 2010 metreinä



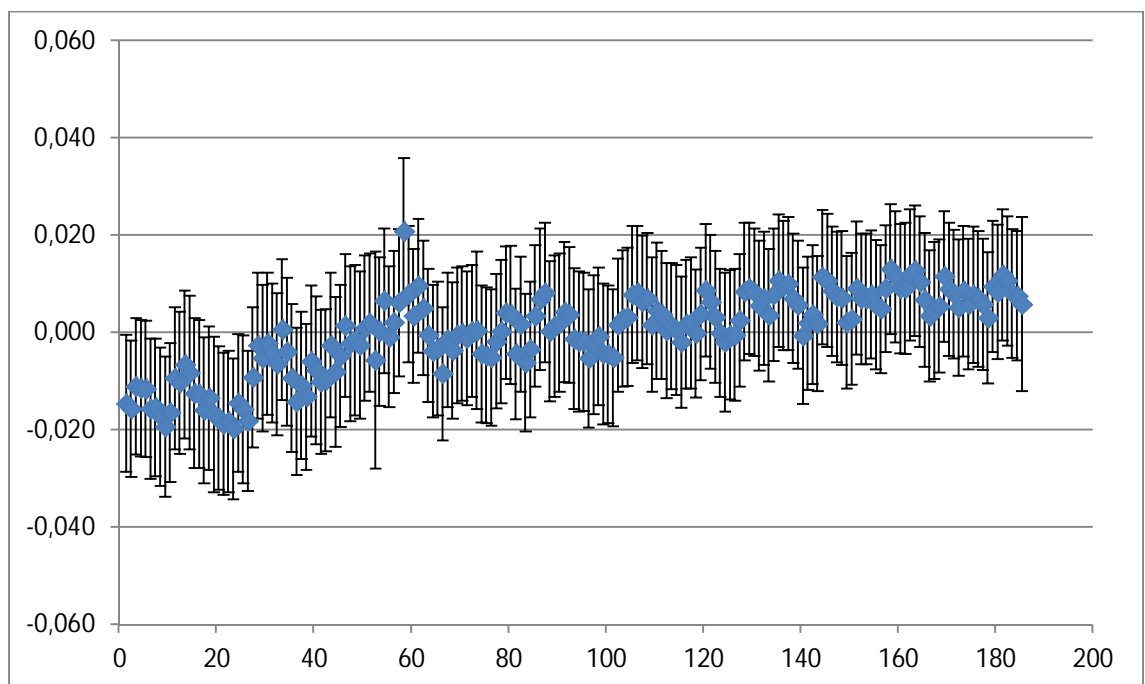
Kaavio 3. Longitudin virhearvot vuonna 2000 metreinä



Kaavio 4. Longitudin virhearvot vuonna 2010 metreinä



Kaavio 5. Korkeuden virhearvot vuonna 2000 metreinä



Kaavio 6. Korkeuden virhearvot vuonna 2010 metreinä

4.4.2 Vuosien 2000 ja 2010 tammikuiden tulokset

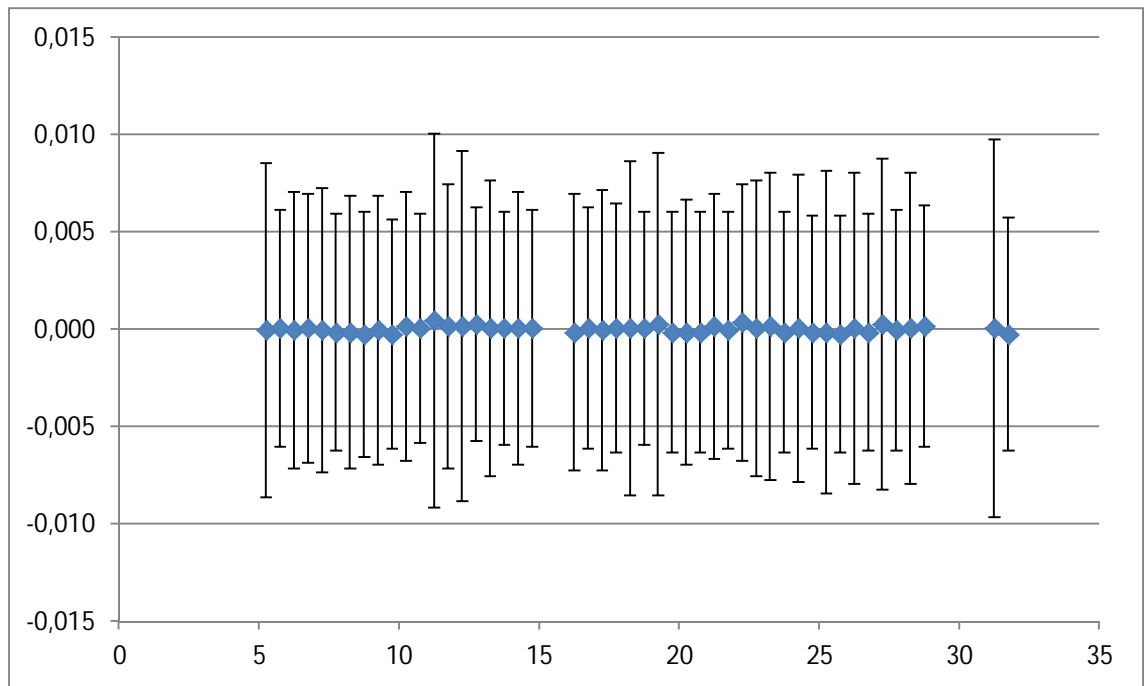
Vuosien 2000 ja 2010 tammikuiden data laskettiin puolen vuorokauden jaksoissa. Vuoden 2000 tammikuun datasta puuttuu yhteensä 7 vuorokautta. Vuoden 2010 tammi-

kuun data on kokonaisuudessaan mukana. Taulukossa 4 on esitetty tammikuiden keskivirheet. Kaavioissa 7–12 on graafisesti esitetty molempien vuosien tammikuiden virhearvot. Täplät ilmaisevat poikkeamaa keskiarvosta ja palkit datablokin sisäistä virhettä neliöllisinä keskiarvoina. Kaavioita tarkastelemalla havaitaan, että vuorokauden sisäistä vaihtelua jonkin verran esiintyy. Myös tässä havaitaan, että vuonna 2010 tarkkuus on parempi kuin vuonna 2000.

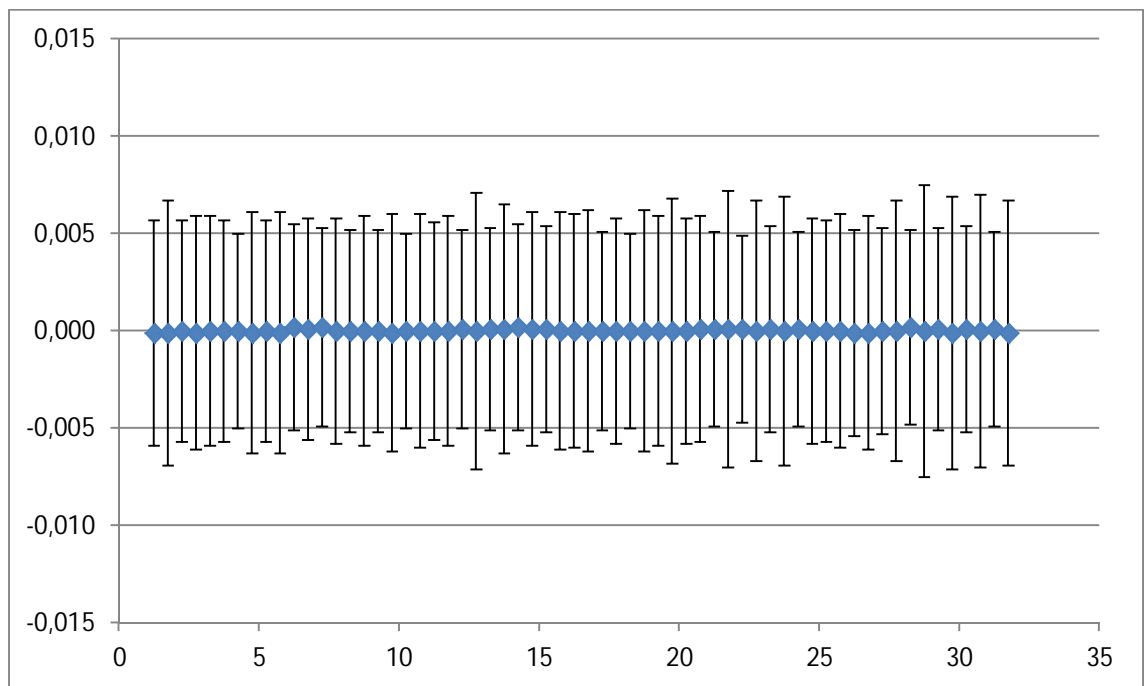
Taulukko 4. Vuosien 2000 ja 2010 tammikuiden keskivirheet metreinä

	Latitudi	Longitudi	Korkeus
2000 tammikuu	0,0070	0,0139	0,0258
2010 tammikuu	0,0058	0,0104	0,0210

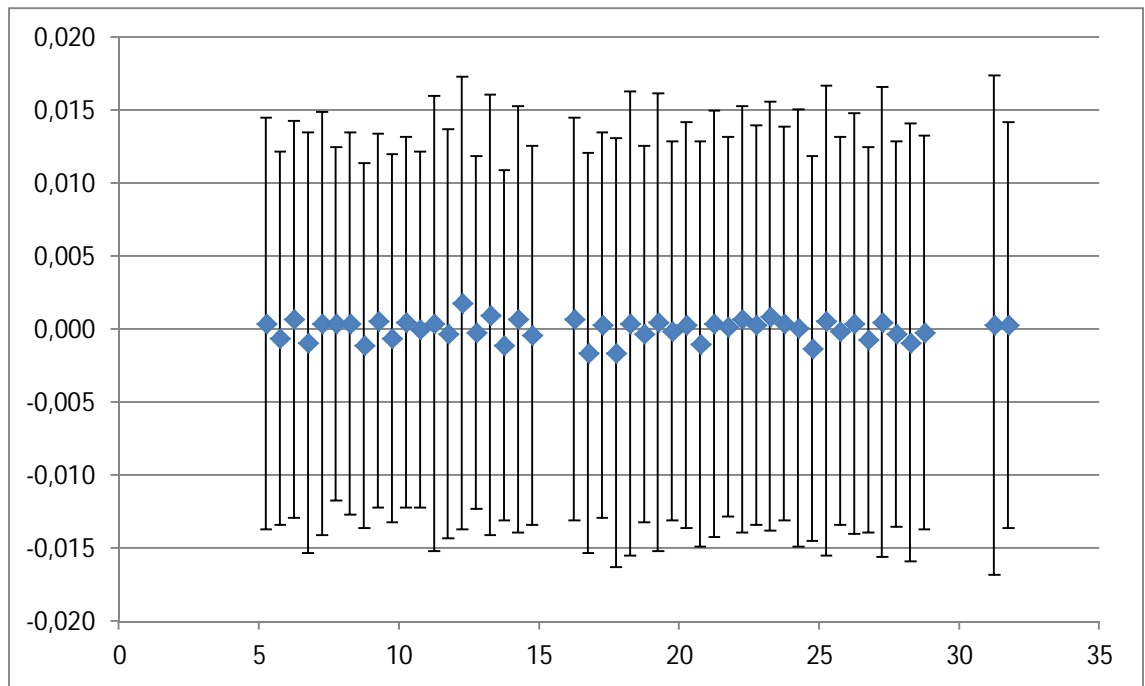
Keskivirheitä tarkastelemalla havaitaan, että kuukauden keskivirheet ovat jonkin verran suurempia kuin koko vuoden keskivirheet. Myös tässä havaitaan, että vuoden 2010 tammikuun keskivirheet ovat noin 20 prosenttia pienemmät kuin vuoden 2000 tammikuun.



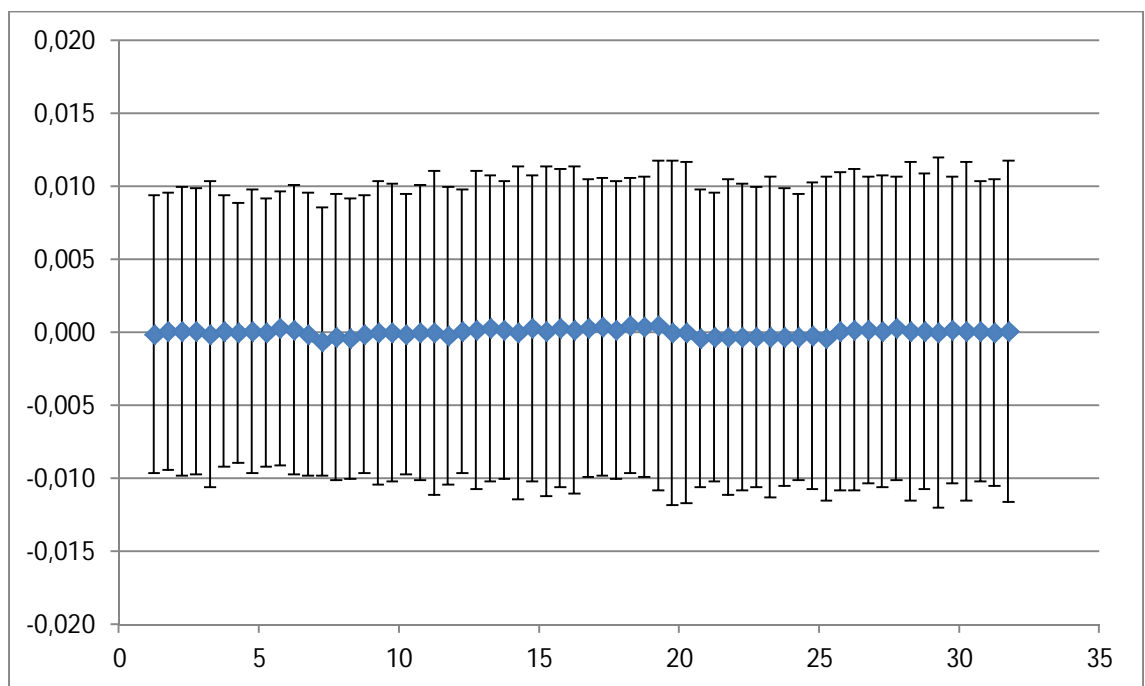
Kaavio 7. Vuoden 2000 tammikuun latitudin virhearvot puolen vuorokauden jaksoissa metreinä



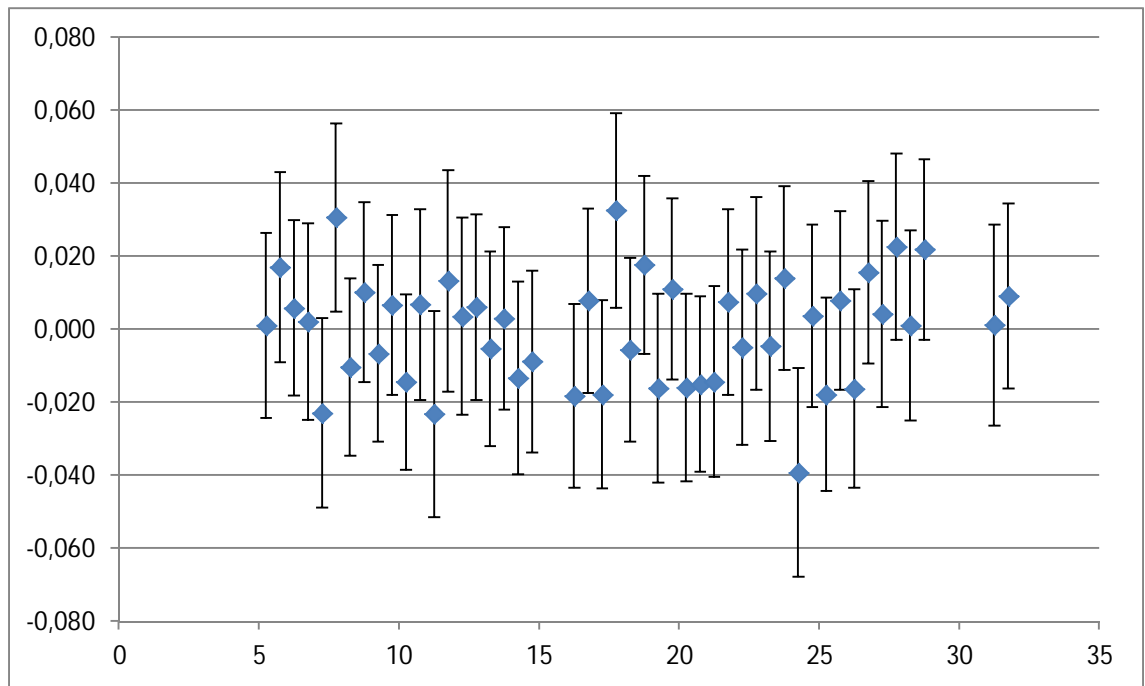
Kaavio 8. Vuoden 2010 tammikuun latitudin virhearvot puolen vuorokauden jaksoissa metreinä



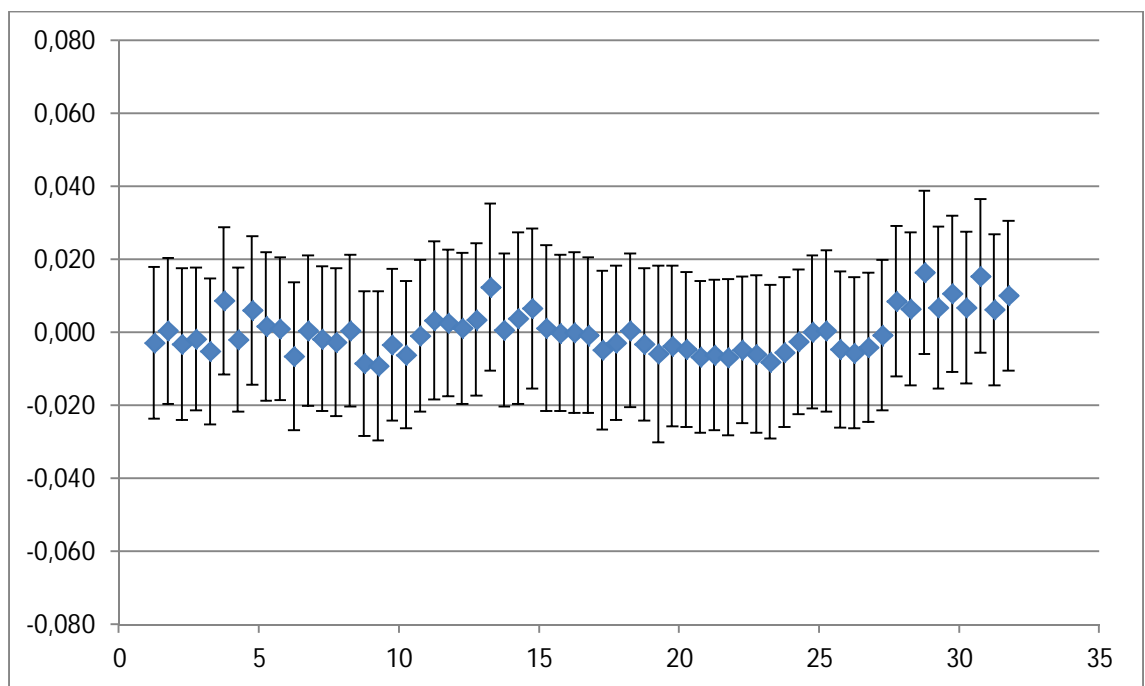
Kaavio 9. Vuoden 2000 tammikuun longitudin virhearvot puolen vuorokauden jaksoissa metreinä



Kaavio 10. Vuoden 2010 tammikuun longitudin virhearvot puolen vuorokauden jaksoissa metreinä



Kaavio 11. Vuoden 2000 tammikuun korkeuden virhearvot puolen vuorokauden jaksoissa metreinä



Kaavio 12. Vuoden 2010 tammikuun korkeuden virhearvot puolen vuorokauden jaksoissa metreinä

4.4.3 Vuorokausiotokset

Lähempään tarkasteluun valittiin vuodelta 2000 kolme vuorokautta sekä vuodelta 2010 kaksi vuorokautta, jotka laskettiin tunnin jaksoina. Valitut vuorokaudet olivat 9.1.2000, 8.6.2000, 28.12.2000, 3.1.2010 ja 5.6.2010. Näiden vuorokausien keskivirheet on esitetty taulukossa 5. Vuorokausikohtaisten virhearvojen graafiset esitykset ovat liitteessä 2. Kaavioissa täplät kuvaavat poikkeamaa keskiarvosta ja palkit kuvaavat datablokin sisäisen virheen suuruutta. Kaavioita tarkastelemalla huomataan, että vuorokauden sisäiset virhearvojen vaihtelut ovat hyvin suuria. Valituista vuorokausiotoksista ei ole havaittavissa merkittävää eroa tarkkuudessa vuoden 2000 ja 2010 välillä.

Taulukko 5. Vuorokausikohtaiset keskivirheet metreinä

Pvm	Latitudi	Longitudi	Korkeus
9.1.2000	0,0871	0,1294	0,1527
8.6.2000	0,0624	0,0973	0,1320
28.12.2000	0,1415	0,2179	0,2765
3.1.2010	0,0681	0,1202	0,1409
5.6.2010	0,0787	0,1272	0,1619

Taulukosta 5 huomataan, että vuorokauden sisäiset keskivirheet ovat monin verroin suurempia kuin pitemmillä aikajaksoilla. On ilmeistä, että PPP:n konvergenssiaika on tuntia pitempi (luku 2.9.1), joten menetelmä ei sovellu näin lyhyille havaintojaksoille.

4.4.4 Keskiarvokoordinaattien muunnokset

Vuosien 2000 ja 2010 datan laskennasta saatiin ITRF-koordinaatistossa olevat keskiarvokoordinaatit koko vuodelle. Nämä koordinaatit on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. ITRF-koordinaattien keskiarvot vuosilta 2000 ja 2010

Vuosi	Epookki	X	Y	Z
2000	ITRF97(2000)	2892570.8697	1311843.3801	5512634.0746
2010	ITRF05(2010)	2892570.7084	1311843.5189	5512634.1946

Nämä koordinaatit muunnettiin EUREF-FIN-koordinaateiksi NKG_RF03vel-mallia käyttäen luvussa 2.7 esitetyllä tavalla. Taulukossa 7 on esitetty arviokoordinaatit sekä muunnetut keskiarvokoordinaatit.

Taulukko 7. Arvioidut ja keskiarvokoordinaateista muunnetut EUREF-FIN-koordinaatit

Vuosi	X	Y	Z
Etukäteisarvio	2892571.1204	1311843.2621	5512633.9521
2000	2892571.1160	1311843.2526	5512633.9591
2010	2892571.1243	1311843.2506	5512633.9515

Koordinaatteja vertailemalla havaitaan, että ne ovat noin senttimetrin tarkkuudella samat.

5 Yhteenveto

PPP-menetelmä on jo laajassa käytössä maailmalla. Se sopiikin hyvin monenlaisiin käyttötarkoituksiin, joissa suuri tarkkuus ei ole ehdoton vaatimus. Koska PPP-menetelmässä ei tarvita tukiasemaa, sen käyttö on mahdollista missä tahansa ilman tukiasemainvestoinnin tarvetta. Tarkimmissa mittauksissa se ei kuitenkaan vielä korvaa suhteellista mittausta rajallisen tarkkuuden vuoksi. Runkomittauksissa sen käyttö on kiellettyä, sillä menetelmää käytettäessä joudutaan käyttämään koordinaattimuunnoksia, eikä sille ole luotettavaa virhekontrollia. PPP-menetelmän haittapuolia suhteellista mittausta heikomman tarkkuuden lisäksi ovat pitkät konvergenssiajat ja huono toimivuus peitteisillä alueilla. Suurissa verkoissa PPP-menetelmän etu tulee esille, sillä PPP-menetelmässä laskennan määrä kasvaa vain suoraan suhteessa asemien määrään.

Koska satelliittien tarkat ratatiedot ovat aina ITRF-koordinaatistossa, joudutaan PPP-menetelmässä käyttämään koordinaattimuunnoksia jotta päästään paikalliseen koordinaatistoon. Suomessa on siirrytty EUREF-FIN-koordinaatistoon, joten PPP-menetelmää käytettäessä joudutaan muuntamaan koordinaatit ITRF-koordinaatistosta EUREF-

FIN-koordinaatistoon. Maankuoren liikkeiden vuoksi mittaaminen ITRF-koordinaatistossa on ajanhetkeen eli epookkiin sidottu. Koska mittauksia ei sidota tukiasemiin, täytyy maankuoren liikkeet tuntea suurella tarkkuudella. Tämä seikka hankaloittaa muunnosten suorittamista. Siksi NKG eli pohjoismainen geodeettinen komissio loi matemaattisen mallin, joka kuvaa maankuoren liikettä pohjoismaiden alueella. Tämän mallin avulla voidaan selvittää kansalliset muunnosparametrit muunnettaessa koordinaatteja ITRF-koordinaatistosta ETRS-89-realisaatioon. Suomessa ei vielä ole rutiinimuunnosta ITRF-koordinaattien ja EUREF-FIN-koordinaattien välillä. Geodeettinen laitos tulee lähitulevaisuudessa luomaan rutiinimuunnokset ITRF:n ja EUREF-FINin välille.

Yksi tämän työn tarkoituksista oli tutkia ionosfäärin vaikutusta PPP-paikannuksen tarkkuuteen. Tämän vuoksi GPS-havaintodataksi valittiin Geodeettisen laitoksen Metsähovin tutkimusasemalta vuosina 2000 ja 2010 kerätty havaintodata. Vuonna 2000 ionosfääri oli aktiivinen ja vuonna 2010 rauhallinen. Havaintodata laskettiin kanadalaisella PPP-Direct-ilmaislaskentapalvelulla. Dataa laskettiin koko vuoden jaksot yhden vuorokauden datablokkeina sekä molempien vuosien tammikuun puolen vuorokauden datablokkeina. Lisäksi poimittiin viisi vuorokautta jotka laskettiin tunnin blokkeina. Havaittiin että vuoden 2000 virhearvot ovat noin 20 prosenttia suuremmat kuin vuoden 2010.

PPP-Direct-palvelu osoittautui todella helppokäyttöiseksi ja käyttökelpoiseksi, joskin yksinkertaiseksi. Laskentatulokset saapuivat hyvin nopeasti datan lähettämisen jälkeen. Ilmaispalveluna se soveltuu erittäin hyvin PPP-menetelmän testaamiseen, jos kaksitaajuusvastaanotin on käytettävissä. Kaupalliset laskentaohjelmat ovat monipuolisempia, mutta niiden lisenssit ovat hyvin kalliita.

Lähteet

- 1 Miettinen, Samuli. 2006. GPS käsikirja. Genimap.
- 2 Poutanen, Markku. 2011. Satelliittipaikannus. Luentomoniste. Geodeettinen Laitos. (2b. Poutanen, Markku. 1998. GPS-paikanmääritys. Ursan julkaisuja 63. Helsinki. 269 s.)
- 3 Dr Weston, Neil & Dr Schwieger, Volker. 2010. Cost Effective GNSS Positioning Techniques. FIG Publication NO 49. FIG Commission 5 Publication.
- 4 Laurila, Pasi. 2008. Mittaus- ja kartoitustekniikan Perusteet. Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D 3.
- 5 Dr King, Matt & Edwards, Stuart & Dr Clarke, Peter. 2002. Precise Point Positioning: Breaking the Monopoly of Relative GPS Processing. Engineering Surveying Showcase.
- 6 Soycan, Metin & Ata, Ercenk. 2010. Precise Point Positioning Versus Traditional Solution for GNSS Networks. Scientific Research and Essays Vol. 6(4), pp. 799-808, 18 February, 2011. <<http://www.academicjournals.org/SRE>> Luettu 10.2.2012
- 7 Witchayangkoon, Boonsap. 2000. Elements of GPS Precise Point Positioning. A Thesis. The University of Maine.
- 8 Kouba, Jan & Héroux, Pierre. 2000. GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products. Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada. <<http://www.geod.nrcan.gc.ca/publications/papers/pdf/final.pdf>> Luettu 10.2.2012
- 9 El-Mowafy, Ahmed. Precise Point Positioning for Mobile mapping. Civil and Environmental Engineering Department, UAE University. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-C55/papers/el-mowafy_ahmed.pdf> Luettu 1.3.2012
- 10 Bisnath, Sunil B. & Gao, Yang. 2009. Innovation: Precise Point Positioning. GPS World April 1, 2009. <<http://www.gpsworld.com/gnss-system/algorithms-methods/innovation-precise-point-positioning-7040>> Luettu 1.3.2012
- 11 Häkli, Pasi & Puupponen, Jyrki & Koivula, Hannu & Poutanen, Markku. 2009. Suomen geodeettiset koordinaatit ja niiden väliset muunnokset. Geodeettinen laitos, tiedote 30.
- 12 JHS 153. ETRS89-järjestelmän mukaiset koordinaatit Suomessa. 2008. Geodeettinen Laitos. Julkisen hallinnon suositus. <<http://www.jhs-suositukset.fi/web/guest/jhs/recommendations/153/full>> Luettu 1.3.2012

- 13 JHS 154. ETRS89-järjestelmään liittyvät karttaprojektiot, tasokoordinaatistot ja karttalehtijako. 2008. Geodeettinen Laitos. Julkisen hallinnon suositus. <<http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS154/JHS154.pdf>> Luettu 10.3.2012
- 14 Geodeettisen Laitoksen verkkoaineisto. <<http://coordtrans.fgi.fi/transform-form.do>> Luettu 10.3.2012
- 15 Maanmittauslaitoksen verkkoaineisto. <www.maanmittauslaitos.fi> Luettu 10.3.2012
- 16 Knudsen, Per (ed), 2008. Technical Report No.1, 2008. Proceedings of the 15th General Meeting of the Nordic Geodetic Commission, Copenhagen, Denmark May 29 – June 2, 2006. DTU Space, National Space Institute. <http://www.space.dtu.dk/upload/institutter/space/forskning/07_reports/technicalreports/tech_no_1_2008.pdf>
- 17 Natural Resources Canada www-sivut. <<http://www.nrcan.gc.ca>> Luettu 15.3.2012
- 18 Kenyon, Steve; Pacino, Maria Christina; Marti, Urs. 2011. Geodesy for Planet Earth. International Association of Geodesy Symposia 136. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Liite 1. Pdf-tulostiedosto 30.5.2010



CSRS-PPP (V 1.05 05211)



METS Data Start Data End Duration of Observations

2010-05-30 00:00:30.000 2010-05-30 23:59:29.999 23h 58m 60.00s

Apri / Aposteriori Phase Std Apri / Aposteriori Code Std

0.015m / 0.004m 2.0m / 1.494m

Observations Frequency Mode

Phase and Code L1 and L2 Static

Elevation Cut-Off Rejected Epochs Observation & Estimation Steps

10.000 degrees 0.00 % 30.00 sec / 30.00 sec

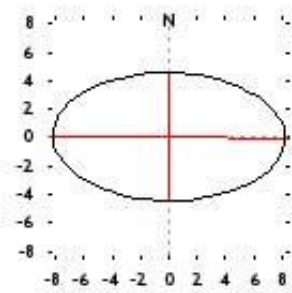
Antenna Model APC to ARP ARP to Marker

AOAD/M_B NONE L1= 0.059 m L2= 0.088 m 0.000 m (APC = antenna phase center; ARP
= antenna reference point)

Estimated Position for METS1500.10O

Latitude (+n)		Longitude (+e)	Ell. Height
ITRF05 (2010)	60° 13' 02.9019''	24° 23' 43.1599''	94.647 m
Sigmas(95%)	0.004 m	0.007 m	0.013 m
Apriori	60° 13' 02.890''	24° 23' 43.133''	94.568 m
Estimated - Apriori	0.355 m	0.409 m	0.080 m

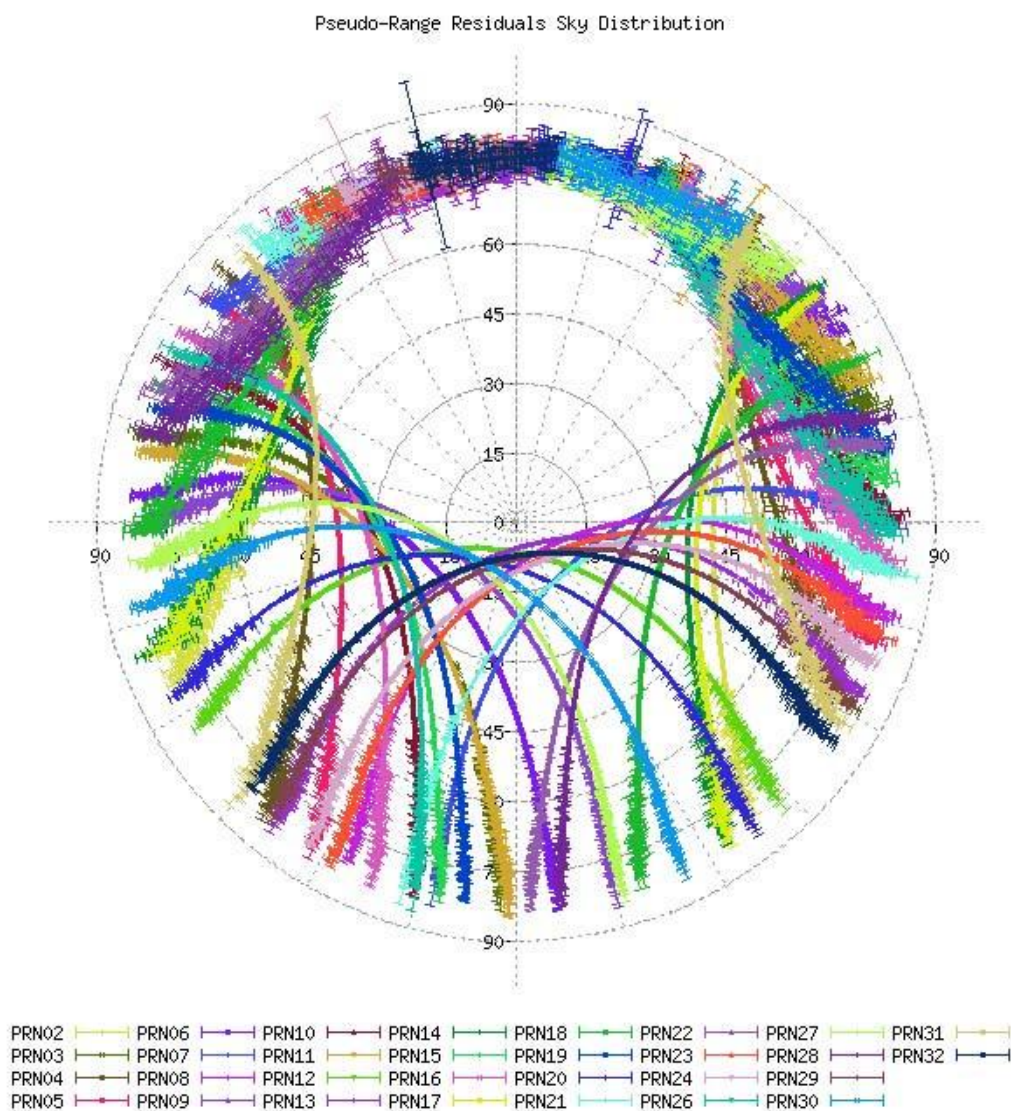
95% Error Ellipse (mm)
semi-major: 8.243mm
semi-minor: 4.494mm semi-major
azimuth: 90° 55' 14.14''

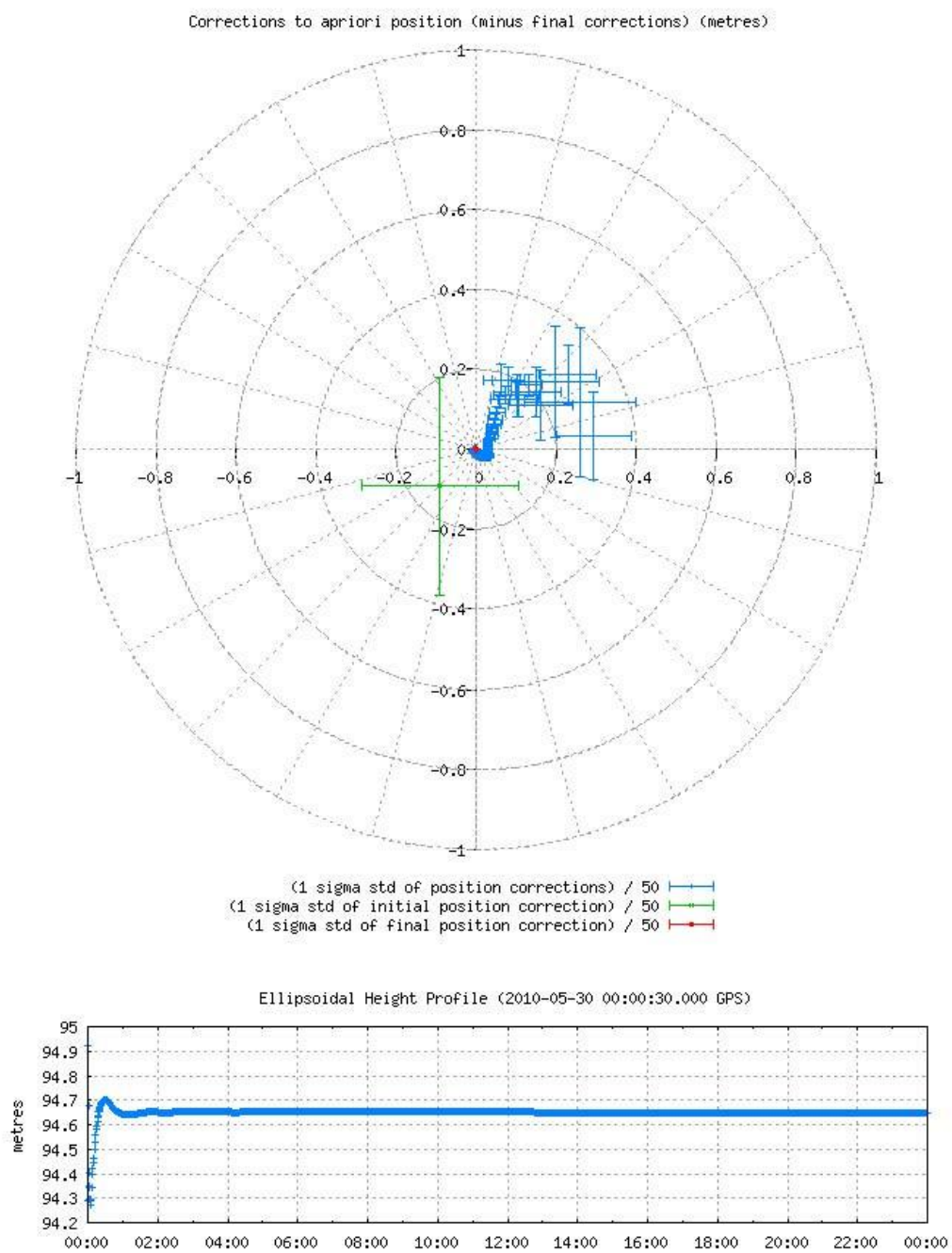


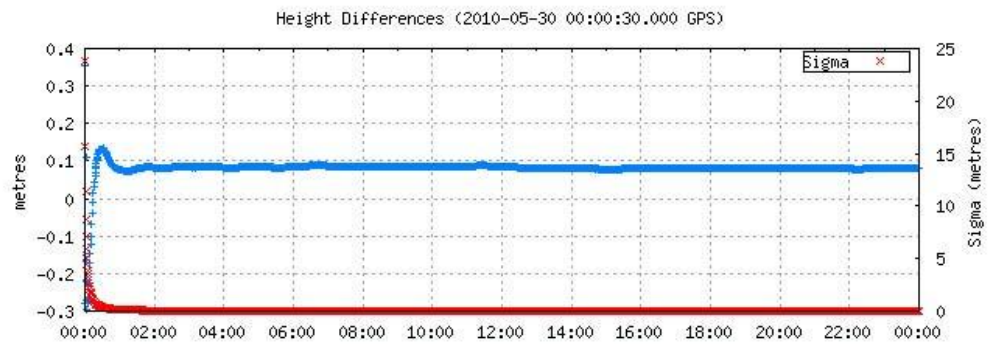
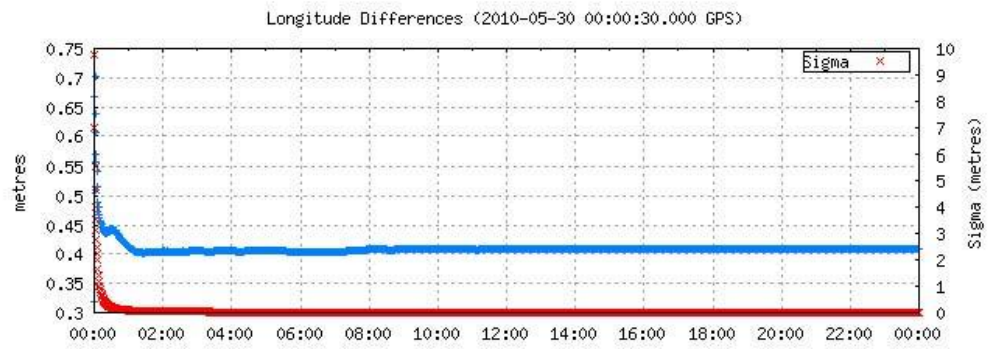
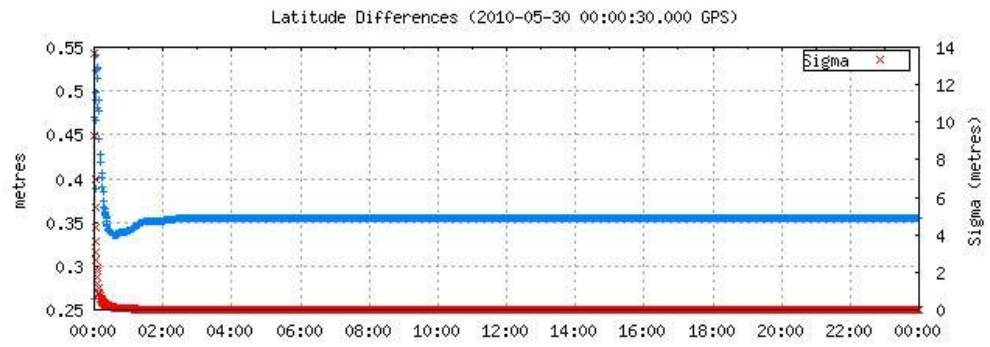
UTM (North) Zone 35
6678478.560m (N) 355696.856m (E)
Scale Factors
0.99985518 (point)
0.99984033 (combined)

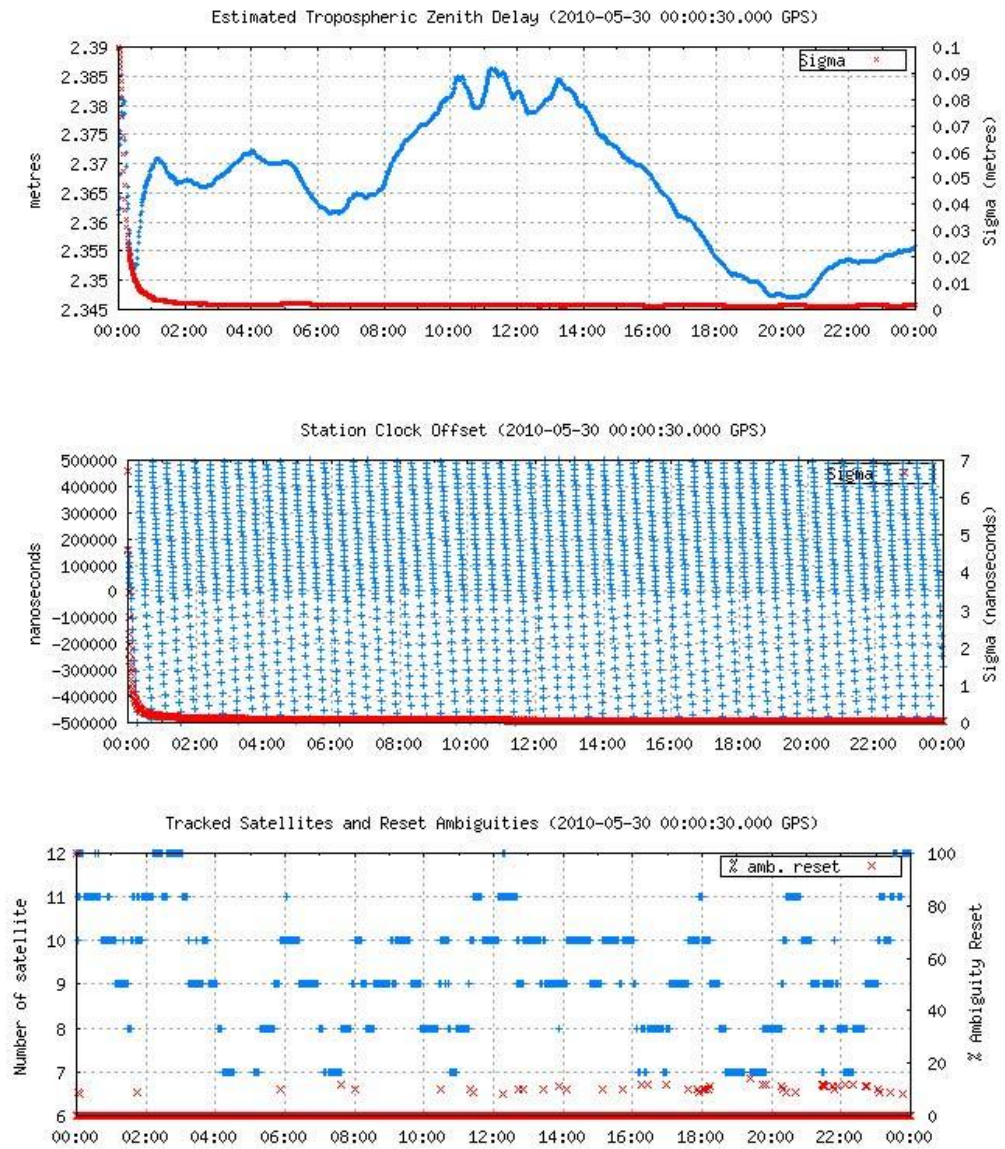
(Coordinates from RINEX file used as apriori position)

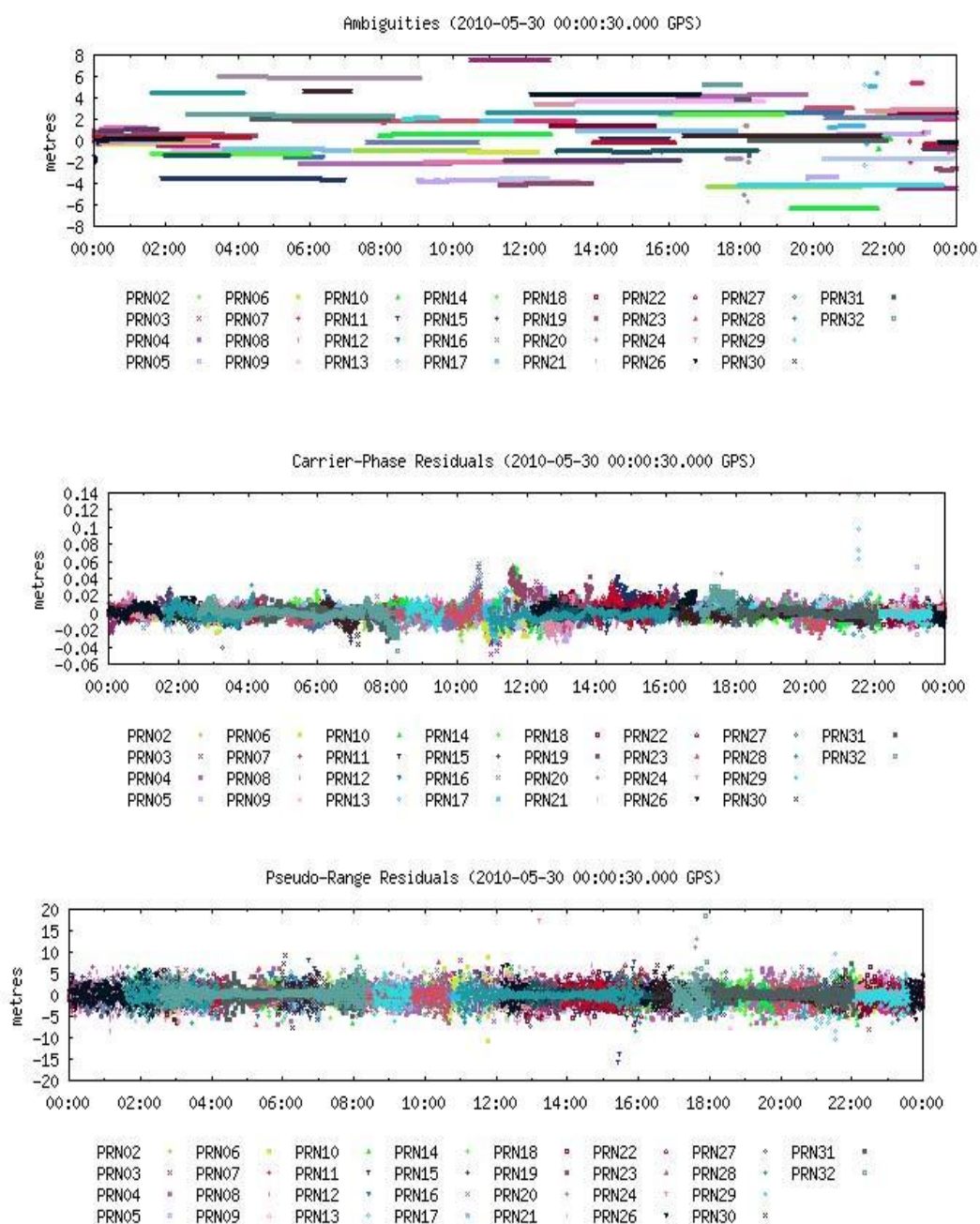
Estimated Parameters & Observations Statistics



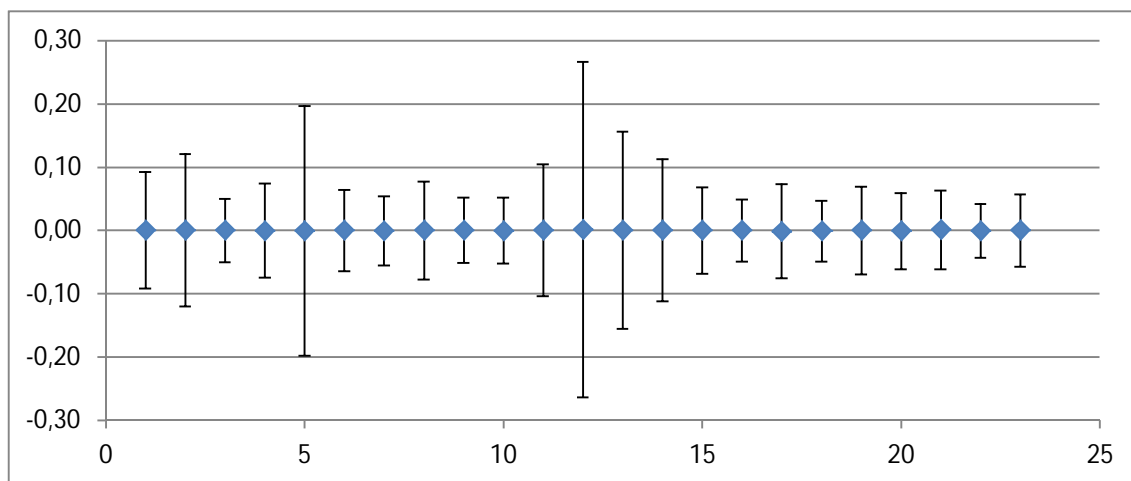




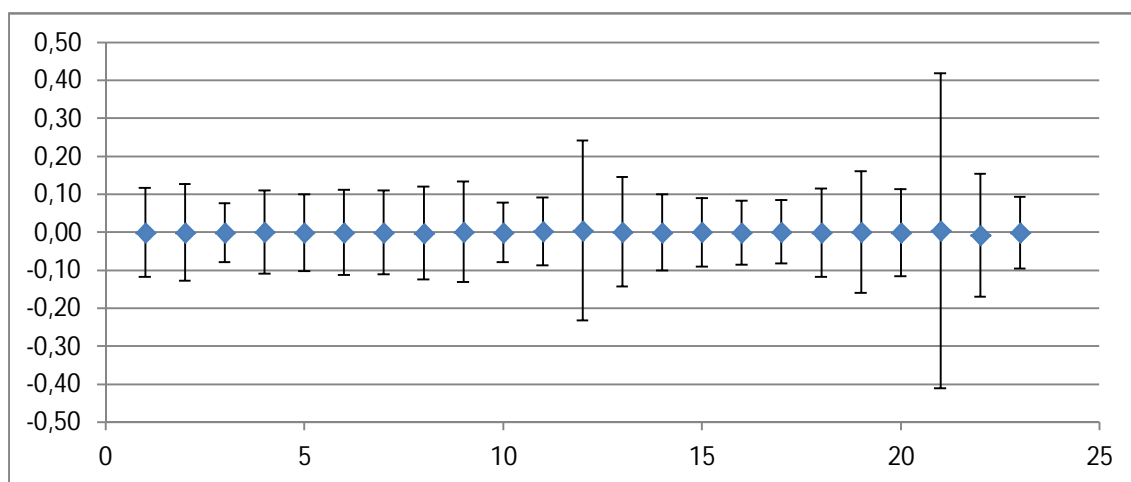




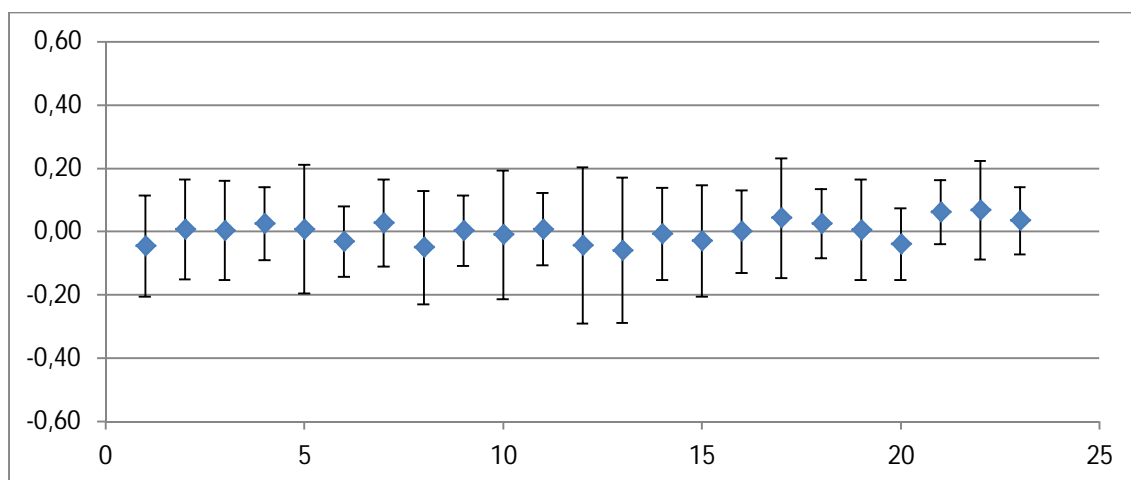
Liite 2. Vuorokausiotosten virhearvojen graafiset esitykset



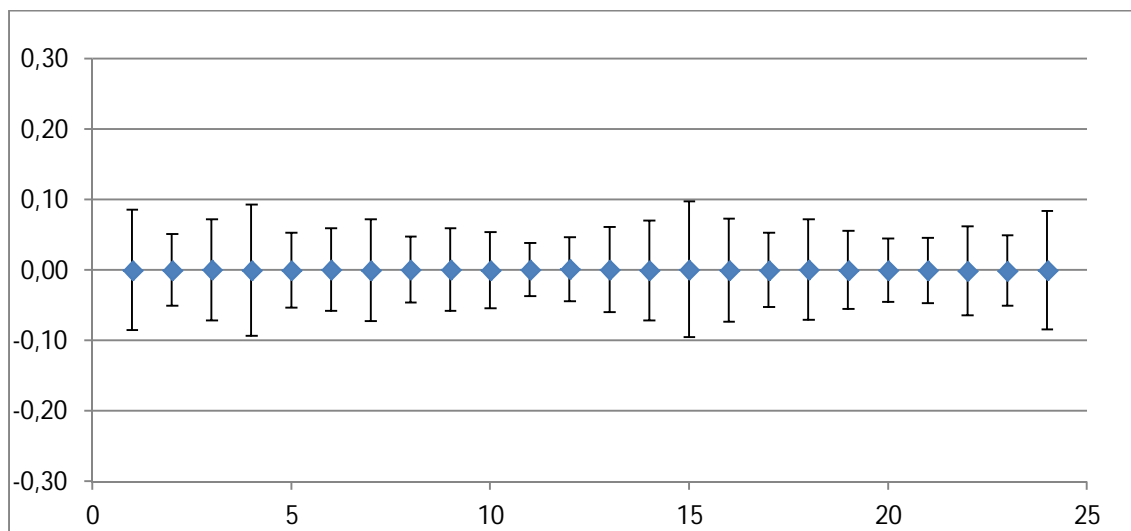
9.1.2000 latitudin virhearvot metreinä



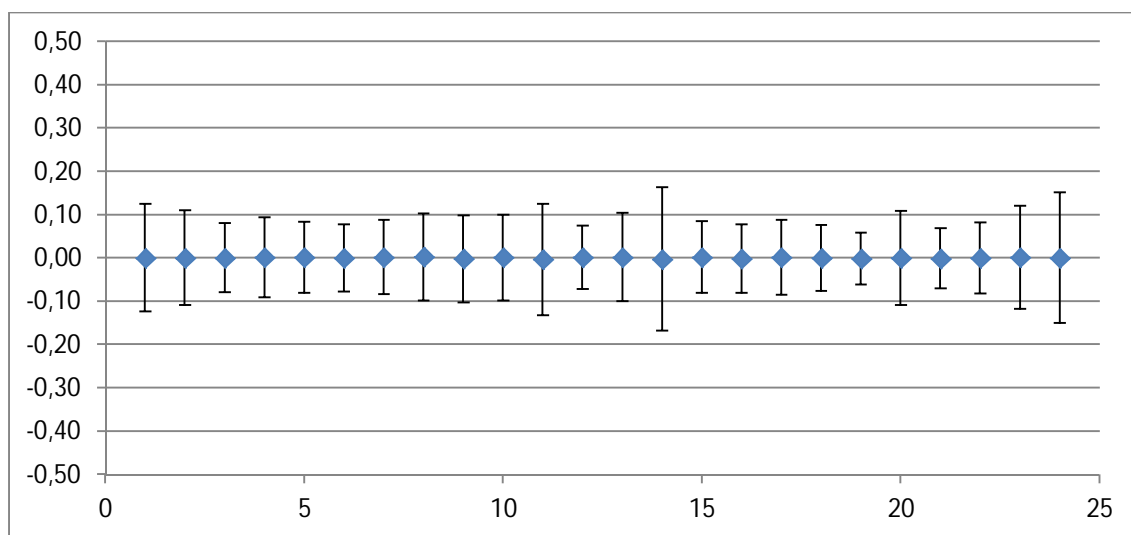
9.1.2000 longitudin virhearvot metreinä



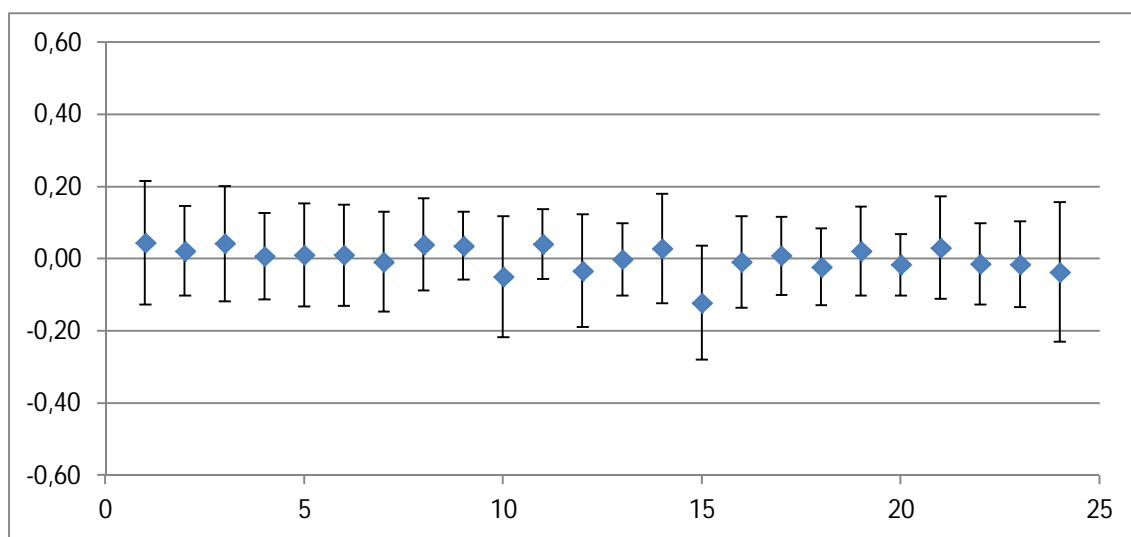
9.1.2000 korkeuden virhearvot metreinä



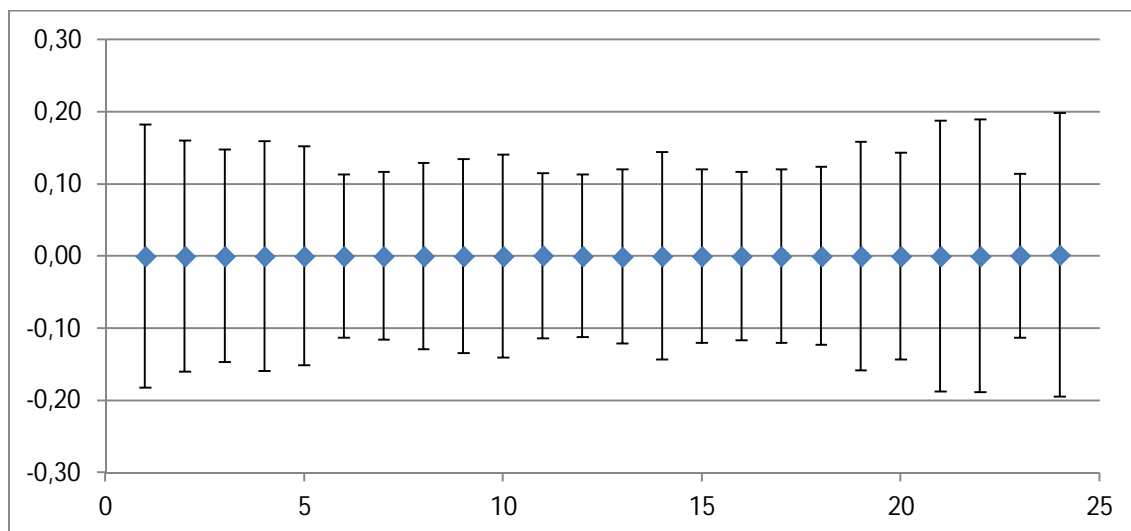
8.6.2000 latitudin virhearvot metreinä



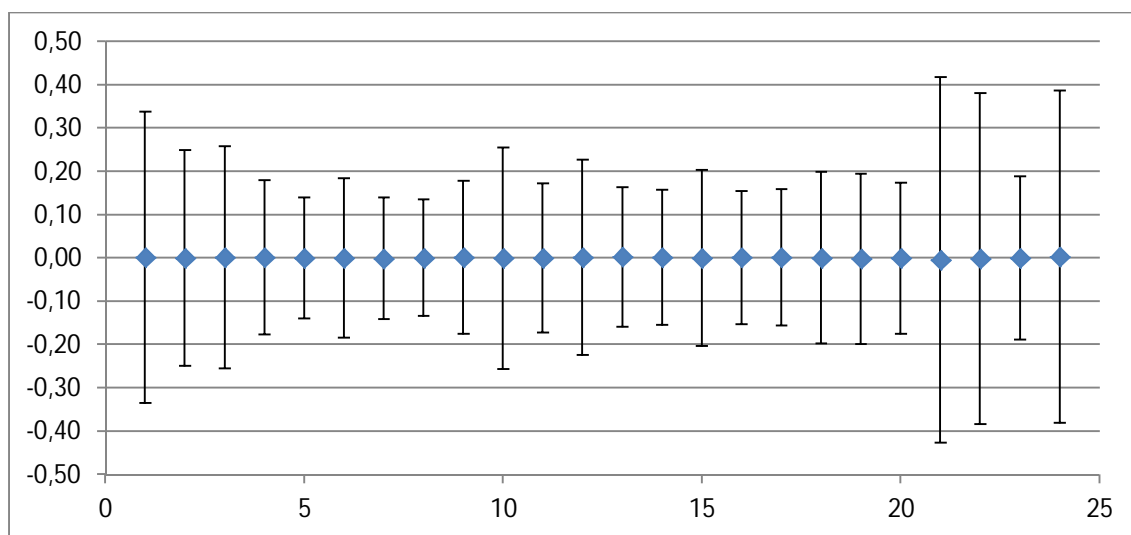
8.6.2000 longitudin virhearvot metreinä



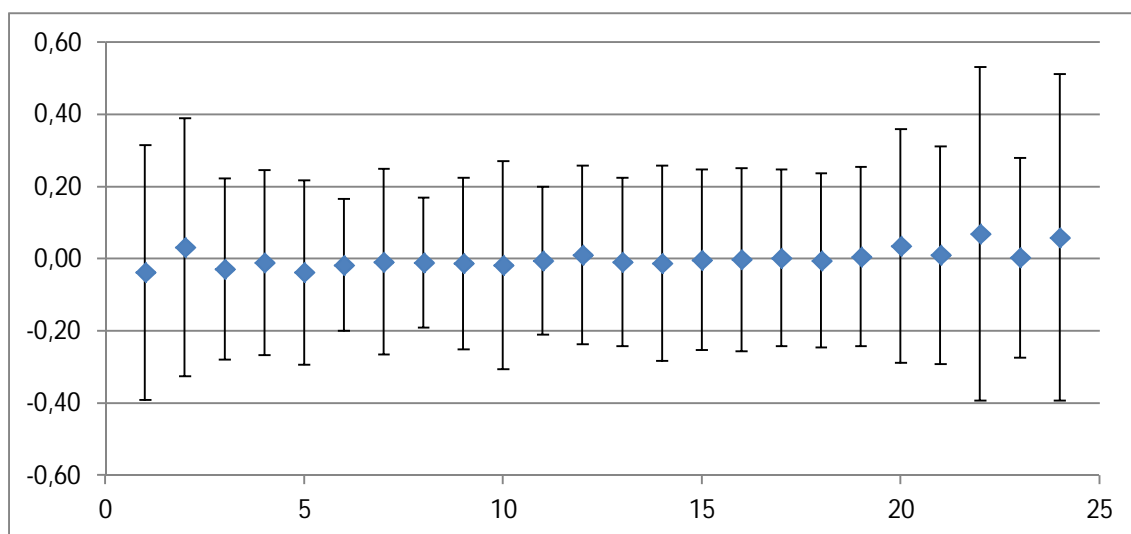
8.6.2000 korkeuden virhearvot metreinä



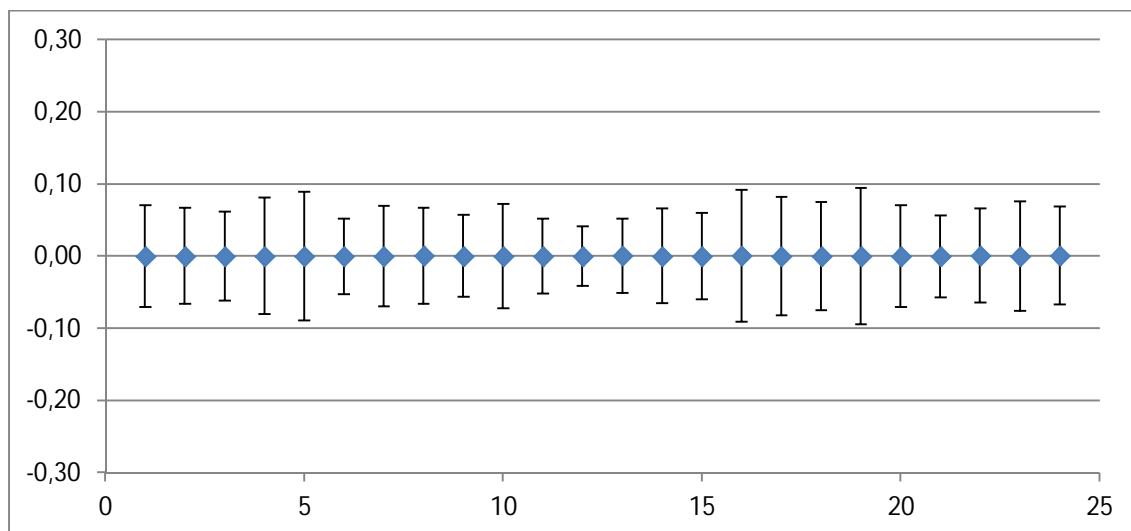
28.12.2000 latitudin virhearvot metreinä



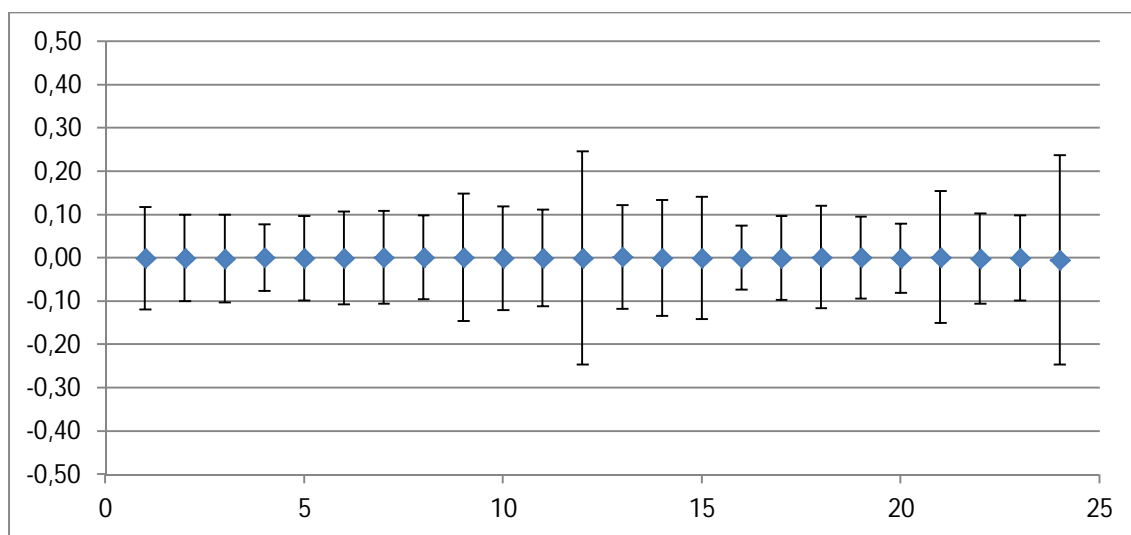
28.12.2000 longitudin virhearvot metreinä



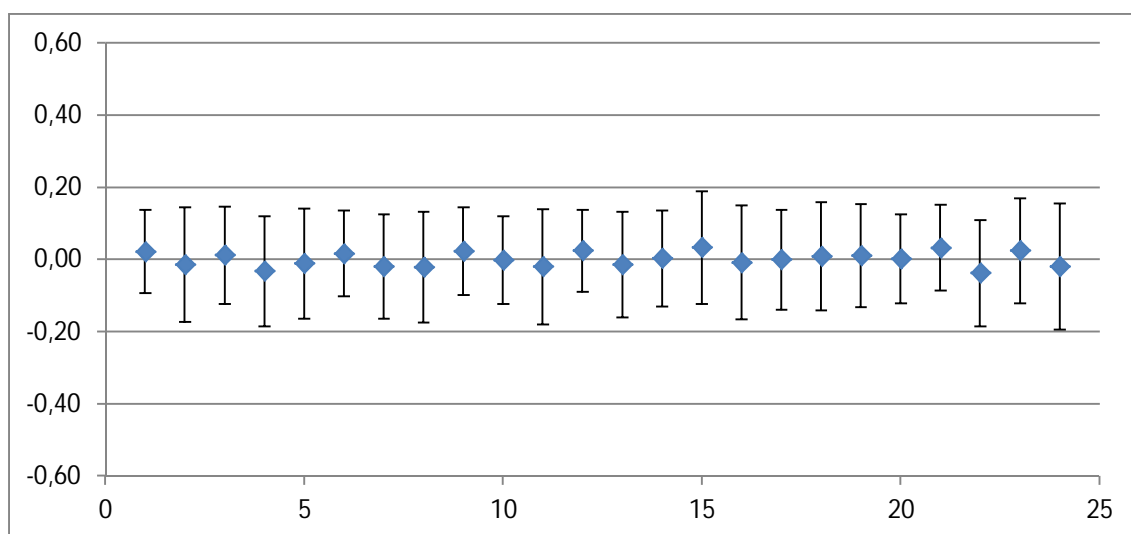
28.12.2000 korkeuden virhearvot metreinä



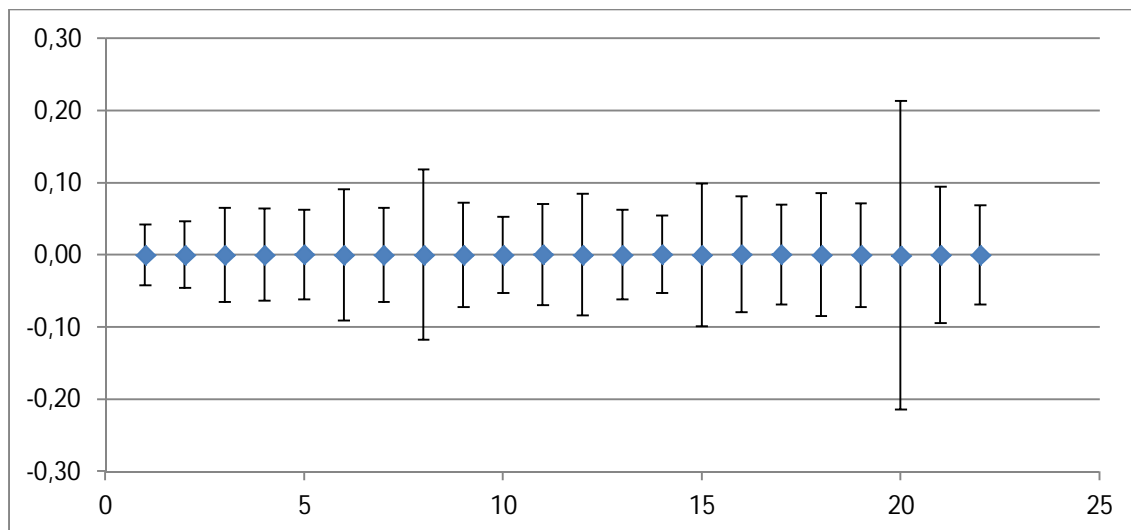
3.1.2010 latitudin virhearvot metreinä



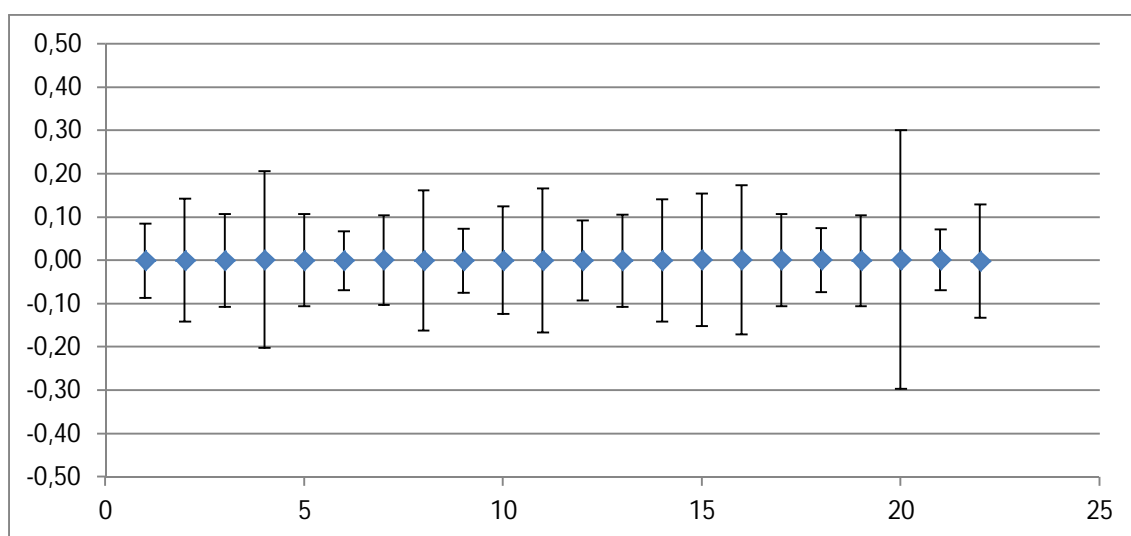
3.1.2010 longitudin virhearvot metreinä



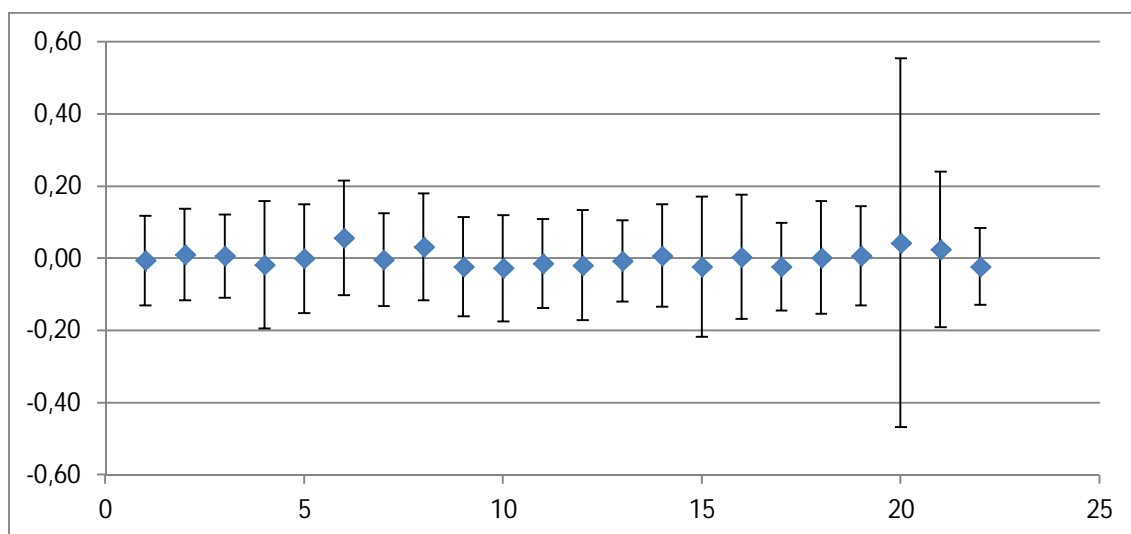
3.1.2010 korkeuden virhearvot metreinä



5.6.2010 latitudin virhearvot metreinä



5.6.2010 longitudin virhearvot metreinä



5.6.2010 korkeuden virhearvot metreinä