

PRECISE POINT POSITIONING

SOVELTUVUUS SUOMESSA

Seppo Myller

Opinnäytetyö
Maanmittausala
Alueiden käytön suunnittelun koulutusohjelma
Insinööri YAMK

2015

Alueiden käytön suunnittelu
Insinööri YAMK

Tekijä	Seppo Myller	Vuosi	2015
Ohjaaja	Pasi Laurila		
Toimeksiantaja			
Työn nimi	Precise Point Positioning Soveltuvuus Suomessa		
Sivu- ja liitemäärä	96 + 20		

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää Precise Point Positioning -mittausta ja sen soveltuvuutta mittauksiin Suomen leveysasteella. Olen suorittanut opinnäytetyötä varten omia mittauksia sekä käyttänyt kiinteiden tukiasemien dataa, jotka olen ratkaissut käyttäen Precise Point Positioning -mittausmoodia. Omissa mittauksissani olen käyttänyt referenssinä pisteen RTK-ratkaisua sekä staattisella mittaustavalla ratkaistuja koordinaatteja. Korkeus-tarkkuuden arvioimiseksi olen vaainnut korkeuden lähimmästä korkeuspultista.

Vaikka PPP-mittaus on mainittu ensimmäisen kerran jo 1970-luvulla, vasta 1990-luvulla Jet Propulsion Laboratory (JPL NASA) julkisti PPP-mittauksen teoreettisen taustan, joka ei tarvinnut erotushavaintoja tarkan paikan määrittämiseksi. Tekniikka nimettiin Precise Point Positioning, PPP. Precise Point Positioning -mittauksessa käytetään ainoastaan yhtä GNSS-vastaanotinta. JPL julkaisi ensimmäisen tutkimuksen yhden, kaksitaajuus GPS-laitteen datan laske- misesta muutaman senttimetrin tarkkuudella vuonna 1997.

Suomen leveysasteella PPP-mittaus on kuitenkin ongelmallinen. Skandinavian alueella on ollut useita jääkausia, jotka painoivat maankuorta alas. Maankuoren palautuminen ja mannerlaatan liike aiheuttavat ongelmia PPP-mittauksen paikallisissa ratkaisuissa. Jos ratkaisu halutaan laskea Suomessa käytetyissä koordinaattijärjestelmissä, mittaus on pystyttävä palauttamaan kyseisissä järjestelmissä käytettyihin epookkeihin. Esimerkiksi EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmä yhtyy kansainväliseen ITRS-järjestelmään epookkina vuosi 1989.

Precise Point Positioning -mittaus ei ole Suomessa muutoin käyttökelpoinen kuin tutkimuskäytössä. Tarkkojen koordinaattien ratkaiseminen suositusten mukaisesti on mahdotonta ilman Nordiska Kommissionen för Geodesin (NKG) kehittämää mallia. Malli ei ole kuitenkaan julkisesti jaossa. Jotkut PPP-laskentaohjelmat saattavat käyttää laskennassa yleisiä tektonisten laattojen malleja, kuten Morvel-mallia laattojen liikkeen laskemisessa, mutta tällöinkin skandinaavisen maankuoren vertikaalinen liike jää uupumaan laskennan ratkai- susta.

Avainsanat

GNNS, Precise Point Positioning

School of Natural Resources And
The Environment Degree Pro-
gramme in Landscape management

Author	Seppo Myller	Year	2015
Supervisor(s)	Pasi Laurila		
Commissioned by	Name of the Commissioner		
Subject of thesis	Precise Point Positioning Feasibility in Finland		
Number of pages	96 + 20		

The purpose of this thesis is to investigate Precise Point Positioning and its feasibility at the latitude of Finland. For this thesis I have made measuring's and PPP calculations using data from one GNSS receiver and downloaded data from the Finnish VRS-network. As a reference point to my own measured point I used RTK and Static solutions. For the better altitude I leveled difference of the new point from the nearest known elevation point.

While the concept of PPP was first mentioned in the 1970's, the theoretical foundation of PPP has not been published until 1997. At that time, the Jet Propulsion Laboratory (JPL) presented its first investigations on positioning within a few cm levels using dual-frequency data from single GPS receivers in post-processing

On Finnish latitude there are difficulties using PPP survey. On Scandinavia area there were several glacial epochs and the weight of the ice sheets pushed the crust deeper into the mantle. When the ice melts, isostatic rebound occurs and the crust rises to its former position before glaciation. Also the Tectonic plate movements are one of the brainteaser to be solved when try to determine Finnish coordinates in a right epoch. E.g. EUREF-FIN associates with global ITRF frame in the epoch 1989.

In Finland Precise Point Positioning is not practical in common use but only in theoretical and research survey. Given Instructions by Nordic Geodetic Commission in accurate PPP survey tells us how to determine coordinates using NKG model. However the NKG model is not in common use. Some PPP-software may use some tectonic models but the calculations are without Scandinavia isostatic rise. Some commercial software may use Tectonic plate model like Morvel 56 model when determine coordinates but nevertheless there is no isostatic rebound absent.

Key words

GPS, Precise Point Positioning

SISÄLLYS

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO.....	1
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET.....	3
1. JOHDANTO.....	13
2. POTENTIAALISET GNSS JÄRJESTELMÄT.....	17
2.1 GPS.....	17
2.2 GLONASS.....	20
3. MITTAUSMOODIT.....	22
4. PRECISE POINT POSITIONING (PPP).....	24
4.1 Rapid Precise Point Positioning/RTK.....	28
4.2 The Quasi-Zeith Satellite System-järjestelmä (QZSS).....	30
5. VIRHELÄHTEET PPP/DIFFERENTIAALI-GNSS-MITTAUKSESSA.....	33
5.1 Yleistä.....	33
5.2 Kontrollisegmentin tehtävä.....	34
5.3 Satelliitteihin liittyvät korjaukset.....	35
5.3.1 Satelliitin vaihekeskipiste ja vaihtelut.....	36
5.3.2 Satelliitin radat.....	39
5.3.3 Ryhmäviive.....	42
5.3.4 Vaiheaallon kiertymisvirheet (Wind-up).....	43
5.3.5 Sagnac vaikutus.....	44
5.4 Vastaanottimiin liittyvät korjaukset.....	45
5.4.1 Vastaanottimen vaihekeskipiste ja sen vaeltelut.....	45
5.4.2 Vastaanottimen vaiheaallon kiertyminen.....	46
5.5 Geofysikaaliset muutokset.....	46
6. TASO- JA KORKEUSJÄRJESTELMIÄ.....	48
6.1 Käsitteitä.....	48
6.2 Tasokoordinaatisto.....	52
6.3 3D-koordinaatistot.....	55
6.4 KKJ, VVJ ja ED50 koordinaattijärjestelmät.....	56
6.5 Euref-Fin.....	58
6.6 WGS84.....	60
6.7 PZ-90.....	61
6.8 ITRS/ITRF.....	62
6.9 ETRS89.....	63
7. LAATTOJEN LIIKKEET.....	65
7.1 Yleistä.....	65
7.2 Laattamallit.....	67
8. PPP-LASKENTAOHJELMISTA.....	70
8.1 Testauksissa käytettyjä ohjelmia ja laitteita.....	71
8.2 Muunnosparametrien laskenta.....	72
9. TESTAUKSIA.....	77
9.1 Testauspiste.....	77

9.2	Staattinen mittaus ja laskenta	78
9.3	Pisteen Precise Point Positioning-ratkaisu.....	81
9.4	Trimble GeoXT	82
9.5	Lisätestauksia	83
10.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	84
	LÄHTEET	87
	LIITTEET	97

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. GPS konstellaatio kuudella ratatasolla	18
Kuvio 2. GLONAS- konstellaatio kolmella ratatasolla	20
Kuvio 3. Prosessikaavio PPP mittauksen datavirrasta	25
Kuvio 4. Precise Point Positioning	26
Kuvio 5. RA-PPP asiakkaan arkkitehtuurin suunnittelu	29
Kuvio 6. US Navigation Centre PDOP arviot 2011 GPS konstellaatiolla	30
Kuvio 7. US Navigation Centre GPS-konstellaatio vuodelta 2009	31
Kuvio 8. S-QZSS kiertorata.....	31
Kuvio 9. Aasian alueen GNSS-satelliittien määrä vuoteen 2021 mennessä	32
Kuvio 10. Satelliitin efemeridi virheet	33
Kuvio 11. Valvontasegmentti sisältää maailman laajuisen GPS-valvontaverkon	34
Kuvio 12. Satelliitin antennin vaihekeskipisteen poikkeama	37
Kuvio 13. Satelliitin BLK IIA antennikalibrointi	39
Kuvio 14. Topex/Poseidon, valtamerien pinnan kartoitus	40
Kuvio 15. Relatiiviset korjaukset	43
Kuvio 16. Kiertymisvirheen korjauksen vaikutus kantoaaltoon	44
Kuvio 17. Topcon HiperPro antennipoikkeamat	46
Kuvio 18. Paikallisesti meren keskivedenpintaan vaikuttavat voimat.....	47
Kuvio 19. Vaihteluita kuinka geoidi, ellipsoidi ja maapohja voivat vaihdella.....	50
Kuvio 20. Kolmen pinnan välinen suhde	51
Kuvio 21. Geoidin pinta.....	52
Kuvio 22. Tasokoordinaatiston muodostuminen projektiokaistalle.....	54
Kuvio 23 Leikkaava ja sivuava projektiio.....	54
Kuvio 24. 3D-koorinaattijärjestelmä, oikean käden sääntö	55
Kuvio 25. I-luokan kolmioverkko, Otavan perusviiva ja suurennusverkko.....	57
Kuvio 26. KKJ kierto verrattuna EUREF-FIN koordinaatteihin.	57
Kuvio 27. GLONASSin käyttöönoton ensimmäiset tulokset EUREF-verkossa	62
Kuvio 28. ETRF2000 on hyväksytty ETRS89 konventionaaliseksi vertauskehikseksi	69
Kuvio 29. Päälaattojen rajat.	65
Kuvio 30. Afrikan ja Intian hajaantuminen	66
Kuvio 31 Euraasian laatan vaipan liikkeet	67
Kuvio 32. Euraasian laatan liikkeitä	68
Kuvio 33. Vasemmalla on laatan horisontaalinen- ja oikealla vertikaalinenliike	69
Kuvio 34. Kaksitaajuuslaskenta voi selvittää datalaskennan riippuvuudet.....	70
Kuvio 35. Neljä testausasemaa.....	71

Kuvio 36. Muunnosparametrin laskennan vaiheet.....	73
Kuvio 37. E2 asemat, joista voidaan ladata dataa.....	74
Kuvio 38. Maanmittauslaitoksen Helmert-ohjelma laskenta FGI-datalla	75
Kuvio 39. Maanmittauslaitoksen Helmert-ohjelma laskenta VRS tukiasemilla.....	75
Kuvio 40. Mittauspaikka, punainen ympyrä ilmakuvalla	78
Kuvio 41. Suurennos mittauksesta.....	78
Kuvio 42. Virtuaaliverkko	79
Kuvio 43. Tukiasemaverkon pisteet laskettava piste kolmion sisällä.	80
Kuvio 44. Signaalikatkoja mitatulla pisteellä.....	82
Kuvio 45. Trimble GeoXT tulos ETRF-koordinaatteina.....	82
Kuvio 46. Suurin ero tulee Trimblen laskennan X-komponentissa.....	83
Taulukko 1. GPS- ja GLONASS-järjestelmien eroja.....	21
Taulukko 2. Mittausmoodit	23
Taulukko 3. Virhetaulukko, PPP- ja differentiaalimittauksissa korjattavat virheet.....	28
Taulukko 4 A. IGS GPS-satelliittien rata-/kellovirheet	35
Taulukko 5. Satelliitti SVPRN 26 kellon poikkeama ja virhe	36
Taulukko 6. NGA GPS Ephemeris/Station/Antenna Offset Documentation.....	39
Taulukko 7. Kiertoratatiedon virheiden vaikutus kantavektoriin ja kantavektorin pituuden vaikutus virheeseen	41
Taulukko 8. WGS84 määrittelyn ja tärkeiden vakioiden taulukko	60
Taulukko 9. WGS84-asemien koordinaattipäivitykset	61
Taulukko 10. Pohjoismaiset parametrit kaavaan.....	76
Taulukko 11. Time to First Fix.....	79
Taulukko 12. Virtuaalipisteiden staattiseen laskennan erot verrattuina RTK-mittaukseen	80
Taulukko 13. Staattisen mittauksen erot käytettäessä virtuaalipisteitä ja tukiasemien dataa.	81
Taulukko 14. Lähtökoordinaatit.....	114
Taulukko 15. Laskennassa on käytetyt parametrit	114
Taulukko 16. Lähtöaineiston lasketut koordinaatit.....	116

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

Absoluuttinen paikannus	Yhden satelliittivastaanottimen mittaamista koodia käyttäen
Affiininen muunnos	Koordinaatistomuunnos, joka alun perin kehitettiin ilmakuvia varten, koska se pystyy ottamaan huomioon X-akselin ja Y-akselin erilaisen muuttumisen. Muoto ei säily
Ambiguity	Alkutuntematon. Kantoaallon (carrier) jaksojen tuntematon lukumäärä katkeamattomassa mitausjaksossa yksittäisen satelliitin ja vastaanottimen välillä
Base	Tunnetussa pisteessä olevaa vastaanotin, tukiasema. Differentiaalimittauksessa joko fyysinen tai virtuaalinen
BeiDou	BeiDou Navigation Satellite System, Kiinalainen satelliittipaikannusjärjestelmä. Kutsutaan myös COMPASS
Bias	Poikkeama, systemaattinen virhe
C/A	C/A-koodi, (Coarse Acquisition)
CNES	Ranskan avaruustutkimuskeskus, (The French space agency)
CORS	Kiinteä tukiasemaverkko, (Continuously Operating Reference Station)

CPH	Kantaaalloon perustuvat paikannustekniikat, (Carrier based positioning techniques)
CTRS	Vertausjärjestelmä, jossa origo sijaitsee maapallon massakeskipisteessä, (Conventional Terrestrial Reference System)
Datumi	Paikallisesti sovitettu ellipsoidi
DCB	Vale-etäisyydenvirhe jokaiseen satelliittiin C/A- ja P1-koodilla, (Differential code bias)
DGNSS	Kahteen laitteeseen perustuva GNSS mittaus. On olemassa useita DGNSS mittauksia kuten perinteinen koodiin perustuva DGPS, reaaliaikainen RTK ja laaja-alainen reaaliaikainen WARTK, (Differential GNSS)
Differentiaalinen paikannus	Kahden laitteen mittauksia, joista toinen on korjausdataa lähettävä tukiasema
DOP	Dilution of Precision, kuvaa mittauksen geometria-arvoja ja niiden vaikutusta mittaukseen
DST	Merenpinta ei ole tasainen vaan voi vaihdella jopa kaksi metriä johtuen valtameren liikkeestä, lämpötilasta ja suolapitoisuudesta, (Dynamic Sea Surface Topography)
ECEF	Maahan sidottu, maakeskeinen (Earth Centered Earth Fixed)
Ellipsoidi	Sovitettu maan matemaattinen malli. Globaaleissa järjestelmissä geosentrinen

Epoch	Epookki, tarkka ajanhetki
ESA	Vuonna 1975 perustettu Euroopan avaruusjärjestö, (European Space Agency)
ETRS89	Yleiseurooppalainen koordinaattijärjestelmä, (European Terrestrial Reference System)
ETRS-GK	Suomalainen 1° - levyinen 13-kaistainen taso-koordinaatisto
ETRS-TM35FIN	Suomalainen tasokoordinaatisto jossa Suomi on yhdessä kaistassa 27°
EUREF-FIN	Suomalainen ETRS89 realisaatio, (European Reference Frame-Finland)
Formaatti	Tiedostomuoto, yleensä laite- ja ohjelmakohtainen
Frame, F	Koordinaatisto on sidottu maankuoreen, esimerkiksi Euref-Fin
GALILEO	Galileo Galilein mukaan nimetty eurooppalainen satelliittipaikannusjärjestelmä
Geoidi	Tasapainopinta, joka yhtyy meren keskiveteen kun siitä on poistettu kaikki siihen vaikuttavat voimat
GLONASS	Venäläinen satelliittipaikannusjärjestelmä, (Globalnaja navigatsionnaya sputnikovaya sistema)

GNSS	Maailmanlaajuinen satelliitti-navigointi-järjestelmien yhteisnimitys, (Global Navigation Satellite System)
GPS	Amerikkalainen satelliittipaikannusjärjestelmä, (Global Positioning System)
Helmert-muunnos	Koordinaattimuunnos on yhdenmuotoisuusmuunnos jossa X ja Y käsitellään samankaltaisesti. Muoto säilyy, mutta pisteiden sijainti, orientointi ja mittakaava yleensä muuttuvat
ICMS	Organisaatio, joka johtaa, koordinoi ja tuottaa standardeja maanmittaukseen, kartoitukseen, merenkulkuun ja kansallisiin tiedostoihin, (The Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping)
IERS	Organisaatio, joka palvelee tähtitieteellisiä, geodeettisia ja geofysikaalisia yhteisöjä koskien maan pyörimisliikkeen ja vertaisjärjestelmien dataa ja standardeja, (International Earth Rotation and Reference System Service)
IGN	Ranskalainen kansallinen maantieteellinen laitos, (Institut Géographique National)
IGS	Kansainvälinen GNSS palvelu, joka tarjoaa erilaisia GNSS palveluita, (International GNSS Service)
Inertiakehys	Inertiaalikoordinaatisto, vertauskehys, joka kuvaa ajan ja paikan suunnasta ja ajasta riippumattomasti

IOC	Alustava operatiivinen valmius, (Initial Operational Capability)
ISC	Uusi parametrikorjaus koskien GPS-satelliitin signaalin muodostumista ja lähetystä, (Inter Signal Correction)
ITRF	Kansainvälisen maakeskeisen järjestelmän realisaatio, (International Terrestrial Frame)
ITRS	Kansainvälinen maakeskeinen järjestelmä, (International Terrestrial Reference System)
JPL	NASAn hallinnoima avaruustekniikkakeskus, (Jet Propulsion Laboratory)
KKJ	Suomalainen kartastokoordinaattijärjestelmä
Konstellaatio	Tähtikuvio, kuten esimerkiksi Otava. Satelliitteja voidaan pitää myös keinotekoisina tähtinä ja konstellaatio määrittää niiden aseman avaruudessa
Koordinaattijärjestelmä	Systeemi (System), jonka origo ja koordinaattiakselien orientointi on määritetty. Ei välttämättä sidottu maankuoreen
LLR	Kuulaseri, (Lunar Laser Ranging)
LOD	Päivän pituus, jokaisen päivän ajanhetken väli jolloin auringon ylimmän kehrän asteluku ylittää horisontin ja laskee taas horisontin alapuolelle, (Length-of-Day)

LSL	Käytetään usein viitattaessa meren keskiveteen, josta lasketaan korkeuksia, vertikaalisia datumeja, (Local Sea Level)
mas	Kaarimillisekunti
MEO	Alue avaruudessa maapallon ympärillä 2000–35786 km korkeudella matalan kiertoradan ja geostationäärisen radan välissä, (Medium Earth orbit)
Mittausmoodi	Satelliittimittauksen mittautapa
MML	Suomen Maanmittauslaitos
MP-ohjelma	Mission Planning-ohjelma, jolla suunnitellaan mittauksen satelliitti-ikkunan mittausajankohtia DOP-arvojen suhteen
MSC	Master Control Station toimittaa ja generoi komennot navigointiviestiin ja kontrolloi GPS konstellaatiota
N60	Suomalainen korkeusjärjestelmä, joka perustuu toiseen tarkkavaaitukseen ja sen perusteella vuoden 1960 mukaisesti laskettuihin korkeuksiin
N2000	Korkeusjärjestelmä, joka perustuu kolmanteen tarkkavaaitukseen. Järjestelmän lähtötasona on Amsterdamin nollapiste (Normaal Amsterdam's Peil, NAP)

NASA	Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto, (National Aeronautics and Space Administration)
NAVIPEDIA	European Space Agencyn perustama GNSS tiedonjakelukanava Internetissä
NGA	Organisaatio, joka jakaa hankkimaansa geospaatialista tietoa päättäjille, tiedusteluorganisaatioille, sotilaslentäjille ja niin edelleen (National Geospatial-Intelligence Agency)
PCV	Vaihekeskipisteenvaeltelu, (Phase Center Variation)
PM	Maan napa-akselinliike maanpinnan leikkauskohdassa, (Polar Motion)
PNT	Kolmen erillisen osan, paikanmäärityksen, halutun sijainnin ja ajan yhdistelmä, (Positioning, Navigation, and Timing)
POD	Tarkan ratatiedon määrittäminen perustuu yleensä maa-asemien jälkilaskentaan ja avaruudessa olevien laitteiden datan yhdistelmään, (Precise Orbit Determination)
ppb	miljardiosa (10^{-9})
PPP	Tarkka paikannusmoodi, jossa käytetään yhtä vastaanotinta, (Precise Point Positioning)
PPP Direct	Internetin yli käytettävä Precise Point Positioning-laskentaohjelma, (Natural Resources Canada)

PPS	Erittäin tarkka sotilaallinen paikanmääritys L1/L2 taajuudella käyttäen (P/Y) koodia ja salatua navigointidataviestiä, (Precise Positioning Service)
PR	Näennäisetäisyyteen perustuvat paikannustekniikat, (Pseudorange based positioning techniques)
Pseudorange	Mitatun kulkuajan perusteella laskettu etäisyys satelliitista, näennäisetäisyys, "vale-etäisyys"
RINEX	GNSS-havaintodatan yleinen tiedostomuoto, (Receiver Independent Exchange Format)
Rover	Liikkuva vastaanotin, joka saa yleensä korjausdataa Base-asemalta differentiaalimittauksessa
RTK	Reaaliaikainen liikkuva mittaus (Real Time Kinematic)
SA	Rajoitettu saatavuus, USA:n puolustusministeriön mahdollisuus huonontaa absoluuttista paikannustarkkuutta huonontamalla tarkoituksellisesti signaalia. Differentiaaliset (differential GPS) ja relatiiviset (relative positioning) menetelmät poistavat SA:n vaikutuksen lähes kokonaan (Selective Availability)
SLR	Satelliittilaser

SiS	GNSS signaali avaruudessa, (Signal in Space)
SPP	Yhden vastaanottimen absoluuttinenmittaus, (Single Point Positioning)
SPS	GPS-järjestelmä L1 taajuudella lähettämä C/A koodiin perustuva navigointidataviesti, (Standard Positioning Service)
System, S	Koordinaattijärjestelmä, joka sisältää määrittelyt origosta ja koordinaattiakselien orientoinnista mutta ei ole välttämättä sidottu maankuoreen, esimerkiksi WGS84
TEC	Elektronien pylväsmäinen tiheys esimerkiksi ionosfäärissä, (Total Electronic Content)
TECU	Elektronien tiheyden kokonaisluku vastaanottimen ja satelliitin välillä. Total Electron Content Unit, $1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16} \text{ elektronia/m}^2$
TGD	Suuntavirhe-ero jokaisen satelliitin P-koodin lähettämisessä L1 ja L2 taajuuksilla, (Timing Group Delay)
TRS	Avaruudellinen vertausjärjestelmä, joka pyörii maan mukana sen liikkuesssa päivittäin avaruudessa, (Terrestrial Reference System)
UNAVCO	Voittoa tuottamaton yliopistojen yhteenliittymä helpottamaan geodesian tutkimista ja opetusta
YKJ	Suomalainen yhtenäiskoordinaatisto, jossa Suomi on yhdessä kaistassa, 27°

VLBL	Tekniikka, jolla määritetään maan vertausjärjestelmiä käyttäen hyväksi tähtiä ja ennustetaan maan orientaation vaihteluita, (Very Long Baseline Interferometry)
VRS	Virtuaalinen tukiasema, käytetään tarkoitettaessa myös virtuaalista tukiasemajärjestelmää, (Virtual Reference Station)
WGS84	Satelliittikoordinaattijärjestelmä, jonka origo on maanmassakeskipiste, (World Geodetic System84)

1. JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia Precise Point Positioning-mittausta (PPP) ja siihen välillisesti tai suoraan vaikuttavia ilmiöitä, sekä analysoida opinnäytetyötä varten suoritettuja mittauksia ja laskentoja. Opinnäytetyöni aiheen, Precise Point Positioning, sain yliopettaja Pasi Laurilan ilinc-luennolla 4.2.2014. Koska en ollut aikaisemmin perehtynyt PPP-satelliittimittaustapaan, halusin selvittää mistä kyseisessä mittauksessa oli kysymys.

PPP-mittauksen suomenkielisten kirjallisten lähteiden puuttumisen vuoksi, käytän lähteinä omien testausteni lisäksi enimmäkseen englanninkielisiä sähköisiä lähteitä. Käsittelen opinnäytetyössäni GPS- JA GLONASS-järjestelmiä suhteellisen vähän keskittyen niihin seikkoihin, jotka vaikuttavat myös PPP-mittaukseen, kuten esimerkiksi mittaajasta riippumattomiin virheisiin. Suomenkielisten vakiintuneiden termien puuttumisen vuoksi, käytän myös osin englanninkielisiä ilmaisuja, joita ole avannut tekstissä kyseisessä kohdassa.

Kun ryhdyin keräämään tietoa Precise Point Positioning mittauksesta, huomasin että kyse ei ole suinkaan uudesta mittaustekniikasta. Osa tiedosta oli jo 1990-luvulta, eli GPS:n alkutaipaleelta. GPS vapautui siviilikäyttöön 1990-luvun puolessavälissä. Yhdysvaltain presidentti Bill Clinton ilmoitti vuonna 1996, että GPS on kaksoiskäyttöjärjestelmä. GPS oli siten sekä sotilaallisen-, että myös rauhanomaisen siviilikäytönjärjestelmä. Tämä oli suoraa jatkoa presidentti Reaganin ilmoitukseen vuonna 1984, että GPS tullaan vapauttamaan vapaaseen siviilikäyttöön.

Clintonin ilmoitus 1996 tarkoitti käytännössä SA-häirinnän poistamisen alkua. SA-häirintä käännettiin pois päältä Clintonin toimesta toukokuussa 2000. Häirinnän poiskytkeminen ei vielä kuitenkaan tarkoittanut, ettei häirintää voitaisi aloittaa uudestaan. USA:n hallituksen vuonna 2007 antaman ilmoituksen mukaan GPS-järjestelmän kolmannen sukupolven satelliittien modernisoinnin yhteydessä mahdollisuus siviilisignaalin tarkoitukselliseen häirintään on tarkoitus poistaa kokonaan (The White House, 2007). USA:n hallituksen virallisen GPS

sivujen mukaan maaliskuussa 2014, GPS III satelliittien laukaisut tullaan aloittamaan vuonna 2016 (GPS.gov, 2014).

Suomessa PPP-satelliittimittaus on melkein unohdettu mittausmoodi. Syinä tähän on ollut PPP-mittauksen ongelmallisuus Suomessa. Kattava valtakunnallisten pisteiden verkosto, johon mittaus on pystytty sitomaan suhteellisen helposti, sekä nopeasti yleistynyt reaaliaikainen mittaus (RTK). Aluksi RTK-mittauksessa käytettiin omia tukiasemia, mutta nopeasti mittaus alkoi muuttua verkkomittaukseksi, jolloin omia tukiasemia ei enää tarvittu. Ensimmäinen verkkopalvelu Suomessa oli vuonna 2000 Geotrim Oy:n Trimble VRS-teknologiaan perustuva tukiasemaverkkojärjestelmä. Valtakunnalliseksi VRS-verkko tuli vuonna 2005, ja nyt käytössä on jo VRS:n viides sukupolvi (Heiskanen, 2014).

Aikaisemmin satelliittimittauksissa käytettiin valtakunnallisena lähtöpisteistönä kartastokoordinaatistojärjestelmää (KKJ). Nykyisin käytetään, joko kolmio- tai osittain myös satelliittimittauksiin perustuvia KKJ-koordinaatistoja, tai satelliittimittauksiin perustuvia ETRS-koordinaatistoja. ETRS-koordinaattijärjestelmät ovat satelliittimittauksen koordinaattijärjestelmään, WGS84, nähden vähemmän epäkeskisiä, kuin KKJ. ETRS-koordinaatistojen valtakunnalliseen käyttöönnottoon johtivat Suomessa osittain myös ulkopuoliset paineet yhtenäisestä koordinaatistosta Euroopassa. Maanmittauslaitos siirtyi pelkästään ETRS-koordinaatistojen käyttöön vuonna 2010. Siirtymisen myötä Maanmittauslaitos lopetti KKJ-koordinaatiston tuen palveluissaan alkuvuonna 2013 (Maanmittauslaitos, 2012). Merenkulku ja lentoliikenne olivat jo aikaisemmin siirtyneet uusiin järjestelmiin.

Satelliittimittauksen koordinaattijärjestelmä WGS84 on globaali ECEF-koordinaatisto huolimatta valitusta mittausmoodista. PPP-mittaus on periaatteessa absoluuttisen paikannuksen kaltaista mittaamista siinä suhteessa, että mittauksessa käytetään ainoastaan yhtä vastaanotinta. Verkkomittaus tai jälkilaskentaan perustuvat mittaukset ovat kantoaallon vaihehavaintoihin perustuvaa differentiaalimittausta, eli kahden laitteen mittausta. Toinen laite voi olla fyysisen laitteen sijasta pelkkä laskennallinen virtuaalinen piste, kuten VRS-mittauksen virtuaalipiste.

RTK-verkkomittaus on tapahtunut Suomessa alusta asti EUREF-FIN koordinaatistossa ja käyttäjä on valinnut ainoastaan koordinaattimuunnoksen WGS84:stä siihen järjestelmään, jota hän käyttää työssään. Aluksi verkkomittauksessa käytettiin yleisiä muunnosparametreja liikkuvan Rover-laitteen paikan laskennassa. Parametrien käytössä ongelmia aiheuttivat KKJ:n paikalliset vääristymät, jotka esimerkiksi Pohjois-Karjalan Ilomantsin Parppeinvaaralla olivat noin 20 senttimetriä. Kun verkkomittauksessa otettiin käyttöön affiininen muunnos, mittauksesta tuli tasalaatuista ja mm. Parppeinvaaran koordinaatit olivat ”tarkkoja” mitaustyylin mukaisesti.

Mittaajana keskityn opinnäytetyössäni myös niihin ongelmiin, joita mittaajat saattavat kohdata PPP-mittausmoodissa. Kun ryhdyin kirjoittamaan tätä opinnäytetyötä, minulla oli ennakko-oletukset, jotka olivat syntyneet perehtyessäni aiheeseen. Löysin Suomesta ainoastaan yhden samaa asiaa käsittelevän tutkimuksen, Ismo Mehtälän maanmittausalan AMK-insinööriyön Metropolian ammattikorkeakoulussa vuodelta 2012. Ohjaajina tässä työssä olivat professori Markku Poutanen ja yliopettaja Vesa Rope. Käsittely opinnäytetyössä oli melkein kokonaan teoreettinen. Muut aineistot, joihin perehdyin, ovat ulkomaisia tutkimuksia, raportteja ja artikkeleita. Opinnäytetyössä käytetyt kaavat ja selitykset ovat suoraan lähteistä, eikä niitä ole muutettu.

Ratkaistessani omia mittauksiani huomasin nopeasti, että teoria ja käytäntö ovat kaksi eri asiaa. Kohtaamiani ongelmia käyn läpi tämän opinnäytetyön kyseisissä kohdissa. Johtopäätöksissä vastaan retoriseen kysymykseen ”Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End?” (Rizos, Janssen, Roberts & Grinter, 2012, 1)

Itse vertaisin PPP mittauksia joessa kulkevalle tukkinipulle mitattuihin pisteisiin. Pisteiden keskinäinen sijainti ei muutu, mutta koko ajan maisema rannalla vaihtuu. Kun pisteet mitataan uudestaan, meidän on pyrittävä saamaan rantanäkymä samaksi, kuin se oli ensimmäisen kerran pisteitä mitattaessa. Tämä tarkoittaa, että mittaus on ”palautettava” siihen ajanhetkeen, missä maisema ei ole vielä vaihtunut. Tämän epookin ratkaiseminen on PPP-mittauksen ongelmakohta alueilla, kuten Suomessa ja muissa pohjoismaissa, jossa maankuori on pai-

nunut alaspäin jääkausien vaikutuksista ja palautuu hiljalleen takaisin alkuperäiseen asemaansa. Tämä maankuoren vertikaalinen liike on myös otettava mitta-alueella huomioon Euraasian laatan horisontaalisen liikkeen lisäksi.

2. POTENTIAALISET GNSS JÄRJESTELMÄT

2.1 GPS

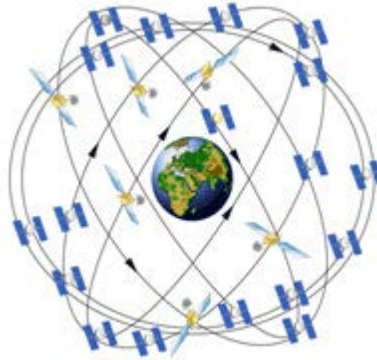
Lokakuun neljäntenä päivänä vuonna 1957 ihminen astui avaruusaikaan, kun Neuvostoliitto laukaisi ensimmäisen Sputnik satelliitin (Marreiros 2012, 1). Tästä alkoi molempien suurvaltojen kilpajuoksu avaruuteen. Yhdysvaltojen 1970-luvulla kehittämää sotilaallista radionavigointi järjestelmää GPS, voidaan pitää kylmänsodan lopputuloksena. Atomiaselaiden sukellusveneisiin siirtymisen myötä tarvittiin, ei pelkästään kohteen tarkat koordinaatit, vaan tieto myös siitä, mistä ohjus laukaistaan. Ominaisuuden oli oltava maapallon kattava, riittävän tarkka sotilaalliseen käyttöön ja sen oli oltava käytettävissä 24/7.

Entiset maanpäälliset radionavigointijärjestelmät olivat helposti löydettävissä ja siten häiritävissä, tai kokonaan tuhottavissa. Maapallon kaarevuus aiheutti myös maanpäällisen signaalin rajoittuneen kantaman. Ensimmäisen kerran GPS oli käytössä taisteluolosuhteissa 1990–1991 Persianlahden sodassa, (Pace, Frost, Lachow, Frelinger, Fossum, Wassem & Pinto 1995, 265).

GPS on 24 tuntia vuorokaudessa toimiva joka sään paikannus- ja navigointijärjestelmä, jota hallitsee ja käyttää Yhdysvaltojen puolustusministeriö (US Department of Defense, DoD). Ensimmäisten neljän Block-I satelliitin laukaisun jälkeen 22.2.1978, järjestelmä alkoi tarjota maailman laajuisesti 4-dimensio-naalista (XYZT) paikannus-, navigointi- ja ajoituspalvelua (PNT). Sotilaallisen järjestelmän siviilikäyttö oli vielä tuolloin rajoittunut.

Seuraavat seitsemän aikaisempia kehittyneemmät Block-I satelliitit laukaistiin vuoteen 1985 mennessä laajentamaan PNT-konstellatiota. Seuraava GPS vaihe alkoi 14.2.1989, kun Block-II satelliitit laukaistiin radoilleen. Näiden jälkeen laukaistiin nopeassa tahdissa lisää Block-II ja Block-IIA satelliitteja, kunnes vuonna 1994 saavutettiin suunniteltu 24 satelliitin konstellatio (kuvio 1). Joulukuun 8 päivä 2013 vietettiin järjestelmän IOC:n (Initial Operational Capability) kahdetkakymmenettä vuosipäivää. IOC tarkoitti, että kaikki satelliitit olivat operationaalisia ja yksilöllisillä medium Earth orbit (MEO) radoillaan tarjoten

Standard Positioning Service (SPS) palvelua siviilikäyttöön ja Precise Positioning Service (PPS) palvelua sotilaskäyttöön oikeutetuille. United States Air Force Space Command (AFSPC) ilmoitti testien jälkeen 27.4.1995, että Full Operational Capability (FOC) on saavutettu. (Air Force Space Command, 2014.)



Kuvio 1. GPS konstellaatio kuudella ratatasolla (Cai 2009, 8).

Jos Reginald Fessendenin radioaaltokokeiluja oskillaattorilla vedenalaisen kohteen paikan määrittämiseksi vuonna 1912 voidaan pitää ensimmäisenä radioaaltoja paikannukseen käyttävänä tapahtumana, niin oli kulunut noin 80 vuotta kun sama tehtiin avaruudesta 24 satelliitin keinoin. Tälle tekemälleni tulkinnalle löysin ainoastaan yhden vahvistavan lähteen Kenan Instituutin Spatial Logistics Technology GIS/GPS, History: GPS Timeline sivulta vuosi 1912 (Kenan Institute 2014).

Air Force sai 15.6.2011 valmiiksi "Expandable 24"- nimisenä tunnetun konstellaation laajennuksen. Satelliittien kahdestakymmenestä neljästä radasta kolme laajennettiin, sekä kuusi satelliittia sijoitettiin uudelleen siten, että kolme ylimääräistä satelliittia saatiin osaksi konstellaatiota. Tämän tuloksena GPS satelliitteja on nyt 27 paremman peiton saamiseksi maapallolle (GPS.gov Space Segment 2014.) Satelliittien määrän lisääminen helpottaa pohjoisella pallonpuoliskolla mittaamista ja samalla se on myös osittainen myönnytys vaatimuksille satelliittien määrän lisäämiseksi kolmeksi kymmeneksi.

Se mistä alkaen satelliittijärjestelmiä alettiin kutsua yhteisnimellä Global Navigation Satellite System (GNSS) ei ole helppo määritellä. Löysin ainoastaan yhden lähteen GNSS – Global Navigation Satellite Systems (Hofmann-Wellenhof,

Lichtenegger, Wasle 2008, Foreword), jossa oli maininta asiasta. Kirjan esipuheessa oli maininta YK:n asiakirjasta A/CONF.184/BP/4 vuodelta 1998, jossa on mainittu GNSS. Kyseistä asiakirjaa en kuitenkaan löytänyt, mutta 19–30.8.1999 Wienin kokouksen asiakirjassa A/GONF.184/6 (United Nations General Assembly 1999, 2) on myös maininta GNSS, joten ainakin vuonna 1999 käytettiin jo nimitystä GNSS.

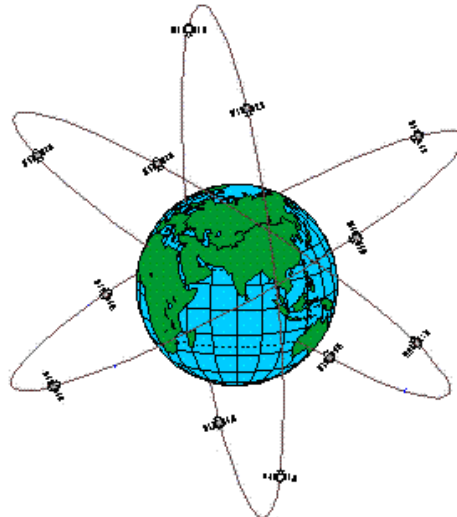
Aikaisemmin yhteiskäyttöjärjestelmävastaanottimista käytettiin nimitystä GPS+GLONASS. Alfred Kleusbergin kirjoituksessa ”Comparing GPS and GLONASS” GPSWorld-lehdessä (Kleusberg 1990) vuodelta 1990 ei mainita vielä GNSS laitteita, kuten ei myöskään Ashtechin GG24 OEM BOARD & SENSOR GPS+GLONASS reference manuaalissa (Ashtech 1997). Novatelin Millenium-GLONASS GPS-kortin User Manuaalissa (Novatel 1999) käytetään jo termiä GNSS. Edellä mainitut tukevat sitä päätelmää, että vuosi 1998 olisi vuosi, jolloin alettiin puhua GNSS-termillä.

Rajanvetona GPS vai GNSS voitaisiin pitää UNAVCO:n määritelmiä, ”What is the difference between GPS and GNSS” vuodelta 2014: ”GNSS on yleisnimi satelliittijärjestelmille, jotka tuottavat geospaattiaalista sijaintia maailman laajuisesti. Termi pitää sisällään mm. GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou ja muut alueelliset järjestelmät. Termi GPS määrittää USA:n GNSS-järjestelmän, ja GLONASS määrittää venäläisen GNSS järjestelmän” (UNAVCO 2014.) Ainoastaan nämä kaksi järjestelmää ovat täysin operationaalisessa kunnossa (Marreiros 2012, 1).

Uusien satelliittijärjestelmien käyttö globaalissa satelliittimittauksessa ei ole vielä mahdollista satelliittien vähäisyyden vuoksi, vaikka nykyaikaiset vastaanottimet voisivatkin hyödyntää kyseisten järjestelmien signaalia. BeiDou-järjestelmän arvellaan olevan toiminnassa vuonna 2020 ja Galileon vuosien 2018–2020 välillä (Geodeettinen laitos 2014). UNAVCO pitää Intialaista IRNSS- ja Japanilaista QZSS-järjestelmää paikallisina (UNAVCO 2014), jolloin niiden käyttö globaalisti ei ole itsestäänselvyys.

2.2 GLONASS

GLONASS on venäläinen vastine GPS järjestelmälle. Ensimmäiset satelliitit ammuttiin 1982. Konstellaatio on 24 satelliittia (kuvio 2), jotka lähettävät jatkuvasti signaalia kahdella taajuudella. Signaaleilla voidaan määritellä käyttäjän sijainti ja nopeus missä tahansa maapallolla käyttäen etäisyys- ja kantoaaltohavaintoja. GLONASS satelliitit tunnistetaan hiukan toisistaan poikkeavien signaalitaajuuksien perusteella. Vuonna 1996 GLONASS järjestelmä oli täydessä operatiivisessa kunnossa. Lyhyemmän elinkaaren ja varojen puutteen vuoksi GLONASS satelliitti-konstellaatio putosi seitsemään satelliittiin vuonna 2001. Uuden 24 satelliitin operatiivisen kunnan järjestelmä saavutti taas vuonna 2010.



Kuvio 2. GLONASS- konstellaatio kolmella ratatasolla (Cai 2009, 10).

Verrattaessa (taulukko 1) näitä kahta järjestelmää GPS ja GLONASS, GPS:n tarkkuus on huomattavasti parempi (RF and Wireless Vendors and Resources 2012). Testien perusteella GLONASS järjestelmän tarkkuus on noin 3 metriä ja GPS-järjestelmän tarkkuus on noin 1.8 metriä. GLONASS monitorintiasemat ovat enimmäkseen Brasiliassa ja Etelämantereella Venäjän lisäksi, kun taas GPS-asemia on ympäri maapalloa. Vastaavasti GLONASS-järjestelmä on etulyöntiasemassa pohjoisilla leveysasteilla. GLONASS-järjestelmän tarkkuus tulee paranemaan, kun suunnitelmat lisätä maa-asemia viiteenkymmeneen asemaan toteutuvat. (LiveViewGPS 2014.) GLONASS-järjestelmän modernisointiin vuonna 2003 kuuluivat uudet GLONASS-M-satelliitit, joiden elinkaari on nostettu

seitsemään vuoteen ja uuden siviilitaajuuden lisääminen L2 taajuudelle navigoinnin parantamiseksi.

Vuonna 2011 laukaistiin ensimmäinen kolmannen sukupolven GLONASS-K1-satelliitti ja toinen satelliitti laukaistiin vuonna 2014. Suunniteltu elinkaari K1-satelliiteilla on 10 vuotta. GLONASS-KM-satelliittien laukaisut alkavat vuoden 2015 jälkeen ja ne voivat lähettää myös L5-taajuutta. K-satelliitit voivat lähettää molempia, vanhaa FDMA (Frequency Division Multiple Access), sekä CDMA (Code Division Multiple Access) signaalia, joka on GPS-signaali, (Esa Navipedia 2015.)

Taulukko 1. GPS- ja GLONASS-järjestelmien eroja (mukaillen RF and Wireless Vendors and Resources 2012)

Erittely	GPS	GLONASS
Ratatasot	kuusi ratatasoa 60 asteen välein	3 ratatasoa 120 asteen välein
Satelliitteja/ ratataso	neljä epätasaisesti jakaantuneina	kahdeksan epätasaisesti jakaantuneina
Ratakaltevuus	55 astetta	64.8 astetta
Ratasäde	26560 km	25510 km
Kiertoaika	noin 11h58min (1/2 tähtivuorokautta)	11h16min
Satelliitti ylittää saman pisteen maanpinnalla	joka tähtivuorokausi	joka kahdeksas tähtivuorokausi
Kantoaalto	L1 1575.42 MHz, L2 1227.60 MHz	L1 (1602+k*9/16) MHz, L2 (1246+k*7/16)MHz. k on kanavan numero
Koodit	eri joka satelliitilla, C/A-koodi L1 (uusimmat satelliitit L1 ja L2) ja P-koodi L1/L2	sama joka satelliitilla C/A-koodi L1 (uusimmat satelliitit L1 ja L2) ja P-koodi L1/L2
Koodin taajuus	C/A-koodi – 1.023 MHz ja P-koodi 10.23 MHz	C/A-koodi – 0.511 MHz ja P-koodi 5.11 MHz (puolet GPS:stä)
Kellodata	GPS kellodata sisältää kellopoikkeaman, taajuuspoikkeaman, taajuustason, ja mahdollistaa GPS satelliitin ja GPS järjestelmän välisen ajanpoikkeaman laskennan	lähetetty kello- ja taajuuspoikkeama tuottavat erot GLONASS satelliitin ja GLONASS järjestelmän välillä
Ratatieto	muokatut Keplerin rataelementit joka tunti	Satelliitin sijainti, nopeus ja kiihtyvyys joka ½ tunti

3. MITTAUSMOODIT

GNSS-järjestelmän paikannukseen on kaksi tapaa. Paikannuksessa voidaan käyttää pisteen paikannusta tai suhteellista pisteen paikannusta. Pisteen paikannus, joka tunnetaan myös absoluuttisena, standalone-mittauksena, käyttää ainoastaan yhtä vastaanotinta ja mittauksen ratkaisussa käytetään pelkästään signaaliin moduloitua koodia. Suhteellinen paikannus käyttää kahta, tai useampaa GNSS-vastaanotinta satelliittien signaalien seuraamiseen. Mittauksen ratkaisemiseksi suhteellisessa ratkaisussa käytetään koodin lisäksi myös kantoaaltoa. Ratkaisussa lasketaan ns. kolmiulotteinen avaruusvektori base- (tuki-) ja rover-aseman (liikkuva asema) välille.

Absoluuttisen mittauksen tarkkuus voi olla siviilien C/A-koodilla parhaimmillaan kolme metriä (mittauksessa voidaan lukea koodia 1 %:n tarkkuudella ja C/A-koodi on noin 300 metriä pitkä) ja huonommillaan 10 metriä tai enemmän johtuen mittauksen virhelähteistä. Sotilaiden käyttämä koodi on noin 30 metriä pitkä, jolloin sen tarkkuus voi olla parhaimmillaan kymmenesosa siviilien tarkkuudesta. Huolimatta, että luentatarkkuus kasvaisi nykyisin 0.1 %:n tarkkuuteen (Hofmann-Wellenhof ym. 2008, 106), näillä tarkkuuksilla ei voida kuitenkaan suorittaa geodeettisia senttimetriluokan mittauksia. Lisäksi on huomioitava, että luentatarkkuus ja mittauksen koordinaattien tarkkuus on kuitenkin eri asia.






Kaikki tarkimmat GNSS-mittaukset perustuvat suhteelliseen mittaustapaan, jossa rover-laite ratkaisee oman sijaintinsa base-aseman suhteen. Nykyisin RTK-mittauksessa käytetään oman tukiaseman sijasta verkkomittausta, jossa oma base-asema on korvattu palveluntarjoajien eri tekniikoihin perustuvilla korjauspalveluilla. Tällä hetkellä Trimblen VRS-verkko ja Leica SmartNet ovat Suomessa ainoat verkkopalvelut, jotka pystyvät tuottamaan senttimetriluokan tarkkuutta RTK-mittauksessa. Kaikkein tarkimmat (<1 cm) suhteelliset mittaukset, joita ei voida tehdä enää reaaliajassa, vaativat datan keräämistä pitempiä aikoja ja ratkaisut tapahtuvat jälkilaskentaan perustuen.

Suomessa yleisimmin käytetyt mittaismoodit voidaan jakaa mitattavien kohteiden, halutun tarkkuuden, käytettävien välineiden ja kenttätyöskentelyn perus-

teella. Korkeampi mittaustarkkuus vaatii huolellisempaa kenttätöyskentelyä ja pitempiä mittausaikoja (taulukko 2). Mittaajan ammattitaitovaatimukset myös kasvavat tarkkuuden lisääntyessä. Tämän vuoksi kaikki tarkimmat mittaukset ovat lakiin perustuvia.

Laissa (Laki Maanmittauslaitoksesta annetun lain muuttamisesta 580/2014 2§) on määriteltä, että Maanmittauslaitokselle siirtyvät kumotun lain (Laki Geodeettisesta laitoksesta 581/2000 2§) voimassa olevat sitoumukset ja sopimukset, sekä niistä johtuvat oikeudet ja velvollisuudet (FINLEX 2014). Uusi laki tuli voimaan 1.1.2015. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kumotun lain 2§ tehtävät siirtyivät Maanmittauslaitokselle, kuten esimerkiksi korkeimmanluokan mittaukset ja Suomen koordinaattijärjestelmien yhteensopivuuden ylläpito muihin Eurooppalaisiin järjestelmiin muun tutkimuksen, kehittämisen ja tehtävien lisäksi.

Taulukko 2. Mittausmoodit (mukaillen UNAVCO Campaign GPS Handbook 2010, 5).

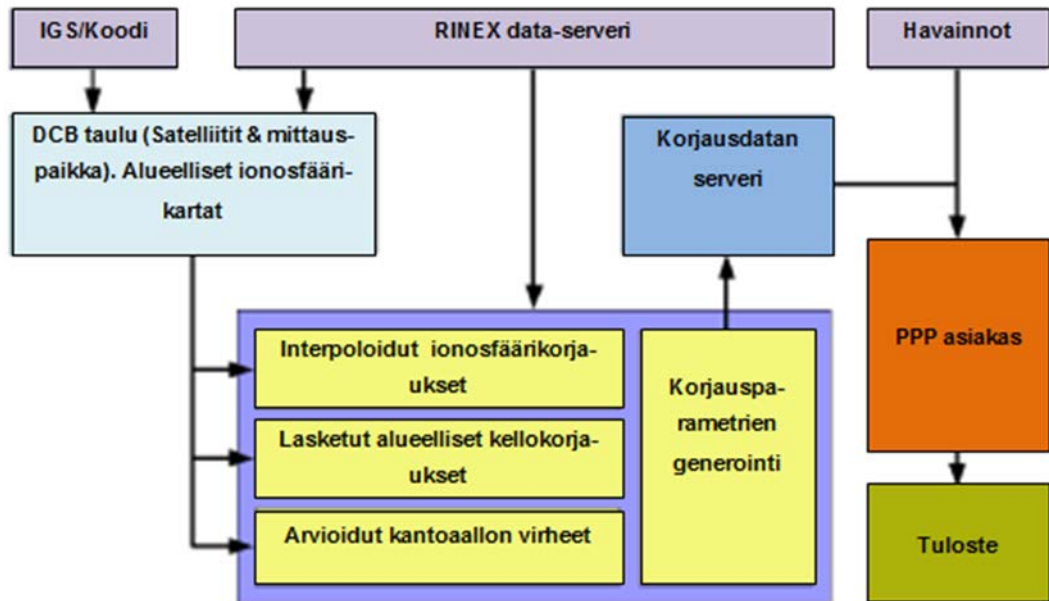
	Mittausmoodi	Tyypillinen tarkkuus	Mittausaika	Tyypilliset käyttöalueet
	Jatkuva mittaus	< 0.5 cm	Kuukausia tai enemmän	Maankuoren muutokset, geofysiikka, tukiasemamittaukset
	Staattinen	0.5 cm – 2.5 cm	Tunteja tai päiviä	Maankuoren muutokset, Geodeettiset seurannat, hyvin pitkien kantavektoreiden mittaus, geofysiikka
	Nopea staattinen	1 cm – 3 cm	Minuutteja	Lyhyiden kantavektoreiden mittaus, jäätikkötutkimus
	Kinematinen (jälkilaskenta ja reaaliaikainen)	1 cm – 5 cm	Sekunteja	Lyhyiden kantavektoreiden mittaus, lyhyiden pistevälien mittaus, ajoneuvopaikannus, yksityiskohtien mittaus, GIS, kartoitus, navigointi (ainoastaan RTK)
	Precise Point Positioning	1 cm – metrejä	Tunteja tai päiviä	Tutkimuskäyttö, pisteiden mittaus, jäätikkömittaus, maankuoren muutokset

4. PRECISE POINT POSITIONING (PPP)

Katrin Huber esitti kalvoillaan FIG kongressissa vuonna 2010, että PPP-mittaus on suhteellisen uusi tekniikka. Kysyin varmistuksena mitä hän tarkoitti (Huber 2015, liite 1), koska ensimmäinen etappi PPP-mittauksessa oli Anderlen 1976 esittämä konsepti, jossa hän käytti Doppler-mittauksia ja laskettuja tarkkoja efemeridi tietoja (Xu, Wang & Gao 2011, 2). Seuraava etappi oli, kun Jet Propulsion Laboratory (JPL) kehitti 1990-luvulla uuden tekniikan, joka ei tarvinnut erotushavaintoja tarkan paikan määrittämiseksi. Tekniikka nimettiin Precise Point Positioning ja laskennan prosessointiin käytettiin GIPSY/OASISII-GPS-laskentaohjelmaa. PPP lisättiin 1994–1995 välisenä aikana kyseiseen prosessointiohjelmaan (King, Edwards & Clarke 2002.) Ensimmäinen tutkimus yhden, kaksitaajuus GPS-laiteen datan laskemisessa muutaman senttimetrin tarkkuudella, julkaistiin JPL:n toimesta vuonna 1997. Ratkaisut silloin, ja vielä nykyisin kin vaativat, kokeiluja lukuun ottamatta, jälkilaskentaan perustuvan ratkaisun.

Kuuden IGS-aseman mitatun datan perusteella numeeriset tulokset osoittavat, että GPS/GLONASS-yhdistelmän käyttö PPP-mittauksessa tuottaa huomattavan parannuksen sijaintiin ja datankeräysaikaan verrattuna pelkkään GPS-käyttöön. Sijainnin parannus X-, Y- ja korkeuskoordinaatilla on 28 %, 40 % ja 24 % ja vastaavasti tallennusajan nopeutuminen samoilla komponenteilla ovat 24 %, 21 % ja 19 % (Cai 2009, 122.)

PPP-ratkaisuissa ionosfäärivapaan lineaarisen kombinaation hyväksikäytön jälkeen jäljelle jääneet mallinnustiedot, kuten tarkka ratatieto ja kellovirheet, saadaan International GNSS Service (IGS) palvelusta. (Huber, Heuberger, Abart, Karabatic, Weber & Berglez 2010). PPP-mittauksen ja relatiivisen mittauksen prosessoinnin suurin ero on satelliitin ja vastaanottimen kellovirheiden käsittely. Sen sijaan, että käytettäisiin vastaanottimien väliä erotushavaintoja, PPP käyttää erittäin tarkkoja satelliittikellojen estimaatteja. Estimaatit johdetaan ratkaisuna globaalista kiinteistä GPS-vastaanottimien verkosta (kuvio 3).

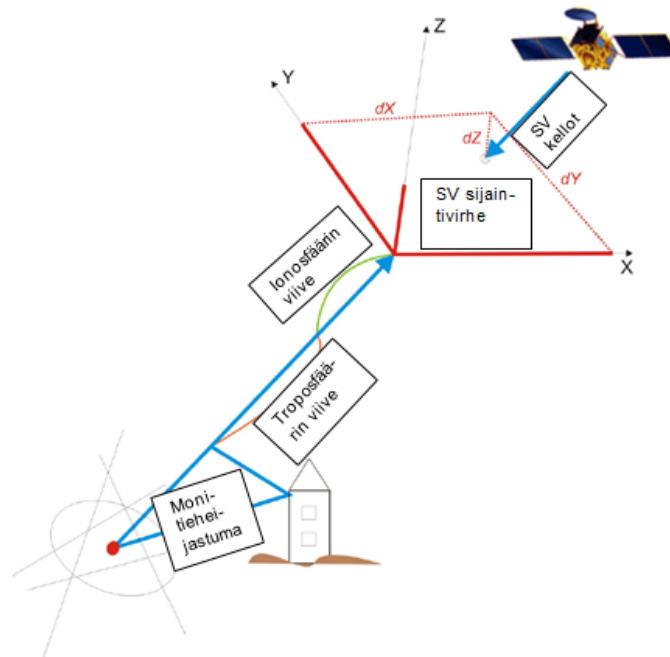


Kuvio 3. Prosessikaavio PPP mittauksen datavirrasta (mukaillen Huber ym. 2010,13).

Relatiivisessa mittauksessa kahden samanaikaisesti mitanseen vastaanottimen vaihehavainnoista laskettu erotushavainto samaan satelliittiin poistaa vastaanottimen kellovirheet mutta PPP-mittauksessa kellovirheet estimoidaan osana pienemmän neliösummanratkaisua koordinaatteihin. Tällä tekniikalla mittauksessa ei tarvita toista vastaanotinta, joten mittauksen virhelähteet ovat toisen, yhden vastaanottimen mittaukseen, SPP kaltaiset. SPP-mittaus eroaa PPP-mittauksesta siinä, että SPP-ratkaisussa ei käytetä tarkkoja satelliittien kelloarvoja. SPP ei käytä myöskään kantoaaltoa laskennassa, vaan ainoastaan koordiiniin perustuvaa "vale-etäisyyttä", kun taas PPP käyttää sekä "vale-etäisyyttä", että tarkempaa kantoaaltoa paikan määrittämisessä (King ym. 2002.)

Viimeisen yli 20 vuoden aikana kaksitaajuus PPP-tekniikan tutkiminen ja PPP-jälkilaskennan palveluntarjoajien määrät ovat kasvaneet huomattavasti. Real-Time Kinematic (RTK) palveluita tarjoavien CORS (Continuously Operating Reference Station) verkkojen lisääntymisen myötä Precise Point Positioning mittauksessa on keskitytty reaaliaikaisiin, tai melkein reaaliaikaisiin ratkaisuihin. Joissain tapauksissa PPP-ratkaisu tarjoaisi toteuttavissa olevan vaihtoehdon RTK-mittaukselle. Vielä on kuitenkin olemassa useita rajoituksia. Etenkin pitkät mittausajat rajoittavat reaaliaikaista PPP-mittaukseen. Precise Point Positioning mittauksessa yhden vastaanottimen käyttö rajoittaa myös mittauksen tarkkuutta

lähettävän satelliitin virheellisen ratatiedon, kellovirheen ja ilmakehän vaikutuksien, sekä signaalin heijastumisen vuoksi (kuvio 4).



Kuvio 4. Precise Point Positioning (mukaillen Huber ym. 2010).

PPP-mittauksessa absoluuttisen mittauksen tarkkuutta parannetaan käyttämällä havaintojen virhelähteiden korjauksia (taulukko 3), kuten tarkkoja ratatietoja ja kellovirheiden korjauksia. Korjaukset ovat samankaltaisia, kuin staattisen mittauksen korjaukset. Korjaukset lasketaan maailmanlaajuisen monitorointiverkon asemien tuottaman datan perusteella (Marreiros 2012, 1.) PPP-mittaus on kuitenkin epäluotettavampi, kuin staattinen mittaus, koska siinä ei voida ratkaista kokonaisten aallonpituuksien lukumäärää. Mittausta ei voida arvioida myöskään sulkeutuvien kuvioiden perusteella, joten esimerkiksi kaikki antennikorkeuden virheet menevät täysimääräisenä laskettuihin koordinaatteihin.

Precise Point Positioning-mittausta varten kaksitaajuuslaitteille on olemassa kaksi matemaattista mallia. Ensimmäinen malli käyttää ionosfäärivapaata lineaarista koodin ja kantoaallon vaihehavaintojen kombinaatiota. Näin ei voida kuitenkaan kiinnittää kokonaisten aallonpituuksien lukumäärää. Toinen malli käyttää erilaista keskiarvostettua havaintomallia, joka perustuu ionosfäärivapaan koodiin ja vaihehavaintojen kombinaatioon, joka vähentää koodin näennäisetäisyyden kohinaa. Myöskään tämä malli ei voi kiinnittää kokonaisten aallonpi-

tuuksien lukumäärää (Andrei, Salazar & Chen2010.) Ionosfäärivirheiden kompensoimiseksi kaksitaajuuslaitteilla käytetään ionosfäärivapaata kombinaatiota kaavojen 1 ja 2 mukaisesti (Huber ym. 2010; Honfman-Wellenhof ym. GNSS Global Navigation Satellite Systems 2008,167, kaava esiintyy hiukan muutettuna). Jäännösvirheen suuruus kaikesta ionosfääriviiveistä uskotaan olevan pienempi kuin 0.1 % ja niiden vaikutus sijaintiin oletetaan olevan minimaalinen, näin ollen siltä yleensä ummistetaan silmät PPP-mittauksessa, (Geng, J. 2010, 3).

$$\frac{R_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{R_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + cdt_r + \Delta_{trp} \quad (1)$$

$$\frac{\lambda_1 \Phi_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 \Phi_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + cdt_r + \Delta_{trp} + \frac{\lambda_1 N_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 N_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2)$$

Missä

ρ	on	sijainti
dt_r	on	vastaanottimen kellovirhe
Δ_{trp}	on	troposfäärinviive
N	on	Ambiguity, alkutuntematon

Yksitaajuuslaitteilla käytetään eräänlaista tilastolliseen ionosfäärimalliin perustuvaa korjausta (Ilmatieteen laitos, 2014). Ongelmana yksitaajuuslaitteiden käyttämässä Klobuchar-mallissa ionosfääriviiveen korjaamisessa L1-taajuudella on, että malli vaihtelee leveysasteen, ajan ja geomagneettisen aktiviteetin mukaan. Etenkin auringon aktiivisina aikoina mallin tarkkuus ei ole riittävä edes absoluuttiseen mittaamiseen. (Stepniak, Wielgosz & Paziewski 2014.)

Käytettävien ionosfäärikorjausten saannissa on myös viiveitä. Korjausdatana voi olla esimerkiksi International GNSS Service (IGS) Vertical Total Electron Content (VTEC) maps. Valitettavasti näiden kuvausten (maps) virheiden suuruus voi nousta keskimäärin 4.5 TECU (Total Electron Content Unit), joka tar-

koittaa noin 72 cm L1 taajuudella, (Geng 2010, 3.) Yleensäkin mallien ionosfäärivaikutus sisällytettynä navigointiviestiin on 50 % luokkaa kokonaisvirheestä, (Witchayangkoon 2000, 87).

Stanaway, Roberts, Blick ja Crook esittävät ”Four Dimensional Deformation Modelling, the link between International, Regional and Local Reference Frames”-nimisessä tutkimuksessa vuonna 2012, että esimerkiksi PPP-laskentoja tuottavat palvelut käyttävät usein perusdatumeja hyväkseen laskennoissaan. Tällöin laskennassa saatetaan käyttää myös alueelle sopimattomia datumeja. PPP-mittaus tuottaa sijainnin globaalissa vertausjärjestelmässä kuten ITRF (Rizos, Janssen, Roberts & Grinter 2012, Introduction).

Taulukko 3. Virhetaulukko, jossa esitetään PPP- ja differentiaalimittauksissa korjattavat virheet (mukaillen Rizos ym. 2012, 3).

Virhetyyppi	PPP	Differentiaali GNSS
Satelliitteihin liittyvät virheet		
Kellokorjaukset	✓	X
Antenni vaihekeskipiste	✓	✓
Vaihekeskipisteen poikkeamat	✓	✓
Tarkka ratatieto	✓	✓ / X
Ryhmäviive	✓ (ainoastaan L1)	X
Einstein suhteellisuusteoria	✓	X
Orientointi	✓	X
Vastaanottimiin liittyvät virheet		
Antenni vaihekeskipiste	✓	✓
Vaihekeskipisteen vaeltelu	✓	✓
Orientointi	✓	X
Geofysikaaliset mallit		
Geologiset siirtymät	✓	X
Valtamerien aiheuttama jännite	✓	X
Napa-alueiden vaikutus	✓	X
Laattojen liike	✓	X
Ilmakehän mallinnus		
Troposfääri viive	✓	✓
Ionosfääri viive	✓ (ainoastaan L1)	X

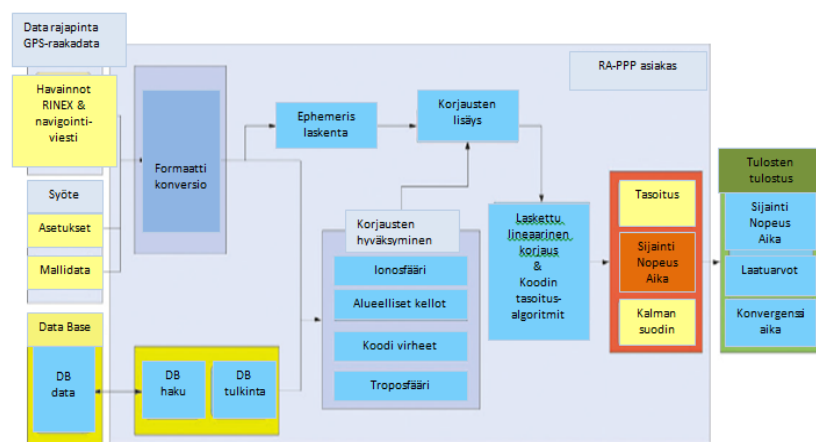
Taulukosta 3 käy ilmi, että myös virheet, jotka vaikuttavat maapallon pyörimisnopeuteen, on otettava huomioon.

4.1 Rapid Precise Point Positioning/RTK

Precise Point Positioning algoritmit pystyvät tarkkaan pistetuotantoon ainoastaan pitkillä havaintoajoilla ja optimaalisilla mittauspaikoilla. Lisäksi ongelmia

tuottavat myös laitteistoihin liittyvät virheet, (Huber 2010, 1). Differentiaali-mittauksessa ongelmia voidaan lieventää lähellä olevan referenssi-vastaanottimen korjauksilla. Senttimetriluokan mittauksia varten on kuitenkin ratkaistava kokonaisten aallonpituuksien lukumäärä. Monet reaaliaikaiset sovel-lukset, kuten porauslautat, merien pinnanmittaukset, tulivuorten purkaukset, tsunami-monitorointi ja niin edelleen, tarvitsevat jopa senttimetriluokan ratkaisu- ja myös alueilla (valtamereet, aavikot, vuoristot ynnä muut), joissa ei ole refe-renssiasemia lähellä. Tämän vuoksi senttimetriluokan tarkkuus välittömästi, käyttäen GNSS perustuvaa paikannustekniikkaa ilman tukiasemaverkkoa (omaa, tai virtuaalista), on tullut strategiseksi kehittämisen kohteeksi. Tämä oli syynä, kun vuonna 2009 aloitettiin Rapid Precise Point Positioning (RA-PPP) tutkimus PPP-algoritmien kehittämiseksi (kuvio 5) lyhyemmän mittausajan ja luotettavamman sijainnin saavuttamiseksi.

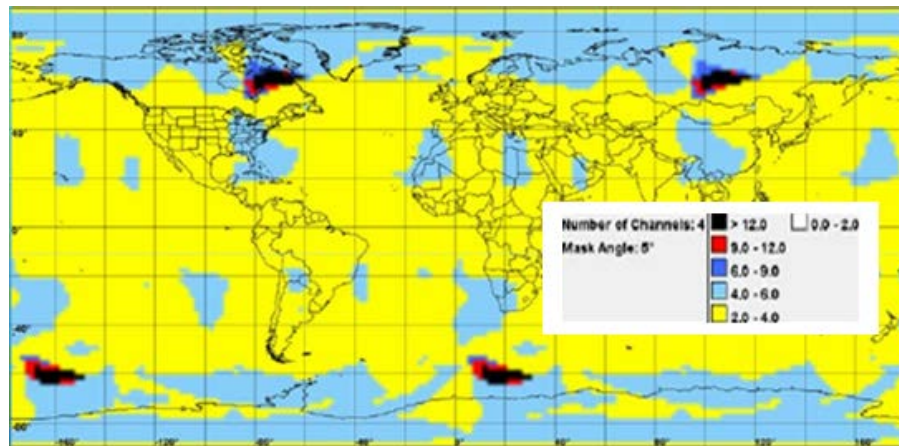
Vuonna 2010 valmistuneen tutkimuksen tarkoitus oli parantaa PPP-tekniikkaa kohti reaaliaikaisuutta. Tutkimuksessa valittiin neljä kehittämiskohdetta: elektro-nien tiheyden (TEC) mallintamisen parantaminen vastaanottimen ja satelliitin välillä yksitaajuuslaitteilla, ns. alueellisten kellojen käyttö, uudet ionosfääriva-paat kombinaatiot, jotka vähentävät kohinaa sekä erityisolosuhteiden kokonais-aallonpituuksien ratkaisujen simulointi.



Kuvio 5. RA-PPP asiakkaan arkkitehtuurin suunnittelu (mukaillen Huber ym. 2011).

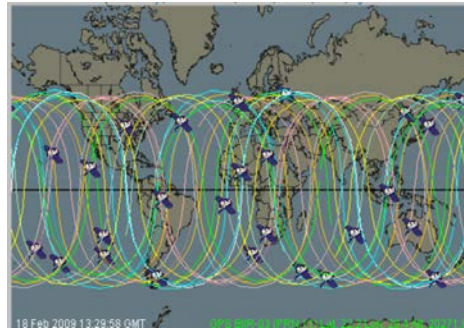
4.2 The Quasi-Zeith Satellite System-järjestelmä (QZSS)

PPP-mittauksen ongelmana pohjoisilla leveysasteilla on satelliittien saatavuus siten, että signaali tulisi mahdollisimman ”puhtaana”, joka tarkoittaisi esimerkiksi GPS-mittauksissa korkeampia korkeuskulmia pohjoisella alueilla. Kuviosta 6 käy ilmi, kuinka PDOP-arvot ovat huonommat pohjoisella pallonpuoliskolla, kuin päiväntasaajan seudulla, käytettäessä pelkästään GPS satelliitteja. Erot selittyvät GPS-satelliittikonstellaatiosta kuvio 7 (Realflightsystem 2011.)



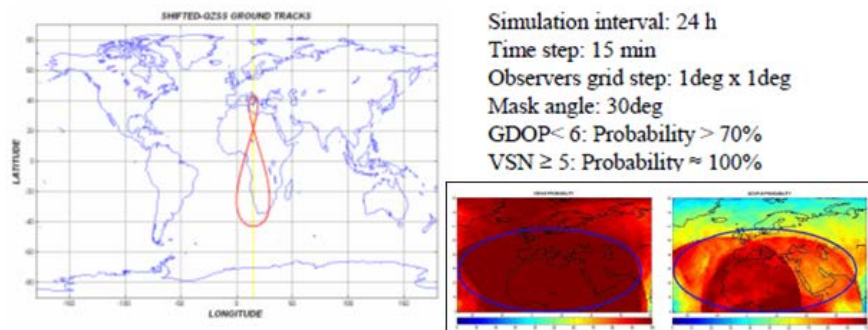
Kuvio 6. US Navigation Centre PDOP arviot 2011 GPS konstellaatiolla (mukaillen Realflightsystem 2011).

Kuviosta 6 käy ilmi myös, että PDOP-arvot ovat erinomaisia +60 ja -60 leveysasteiden välillä. PDOP-arvot taas putoavat Pohjois-Euroopassa, Pohjois-Venäjällä ja Antarktisilla alueilla. Vaikka GPS-konstellaatiota on hiukan muutettu vuonna 2011, niin silti pohjoisella pallonpuoliskolla GPS-mittaus on ongelmallisempaa, kuin eteläisellä pallonpuoliskolla. Pelkästään GPS-satelliiteilla esimerkiksi Suomessa ei tulla kunnolla toimeen muutoin, kuin aukeilla alueilla. GLO-NASS-järjestelmä toi tähän ongelmaan helpotusta, mutta ei kuitenkaan kokonaan poistanut sitä. Galileo järjestelmän myöhästymisen on suuri takaisku, koska satelliittien määrän lisääntyminen olisi helpottanut GNSS-mittausta pohjoisilla alueilla.



Kuvio 7. US Navigation Centre GPS-konstellaatio vuodelta 2009 (Reallfligsystem 2011).

Japanilaisen, The Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), järjestelmän demoaminen (kuvio 8) lähellä Napolia osoitti että konstellaatio, jossa yksi satelliitti on aina yli 75° varmistaa sen, että satelliitti on aina käytettävissä myös kaupunkimaisissa katukanjoneissa. Solving GPS gap - Coverage analysis of a super-constellation made up of GPS+EGNOS+S-QZSS tutkimuksessaan Angrisano, Pacifico & Vultaggio vuonna 2010 tulivat sellaiseen lopputulokseen, että niin sanottu super-konstellaatio (GPS+EGNOS+S-QZSS) takaa hyvän satelliittinäkyvyyden ja GDOP-arvot (kuvio 8).

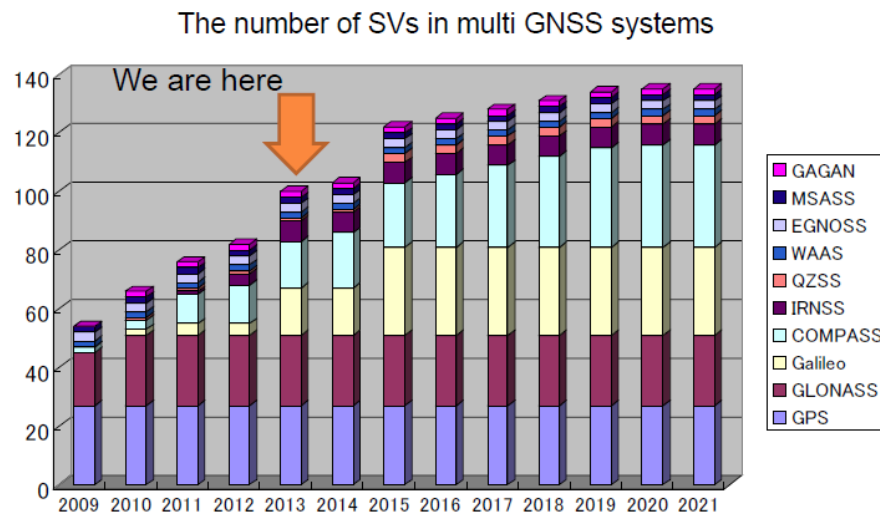


Kuvio 8. S-QZSS kiertorata (Angrisano ym. 2010).

Performance of Real-Time Precise Point Positioning Using MADOCA-LEX Augmentation Messages tutkimus (Harima, Choy, Li, Grinter, Choudhury, Rizos, Wakabayashi & Satoshi 2014, 14) osoitti, että QZSS-järjestelmän käytöllä PPP-mittausaikana 2 tuntia tai enemmän staattisena mittauksena on riittävä, jotta voidaan odottaa 0.041 metrin tarkkuutta. Evaluation of Precise Point Positioning Using MADOCA-LEX via Quasi-Zenith Satellite System (Suzuki, Kubo & Takasu 2013) tutkimuksen mukaan QZSS mahdollistaa reaaliaikaisen paikannuksen MADOCA-LEX viestiä hyväksikäyttäen. Viestin mukana saadaan satel-

liitin tarkat ratatiedot ja kellokorjaukset reaaliaikaisena. Päätelmissä tutkijat esittävät, että yhden vastaanottimen sijainti tasossa, RMS-virhe 10 senttimetrin sisällä, voidaan ratkaista PPP-mittausta hyväksikäyttäen MADOCA-LEX viestillä reaaliajassa.

Introduction of QZSS and Multi-GNSS Asia 2013, Tateshita esittää Aasian alueen käytettävien GNSS satelliittien määrät vuoteen 2021 mennessä 30 asteen maskikulmalla (kuvio 9). Valitettavasti Suomessa kyseisiä satelliittimääriä 30 asteen maskikulmalla ei tulla näkemään.



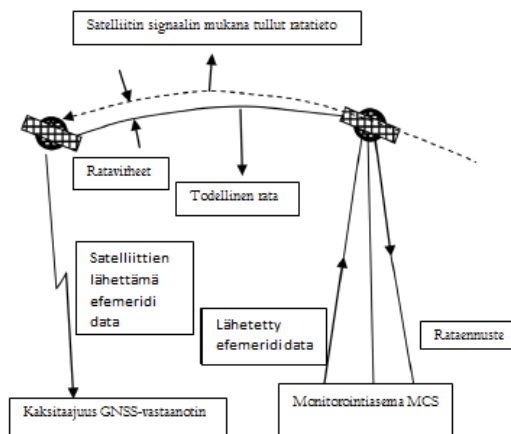
Kuvio 9. Aasian alueen GNSS-satelliittien määrä vuoteen 2021 mennessä maskikulmalla 30° (Tateshita 2013, 19).

5. VIRHELÄHTEET PPP/DIFFERENTIAALI-GNSS-MITTAUKSESSA

5.1 Yleistä

PPP-mittaus vaatii lukuisia korjauksia differoimattomiin PR (Pseudorange based positioning techniques) ja CPH (Carrier based positioning techniques) havaintoihin, jotta päästäisiin senttiluokan mittaustulokseen. Relatiivisen mittaamisen erotushavaintojen lailla, virheet eivät poistu PPP-mittauksessa. Esimerkiksi mitauspisteen liikkeet, jotka johtuvat geofysikaalisista ilmiöistä, kuten laattojen liikkeistä, eivät poistu. Metsähovin vaaitustestikentän mittausten perusteella myös lämpötila voi vaikuttaa suoraan vertikaaliseen tarkkuuteen (Lehmuskoski, Rouhiainen, Saaranen, Takalo & Virtanen 2005, 127). Kiinteän maan vuoksen kaltainen liike ja valtamerien paineet vaikuttavat täysimääräisesti PPP-mittauksessa samoin, kuin havaintojen troposfääri- ja ionosfäärivirheet. Jos esimerkiksi Itämeri nousee Helsingin edustalla metrin ylöspäin, niin maanpinta painuu Metsähovissa 11 millimetriä alaspäin (Lehmuskoski ym. 2005, 266).

Merkittäviä satelliittien virheitä luotettavissa PPP-ratkaisuissa ovat satelliittien kellovirheet, satelliitin antennin vaihekeskipiste-, suhteellisuus- ja satelliittiantenninvaiheaallon kiertymisen virheet. Vastaanottimen erityiset virheet ovat antennin vaihekeskipisteen poikkeamavirhe ja antennin vaiheaallon kiertymisestä johtuvat virheet. (Rizos ym. 2012; Witchayangkoon 2000, 18.) Kaikki kiertoraitoihin liittyvät ratkaisut jokaiselle GPS satelliitille arvioidaan lähetetyn efemeridi tiedon perusteella, kuvio 10. (Bidikar, Gottapu, Rao, Ganesh & Kumar 2014).

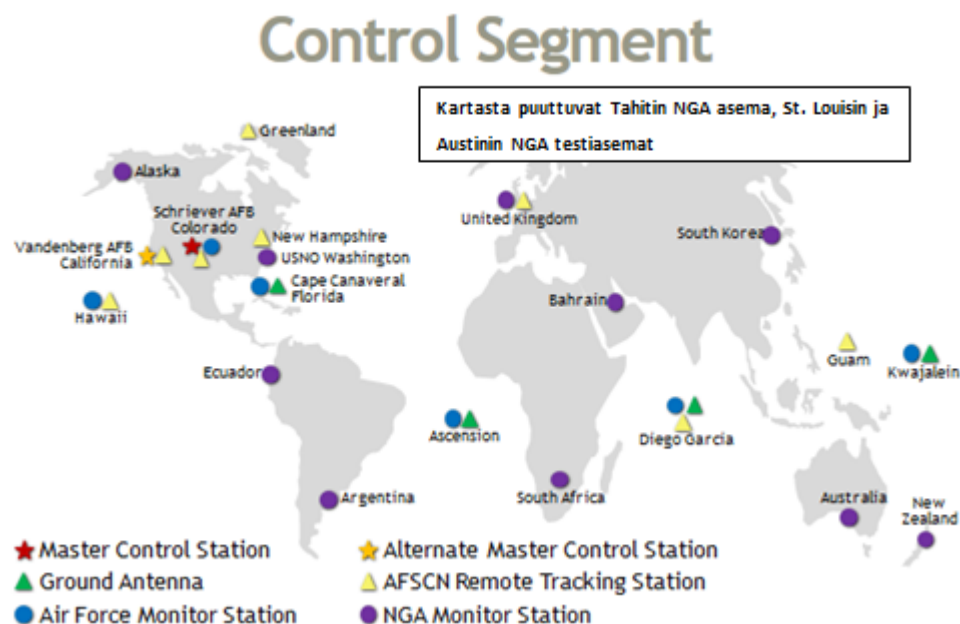


Kuvio 10. Satelliitin efemeridi virheet (mukaillen Bidikar ym. 2014, 23).

5.2 Kontrollisegmentin tehtävä

Kontrollisegmentti koostuu ympäri maapalloa olevista satelliittien seuranta-aseamista (kuvio 11). Ne monitoroivat satelliittien lähetystä, suorittavat analyysijä ja lähettävät komentoja ja dataa takaisin konstellaatioon.

Jokainen satelliitti saa maa-asemilta, joilla on lähetysantennistatus (ground-antenna-status), navigointidatan (kuvio 10), jonka se lähettää takaisin käyttäjille navigointiviestinä. Viesti sisältää tarpeellisen tiedon paikan määrittämiseksi. Se sisältää satelliitin koordinaattien ratkaisemiseksi Efemeridi-tiedon mukana tulevat aika-parametrit ja kellokorjauksen satelliitin kellopoikkeaman ja aikakonversion laskemiseksi satelliitin ja GPS-ajan välillä, tiedon satelliitin kunnosta, ionosfäärin mallin parametrit yksitaajuuslaitteelle, sekä almanakkatiedot. Almanakkatietoja käytetään satelliitti-konstellaation laskemiseen 1-2 km tarkkuudella. Sijaintitietoa vastaanotin käyttää satelliittien signaalien etsimiseen taivaankannelta. Efemeridi- ja kellotiedot päivitetään yleensä joka toinen tunti ja almanakkatiedot päivitetään joka kuudes päivä, (ESA Navipedia 2014.)



Kuvio 11. Valvontasegmentti sisältää maailman laajuisen GPS-valvontaverkon, (mukaillen Control Segment, 2014).

5.3 Satelliitteihin liittyvät korjaukset

Satelliitin kellovirheen tarkka tunteminen on keskeinen asia PPP-mittauksessa. Ilman tarkkaa tietoa kellovirheestä mittaus on pelkkä navigointiratkaisu (Witchayangkoon 2000, 31). IGS jakaa SP3 efemeridi tiedostossa tiedon myös satelliittien kellovirheistä. Taulukoista 4A ja B käy ilmi, että satelliittien lopulliset tiedot ovat tarkimmat, mutta myös viiveet niiden saamiseksi ovat suuremmat, (Geng 2010, 6; IGS GLONASS-ephemeris 2015). Epätarkempi tieto kellovirheestä saadaan satelliitin lähettämän signaalin mukana. GPSS-satelliittien kellot käyvät Einsteinin teorioihin perustuen nopeammin, kuin maassa olevat kellot johtuen mm. pienemmästä painovoimasta (Real-World Relativity: The GPS Navigation System 2014.)

Taulukko 4 A. IGS GPS-satelliittien rata-/kellovirheet (mukaillen Geng 2010,6).

Tyyppi	Tarkkuus	Viive	Päivitys	Otostiheys
Lopullinen	ratatieto ~ 2.5 cm kellot ~ 75 ps	12–18 päivää	joka torstai	15 minuuttia 30 sekuntia
Nopea	ratatieto ~ 2.5 cm kellot ~ 75 ps	17–41 tuntia	päivittäin klo 17 UTC	15 minuuttia 5 minuuttia
Ultra-nopea havaittu	ratatieto ~ 3.0 cm kellot ~ 150 ps	3-9 tuntia	päivittäin klo 03, 09, 15, 21 UTC	15 minuuttia 15 minuuttia
Ultra-nopea ennuste	ratatieto ~ 5.0 cm kellot ~ 3 ns	reaaliaikainen	päivittäin klo 03, 09, 15, 21 UTC	15 minuuttia 15 minuuttia

Edellä olevan taulukon ns tarkoittaa nanosekuntia eli 10^{-9} ja ps tarkoittaa piko-sekuntia eli 10^{-12} .

Taulukko 4 B. IGS GLONASS efemeridi 2015 (mukaillen IGS Products).

GLONASS satelliitin efemeridi		Tarkkuus	Viive	Päivitys	Otostiheys
Lopullinen		~ 3 mm	12–18 päivää	Joka torstai	15 minuuttia
Geosentriset koordinaatit					
Lopullinen sijainti	horisontaali	3 mm	11–17 päivää	joka keskiviikko	viikoittain
	vertikaali	6 mm			
Lopullinen nopeus	horisontaali	2 mm/v	11–17 päivää	joka keskiviikko	viikoittain
	vertikaali	3 mm/v			

Kellovirheellä on suuri vaikutus ”vale-etäisyyteen”. Vaikutus voidaan laskea kaavasta 3 (Bidikar ym. 2014, 23).

$$P_m = \rho + \varepsilon^{sc} \times C \quad (3)$$

Missä

P_m	on	mitattuetäisyys
ρ	on	todellinen etäisyys (metreinä)
ε^{sc}	on	satelliitin kellovirhe (sek)
c	on	valonopeus (3×10^8)

Kaavan perusteella voidaan päätellä, että satelliitin yhden mikrosekunnin (10^{-6}) kellovirhe aiheuttaa 300 metrin virheen matkassa.

Jokaisessa GPS-satelliiteissa on useampi atomikello, jotka kontrolloivat kaikkea, mitä satelliiteissa tapahtuu, myös lähetettävän signaalin generointia. Huolimatta kellojen tarkkuudesta, ne eivät onnistu täydellisesti synkronoimaan GPS aikaa ja lähetetyn signaalin aikaa, taulukko 5. Satelliitin kellokorjaustermit (a_0 , a_1 , ja a_2), sekä tieto kellosta t_{0c} lähetetään navigointiviestin mukana. (Bidikar ym. 2014, 24.)

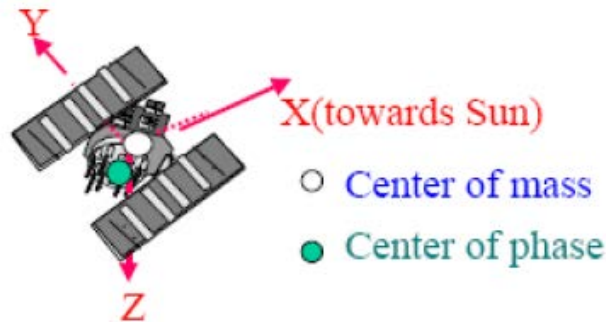
Taulukko 5. Satelliitti SVPRN 26 kellon poikkeama ja virhe (Bidikar ym. 2014, 24).

Epoch No.	Time of epoch (sec)	Satellite clock offset (sec)	Satellite clock error (sec)
1	439200	-0.07262	-0.00014192
2	439215	14.9274	-0.00014192
3	439230	29.92741	-0.00014192
4	439245	44.92743	-0.00014192
5	439260	59.92745	-0.00014192
6	439275	74.92746	-0.00014192
7	439290	89.92748	-0.00014192
8	439305	104.9275	-0.00014192
9	439320	119.9275	-0.00014192
10	439335	134.9275	-0.00014192

5.3.1 Satelliitin vaihekeskipiste ja vaihtelut

Satelliitin antennin vaihekeskipisteen vaihtelu johtuu satelliitin massakeskipisteen ja vaihekeskipisteen erosta ja tämä on otettava huomioon PPP-mittauksissa. Syynä tähän on, että tarkat rata- ja kellotiedot oletetaan olevan peräisin satelliitin massakeskipisteestä. Suurin osa malleista, jotka

mallintavat satelliittien ratoja, olettavat näin. PPP-mittauksessa käytettävien koodi- ja vaihetietojen oletetaan olevan peräisin vaihekeskipisteestä. Satelliitin antennin vaihekeskipisteen poikkeama (kuvio 12) ja satelliitin aseman määrittäminen (Satellite Antenna Phase Center Offset and Satellite Orientation) voidaan poistaa kaksoiserotushavainnoissa differentiaali GPS-mittauksessa (Cai 2009, 23.)



Kuvio 12. Satelliitin antennin vaihekeskipisteen poikkeama, (Cai 2009, 39).

PPP ratkaisut ovat voimakkaasti riippuvaisia satelliitin antennin poikkeamista. Kaikki poikkeamat (taulukko 6) ilmoitetaan samassa satelliittikiinnitetyssä koordinaattijärjestelmässä, kuin auringon säteily. Origona on satelliitin massakeskipiste, k -akseli osoittaa maan keskipisteeseen, j -akseli yhtyy aurinkopaneelin akselin suuntaan ja i -akseli täydentää oikeakätisen koordinaattijärjestelmän ja se on riippuvainen aurinko-satelliitti-maa tasosta. Tämä määritelmä ei päde, kun kaikki ovat samalla suoralla. Tässä tapauksessa, jossa satelliitti on maan varjossa, satelliitin korkeus muuttuu epävakaaksi ja vaikeaksi mallintaa, (Witchayangkoon 2000, 29.) Mittaajalla on neljä mahdollisuutta käsitellä satelliitin antennin poikkeamista, (matriisit A-D, Witchayangkoon 2000, 157).

- A) Käytetään IGS tuottamaa antennivaihekeskipisteen kalibroituja poikkeamismalleja molemmille (GPS, GLONASS) järjestelmille (esimerkkeinä taulukko 6, kuvio 13).

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.279 \\ 0 \\ 1.023 \end{bmatrix} \text{ m.}$$

B) Ei välitetä poikkeamista.

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m.}$$

C) Käytetään ainoastaan satelliitin antennin i-poikkeama

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.279 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m.}$$

D) Käytetään ainoastaan satelliitin antennin k-poikkeama

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.023 \end{bmatrix} \text{ m.}$$

Tutkimuksen perusteella (Witchayangkoon 2000, 157) C-tapaus, joka huomioi ainoastaan i -akselin poikkeaman, antaa hiukan huonomman tuloksen (3D-virheenä), kuin A-tapaus, johtuen k -akselin suunnasta maan keskipisteeseen. Virhe johtuu siitä, että useimmiten k -akselin virheen uskotaan absorboituvan vastaanottimen kellon mukana etenkin, kun satelliitin efemeridin katsotaan olevan peräisin satelliitin massakeskipisteestä. Kun satelliitti liikkuu, poikkeama i -akselilla, joka osoittaa karkeasti kohti aurinkoa, muuttuu maankuoren pinnalla olevassa koordinaattijärjestelmässä. Kun i -akselin poikkeamaa ei huomioida, se vääristää huomattavasti ratkaisua ollen riippuvainen i -akselin suunnan vaihteluista.

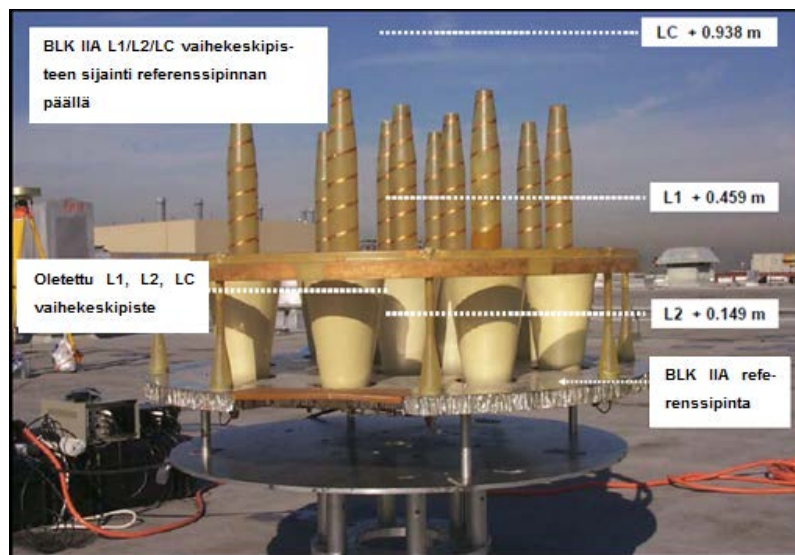
Taulukko 6. NGA GPS Ephemeris/Station/Antenna Offset Documentation 2014.

Satellite antenna offset (satellite body centered coordinates, meters)

```

Block II PRN's - Delta x= 0.2794, Delta y= 0.0000, Delta z= 0.9519
---
Block IIA PRN's - Delta x= 0.2794, Delta y= 0.0000, Delta z= 0.9519
---
Block IIR PRN 02 - Delta x= -0.0099, Delta y= 0.0061, Delta z= -0.0820
Block IIR PRN 11 - Delta x= 0.0019, Delta y= 0.0011, Delta z= 1.5141
Block IIR PRN 13 - Delta x= 0.0024, Delta y= 0.0025, Delta z= 1.6140
Block IIR PRN 14 - Delta x= 0.0018, Delta y= 0.0002, Delta z= 1.6137
Block IIR PRN 16 - Delta x= -0.0098, Delta y= 0.0060, Delta z= 1.6630
Block IIR PRN 18 - Delta x= -0.0098, Delta y= 0.0060, Delta z= 1.5923
Block IIR PRN 19 - Delta x= -0.0079, Delta y= 0.0046, Delta z= -0.0180
Block IIR PRN 20 - Delta x= 0.0022, Delta y= 0.0014, Delta z= 1.6140
Block IIR PRN 21 - Delta x= 0.0023, Delta y= -0.0006, Delta z= 1.5840
Block IIR PRN 22 - Delta x= 0.0018, Delta y= -0.0009, Delta z= 0.0598
Block IIR PRN 23 - Delta x= -0.0088, Delta y= 0.0035, Delta z= 0.0004
Block IIR PRN 28 - Delta x= 0.0019, Delta y= 0.0007, Delta z= 1.5131
---
Block IIR-M PRN 05 - Delta x= 0.00292, Delta y= -0.00005, Delta z= -0.01671
Block IIR-M PRN 07 - Delta x= 0.00127, Delta y= 0.00025, Delta z= 0.00056
Block IIR-M PRN 12 - Delta x= -0.01016, Delta y= 0.00587, Delta z= -0.09355
Block IIR-M PRN 15 - Delta x= -0.00996, Delta y= 0.00579, Delta z= -0.01227
Block IIR-M PRN 17 - Delta x= -0.00996, Delta y= 0.00599, Delta z= -0.10060
Block IIR-M PRN 29 - Delta x= -0.01012, Delta y= 0.00591, Delta z= -0.01512
Block IIR-M PRN 30 - Delta x= 0.01245, Delta y= -0.00038, Delta z= -0.02283
Block IIR-M PRN 31 - Delta x= 0.00160, Delta y= 0.00033, Delta z= -0.05750
---
Block IIF-2 PRN 01 - Delta x= 0.39100, Delta y= 0.00000, Delta z= 1.09100
Block IIF-8 PRN 03 - Delta x= 0.39500, Delta y= 0.00030, Delta z= 1.09070
Block IIF-6 PRN 06 - Delta x= 0.39470, Delta y= -0.00100, Delta z= 1.09170
Block IIF-7 PRN 09 - Delta x= 0.39550, Delta y= -0.00200, Delta z= 1.09220
Block IIF-3 PRN 24 - Delta x= 0.39200, Delta y= 0.00200, Delta z= 1.09300
Block IIF-1 PRN 25 - Delta x= 0.39200, Delta y= 0.00200, Delta z= 1.09300
Block IIF-4 PRN 27 - Delta x= 0.39140, Delta y= 0.00030, Delta z= 1.09040
Block IIF-5 PRN 30 - Delta x= 0.39520, Delta y= -0.00080, Delta z= 1.09040
---
```

Jos satelliitin antennin kalibrointi tunnetaan, on mahdollista sisällyttää tämä tieto koodin ja vaihehavaintojen kanssa fyysisen pisteen sijaintiin, kuten ulkoisen antennin referenssi pisteeseen (ARP).

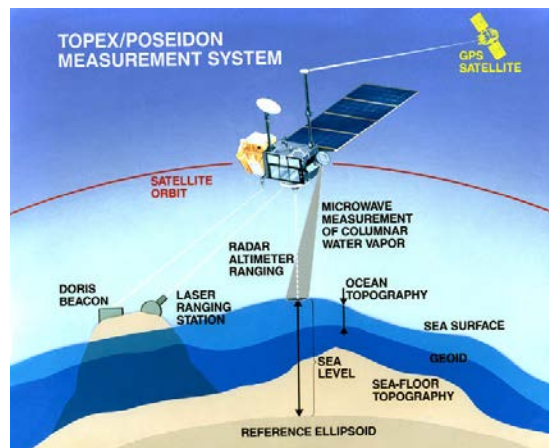


Kuvio 13. Satelliitin BLK IIA antennikalibrointi (mukaillen Mader & Weston, 2008).

5.3.2 Satelliitin radat

Ensimmäisiä GNSS tieteellisiä sovelluksia oli määrittää kiinteiden maa-antennien tarkka paikka tarkoituksena tutkia maankuoren dynamiikkaa. Tätä

varten täytyi määrittää GPS satelliittien tarkat ratatiedot. Tarkan kiertoradan selvittämisessä (Precise Orbit Determination, POD) käytetään samankaltaista tekniikkaa, kuin mitä käytetään huipputarkoissa geodeettisissa vastaanottimissa. Enimmäkseen ratatiedot lasketaan jälkilaskentaan perustuen (normaalisti maa-asemien toimesta). Myöhemmin laskettu data yhdistetään muiden avaruudessa olevien laitteiden dataan ja lopputuloksena muodostetaan lopullinen tuote. Neljän satelliitin käytöllä GNSS tarjoaa reaaliajassa mahdollisuuden itsenäiseen satelliitin sijainnin ratkaisuun, joka ei kuitenkaan riitä tarkempiin mittauksiin. Yksi yleisistä tarkan ratatiedon käytöistä on tarkat maan- tai merenpinnan korkeudenmittaukset (kuvio 14) yhdistettynä laser- tai radiomittausten kanssa (Navibedia.net 2011.)



Kuvio 14. Topex/Poseidon (NASA & CNES), valtamerien pinnan kartoitus, (Navpedia.net 2011).

Asen 5050 Project-GPS Orbit Accuracy 2004–2012 välisenä aikana suoritetun tutkimuksen mukaan GPS-signaalin mukana tulleen kiertoratatiedon tarkkuus on kasvanut 33 %, ollen nyt 1.0-2 m:n suuruusluokkaa, (Finch 2012, Conclusion). Viimeisin IGS-tieto, vuodelta 2013, arvioi ratatiedon tarkkuudeksi 1 m. Koska satelliitin efemeridi vaikuttaa suoraan vastaanottimen paikkaan, voisi olettaa, että tarkan ratatiedon käyttö tuo tarkkuutta GPS mittaamiseen. Waypoint Consulting Inc. tutkimus "Static Baseline Accuracies as a Function of Baseline Length, Observation Time and the Effect of using the Precise Ephemeris" vuodelta 2005 sivulla 8 osoittaa kuitenkin, että 200 km:ä, tai lyhyemmillä vektoreilla ei voida osoittaa selkeää hyötyä tarkan ratatiedon käytössä. Tutkimuksen pää-

telmissä oletettiin, että signaalin mukana tullut ratatiedon tarkkuus olisi kuitenkin parempi, kuin tutkimuksen aikaan NGS antama 2.6 metrin tarkkuus. Tälle olettamukselle saatiin vahvistus Logan Finchin Asen 5050 projektissa, GPS Orbit Accuracy, vuonna 2012. Tosin keskellä ko. tutkimusta the Legacy Improvement Initiative laajensi seuranta-asemien lukumäärän kuudesta yhteentoista tarkoituksena parantaa GPS-satelliittien ratojen määrittystarkkuutta 10–15%.

Aikaisempi Nottinghamin Yliopiston tutkimuksessa Precise Orbit Determination for GPS Satellites vuodelta 1990 (Whalley S & Eng B) oli tultu toisenlaiseen lopputulokseen. Sen mukaan lyhyillä, alle 10 km vektoreilla, joissa tarkkuus on alle 1 cm, voidaan käyttää signaalin mukana tullutta ratatietoa. Pitemmillä vektoreilla (yli 10 km) ja suuremmissa verkoissa olisi käytettävä tarkkaa ratatietoa (taulukko 7). Assessment of practical 3-D geodetic accuracy for static GPS surveying (Häkli P, Koivula H, Puupponen J, 2008) tutkimus osoittaa, että käyttämällä tarkkaa ratatietoa laskiessa, voidaan mittausaikaa lyhentää. Kyseisen tutkimuksen suunnitteluperiaatteita on otettu julkishallinnon suositukseen jhs184.

Taulukko 7. Kiertoratatiedon virheiden vaikutus kantavektoriin a ja kantavektorin pituuden vaikutus b virheeseen signaalin mukana tulleella ratatiedolla (mukaillen Whalley & Eng 1990, 39, 40).

Δr (m)	ppm	Kantavektori (km)	Virhe
ratavirhe	kantavektorin virhe		
100	5	1	1 mm
20	1	10	1 cm
2	0.1	100	10 cm
0.2	0.001	1000	1 m
	a	b	

Koska satelliitin radoissa on virheellisyyttä (taulukko 5), JPL määrittää tarkan satelliitin sijainnin laskelmat 15 minuutin välein. Aikaa määritellessä on otettu huomioon datan tallennus ja prosessointi, (Warren 2002) Satelliitin lähettämä sijainti määritetään 15 sekunnin epookkivälein, (Bidikar ym. 2014, 25). Satelliitin lähettämä sijainti on esitetty tapahtuvan myös 30 sekunnin intervallilla, esimerkiksi Accuracy Research on GPS Point Positioning Using IGS Data Products (Yan, Xiuwan & Yubin 2012, 2). 30 sekuntia tuntuisi oikeammalta, jos ajatellaan yhden lähetyssivun, framen, kestävän 30 sekuntia (6 sekuntia/kpl x 5 kpl

alisivua), vaikka efemeridi tieto lähetetään alisivuilla 2 ja 3, eli väleillä 6-18 sekuntia, aika ei riitä 15 sekunnin päivitykseen.

5.3.3 Ryhmäviive

Group delay differential L1-L2 taajuuksilla ja koodilla oleva laitteistoon rajattu virhe, on satelliittikohtainen. Jos signaalin muodostamisen sijainnin (mitattu antennin vaihekeskipisteessä) lähettämisen ja satelliitin taajuuslähteestä lähtemisen välillä on viivettä, signaalin lähtemiskohta on hiukan eri, kuin sen muodostamiskohta. Tämän viiveen epävarmuus ei ylitä kolmea nanosekuntia. Kokonaisuutena \pm merkkinen differentiaalikeskiarvo ei ylitä 15 nanosekuntia. Virhe on sisällytetty navigointiviestin kellokorjaukseen. (Tetewsky, Ross, Soltz, Vaughn, Anszperger, O'Brien, Graham, Craig & Lozow 2009.) GPS-kiertoradan epäkeskisyyden vuoksi on tärkeää ottaa huomioon pienet suhteelliset kellokorjaukset (kaava 4).

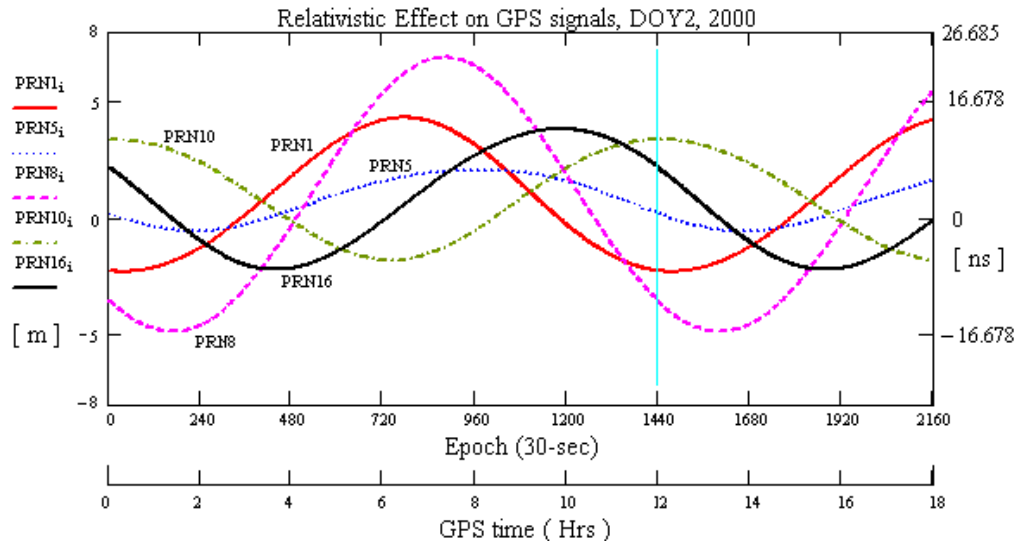
$$dt_{rel} = \frac{2}{c^2} X \cdot \dot{X}$$

(4)

Missä

X	on	GPS-satelliitin sijainti
X'	on	GPS-satelliitin nopeus

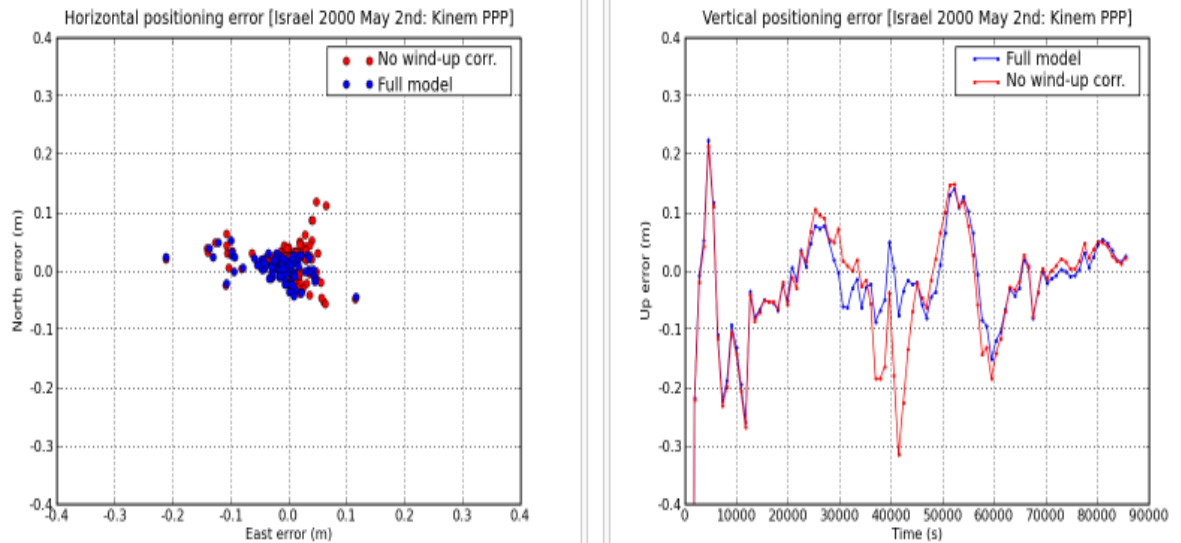
Relatiiviset korjaukset vaihtelevat satelliiteittain ja epookista toiseen (kuvio 15). Relatiivisten vaikutukset ovat riippuvaisia satelliitin sijainnista ja nopeudesta, joten muutokset tehdään lentorataan, (Witchayangkoon B, 2000,147.) Differentiaalisesta mittauksesta poiketen, relatiiviset virheet on huomioitava PPP-mittauksessa.



Kuvio 15. Relatiiviset korjaukset, (Witchayangkoon B, 2000).

5.3.4 Vaiheaallon kiertymisvirheet (Wind-up)

Vaiheaallon kiertymisvirheen ongelmat liittyvät antennien orientointiin sekä satelliiteissa, että vastaanottimissa. Ongelmat johtuvat GPS-signaalin oikealle kierteispolarisoidun aallon luonteesta. Ideaalitapauksessa vastaanottimen mittaaman kantoaallon suunta yhtyy siihen geometriseen kulmaan, joka on sähköisen kentän ja vastaanottimen antennin suuntainen. Vaikutukset ovat ainoastaan kantoaaltoon perustuvissa laskennoissa (kuvio 16) mutta ei koodi-etäisyydessä. Kantoaallossa vaikutukset riippuvat satelliitin antennin ja vastaanottimen antennin suhteellisesta orientaatiosta ja suuntauksesta. Korjauksia tarvitaan ainoastaan tarkimmissa mittauksissa. Koordinaateiltaan tunnetun vastaanottimen vaiheaallon kiertymisvirhe johtuu satelliitin orientaation liikkeestä. Kun satelliitti liikkuu radallaan, sen on käännettävä pitääkseen aurinkopaneelit kohti aurinkoa ja säilyttääkseen siten maksimi energiatasonsa, kun taas satelliitin antenni osoittaa jatkuvasti maapallon keskipisteeseen. Kääntyminen aiheuttaa vaihtelun vaiheessa, jota vastaanotin ei kuitenkaan ymmärrä etäisyyden vaihteluna (ESA, Navipedia 2014.)



Kuvio 16. Kiertymisvirheen korjauksen vaikutus kantoaalttoon (Esa Navipedia, 2014).

5.3.5 Sagnac vaikutus

Tavalliselle GNSS-mittaajalle Sagnac-vaikutuksella ei ole merkitystä, mutta tar-koissa geodeettisissä mittauksissa se on otettava huomioon. Nimensä Sagnac-vaikutus on saanut ranskalaisen fyysikon Georges Sagnacin mukaan. Sagnac johtuu maan pyörimisliikkeestä satelliitin lähettäessä signaalia vastaanottimeen. Koska maapallo pyörii, vastaanotin voi liikkua maan pinnalla aina 500 m/s (päi-väntasaajalla) nopeuteen asti. Sagnac on hyvin pieni virhe ja monimutkainen laskettava (Cai 2009, 47.) Liikkuva kello käy hitaammin, kuin paikallaan oleva kello. Jos kellot asetetaan maakeskeiseen koordinaatistoon, niin molempien kellojen nopeudet tai taajuuksien erot eivät muutu. Tämä tarkoittaa, että satelliit-tien atomikelloille ja maakelloille on asetettava sama nopeus maakeskeisessä, pyörimättömässä koordinaatistossa. Tällöin satelliitin suunnalla tai kiihtyvyydellä maan rataliikkeeseen nähden ei ole merkitystä.

GPS-koordinaatisto on maakeskinen rotaatiokehys WGS84, kun taas aikakehys on paikallinen inertiakehys, jossa ei huomioida rotaatiota. Tämän vuoksi GPS-vastaanottimen on otettava huomioon Sagnac-vaikutus. Korjauksia voidaan kä-sitellä paikallisessa inertiakehyksessä, jossa valo, radiosignaali ja kello kulkevat vakionopeudella kaikissa suunnissa, tai maakeskisessä rotaatiokehyksessä, jossa Sagnac-vaikutus esitetään skalaarimuuttumattomana ajan ja paikan suh-teen (Ashby 2004, Abstract.)

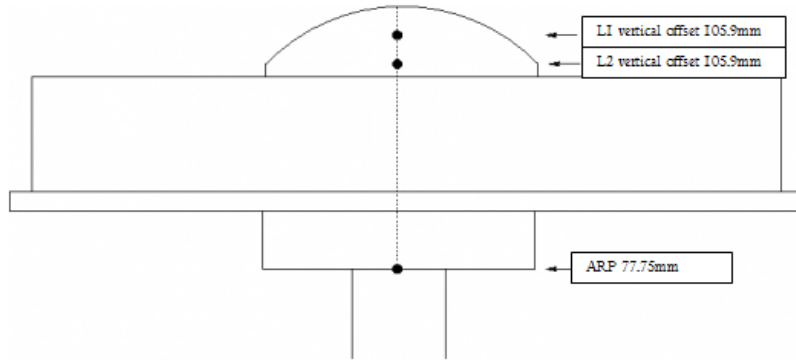
5.4 Vastaanottimiin liittyvät korjaukset

5.4.1 Vastaanottimen vaihekeskipiste ja sen vaeltelu

GPS-vastaanottimen antenni on liitettävä osa vastaanottimeen. Se voi olla integroitu, erillisellä kaapelilla, tai muulla yhteydellä kytketty osa. Antennin tarkoitus on suodattaa, vahvistaa, sekä konvertoida satelliitista saapuva signaali sähköiseksi signaaliksi, jota GPS-vastaanotin voi käyttää. Pistettä, jossa signaali vastaanotetaan, kutsutaan antennin vaihekeskipisteeksi (antenna phase center, APC), (EL-Hattab A, 2013, johdanto.) Antennin vaihekeskipiste, ei ole välttämättä antennin geometrinen keskipiste. GPS-antennin vaihekeskipisteenpoikkeama esiintyy, koska satelliitti lähettää signaalina mittaamansa GPS-kiertoratahavainnot vastaanottimen antennin vaihekeskipisteeseen. Vaihekeskipiste ei ole kuitenkaan yksi, tarkasti määritetty fysikaalinen piste tai pysyvä paikka, vaan paremminkin se vaeltelee satelliitista saapuvan signaalin vaihtuvan suunnan mukaisesti. Elektronisen vaihekeskipisteenvaeltelu (PCV) on antennimallista riippuvainen, eikä ole siten vakio. Antennin vaihekeskipisteenpoikkeama voi vaikuttaa huomattavasti sijainnin korkeustarkkuuteen. Virheen vaikutus voi olla jopa kymmenen senttimetriä. Horisontaalitarkkuuteen vaikutus on alle senttimetri. Normaalisti PCV ei ole pelkästään suunnan ja korkeuskulman funktio, vaan se on riippuvainen myös signaalin taajuudesta. Elektronisen vaihekeskipisteenvaeltelu ei ole helppo mallintaa johtuen sen voimakkaasta ajallisesta korrelaatiosta monitieheijastumaan ja erilaisiin antenneihin.

Jos tunnetaan antennin absoluuttiset kalibrointi-arvot, on mahdollista sisällyttää tämä informaatio koodin ja vaihehavaintojen kanssa pisteen sijaintiin, (Witchayangkoon B, 2000, 27,28.) Laitetoimittajat toimittavat teknisissä dokumenteissaan myös tiedot antennista (kuvio 17), mutta ne saattavat poiketa kalibroinnilla saaduista tarkoista arvoista. Jos käytetään samanlaisia antenneja suunnattuina samaan suuntaan mitattavan vektorin molemmissa päissä, niin erityisesti lyhyillä vektoreilla vaihekeskipisteenvaihtelu voi kadota. Erilaisten antennien käyttö, jopa lyhyillä vektoreilla, voi johtaa suuriin virheisiin etenkin

korkeudessa. Virheiden välttämiseksi olisi laskennassa käytettävä tarkkoja kalibrointitietoja kyseisille antennille. Jokaisella staattisella jälkilaskentaohjelmalla on oma tapansa käsitellä vaihekeskipisteen vaihteluita, (EL-Hattab A, 2013, Conclusion.) IGS:n eri antennimallien korjauksia on saatavilla Internetin kautta <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general>.



Kuvio 17. Topcon HiperPro antennipoikkeamat (mukaille ESA Navipedia 2014).

5.4.2 Vastaanottimen vaiheaallon kiertyminen

Koodiratkaisuihin vastaanottimen vaiheaallonkiertymisefekti ei vaikuta, vaan ainoastaan kantaaltoon. Jos lähettävän satelliitin suunta muuttuu, muuttuu myös lähtevän elektronisen kentän suunta ja myöhemmin myös vastaanottimen mitattava vaihe. Jos sekä lähettävä, että vastaanottava antenni kääntyvät, vaiheen muutos lisääntyy. Tämä ilmiö on nimetty vaiheaallon kiertyminen (phase wind-up). Lisäksi vastaanottimen kierto aiheuttaa selkeän muutoksen GPS:n kantaallon taajuuteen, (Kim, Serrano & Langley 2006.)

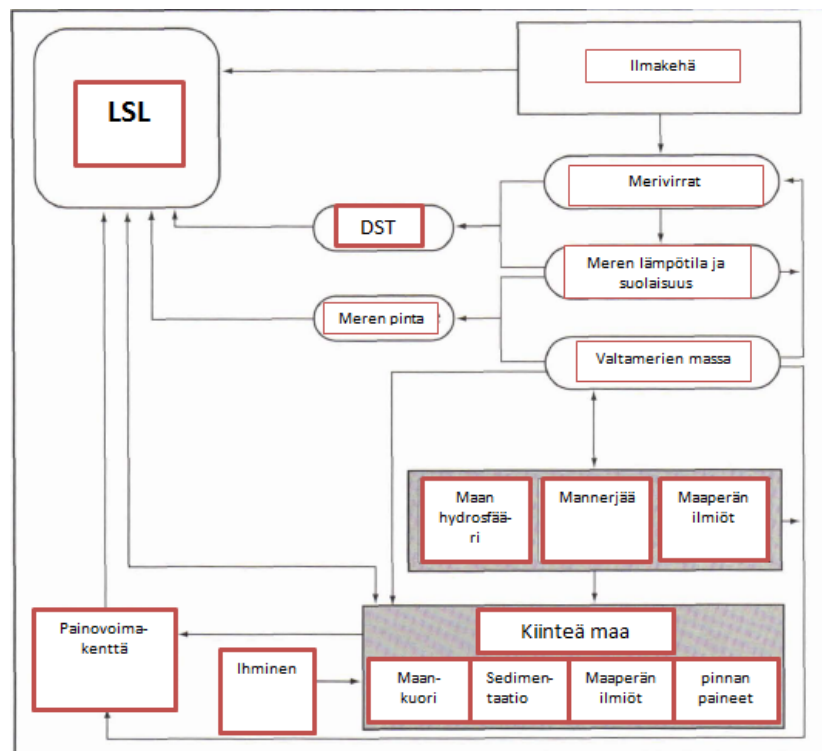
5.5 Geofysikaaliset muutokset

Kiinteässä maankuoressa, valtamerissä ja ilmakehässä tapahtuvat ajoittaiset muodonmuutokset, deformaatiot, ovat vuorovaikutuksessa eri tavoin maan pyörimisliikkeen kanssa. Massan muutokset kiinteässä maassa vaikuttavat hitausmomenttiin ja siten päivän pituuteen (LOD) ja rotaatioakselin sijaintiin (PM), (Plag 2006, 55.) Pisteiden paikalliset sijainnin muutokset voivat johtua pisteen omasta liikkumisesta, maaperän, rakenteen käyttäytymisestä, tai pienistä tektonisista liikkeistä. Kaikki tällaiset liikkeet vaikeuttavat pisteen käyttämistä referenssipisteenä. Fennoskandian alueella pisteet voidaan yleensä rakentaa suo-

raan peruskallioon mutta muualla Euroopassa pysyviä GNSS-, tai muita monitorintiasemia perustettaessa on oltava erittäin huolellinen, etenkin rannikkoalueella (Plag 2006, 55.), (kuvio 18.)

Ihmisen oma toiminta, esimerkiksi pohjaveden käyttö, öljynporausta ja kaivokset voivat aiheuttaa pisteen paikallista liikkumista etenkin korkeussuunnassa. Myös laite-, ohjelma- ja laskenta-algoritmien muutokset voivat aiheuttaa referenssipisteillä useiden senttimetrien muutoksia koordinaateissa. Kokemuksesta tiedetään, että kyseiset ihmisen tekemät muutokset eivät vaikuta ainoastaan pisteen koordinaatteihin, vaan myös mittauksen kohinatasoon ja datan luonteeseen, (Plag 2006, 60.)

Kaikki maanpinnan pisteet liikkuvat suhteessa globaaliin vertauskehykseen kuten esimerkiksi ITRF. Jotta saman pisteen koordinaatteja voitaisiin verrata eri ajanhetkillä, tarvitaan riittävän tarkkoja malleja pisteen liikkumisen ennustamiseksi, (Plag 2006, 51.)



Kuvio 18. Paikallisesti meren keskivedenpintaan (LSL) vaikuttavat voimat (mukaillen Plag 2006, 32).

6. TASO- JA KORKEUSJÄRJESTELMIÄ

6.1 Käsitteitä

Koordinaattijärjestelmä (Reference System) sisältää ne määritelmät (suureet), jotka tarvitaan maankuoreen fyysisesti sidotun koordinaatiston, koordinaattijärjestelmän realisaation, määrittelemiseksi, sijoittamiseksi ja orientoimiseksi halutulle maankuoren alueelle globaalisti tai paikallisesti. Koordinaattijärjestelmää ei ole mitattu tai fyysisesti kiinnitetty maapallon kuoreen. Määritelmä sisältää koordinaatistot, jotka perustuvat geodeettisiin tai suorakulmaisiin koordinaatteihin sekä koordinaatistot, jotka perustuvat karttaprojektioihin, (Komission asetus (EU) N:o 1089/2010, liite II). Määriteltäviä suureita ovat: vertausellipsoidin isoakselin puolikas (a), Maan geosentrinen vetovoimavakio (GM), dynaaminen muotokerroin (J_2), pyörahdyksliikkeen kulmanopeus (ω), koordinaatiston origon sijainti ja koordinaattiakselien suunnat (Julkishallinnon suositus, JHS 153, 4.)

Järjestelmän nimen perässä olevasta S, System, merkinnästä voidaan päätellä, että kysymys on systeemistä, esimerkiksi ETRS89 on European Terrestrial Reference System 1989. Jos kirjain nimen perässä on F (Frame), tarkoitetaan systeemin realisaatiota, esimerkiksi EUREF-FIN on Suomen ETRS89 realisaatio.

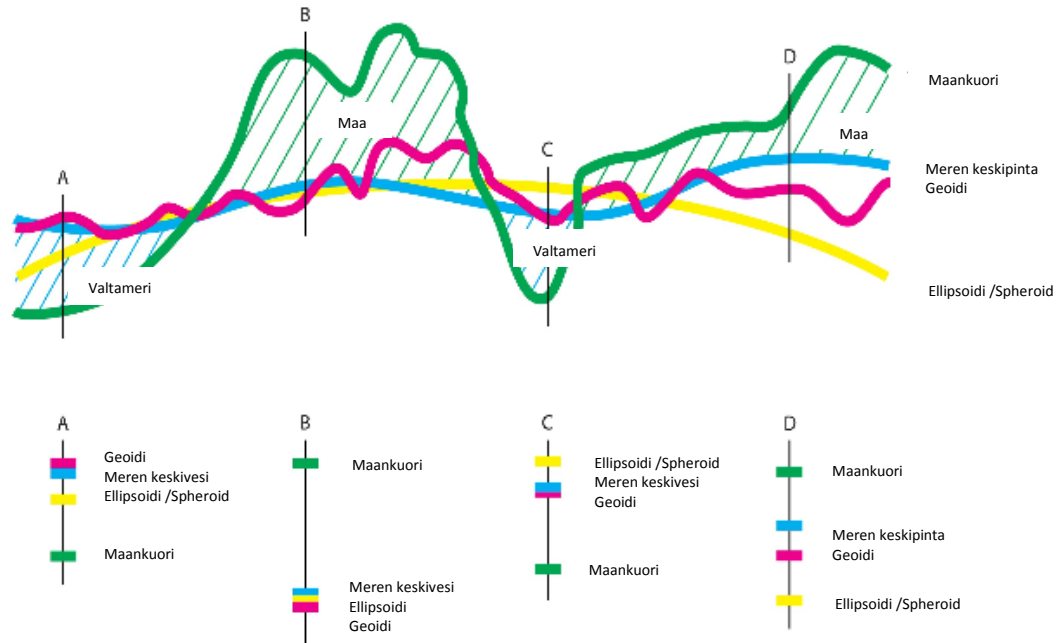
EU:n Komissio on antanut 23.11.2010 asetuksen (Komission asetus (EU) N:o 1089/2010) liittyen paikkatietoaineistojen ja palveluiden yhteensopivuudesta. Kyseisessä asetuksessa puhutaan määritelmissä 1.1. liite II, koordinaattijärjestelmästä ja koordinaatistosta. Lausuntokierroksella olevassa versiossa 29.9.2014 ”JHS XXX EUREF-FIN -järjestelmän mukaiset koordinaatit Suomessa”, puhutaan vertausjärjestelmästä ja vertauskehyksestä. Kyseinen JHS tulee kumoamaan version 6.6.2008, JHS 153, suosituksen, jossa vanhat termit ovat käytössä. Uudessa suosituksessa ETRS89 on Euroopan terrestrinen vertausjärjestelmä 1989 (European Terrestrial Reference System 1989). Sen realisaatiota ETRF kutsutaan ”Euroopan terrestrinen vertauskehys” (European Terrestrial Reference Frame). Sanastokeskuksen Geoinformatiikan sanasto TSK 45, 2014, ei käytä vertaus-sanaa muutoin, kuin datumin ja ellipsoidin yhteydessä, joten

seuraavassa päivityksessä ilmeisesti myös sanastoa tullaan uusimaan tältä osin.

Datumi on mittauksilla paikallisesti sovitettu koordinaattijärjestelmä. Se on siten parametri tai parametrijoukko, joka määrittelee koordinaatiston origon, mittakaavan ja orientaation joilla sijainnin leveys- ja pituusaste sekä korkeus määritellään maanpinnalle. Koska matemaattinen malli voidaan sovittaa eri lailla maan pinnalle, on olemassa erilaisia datumeja. Erilaiset datumit aiheuttavat sotilaskäytössä, etenkin taistelukoneille, suuria ongelmia (NGA 2014.) Tämä oli myös eräs peruste kehittää globaali WGS84 järjestelmä. Nykyisin digitaalisena GPS-aikana monet datumit ovat usein kuitenkin samankaltaisia (ICSM, 2015.) Suomessa datumina pidetään esimerkiksi ”jossain mielessä” Kartastokoordinaattijärjestelmää (KKJ). Jos ajatellaan, että geodeettinen datumi määrittelee maapallon koon ja muodon, koordinaatiston origon, mittakaavan ja orientaation, joita käytetään kartoissa (Dana, 2014), niin KKJ ei kuitenkaan ole liu’utettuna järjestelmänä puhdas datumi. Myöskään se ei ole varsinainen järjestelmä, koska se on sidottu maankuoreen.

Kun uusi JHS versio 29.9.2014 ilmestyy uusine määritelmineen, niin se selkeyttää määritysten käyttöä. Uuden määrittelyn mukaan Kartastokoordinaattijärjestelmää voitaisiin pitää ”vertauskehys Kartastokoordinaattijärjestelmänä”.

Ellipsoidi on maan matemaattinen malli, jota käytetään, kun määritellään koordinaattijärjestelmää (vertausjärjestelmää). Se, mitä vertausellipsoidia käytetään, on riippuvainen koordinaatistosta ja alueesta mitä halutaan kuvata. Esimerkiksi KKJ käyttää Hayfordin, kansainvälistä 1924 ellipsoidia ja EUREF-FIN taas GRS80 ellipsoidia. Koordinaatistossa taas määritellään tiettyjen sääntöjen mukaan, kuinka pisteille annetaan koordinaatit. GPS:n myötä paikallisten ellipsoidien lisäksi käyttöön ovat tulleet myös globaalit ellipsoidit. Kuvio 19 osoittaa maankuoren, geoidin, meren keskiveden ja ellipsoidin välisiä suhteita (IGSM 2015).

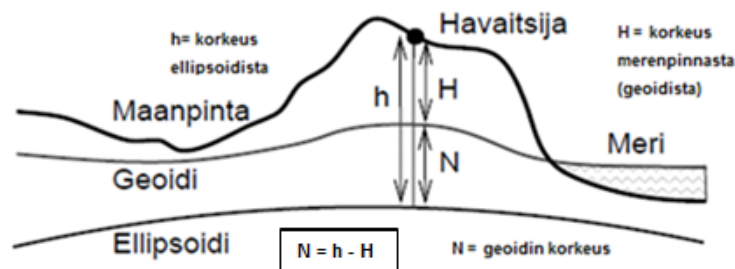


Kuvio 19. Vaihteluita kuinka geoidi, ellipsoidi ja maapohja voivat vaihdella (mukaillen ICSM, 2015).

Kuviossa 19 A ja C osoittavat maapohjan olevan meren keskiveden alapuolella, jollainen tilanne on valtamerien alueilla. Meren keskiveden ja geoidin välinen ero on minimaalinen mutta niiden sijainnit vaihtelevat ellipsoidiin nähden. B ja D osoittavat maapohjan olevan keskiveden yläpuolella, jollainen tilanne on maa-alueilla. Geoidin ja meren keskiveden välinen ero on huomattavasti suurempi, kuin valtamerien alueilla mutta sijainnit vaihtelevat ellipsoidiin nähden samalla lailla, kuin valtamerien alueilla.

Satelliittimittauksen myötä on jouduttu selkeämmin ottamaan kantaa mittauksen korkeuteen. Aikaisemmin takymetrimittauksessa korkeustietoa ei välttämättä kerätty siihen liittyvän ylimääräisen työn vuoksi, ellei se ollut tarpeellinen tehtävän kannalta. Jos ympäröivässä viitejärjestelmässä tapahtuneeseen mittaukseen olisi sidottu myös korkeus, olisi tarvittu lisäpisteenä korkeuden lähtöpiste, ellei joku käytetty tasopiste olisi ollut yhdistelmäpiste. GPS-mittaus on kolmiulotteista mittausta WGS84-koordinaattijärjestelmässä, jolla on oma datumi ja ellipsoidi. Jos järjestelmän korkeutta halutaan hyödyntää, se on muutettava ellipsoidisesta korkeudesta h , kyseiselle alueelle sopivaksi korkeudeksi H (kuvio 20). Suomessa on käytännössä kaksi korkeusjärjestelmää, jotka voivat hyödyntää GPS:n tuottamaa korkeutta. N60- ja N2000 korkeusjärjestelmät. N60 järjes-

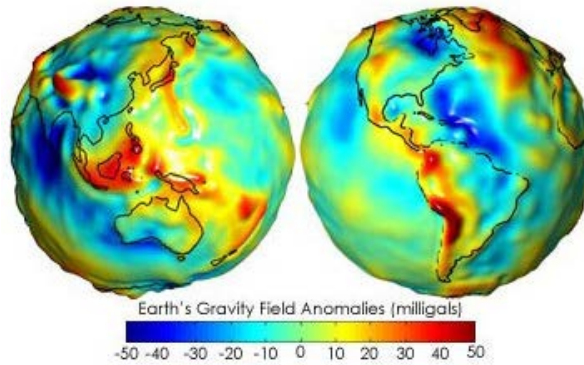
telmän korkeudet ovat ortometrisiä ja N2000-järjestelmän korkeudet ovat normaalikorkeuksia. Se, miten paikallinen painovoima otetaan huomioon tarkkavaaituslaskuissa, syntyy joko ortometrinen tai normaalikorkeusjärjestelmä, (Bilker-Koivula & Ollikainen, 2009.) Kaikki organisaatiot eivät kerää kuitenkaan korkeutta GPS-mittausten yhteydessä. Maanmittauslaitos esimerkiksi enimmäkseen editoi pois korkeuden omissa kiinteistöihin liittyvissä mittauksissaan.



Kuvio 20. Kolmen pinnan välinen suhde (mukaillen Häkli ym. 2009).

GPS-järjestelmä mittaa etäisyyksiä järjestelmän origosta eli maan keskipisteestä, jolloin etäisyys voidaan esittää korkeutena ellipsoidista. Jotta korkeus voidaan esittää valtakunnallisessa korkeusjärjestelmässä, tarvitaan merenpinnan malli, joka jatkuu mantereen alle, (Poutanen 2006.) Tätä nivopintaa kutsutaan geoidiksi (kuvio 21), joka on ortometrisen korkeuden referenssipinta, (Sanasto-keskus TSK 45, 2014, 20). Joku on joskus kuvannut geoidia ”ryppyiseksi rusinaksi”, joka on alituiseissa liikkeessä.

Korkeudessa geoidin epävarmuus aiheuttaa ongelmia ellipsoidisen korkeuden muuttamisessa ortometriseksi korkeudeksi sen lisäksi, että GPS-mittauksessa korkeuskoordinaatti on aina kriittisempi tekijä verrattuna tasokoordinaattiin. Korkeusjärjestelmien korkeudet voidaan johtaa ellipsoidisista GPS-korkeuksista käyttäen geoidin malleja. Suomessa N60-järjestelmän malli on FIN2000 ja N2000-järjestelmän malli on FIN2005N00. Mallien korkeustarkkuus on riippuvainen alueesta. Maksimivirheet FIN2000 mallilla ovat 8-9 cm ja FIN2005N00 mallilla maksimivirheet ovat 6 cm (Häkli P, 2010.)



Kuvio 21. Geoidin pinta, (Ellipsoidi ja Geoidi, 2014).

YK:n yleiskokous hyväksyi 18.2.2015 päätöslauselman (A/69/L.53), jossa kehoitetaan jäsenvaltioita edistämään geodeettisen aineiston vapaata saatavuutta, (UN General Assembly 2015). EU on jo tässä suhteessa ennakoinut YK:n päätöslauselmaa asetuksellaan liittyen paikkatietoaineistojen ja palveluiden yhteensopivuuteen. Kesäkuusta 2014 lähtien GL on jakanut verkossa FinRef asemien RINEX havaintodataa kahdeksan viikon ajalta pelkästään rekisteröitymällä RINEX latauspalveluun, (Koivula 2014, liite 2).

6.2 Tasokoordinaatisto

Suurimmalle osalle ihmisistä mittauksista on vähän hyötyä, ellei sitä voi esittää ymmärrettävänä graafisena kuvauksena. On vaikea hahmottaa esimerkiksi mitattujen kohteiden välisiä etäisyyksiä ja pinta-aloja pelkkien numeeristen arvojen perusteella. Verotukselliset ja sotilaalliset tarpeet vaativat kohteiden esittämistä myös tasomaisella muodolla. Yksinkertainen tasomainen kartta on suorakulmaisella mittauksella muodostettu kartta. Siinä kohteet esitetään referenssilinjan suhteen. Tällaisessa kartassa virheet kasvavat referenssilinjan 0-pisteestä ja itse linjasta etäännyttäessä. Virheiden syynä kartoissa olivat mittavirheet mittauksissa ja epätarkkuudet kartan konstruoinnissa. Suomessa maanmittaustoimitusten kiinteistöjen mittauksissa kyseistä mittaustapaa käytettiin yleisesti vielä 90-luvun loppupuolella.

Mittauskohteet olivat alueina suhteellisen pieniä, joten maapallon kaarevuuden vaikutusta ei tarvinnut ottaa huomioon. Näin tehdyssä kartassa tärkeintä oli kohteena olevan kiinteistön sisäinen kuvaaminen, eikä se, miten kaukana se oli

kylän toisella laidalla olevasta kiinteistöstä. Mitattu kiinteistö sijoitettiin ympäröivään viitejärjestelmään yksityiskohtien tai rannoilla rannan muodon perusteella.

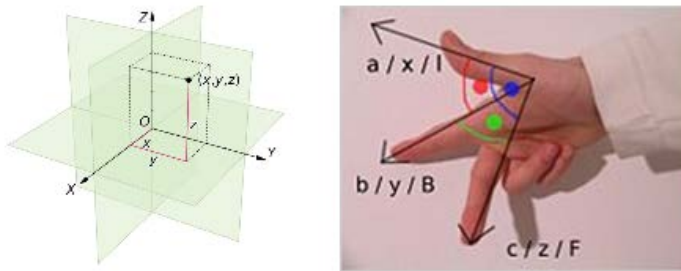
Myös sotilaille tärkeintä oli tietää missä suurikokoiset armeijat voivat liikkua ilman suuria ylipääsemättömiä esteitä, miten huolto voitiin järjestää, missä oli paras puolustautua jne. Niinkään tärkeää ei ollut tietää tarkasti, kuinka kaukana seuraava kaupunki oli. Vielä 80-luvulla isännät muistelivat Kiteellä Venäjän valan aikaisia armeijan topografeja, jotka hakkuuttivat vaarojen laet paljaiksi ja mittasivat etäisyyttä ääneen perustuen, huutamalla.

Yleisen kehityksen myötä tuli tarve esittää laajempia alueita siten, että esitysmittakaavan puitteissa, myös kohteiden etäisyydet ja alueet kuvautuisivat oikein. Tarvittiin väyliä, joiden suunnittelua varten kartat olivat tarpeellisia. Sotilaallinen karttojentarve kasvoi. Valtamerialueilla navigointi oli ollut jo pitkään käytössä. Vuonna 1714 Englannin hallituksen kilpailun, merellä käytettävän pituusasteen määritelmän keksimiseksi, voittaneen John Harrisonin keksimän laivakronometrin (Royal Naval Museum Library, 2004) ja myöhemmin sen parannusten avulla valtamerien ylitys sujui suhteellisen tarkasti lähtösatamasta määränpäähän.

Suomessa pitäjäkarttojen vanha polyedriprojektio korvautui vähitellen 1942 vahvistetulla Gauss-Krügerin projektion yleislehtijaolla. Pitäjäkarttojen tuotanto päättyi, kun peruskartoitus alkoi vuonna 1947 (Strang, 2013). Gauss-Krügerin projektiota kutsutaan myös Transverse Mercatorin projektioksi. Projektiota käytetään laajasti topografisissa kartoissa sekä merikartoissa. Kaikissa versioissa on samat ominaispiirteet ja kaavat. Poikkeuksia ovat eri maiden erilaiset variaatiot transformaatioparametreissa, erityisesti leveysasteen origossa, pituusasteen keskimeridiaanissa ja keskimeridiaanin mittakaavassa, sekä vale-idässä ja vale-pohjoisessa (kuvio 22). Yleisimpiä Transverse Mercatorin projektioista on Universal Transverse Mercator (UTM), (Transverce Mercator, 2014.)

6.3 3D-koordinaatistot

Tasokoordinaatistoissa pisteen kuvautumisen oikeellisuus on riippuvainen kuinka kaukana se on karttatason ja kuvattavan pallomaisen kohteen sivuamis-, tai leikkauskohdasta. Kolmiulotteisen ympäristön esittäminen kartalla on hankalaa, koska kartalla on mittakaava ja sen on oltava mittatarkka, (Hagren, 1997.) Kuvattaessa laaja-alaisia, tai globaaleja kohteita, tai tapahtumia mahdollisimman tarkasti tarvitaan kolmiulotteisia koordinaattijärjestelmiä, 3D-koordinaattijärjestelmän (coordinate reference system) origo sijaitsee käytännössä maapallon massakeskipisteessä ja koordinaattiakselit orientoidaan maan suhteen yleensä kohtisuoraan toisiaan vastaan. Järjestelmää kutsutaan maa-keskeiseksi karteesiseksi (suorakulmaiseksi) järjestelmäksi (kuvio 24), (3D-koordinaatistot, Maanmittauslaitos, 2014.)



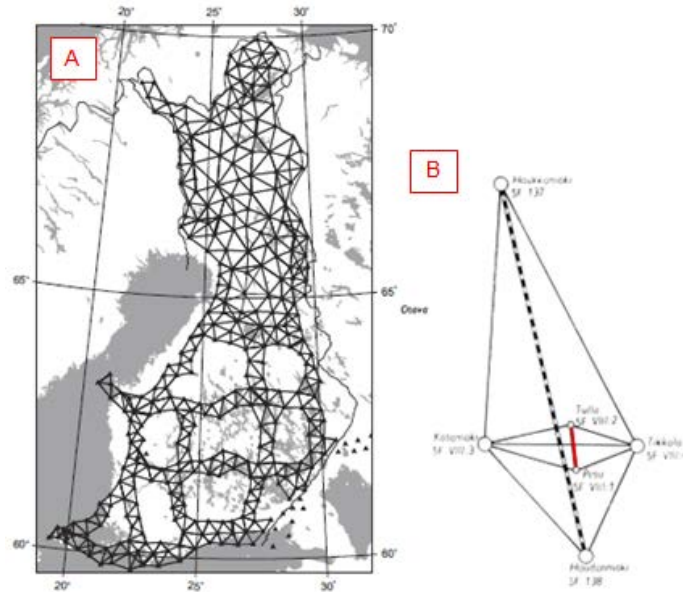
Kuvio 24. 3D-koordinaattijärjestelmä, (Maanmittauslaitos, 2014), oikean käden sääntö, (New World Encyclopedia, 2007).

Sijainnin esittämiseen käytetään maantieteellistä tai geodeettista koordinaatistoa. Koordinaattijärjestelmässä käytetään maapallon muotoa kuvaavaa pyörähdyssellipsoidia, jonka pinnalla maantieteelliset koordinaatit kuvataan. Maantieteellisten koordinaattien kulmamittojen symboleina ovat maantieteellinen leveys ϕ (ellipsoidin normaalin ja päiväntasaajatasen välinen kulma) ja maantieteellinen pituus λ (leveys on etäisyys päiväntasaajasta ja pituus on etäisyys nollameridiaanista). Geodeettinen koordinaatisto on samankaltainen, muuta se sisältää myös korkeuskoordinaatin h , eli korkeuden ellipsoidista, (Suorakulmaiset ja maantieteelliset koordinaatistot, Maanmittauslaitos, 2014.)

6.4 KKJ, VVJ ja ED50 koordinaattijärjestelmät

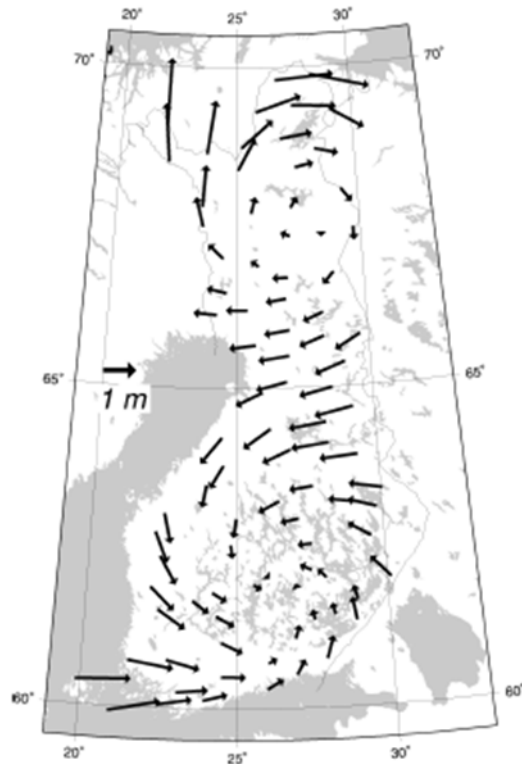
Kartastokoordinaattijärjestelmä KKJ on vielä käytössä Suomessa monissa kunnissa huolimatta siitä, että MML lopetti KKJ-tuen alkuvuodesta 2013. KKJ perustuu 1900-luvulla tehtyihin kolmiomittauksiin. Vuonna 1987 Geodeettinen laitos sai päätökseen I-luokan (kuvio 25 A) mittaustyöt, jotka oli aloitettu 1919. Kolmiomittaus perustuu trigonometriseen kolmionratkaisuun. Kun tunnetaan kaksi kulmaa ja yksi sivu, voidaan muut sivut määrittää laskemalla. Suomen kolmiomittauksessa mitattiin ylimäärityksenä myös kolmas kulma. Etäisyyden mittauksiin käytettiin ensimmäisen luokan mittauksissa säännöllisesti kalibroituja invarlankoja, (Häkli, Puupponen, Koivula & Poutanen 2009.) Invarteräksen lämpötilakerroin on $2^{10-6/K}$ ja teräksen vastaava on $12^{10-6/K}$, jolloin lämpölaajeneminen invarteräksellä on huomattavasti pienempää, kuin teräksellä, (Metaliseosten ominaisuuksia, 2015). Jokaisella ensimmäisen luokan pisteellä suoritettiin myös tähtitieteelliset mittaukset kolmioverkon asemoimiseksi maapallon pinnalle. Lisäksi kolmioverkossa mitattiin 100–200 kilometrin välein perusviivoja mittakaavan varmistamiseksi. Kulmanmittausten ja suurennosverkon avulla perusviivan pituus siirrettiin kolmion 30–50 kilometrin perusviivan pituudeksi (kuvio 25 B), (Häkli ym. 2009, 9,14.)

Maanmittaushallitus aloitti 1920-luvulla ensimmäisen valtakunnallisen tasokoordinaatiston luomisen. Järjestelmän nimeksi tuli Helsingin-järjestelmä lähtöpisteen sijainnin, Kallion kirkko, mukaan, joka sijaitsee Helsingissä. Verkkoa on kutsuttu myös Valtion vanhaksi järjestelmäksi, VVJ. Perustana uudelle järjestelmälle oli Geodeettisen laitoksen (GL) vuonna 1919 aloittama kolmiomittaus. GL mittasi aluksi kolmioverkkosilmukoita saadakseen verkon ulottumaan koko maahan mahdollisimman nopeasti. Mittauksen edetessä silmukat tasoitettiin niiden valmistuttua. Tasoitetut koordinaatit olivat uusien silmukoiden tasoituksiensa lähtöpisteinä. Tasoitustavasta johtuen virheet alkoivat kasaantua ja VVJ-verkosta tuli epähomogeeninen, (Häkli ym. 2009, 16,17.) Kuvio 26 osoittaa GPS-mitattujen EURE-FIN-koordinaattien ja liu'uttamalla syntyneen KKJ-koordinaattien erot, (VVJ, Maanmittauslaitos, 2014).



Kuvio 25. A, B. I-luokan kolmioverkko A ja Otavan perusviiva ja suurennusverkko B, (mukaillen Häkli ym. 2009).

Punainen perusviiva mitattiin ja siirrettiin kulmahavainnoilla perusviivan pituudeksi, katkoviiva, (Häkli ym. 2009).



Kuvio 26. KKJ kiertä verrattuna EUREF-FIN koordinaatteihin (Julkishallinnon suositus, JHS 153, 2008,3,1).

Ellipsoidina VVJ:ssä käytettiin Hayfordin (kansainvälistä 1924) ellipsoidia. Hayfordin ellipsoidi ei ole geosentrinen, vaan se eroaa geosentrisistä järjestelmistä lähes 200 metriä. VVJ:ssä on 3:n asteen projektiokaistoja 4 kpl (21°, 24°, 27° ja 30°) kuten KKJ:ssä oli alun perin. Myöhemmin KKJ täydennettiin 0- ja 5-kaistalla, 18° ja 33°. Erotukseksi KKJ:stä VVJ:n koordinaattien ensimmäiset numerot jätettiin yleensä merkitsemättä, (Häkli ym. 2009, 16.)

II-maailmansodan jälkeen U.S.Army Service (AMS) organisoi kaikkien Länsi-eurooppalaisten datumien uudelleenlaskennan. Uuden järjestelmän nimeksi tuli European Datum of 1950 (ED50). NATO piti ED50 järjestelmää sotilaallisena salaisuutena useita vuosia, (Mugnier 1998). Suomen pisteet sisältäneen pohjoisen lohkon laskennan suoritti U.S. Coast and Geodetic Survey. ED50 vertailuellipsoidina oli Hayfordin ellipsoidi. Suomen I-luokan kolmiopisteiden tasoitus tapahtui vuosina 1956–1966 ja mukana olivat kaikki vuosina 1920–1962 suoritettut I-luokan kolmioverkon havainnot. Tasoitettujen havaintojen perusteella laskettiin ED50-koordinaatit kaikille kolmiopisteille lähtöpisteenä Simsiön yhteiseurooppalaisen tasoituksen koordinaatit. KKJ:n maantieteelliset ED50-koordinaatit muunnettiin X_{ED50} ja Y_{ED50} tasokoordinaateiksi maan kattavassa Gauss-Kruger-projektiossa kaistassa 27°. Muunnoksen jälkeen laskettiin neliparametrinen yhdenmuotoisuusmuunnos 202 pisteen kautta ED50-VVJ. Tämä tarkoitti ED50-koordinaatiston siirtämistä ja kiertämistä, kun se sovitettiin Helsingin koordinaatistoon. Muunnoskaavoilla (kaava 5) laskettiin kaikille I-luokan kolmiopisteille kkj-koordinaatit, X_{kkj} ja Y_{kkj} , sekä muunnettiin ne lopuksi omiin projektiokaistoihinsa, (Häkli ym. 2009.)

$$\begin{aligned} X_{kki} &= -61.571 + 1.00000075 * X_{ED50} - 0.00000439 * Y_{ED50} \\ Y_{kki} &= 95.693 + 1.00000075 * Y_{ED50} + 0.00000439 * X_{ED50} \end{aligned}$$

(5)

6.5 Euref-Fin

Nykyiset globaalit koordinaattijärjestelmät ovat suorakulmaisia ja kolmiulotteisia järjestelmiä, (CTRS). Järjestelmien origo sijaitsee maapallon massakeskipisteessä, X-akseli osoittaa keskimääräiseen Greenwichin meridiaaniin, Z-akseli on maapallon pyörimisakselin suuntainen ja Y-akseli on kohtisuorassa X- ja Z-

akseliin, (Häkli ym. 2009.) Globaalina järjestelmänä satelliittipaikannus tarvitsee yhtenäisen maailmanlaajuisen koordinaatinjärjestelmän. Vuonna 1999 pidettiin Euroopan komission aloitteesta kokous (Spatial Reference Workshop4), jossa suositeltiin ETRS89 koordinaattijärjestelmän hyväksymistä yleiseurooppalaiseksi maantieteellisten koordinaattien järjestelmäksi. Kokous suositteli myös, että eri maiden kansalliset mittausviranomaiset toimittaisivat julkiseen käyttöön sellaiset siirtoparametrit sekä menetelmät, joiden avulla voidaan tehdä siirtyminen kansallisesta koordinaattijärjestelmästä ETRS89-järjestelmään, (JHS 153, johdanto.)

Geosentrinen-koordinaatisto koordinaatiston taustalla on ETRS89, joka yhtyy kansainväliseen ITRS-koordinaattijärjestelmään ajanhetkellä 1989.0. Koordinaatistojen erotus syntyy mannerlaattojen liikkeestä. Koordinaatiston vertailuellsoidina toimii GRS80, jonka isoakselin puolikas on 6 378 137 metriä ja litistyneisyysuhde 1:298,257222101. EUREF-FIN-koordinaatisto, ETRS89-koordinaattijärjestelmän suomalainen realisaatio, pohjautuu avaruusgeodeettisiin mittauksiin ja kansainvälisiin koordinaattijärjestelmiin. Koordinaatisto on kiinnitetty Euraasian mannerlaatan muuttumattomaan osaan. Näin ollen koordinaatit eivät muutu sisäisesti mannerlaatan liikkuessa.

Geodeettisen laitoksen ja Maanmittauslaitoksen yhdistymisen myötä Maanmittauslaitokseksi vuoden alusta 2015, uuden organisaation tehtävänä on lakiin perustuen harjoittaa tieteellistä tutkimusta geodesian, paikannuksen, navigoinnin, geoinformatiikan, kartografian, paikkatietotekniikan, fotogrammetrian, laserkeilauksen sekä kaukokartoituksen aloilla. Sen tulee huolehtia geodeettisesta, fotogrammetrisesta, laserkeilaukseen liittyvästä ja muusta paikkatietojen metrologiasta ja suorittaa valtakunnalliset geodeettiset perusmittaukset, ylläpitää geodeettisten ja fotogrammetristen mittauksen mittanormaaleja, sekä toimia pituuden ja putoamiskiihtyvyyden kansallisena mittanormaallilaboratoriona.

Uuden MML:n pitää kehittää ja kokeilla geodesian, paikkatietotekniikan, paikannuksen ja kaukokartoituksen menetelmiä ja laitteita sekä paikannuksen ja kaukokartoituksen menetelmiä ja laitteita sekä edistää näiden käyttöönottoa. Sen on tuettava paikkatietoinfrastruktuurin ylläpitämistä ja kehittämistä, julkaista tie-

toja tutkimustensa tuloksista ja edistää niiden hyväksikäyttöä, (Laki 580/2014, 2§.) Tietoyhteiskuntaan kuluva yhteensopiva ja tarkka koordinaattijärjestelmä, joka on liitetty naapurimaiden vastaaviin järjestelmiin (JHS 153, johdanto).

JHS 153:n suositus on luonteeltaan tekninen ja siinä määritellään yleiseurooppalaisen ETRS89 koordinaattijärjestelmän realisaatio Suomessa. Tästä suomalaisesta koordinaatistosta käytetään nimitystä EUREF-FIN erotukseksi eurooppalaisista realisaatioista ETRF89, (JHS 153, soveltamisala).

6.6 WGS84

WGS84 (World Geodetic System 84) on USA:n puolustusministeriön satelliitinavigointijärjestelmän, GPS, maakeskipisteinen terrestrinen koordinaattijärjestelmä (CTRS) ja geodeettinen datumi. Järjestelmän määritykset seuraavat pääpiirteittäin IERS:n kriteereitä (taulukko 8), jotka on määritetty teknisessä muistiossa no. 36, (NGA, 2014, 2-1.)

Taulukko 8. WGS84 määrittelyn ja tärkeiden vakioiden taulukko (mukaan NGA 2014, 3-4,3-6).

Parametrit	Symboli	Arvo	Yksikkö
Isoakselin puolikas	a	6378137.0	m
Litistyssuhde	1/f	298.257223563	
Geosentrinen gravitaatiovakio	$\mu = GM$	$3.986004418 \times 10^{14}$	m^3 / s^2
Maan nimellinen kulmanopeuden keskiarvo	ω	7.292115×10^{-5}	rads / s
Parametrit	Symboli	Arvo	Yksikkö
Valonnopeus tyhjiössä	c	2.99792458×10^8	m / s
Yleinen painovoimavakio	G	6.67428×10^{-11}	$m^3 / kg s^2$
Ilmakehän kokonaismassan keskiarvo vesihöyryineen	M_A	5.1480×10^{18}	kg
"Tähtitieteellinen" dynaaminen elliptisyys	H	3.273795×10^{-3}	ei yksikköä

WGS84:n nykyinen (taulukko 9) kuudes realisaatio (G1762) on datumi epochina 2005.0. Realisaation on toteuttanut GPS Operational Control Segment

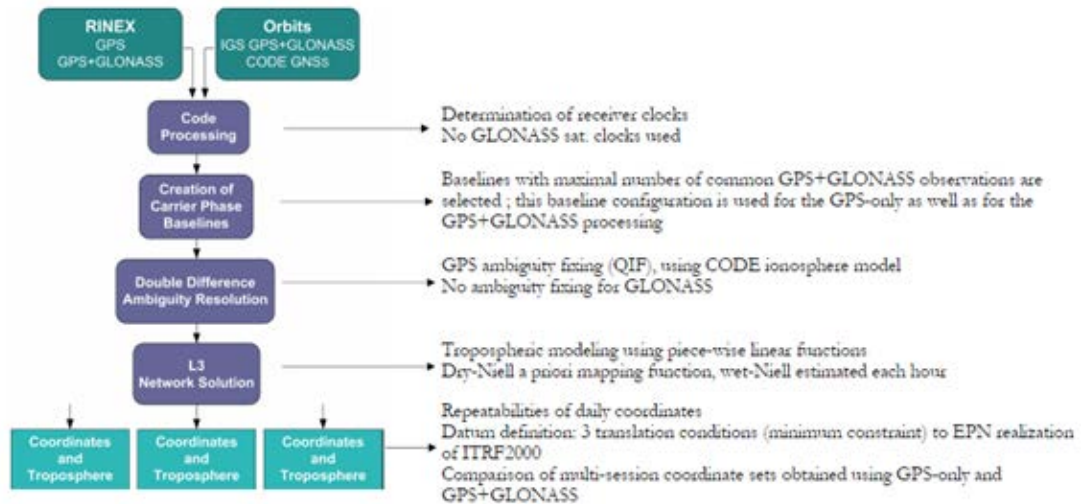
(OCS) lokakuussa 2013 perustuen kaikilta GPS-monitorointiasemilta kerättyyn dataan 11–26 välisenä aikana toukokuuta 2013. G datumin epookissa tarkoittaa GPS ja 1762 on GPS viikon numero perustuen ITRF2008. Alkuperäinen WGS84-realisaatio perustui Doppler Transit nimisenä tunnettuun U.S. Navy Navigation Satellite Systemiin (NNSS), jonka pisteen koordinaattien tarkkuus oli noin yksi metri ITRS-järjestelmässä ja sen realisaatiossa ITRFyy, (NGA, 2014, 2-3.) WGS84 eri realisaatioiden tarkkuus on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. WGS84-asemien koordinaattipäivitykset (mukaillen NGA 2014, 2-4).

Nimi	Käyttöönottopäivä		Epookki	Tarkkuus
	GPS lähetty ratatieto	NGA tarkka ephemeristieto		
WGS 84	1987	Tammikuu 1.1987		1-2 m
WGS 84 (G730)	Kesäkuu 29.1994	Tammikuu 2.1994	1994.0	10 cm/osatekiä rms
WGS 84 (G873)	Tammikuu 29. 1997	Syyskuu 29.1996	1997.0	5 cm/osatekiä rms
WGS 84 (G1150)	Kesäkuu 20.2002	Tammikuu 20.2002	2001.0	1 cm/osatekiä rms
WGS 84 (G1674)	Helmikuu 8.2012	Toukokuu 7.2012	2005.0	<1 cm/osatekiä rms
WGS 84 (G1762)	Lokakuu 16.2013	Lokakuu 16.2013	2005.0	<1 cm/osatekiä rms

6.7 PZ-90

PZ-90 on venäläinen globaali geosentrinen satelliittikoordinaattijärjestelmä, eli se vastaa amerikkalaisten WGS84-järjestelmää. Molemmilla järjestelmillä on kuitenkin oma referenssikehys, joka on riippuvainen kontrolliasemien koordinaateista taaten siten molempien järjestelmien riippumattomuuden toisistaan. Verrattaessa näitä kahta järjestelmää, niin WGS84 on melkein identtinen viimeisimmän ITRF-järjestelmän kanssa. Samoin vuodesta 2013 aloitettu uusi PZ-90.11 on senttimetritasolla yhteneväinen ITRF:n kanssa (Januszewski 2013, 204–205; Russian Institute of Space Device Engineering, 2008.) Molemmilla järjestelmillä on oma toisistaan riippumaton aikajärjestelmä, joka on yhdistetty eri UTC (coordinate Universal Time) realisaatioihin. Siksi siirtyminen GLO-NASS- ajasta GPS-aikaan ei ole helppoa. Aikaväli on otettava huomioon yhdistettäessä GPS/GLONASS-dataa. Kuviosta 27 (Bruyninx 2006) käy ilmi miten eri tavalla GLONASS otetaan huomioon mm. kelloissa ja kokonaisuallonpituudessa, vaikka koordinaatit olisi mitattu GNSS-laitteilla (GPS+GLONASS).



Kuvio 27. GLONASSin käyttöönoton ensimmäiset tulokset pysyvässä EUREF-verkossa, (Bruyninx 2006).

6.8 ITRS/ITRF

Koska maa muuttaa jatkuvasti muotoaan, on mittauksessa ymmärrettävä ajanhetken vaikutus koordinaatteihin. Terrestriaalinen vertauskehys (TRF) sisältää sarjan koordinaatteja, joilla pisteen sijainti esitetään maan pinnalla. The International Terrestrial Reference System (ITRS) on maailman avaruudellinen vertausjärjestelmä, joka muuttuu päivittäin, maapallon avaruudessa liikkeen mukana. ITRF on yhdistelmä yksittäisistä TRF ratkaisuista, jotka IERS analysointikeskukset ovat laskeneet käyttäen avaruusgeodesian menettelytapoja, kuten GPS, VLBL, SLR (satelliittilaser), LLR (Lunar Laser Ranging) ja DORIS. ITRF on sarja pisteitä, joilla on kolmiulotteiset karteesian koordinaatit, jotka toteuttavat parhaan mahdollisen vertausjärjestelmän ITRS. ITRS on International Union of Geodesy and Geophysics määrittelemä järjestelmä, joka otettiin käyttöön Wienissä 1991, (IGN 2014, IERS 2013.). PPP-mittauksen koordinaatit toimitetaan ITRFyy-järjestelmässä. Laskijan tehtävä on valita, mikä on PPP-laskentaohjelman laskentaepookki, jos laskentaohjelma mahdollistaa valinnan. Vaikein tehtävä laskijalla on kuitenkin muuttaa toimitetut ITRFyy-koordinaatit paikalliseksi.

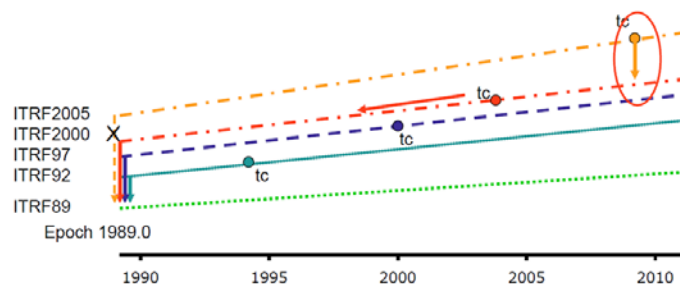
6.9 ETRS89

IAG:n European Reference Frame (EUREF) alakomissio suositti vuonna Firenzen kokouksessa 1990, että eurooppalainen TRS järjestelmä on EUREF, joka on yhteneväinen ITRS järjestelmään epookissa 1989.0. EUREF kiinnitettiin Euroasian laatan stabiiliin osaan ja nimettiin European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89), (Lidberg, Häkli, Engsager, Nørbech & Pihlak 2010.) NKG2003 GPS-kampanjan jälkeen päätöslauselmassa numero 3, neljästoista NKG yleiskokous suositteli käytettävän yhtenäistä ETRS89 vertausjärjestelmää Pohjoismaiden alueella. Tämä koskee myös transformaatiota ITRF järjestelmästä yhtenäiseen ETRS89 vertausjärjestelmää (Jivall, Lidberg, Nørbech & Weber, 2003.) Järjestelmä laskettiin ITRF2000 järjestelmässä epookkina 2003.75 ja nimettiin GPS kampanjan NKG2003 mukaisesti NKG_RF03. Suomessa transformatio sisältää kolme vaihetta (kaava 6), (Kenyon, Pacino, Marti 2009, 80.)

1. ITRF2000 (t_c) \rightarrow ITRF2000 (2003.75) \approx (NKG_RF03)
2. ITRF2000(2003.75) \rightarrow ITRF2000(2003.75)1997.0 (laatan sisäinen korjaus epookkiin 1997)
3. ITRF2000(2003.75)1997.0 \rightarrow EUREF-FIN

(6)

NKG 2003 kampanjan seuraajan, NKG 2008 GPS kampanjan, tärkeimpinä syinä olivat GNSS antennien kalibrointimallit ja julkaistu uusi ITRF-järjestelmä (ITRF2005). Kahdeskymmenes EUREF-symposium Gävlessä 2010 esitti toisessa julkilausumassaan suosituksen ETRF2000 hyväksymisestä ETRS89 realisaation conventional terrestria reference frame kehykseksi (kuvio 28), (Lilje 2010.)



Kuvio 28. ETRF2000 on hyväksytty ETRS89 konventionaaliseksi vertauskehykseksi (Lidber ym, 2010).

Uutta kampanjaa koskevissa päätelmissä tultiin seuraaviin lopputuloksiin: Molemmat kampanjat sopivat hyvin yhteen ilman 7-parametrin sovitusta. Uusi kampanja / ETRS89-realisaatio osoittaa systemaattisia eroja virallisiin kansallisiin realisaatioihin, vaikka käytettäisiin muutosnopeutta. Sisäinen geometria toimii hyvin. Pysyvien asemien laitteistojen muutoksiin on kiinnitettävä enemmän huomiota. Standardisoitu epookki 2000.0 toimii käytännössä yhtä hyvin, kuin kansallisten realisaatioiden epookit. Referenssikeyhykset ovat vieläkin tärkeä asia, huolimatta mittauksen geometrian hyvyydestä. Lopputuloksissa haluttiin myös muutosnopeusmalleihin parannuksia (Lidberg, Häkli, Engsager, & Nørbech 2010.). Edellä mainitussa kampanjassa esitettiin NKG 2003 viralliset transformaatiot kansallisiin ETRS89-realisaatioihin, josta esimerkkinä (kaava 7) ITRF 2000 laattanopeus ja NKG2003_vel malli epookista 2008.10.01 Tanskan realisaatioon, (Lidber ym, 2010.) DK:n tilalla voi olla FI, NO tai SE.

1. ITRF 2005 epoch 2008.10.01 \longrightarrow ITRF 2000 epoch 2008.10.01 (IERS 14 par.)
2. ITRF 2000 epoch 2008.10.01 \longrightarrow DK_ETRS89 (NKG 2003 transformation)

(7)

Määrittelyt EUREF GPS kampanjan laskemiseksi ETRS 89-järjestelmässä on ensiksi prosessoida data ITRS järjestelmässä epookissa t_c . Tätä varten käytetään viimeisintä ITRFyy järjestelmää. Jos käytetään IGS-efemeridi tietoja, käytetään YY vastaavaa IGS generoimaa efemeridi-dataa. Transformaatio (kaava 8) ITRFyy – ETRFyy välillä esitetään Boucher & Altamimi Memossa V8 kappaleessa 3 (Boucher & Altamimi 2010.)

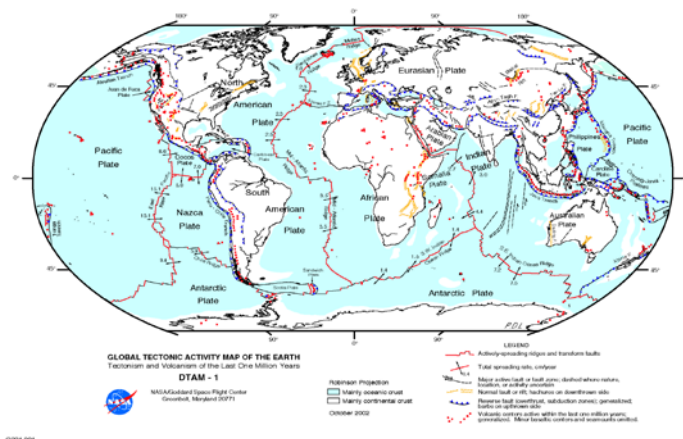
$$X^E(t_c) = X_{YY}^I(t_c) + T_{YY} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_{3YY} & \dot{R}_{2YY} \\ \dot{R}_{3YY} & 0 & -\dot{R}_{1YY} \\ -\dot{R}_{2YY} & \dot{R}_{1YY} & 0 \end{pmatrix} \times X_{YY}^I(t_c) \cdot (t_c - 1989.0)$$

(8)

7. LAATTOJEN LIIKKEET

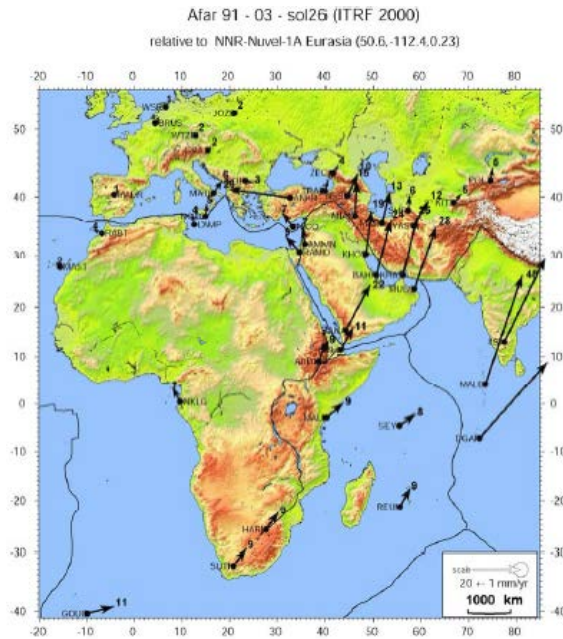
7.1 Yleistä

Maan pintakerroksen paksuus vaihtelee 20–70 kilometriin (vaihtelee eri lähteissä) ollen meren alla ohuin. Tästä johtuen maankuori voidaan luokitella kahdella eri tyypillä, merenalainen - ja mantereenalainen kuori. Kuoren tiheys on keskimäärin $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Suurinta tiheys on vuoristoisilla alueilla. Maan ylintä kerrosta kutsutaan litosfääriksi, kivikehäksi, joka ulottuu noin 100 km syvyyteen osittain vaipan ylimmälle alueelle. Kivikehä on jakautunut laatoiksi (kuvio 29), jotka ovat alituisesti hitaassa liikkeessä. Laattojen liikkuminen on yksi tuntematon tekijä, joka on ratkaistava PPP-mittauksessa, jotta mittauksessa voitaisiin saavuttaa senttimetritaso. Yksi tapa käsitellä laattojen liikkeitä laskennassa on arvioida liikeparametrit paikan parametrien mukana (NGA, 2014, 2-10.)



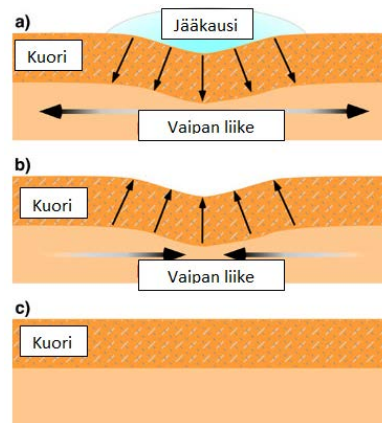
Kuvio 29. Päälaattojen rajat, (NGA 2014, 2-11).

Joidenkin laattaparien liikkeitä on hyvin mallinnettu, koska niillä on merellinen raja, esimerkiksi Afrikka / Etelä-Amerikka. Toisilla liike on huonosti tunnettu, esimerkiksi Arabia / Intia. Huonosti tunnettujen laattaparien suhteellinen liike saadaan käyttämällä hyväksi tunnettujen laattojen ympärysmittoja, esimerkiksi Intia / Australia tunnetaan Afrikan perusteella. GPS nopeuksien perusteella on voitu esimerkiksi määrittää, että Afrikka liikkuu hitaasti pohjoiseen kohti Euraasian laattaa, Somalia alkaa irtaantua Afrikasta, Arabia liikkuu nopeasti pohjoiseen kohti Euraasian laattaa ja Intia liikkuu vieläkin nopeammin pohjoiseen kohti Euraasian laattaa (kuvio 30), (Geodesy & Geodynamics, 2004.)



Kuvio 30. Afrikan ja Intian hajaantuminen, (Geodesy & Geodynamics 2004).

Suomessa jääkaudet painoivat Euraasian mannerlaatan maankuorta alaspäin, merestä siirtyi vettä jäätikköön (merenpinta laskeutui) ja vaippa liikkui sivulle, sekä lisääntyvä painovoima muutti geoidin muotoa. Maankuori painui elastisesti kasaan (kuvio 31 a). Jääkaudesta johtuen pohjoismaissa laatta on deformatunut sisäisesti maankohoamisen vuoksi. Jään sulettua vesi virtaa takaisin mereen, elastinen maankuori palautuu nopeasti ja vaipan massavirtaukset alkavat nostaa jäljelle jäänyttä painumaa hitaasti entiseen asemaansa (kuvio 31 b ja c). Pohjoisella pallonpuoliskolla olleet jääkaudet aiheuttavat oman ongelmansa PPP-mittauksen ratkaisuisissa. Maankuoren liike ei ole pelkästään horisontaalista vaan myös vertikaalista. Jotta koordinaatit olisivat pysyviä myös ajan suhteen, laattojen liikkeiden lisäksi olisi otettava huomioon myös Euraasian laatan sisäiset muutokset. Tämän vuoksi Suomessa, käytettäessä laattamalleja, yleiset laattamallit eivät ole tarpeeksi tarkkoja, vaan mittauksen ratkaisussa olisi käytettävä Pohjoismaihin sovitettua omaa NKG_RF03vel nopeusmallia. Malli ei ole kuitenkaan yleisesti jaossa (Koivula 2014, liite 2).



Kuvio 31 a, b, c. Euraasian laatan vaipan liikkeet (mukaillen Pidwirny & Jones, 2010)

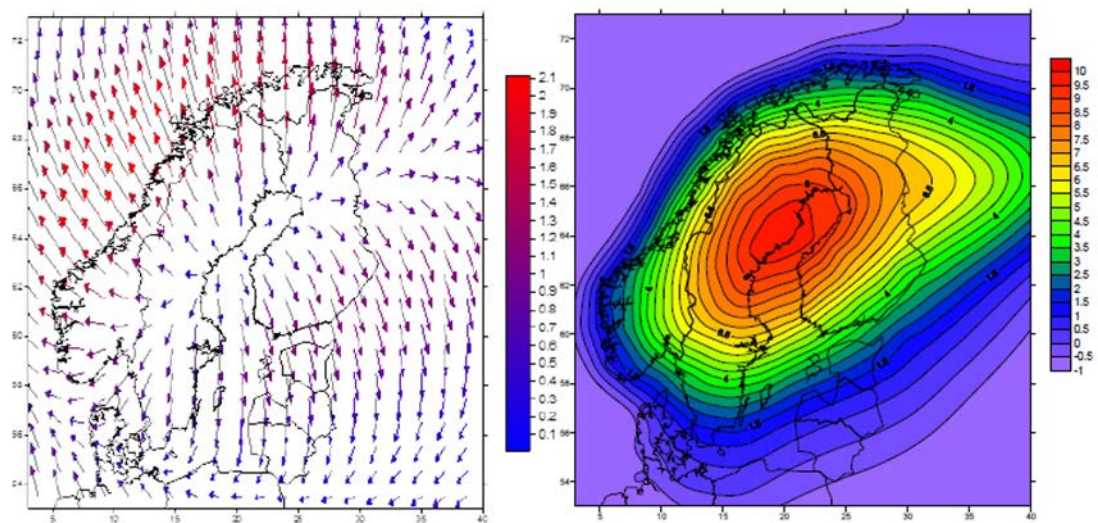
Maan koko massaan kuuluvat kiinteä maa, sekä nestemäinen kalvo kuten valtameret, ilmakehä ja mannermainen vesistö. Yleisesti on olemassa kolmenlaisia geosentrisiä määrittäyksiä. Koko maapallon keskipiste, (CM), kiinteän maan keskipiste (CE) ja maan muodon keskipiste (CF). Keskipisteet eivät ole yhteneväisiä. Liikkeitä CF:n ja CM:n tai CE:n ja CM:n välillä kutsutaan yleisesti geosentrisiksi liikkeiksi (Zhang & Jin 2014.)

7.2 Laattamallit

Globaalissa mittaamisessa, jota myös PPP mittaus pohjimmiltaan on, ajan mukaan liikkuvia paikan koordinaatteja voidaan tarkentaa ottamalla huomioon laattojen liikkuminen. Liikkeen arviointiin voidaan käyttää laattojen liikkeistä tehtyjä malleja ja nopeusarvioita. Maapallon ajoittaiset, erilaiset muutokset ja vyöhykkeet rajaavat kuitenkin mallit ainoastaan tietylle alueelle sopiviksi. Plag mainitsee kirjassaan National Geodetic Infrastructure, *“Motion in Norway is mainly due to plate tectonics (mainly horizontal) and postglacial deformation (mainly vertical). It is necessary to monitor Norway's motion in relation to the satellite orbits that provide access to the global geodetic reference frame”*, (Plag, 2006, 9). Sama, joka koskee Norjaa, koskee myös Suomea. Laajoilla alueilla laatoissa esiintyy sisäisiä deformaatioita ja etenkin tektonisesti aktiivisilla alueilla nopeudet voivat olla useita kymmeniä millimetrejä vuodessa, (Plag 2006, 24.) Normaaleissa staattisissa laskennoissa paikallisesti ei laattoihin liittyviä seikkoja tarvitse ottaa huomioon, mutta PPP mittauksen laskemisessa laat-

Vuoteen 2001 asti Euraasian kiinteänlaatan liikkeen oikeana ETRS89 mallina pidettiin NUVEL-1A-NNR ennustamaa liikettä, (Kierulf, Plag, Kristiansen &

Nørbech 2003). Lotti Jivalin esityksen mukaan Vilnassa 2014, paras malli Ruot-
sissa ja siten myös muissa Pohjoismaissa, joissa on jääkausien aiheuttamia
muutoksia, on nykyään NKG_RF03_vel malli. Malli tullaan kuitenkin tulevaisuu-
dessa korvaamaan paremmilla malleilla. Kuviossa 33 vasemmalla on vaa-
kasuuntainen laattaliike mm/vuosi ITRF2000 Euraasian laatan kiertonavan (Eu-
ler pole) mukaisesti. Oikealla on ITRF2000 pyörähdysnavan määrittämä Eu-
raasian vakaan tektonisen laatan sisäinen deformaatio NKG_RF03vel nopeus-
mallin mukaisesti.



Kuvio 33. Vasemmalla on laatan horisontaalinen- (0-2 mm/v) ja oikealla vertikaalinenlii-
ke (1-10 mm/v), (Jivall 2014).

Yleisimmät laattojen liikkeiden mallit ovat MORVEL 56, NUVEL1 A ja ITRF08-
PMM, joka on estimoitu ITRF2008 GPS ratkaisuista. Keskiarvo sigma kaikille
GPS-sovitetuille nopeuksien virheille on 1.7 mm/v. Kaikki GPS-asemat, joiden
virheet ovat suuremmat, kuin 3σ (5.1 mm) on poistettu, (Zhang & Jin
2014.) Yleisissä malleissa ei yleensä huomioida Fennoskandian jääkauden ai-
heuttamia sisäisiä muutoksia.

8. PPP-LASKENTAOHJELMISTA

Kaikki Precise Point Positioning -laskentaohjelmat vaativat rekisteröitymisen palveluun, vaikka muutoin suurin osa niistä on ilmaisia. Monet ohjelmat eivät käytä lainkaan laattamalleja. Mittaajan on kuitenkin varmistettava asia laskenta-palvelusta, ellei asiasta ole mainintaa palveluntuottajan nettisivuilla. Myös datan määrää ohjelmissa on rajoitettu joko luotauksen pituuden, tai luotauksen koon mukaa.

Laskentaohjelmat koostuvat pääasiassa seuraavista viidestä osasta: 1. vastaanotetusta datasta, 2. alustuksesta, 3. datan ennakkolaskennasta, 4. sijainnin laskemisesta ja 5. graafisesta esityksestä (Du 2012, 300.)

1. Datana käytetään pääasiassa GPS vastaanottimen tallentamaa havaintodataa (Odata) ja signaalin mukana tullutta efemeridi dataa (Nsaved). Käytetty ”tietoserveri” lähettää ratatiedot ja kellotiedot.
2. Alustusosassa pääasiallisesti sijoitetaan koordinaatisto yhden pisteen ”vale-etäisyyden” kautta. Samaan aikaan käsitellään alustavasti dataa ja Kalman filtteriä.
3. Datan jatkokäsittelyssä hallitaan tehokkaasti monitorointi, datan ja havaintojen suuret virheet, sekä korjataan signaalikatkot.
4. Pisteen sijainnin laskemisessa tarkistetaan ja korjataan jatkokäsiteltä dataa. Sen lisäksi ohjelma laskee koordinaatit ja havaintoaseman tarkkuusasteen käyttäen suodatusta.
5. Graafinen esitys esittää laskijalle mitatun pisteen kolmiulotteiset koordinaatit ja tarkkuustiedot, sekä muita asiaankuuluvia tietoja (kuvio 34).

Dual frequency data quality control function
 Calculation function based on broadcasting satellite ephemeris
 Track and clock difference enhancing function based on differential correction
 Dual frequency carrier positioning, speed measurement function
 Dual frequency fuzzy determination function
 Meteorological parameter evaluating function
 Terminal time synchronization function

Kuvio 34. Kaksitaajuuslaskenta voi selvittää datalaskennan riippuvuudet (Du 2012, 300).

Laskentaohjelmissa ongelmana on monesti epätietoisuus siitä, miten ohjelmat ratkaisevat mittauksen. Esimerkiksi Trimble CenterPoint RTX Post-Processing Services on hyvin ohjeistettu laskentaohjelma. Laskennassa on mahdollisuus valita ITRF-järjestelmä 1988–2008 välillä. Laattamalli valitaan automaattisesti datan perusteella, tai sen voi valita itse alueen perusteella. Suomessa mallina käytetään MORVEL 56-mallia, joka kiertoparametrit ovat Altamini (2007) ja Bird (2003) tuottamia. Datamäärä on rajoitettu alle 24 tunnin luotausajaksi. Ohjelma ei tue myöskään vanhempia antennejä. Toinen ohjelma CSRSPPP (the Geodetic Survey Division of Natural Resource Canada) ei taas käytä laattamalleja hyväkseen. (Lamothe 2014, liite 3).

Abdelazeem & Çelik ovat testanneet CSRS-PPP-ohjelmaa neljällä asemalla (kuvio 35). Heidän mukaansa online tarjoavia palveluita on viisi: AUSPOS (Geoscience Australia), CSRSPPP (the Geodetic Survey Division of Natural Resource Canada), OPUS (the U.S. National Geodetic Survey), SCOUT (Scripps Orbit and Permanent Array Center, SOPAC) ja APPS, aiemmin Auto-GPISY (Jet Propulsion Laboratory, JPL) (Abdelazeem & Çelik 2014.) CSRS-PPP-ohjelmaa. He pitivät CSRS-PPP-ohjelmaa hyvänä ohjelmana kuitenkin, kuten Abdelazeem & Çelik toteavat, niin kaikilla ohjelmilla on omat hyvät puolensa.

Table 1: Selected points [IGS, 2013]

Station ID	Station Name	Country	Receiver Type	Antenna Type	Operation Date
KIRU	Kiruna	Sweden	SEPT POLARX4	SEPCHOKE_MC SPKE	08-07-1993
BRFT	Eusebio	Brazil	LEICA GRX1200PRO	LEIAT504 NONE	06-09-2005
HARB	Pretoria	South Africa	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00 NONE	09-08-2000
AIRA	Aira	Japan	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00 SCIS	05-12-1997

Kuvio 35. Neljä testausasemaa (Abdelazeem & Çelik 2014).

8.1 Testauksissa käytettyjä ohjelmia ja laitteita

PPP-mittauksen tutkimista varten suoritettiin erilaisia mittauksia, joiden ratkaisemiseksi käytettiin useita eri ohjelmia. Staattisen mittauksen Javad GPS-laitteiden konfigurointiin ja purkamiseen käytettiin Topconin PCCDU-ohjelmaa. Mitatun datan muuntamiseksi RINEX dataksi käytettiin Topcon Tools-ohjelmaa

v. 8.2.3, jolla tehtiin myös osin staattista laskentaa, kuten Javadin (Topcon) omalla Pinnacle-ohjelmalla v. 1.7. Staattisen laskennan kontrolloinnissa käytettiin Trimble Business Center v 2.40 (Patch 3) ohjelmaa.

Käytetyn paikkatietolaiteen Trimble GeoXT-laiteen purkamiseen ja jälkilaskentaan käytettiin Trimble Pathfinder Office-ohjelmaa v 5.0. Ohjelmaa hyödynnettiin myös datan RINEX-formaatin muuttamiseen ja ulosviemiseen.

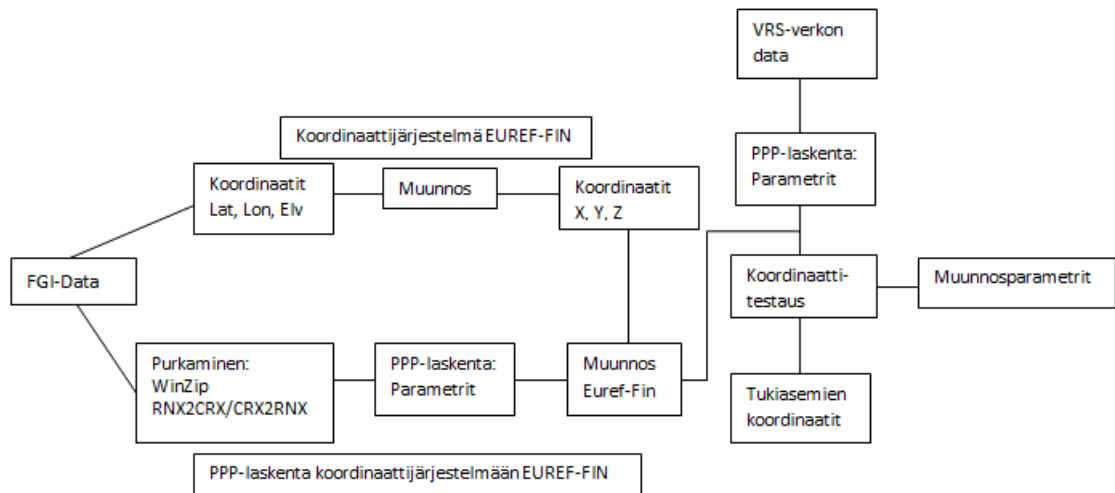
Virtuaalidata käytiin hakemassa luotausajankohdan mukaisesti Geotrim Oy:n Trimnet GPS/GNSS web-palvelusta. Palvelussa generoitiin sekä virtuaalisia pisteitä uuden pisteen staattista laskentaa varten, että tukiasemadataa testausta ja uuden pisteen laskemiseksi. Trimblen toinen internetin yli käytetty ohjelma oli Trimblen CenterPoint RTX Post-Processing, joka on tarkoitettu Precise Point Positioning -laskentaan.

PPP-ratkaisuihin käytettiin aikaisemmin mainittuja PPP-ohjelmia. Maanmittauslaitoksen paikkatietokeskuksen (FGI) kiinteiden tukiasemien (liite 4) datan purkamisessa käytettiin WinZip- ja RNX2CRX/CRX2RNX-ohjelmaa (Ver.4.0.6). Koordinaatti muunnoksiin käytettiin 3D-Win- sekä Maanmittauslaitoksen Helmert-ohjelmaa, joka ei tue korkeuden muunnosta. Maantieteellisten koordinaattien muuntamiseen käytettiin Excel Transxyz-ohjelmaa, jonka laskenta oli tarkastettu Trimble Business Center-ohjelmalla. Tarvittavia muita laskentoja suoritettiin Mathcad 14 ohjelmalla.

8.2 Muunnosparametrien laskenta

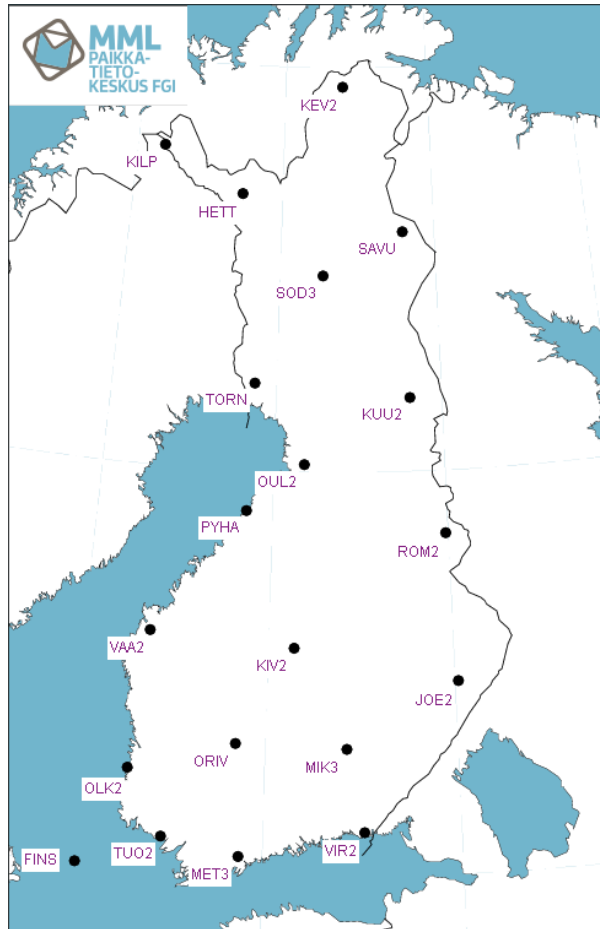
Koska Pohjoismaiden, laatan sisäisen deformaatio NKG_RF03vel nopeusmallin käyttö ei ollut mahdollista tätä opinnäytetyötä tehtäessä, jouduttiin laskemaan mittausten ratkaisemiseksi omat muunnosparametrit (kuvio 36), joissa pyrittiin huomioimaan mahdollisimman hyvin ajallisen muutoksen vaikutus laskettuihin koordinaatteihin. Ensimmäinen laskenta suoritettiin kesällä 2014 käyttäen lähtöpisteinä yhdeksää VRS-verkon kiinteää tukiasemaa (liite 9). Toinen laskenta suoritettiin (liite 10), Maanmittauslaitoksen latauspalvelun avauduttua kesäkuussa 2014, FGI:n RINEX-palvelun datalla ja joulukuussa 2014 julkaistuilla E2-

asemien EUREF-FIN koordinaateilla (liite 8) (FGI RINEX-latauspalvelu koordinaatit 2015). Ongelmana muunnoksen käyttämisessä on, että se vanhenee ajallisesti, joten parametrit on laskettava aikavälein uudestaan. Nopeusmallien käytössä vanheneminen on huomattavasti hitaampaa.



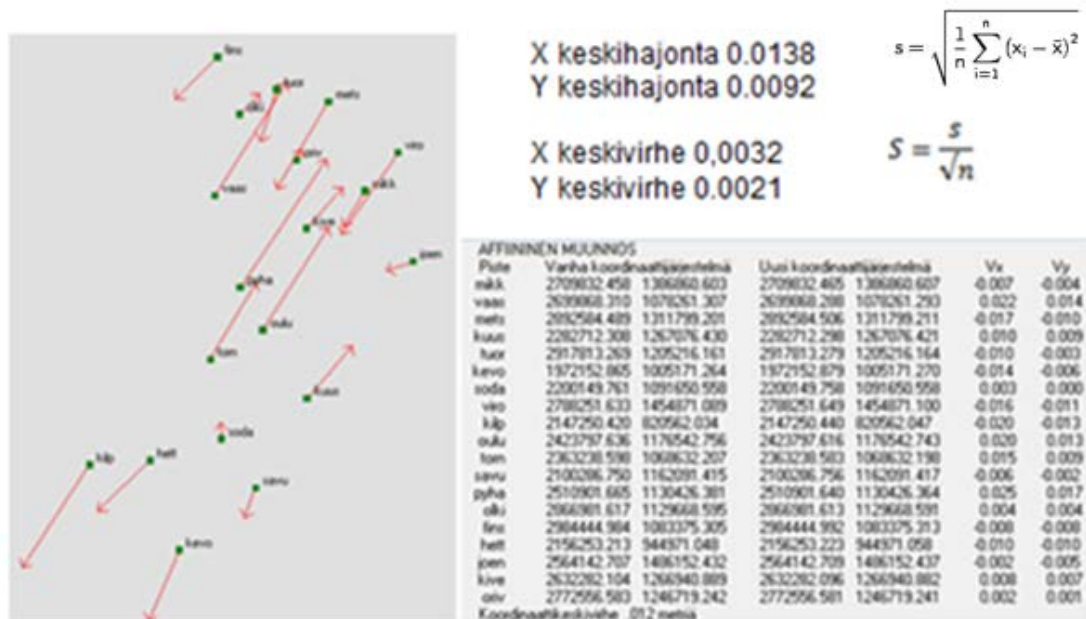
Kuvio 36. Muunnosparametrin laskennan vaiheet (Myller 2015).

FGI-datan PPP-laskennassa käytettiin kaikkia sillä hetkellä (kuvio 37) olevia E2-asemien dataa. Rom2-asemalta ei saanut dataa kyseisellä ajanhetkellä 15.2.2015. Datan laskemisessa käytettiin Trimble CenterPoint RTX Post-Processing Services palvelua, koska siinä voidaan valita, missä järjestelmässä koordinaatit otetaan ulos. Laskennan koordinaattijärjestelmänä oli ETRF2000-R05 ja laattamallina oli automaattisesti MORVEL56. Lasketut koordinaatit muunnettiin EUREF-FIN-järjestelmään Earth-centre Cartesian koordinaatteina ja lopputuloksena saatiin muunnosparametrit käytettäväksi PPP-laskennoissa. Testausta varten haettiin VRS-verkon dataa kiinteiltä tukiasemilta Suomen alueelta satunnaisesti.



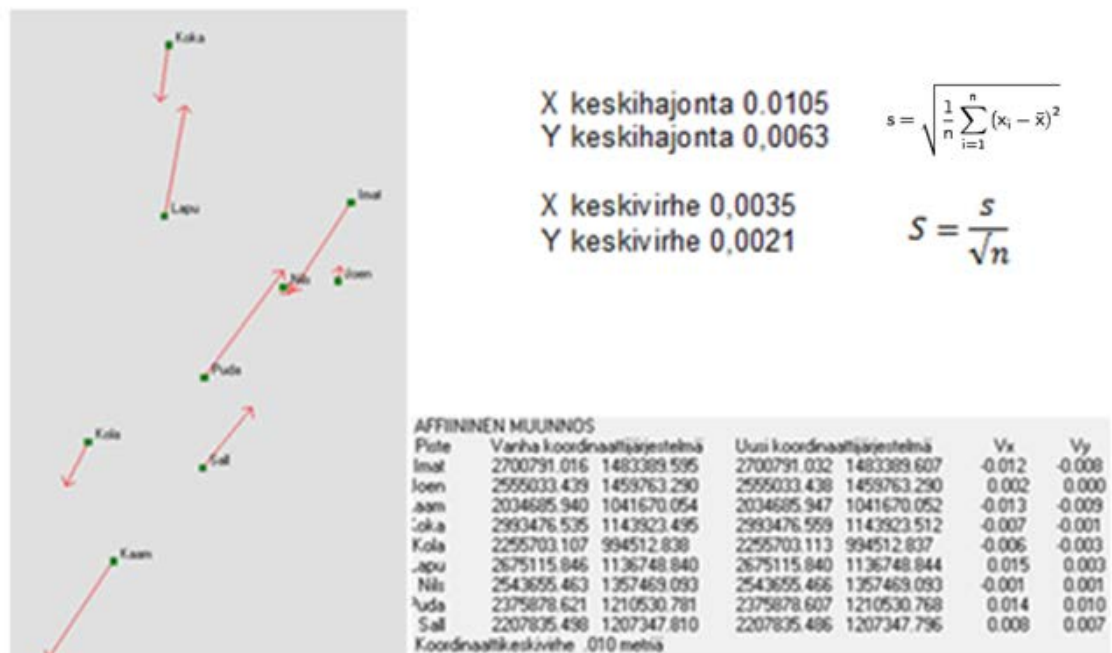
Kuvio 37. E2-asemat, joista voidaan ladata dataa (FGI RINEX-latauspalvelu 2015).

Verrattaessa VRS- ja lopullista FGI-muunnosta (kuvio 38) keskenään, niin Pohjanmaan rannikolla jo muunnosten puolen vuoden ajallinen ero näkyy selkeästi, kun taas Itä-Suomessa muunnoksien erot näkyvät ainoastaan X:n ja korkeuden hienoisena residuaalien kasvuna.



Kuvio 38. Maanmittauslaitoksen Helmert-ohjelma laskenta ilman korkeuksia FGI-datalla (Myller 2015).

Muunnoksen testauksessa kesällä 2014 yhdeksällä kiinteällä VRS- tukiasemalla (kuvio 39) X:n ja Y:n keskivirheet eivät juuri muutu FGI- datan laskentaan nähden.



Kuvio 39. Maanmittauslaitoksen Helmert-ohjelma laskenta ilman korkeuksia yhdeksällä VRS-tukiasemalla (Myller 2015).

Oikein suoritetussa laskennassa ratkaistaan mitattu data PPP-laskenta-ohjelmassa ITRF2000 järjestelmässä (kaava 9). Ko. järjestelmä muunnetaan sen jälkeen ITRF2000 järjestelmän epookkiin 2003.75. Tässä poistetaan laatan sisäinen deformaatio. Lopuksi suoritetaan 7-parametrinen muunnos (kaava 10) kansalliseen ETRS89 realisaatioon (Knudsen 2006, 69.) Taulukossa 10 ovat pohjoismaiden parametrit muunnettaessa ITRF2000 epookissa 2003.75 virallisiin kansallisiin ETRS89 realisaatioihin laatan sisäisen deformaation korjauksen jälkeen (Knudsen 2006, 70). Liitteenä 11 (kaava 14) on kaavalla 10 laskettu esimerkki.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{t_r}^{ITRF\ 2000} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2003.75}^{ITRF\ 2000} + (t_r - 2003.75) \begin{pmatrix} V_{X_{int\ ru}} \\ V_{Y_{int\ ru}} \\ V_{Z_{int\ ru}} \end{pmatrix}_{NKG_RF03vel}^{ITRF\ 2000} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}^{national_ETRS89} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} + (1 + D) \begin{pmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{t_r}^{ITRF\ 2000} \quad (10)$$

Taulukko 10. Pohjoismaiset parametrit kaavaan 10 (Knudsen 2006, 69).

Nation	t_r	$T_x(\text{cm})$	$T_y(\text{cm})$	$T_z(\text{cm})$	D(ppb)	$R_x(\text{mas})$	$R_y(\text{mas})$	$R_z(\text{mas})$
Denmark	1994.707	-3.31	55.84	2.24	-10.91	-16.732	-11.308	18.998
Finland	1997.000	11.15	-7.78	-13.81	9.84	0.700	-4.710	8.091
Norway	1994.665	-5.36	-11.10	-4.58	8.31	3.099	-10.295	8.912
Sweden	1999.500	3.44	3.03	-6.79	0.08	-2.134	-7.765	9.810

9. TESTAUKSIA

9.1 Testauspiste

Tätä opinnäytetyötä, Precise Point Positioning, varten tehtiin mittauksia yhdellä pisteellä sekä geodeettisella laitteella, että selvitettiin paikkatieto- laitteen, Trimble GeoXT, mitattujen koordinaattien tarkkuuden parantamista PPP-mittaustekniikalla. Normaalisti kyseisten laitteiden mittauksen koordinaattien tarkkuuden parantaminen perustuu jälkilaskentaan, ei PPP-laskentaan.

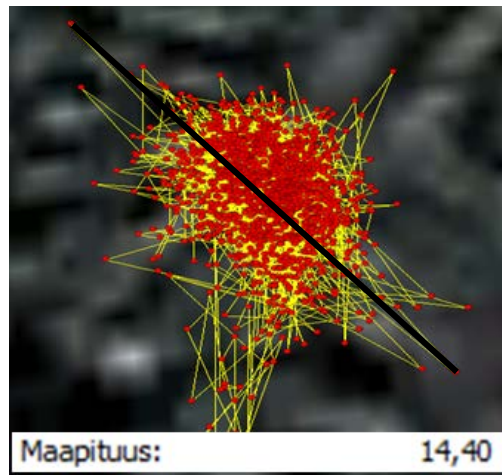
Testauksia varten testauspisteellä mitattiin kuuden tunnin jakso Javad L1/L2-vastaanottimella. Mittauksen tarkkuuden parantamiseen käytettiin Trimble PPP-palveluntarjoajan palveluita sekä haettua IGS-dataa. Testauksen tarkoituksena on selvittää Precise Point Position-mittauksen käyttömahdollisuus mittaustöissä. Kontrollina testauksessa käytettiin staattisella mittaustavalla, sekä VRS-verkossa RTK-mitattuja pisteitä. VRS-verkkoa käytettiin kontrollipisteiden mittauksessa ja laskennassa, koska siinä kaikkien pisteiden sijainti ratkaistaan ETRS-koordinaatistossa huolimatta siitä, mitä mittauslaitteen näytöllä on näkyvissä. Laskettuja staattisia mittauksia lähtöpisteinä käytettiin taas sen vuoksi, että haluttiin ulkopuolisesta järjestelmästä johtuvien virheiden olevan pisteillä samanlaiset.

Alustavassa laskennassa käytettiin satelliittisignaalin mukana tulleita broadcast ephemeris tietoja ja myöhemmin samat vektorit laskettiin IGS-precise-ratatiedoilla, koska myös PPP-laskenta käyttää IGS-ratatietoja. Riippuen kuinka nopeasti laskenta suoritetaan, IGS-ratatiedon tarkkuus vaihtelee (taulukko 4A ja 4B). Reaaliaikainen mittaus VRS-verkossa suoritettiin Trimble R8 kolmoskehitysversion vastaanottimella käyttäen Fin2000-geoidinmallia. Mittauspaikkaa ei oltu optimoitu GPS-mittaukselle, vaan mittauspaikkana käytettiin metsäaukkoa (kuvio 40B ja kuvio 41 suurennos), jossa oli taimistoa ja puustoa ympärillä. Jos olisi valittu optimoitu paikka testaukselle, olisi saatu väärä kuva mittauksen tarkkuudesta käytännön töissä. Mittausajat valittiin siten, että satelliittigeometria oli samanlainen joka mittauksessa, mutta ei optimoitu geometriaa MP-ohjelmilla.



Kuvio 40. Mittauspaikka, punainen ympyrä, ilmakuvalla (Ammattilaisen karttapaikka 2014); Mittauspaikka tallennettuina pisteinä 30s tallennusväleillä (GoogleEarth 2014).

Kuviosta 40B ja 41 käy hyvin selville, kuinka mittaus on hajonnut. Näin suuri hajonta tarkoittaa, että PPP-ratkaisuun pyrittäessä, mittauksen ratkaisu epäonnistuu. Kyseinen hajonta tekee myös staattisessa laskennassa ongelmia.



Kuvio 41. Suurennos mittauksesta, jossa musta vektoriväli on 14.4 m (GoogleEarth 2014).

9.2 Staattinen mittaus ja laskenta

Testauspistettä luodattiin 29.6.2014 Javad Lecasy GPS/GLONASS L1/L2 vastaanottimella kuuden tunnin ajan. Tallennustiheytenä käytettiin 30 sekuntia. Luotauksen aloitus viivästyi 20 minuuttia, koska laite ei ollut ollut käytössä pitkään aikaan, ja se joutui aloittamaan Gold Start-vaiheesta. Gold Start tarkoittaa, että vastaanottimen sisäisestä muistista on kadonnut paikka, almanakka, efe-

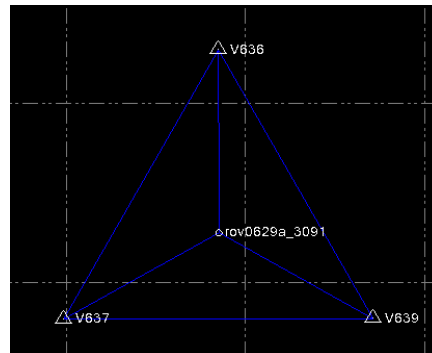
meridi ja aika (taulukko 11). Ainut, joka on jäljellä vastaanottimen muistissa, on kellopoikkeama.

Taulukko 11. Time to First Fix (mukaillen TTFF).

	"Hot" aloitus	"Warm" aloitus	"Gold" aloitus
Aikaisempi sijainti	laitteessa	laitteessa	pyyhkiytynyt
Aika	laitteessa	laitteessa	pyyhkiytynyt
Almanakka	laitteessa	laitteessa	pyyhkiytynyt
Ephemeris-tieto	laitteessa	pyyhkiytynyt	pyyhkiytynyt

Laskenta suoritettiin Javadin Pinnacle v. 1.7 ja Topcon Tools-ohjelmilla v. 8.2.3. Trimblen Business Center versio 2.4 (Patch 3) -ohjelmaa käytettiin pisteen laskennan oikeellisuuden varmistamiseksi.

Jälkilaskenta suoritettiin kolmella virtuaali-pisteellä (kuvio 42), jotka oli haettu Geotrim oy:n Trimnet-palvelusta laskettavan pisteen ympärille. Virtuaalipisteiden paikat oli laskettu valmiiksi 3D-Win-ohjelmalla parhaan geometrian saavuttamiseksi. Laskennassa käytettiin Fin2000-geoidinmallia korkeustarkkuuden parantamiseksi.



Kuvio 42. Virtuaaliverkko, (Myller 2014).

Virtuaalipisteiden staattisen laskennan erot (taulukko 12) ΔX ja ΔY verrattuina RTK-mittaukseen olivat niin pienet, että laskennan varmistus haettiin vielä Joensuun, Kiteen ja Ilomantsin tukiasemalta (Kuvio 42) mittausajankohdan datan ratkaisuilla. Tällä varmistettiin, että laskennassa käytetty data, olisi mitattu, eikä generoitu samasta verkosta, jossa mitattiin RTK-mittaus. Korkeuden ero virtuaalipisteillä lasketun ja RTK-mittauksen välillä oli yllättävän suuri 0.151 m.

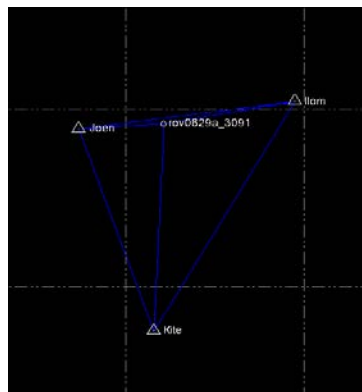
Taulukko 12. Virtuaalipisteiden staattiseen laskennan erot verrattuina RTK-mittaukseen, (Myller 2014).

Adjusted Grid Coordinates

Point ID	Easting (Meter)	Easting Error (Meter)	Northing (Meter)	Northing Error (Meter)	Elevation (Meter)	Elevation Error (Meter)	Constraint
rov0629a_3091	30510657,027	0,006	6945745,477	0,005	129,572	0,004	
V636	30510656,943	?	6945765,859	?	82,800	?	LLh
V637	30510639,635	?	6945735,840	?	82,800	?	LLh
V639	30510674,270	?	6945735,868	?	82,800	?	LLh

RTK-mittaus piste rov0629a_3091	Δ -EROT
X = 6945745.477 m	X 0.000
Y = 30510657.023 m	Y 0.004
H = 0129.421 m	H 0.151

Kuviosta 43 voidaan nähdä, että vaikka uusi laskettava piste on muunnospisteiden sisällä, laskennan painotuksessa eteläisimmällä pisteellä on vähäisempi painoarvo. Laskennassa oli alun perin mukana myös Lieksan piste, joka sijaitsee pohjoiseen laskenta-alueelta. Lieksan mukanaolo laskennassa heikensi laskentatulosta niin paljon, että se jätettiin pois.



Kuvio 43. Tukiasemaverkon pisteet laskettava piste kolmion sisällä, (Myller 2014).

Tukiasemadatan ja virtuaalipistedatan laskennan erot (taulukko 13) olivat samaa luokkaa, joka yleensä ovat VRS-verkossa RTK-mittauksen pisteiden ja kolmiopisteiden välinen ero. Korkeudessa geoidinmalli ei ole toiminut täysin, vaan ero on ehkä hiukan liian suuri.

Taulukko 13. Staattisen mittauksen erot käytettäessä virtuaalipisteitä ja tukiasemien dataa, (Myller 2014).

Adjusted Grid Coordinates

Point ID	Easting (Meter)	Easting Error (Meter)	Northing (Meter)	Northing Error (Meter)	Elevation (Meter)	Elevation Error (Meter)	Constraint
Ikon	30547470,395	?	6952059,135	?	173,683	?	LLh
Joen	30486675,592	?	6944288,513	?	96,671	?	LLh
Kite	30507779,867	?	6887441,086	?	114,999	?	LLh
rov0629a 3091	30510657,023	0,004	6945745,490	0,005	129,520	0,012	

VRS-datan/tukiasema-datan laskenta

$\Delta X = -0.013 \text{ m}$

$\Delta Y = 0.004 \text{ m}$

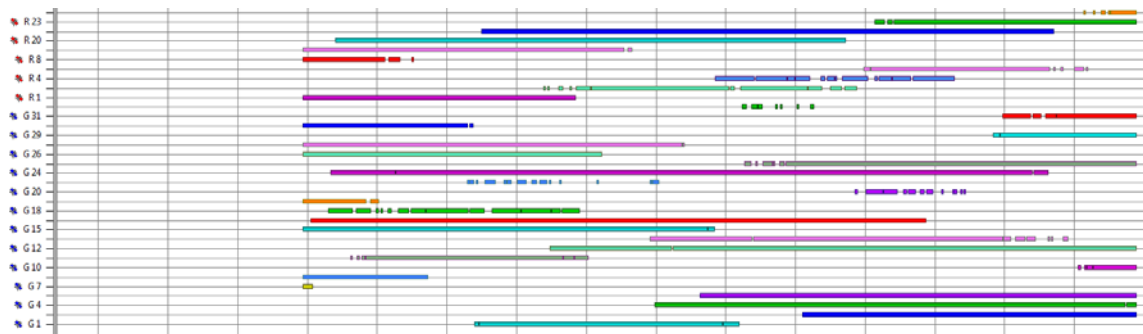
$\Delta H = 0.052 \text{ m}$

Koska korkeuden suhteen oli epäselvyyttä, niin uuden mitattavan pisteen korkeus vaaittiin Sokkia SDL30 digitaalisella vaaituskojeella. Lähtöpisteenä oli III-luokan vaaituspiste 667424, jonka korkeus N60-järjestelmässä on 127.471. Uuden pisteen vaaitetuksi korkeudeksi saatiin 129.459. Näin saatua korkeutta pidettiin kiinteänä ja siihen verrattiin RTK-mittattua, tai jälkilaskettuja korkeuksia. VRS-verkossa suoritettun RTK-mittauksen korkeusero, verrattuna vaaittuun korkeuteen, oli -0.038 m. Kiinteiden tukiasemien kautta laskettu korkeusero mitattuun korkeuteen ΔH , oli 0.061 m ja generoitujen lähtöpisteiden kautta laskettu korkeus ΔH , oli 0.113 m. RTK-mittauksen korkeus oli siten lähempänä vaaittua korkeutta, kuin generoitujen, tai kiinteiden tukiasemien kautta laskettu korkeus. Syitä miksi korkeus heittelee noinkin paljon, voi olla useita, mm. etäisyydestä johtuva virhe kiinteistä tukiasemista.

9.3 Pisteen Precise Point Positioning-ratkaisu

Kuviosta 41 käy jo ilmi, että testauspisteen mittausdata ei ollut hyvää. Huonosta datasta saa yleensä huonon ratkaisun pitää paikkansa myös tässä mittauksessa. Jo ensimmäinen laskenta osoitti, että PPP-mittausmoodin laskennalla saadaan virheellisiä koordinaatteja. Mittausaika pisteellä oli keskimäärin 6 tuntia. Pisteen paikka ei ollut huono staattisessa mittauksessa, eikä RTK mittauksessa, mutta PPP mittaukseen se oli liian huono signaalikatkojen vuoksi (kuvio 44). Kyseisiä signaalikatkoja voidaan korjata staattisessa mittauksessa ja RTK-mittaus on niin nopea, että laajoja signaalikatkoja ei ehdi syntyä. PPP-

laskennassa laskija ei yleensä tiedä, miten signaalikatkoja ja huonoa dataa käsitellään



Kuvio 44. Signaalikatkoja mitatulla pisteellä (Topcon Tools v8.2.3).

Oman pisteen PPP-laskenta antoi tuloksen Cartesian koordinaatteina

$X = 2541937.068\text{m}$, $Y = 1479894.007\text{ m}$, $Z = 5640615.932\text{m}$. Oman pisteen staattinen laskenta antoi tuloksen Trimble Business Center ohjelmalla:

$X = 2541937.157\text{ m}$, $Y = 157\ 1479894,047\text{ m}$, $Z = 5640616,137\text{ m}$

Lasketut koordinaattierot ovat: $Dx = -0.089$, $Dy = -0.040$ ja $Dz = -0.205$. Laskenta ei siten täyttänyt senttiluokan tarkkuutta, jota alkukuoletuksena odotettiin.

9.4 Trimble GeoXT

Koska Trimble GeoXT-paikkatietolaitteella ei saatu luotettavasti mitattua antenniongelmien vuoksi, niin noin tunnin mittaus laskettiin jälkilaskentaan perustuen Trimble Pathfinder Office-ohjelmalla ver. 5.0. Korkeutta ei otettu laskennassa huomioon, vaikka ulkoinen antenni oli asetoitu laskettavan pisteen päälle ja mitattu antennikorkeus. Verrattaessa GeoXT jälkilaskettua pistettä (kuvio 45) staattiseen-mittaukseen, niin lopputulos oli yllättävän hyvä. X:n poikkeama oli -0.080 m ja Y:n poikkeama -0.048 m . Verrattaessa RTK-mittaukseen, poikkeamat olivat vieläkin pienemmät johtuen VRS-verkon datan käytöstä laskennassa. X:n poikkeama oli -0.067 m ja Y:n poikkeama -0.048 m .

XYZ	Data
X	6945745.410
Y	30510656.975
Z	0.000

Kuvio 45. Trimble GeoXT tulos ETRF-koordinaatteina, (Myller 2014).

Trimble GeoXT PPP-laskennan Cartesian koordinaatit olivat $X = 2541936.645$ m, $Y = 1479894.393$ m ja $Z = 5640616.5472$ m. Laskennan koordinaattivirheet olivat $Dx = -0.512$, $Dy = 0.346$ ja $Dz = 0.335$. Trimble GeoXT mittauksen jälkilaskenta antoi huomattavasti paremman lopputuloksen, kuin PPP-laskenta.

9.5 Lisätestauksia

Precise Point Positioning-ohjelmien testauslaskennassa käytettiin vielä dataa kuuden tunnin ajalta Geotrim Oy:n Trimnet GPS/GNSS web-palvelun Helsingin pisteeltä. Laskennassa käytettiin PPP direct-ohjelmaa v1.4 (the Geodetic Survey Division of Natural Resource Canada), Trimble CenterPoint RTX Post-Processing Services, sekä Jet Propulsion Laboratoryn (JPL) The Automatic Precise Positioning Service of the Global Differential GPS (GDGPS) System palveluita. Jälkimmäinen ohjelma käyttää GIPSY 6.3 ohjelmaa, joka on kehitetty JPL:n GIPSY-OASIS GPS-laskenta ja analysointiohjelmasta. Kaikki kolme ratkaisevat koordinaatin melkein yhtenäisesti (kuvio 46). Kaikki kolme laskentaa ovat liitteenä 5₁₋₇, 6, sekä 7. Laskenta eroaa kuitenkin Geotrim Oy:n ilmoittamista koordinaateista, koska laskennassa tarkasteltiin ainoastaan laskemista, ei koordinaatteja ITRF2008 epookkina 2015.0.

CSRS-PPP, PPP-direct v1.4

Cartesian coordinates (X Y Z in metres) 2877740.920, 1345210.428, 5512290.313

Trimble CenterPoint RTX Post-Processing Services

ITRF2008 at Epoch 2015.09		
Coordinate	Value	σ
X	2877740.908 m	0.006 m
Y	1345210.419 m	0.005 m
Z	5512290.313 m	0.008 m

GIPSY 6.3

Estimated Cartesian coordinates:

X = 2877740.9201 m Y = 1345210.4232 m Z = 5512290.3099 m# Sigmas of Cartesian coordinates: SigX = 0.0017 m SigY = 0.0011 m SigZ = 0.0032 m#

Kuvio 46. Suurin ero tulee Trimblen laskennan X-komponentissa, johtuen käytetystä laattamallista (Myller 2015).

10. JOHTOPÄÄTÖKSET

Witchayangkoon esittää Elements of GPS Precise Point Positioning väitöskirjassaan esimerkkinä PPP-mittauksen soveltuvuudesta: “For example, PPP is useful to researchers for studying diurnal tidal motions of the solid earth center” (Witchayangkoon 2000, 4). Tässä opinnäytetyössä on tultu samaan loppupäätelmään. Suomessa PPP-mittaus ei sovellu, ainakaan vielä, tuottavaan työhön, vaan ainoastaan tutkimustyöhön ja viranomaistoimintaan. Globaalisti Precise Point Positioning-mittauksen laskentaratkaisuja kehitetään yhä reaaliaikaisempaan suuntaan, mutta reaaliaikaisuus ei auta pohjoismaissa, ellei laattojen liikkeitä ja sisäisiä muutoksia saada hallittua paremmin. Etenkin pohjoisilla alueilla olisi otettava huomioon laatan liikkeeseen vaikuttavat jääkausien aiheuttamat sisäiset muutokset ja tätä ilmaiset PPP-laskenta-algoritmit eivät ota huomioon. Myös Pohjoismaiden alueelle laskettu nopeusmalli NKG_RF03vel olisi saatava yleiseen käyttöön, kuten Hannu Koivula esittää sähköpostissaan (liite 2).

Differentiaalimittaus ei ainakaan vielä ole tullut tiensä päähän, kuten suoritettujen mittaukset osoittivat, vastauksena Rizos, Janssen, Roberts & Grinter vuonna 2012 esittämään retoriseen kysymykseen. Tätä opinnäytetyötä varten suoritettujen mittauksien PPP-ratkaisut geodeettisillä laitteilla eivät onnistuneet edes tyydyttävästi, kun taas pelkällä paikkatietolaitteella päästiin koodiin perustuvassa differentiaalimittauksessa huomattavasti parempaan lopputulokseen. Kyseisen mittaus osoitti myös, kuinka tärkeää on mitata siten, että mittauksen tarkkuutta voidaan kontrolloida. Missään perehdytyissä aineistoissa ei mittauksen yleiseen kontrollointiin ollut kiinnitetty huomiota. Kuinka varmistetaan koordinaattien oikeellisuus muulloinkin, kuin tutkimuskäytössä? PPP-mittauksessa kyseessä on kuitenkin piikkimittaus, jonka monitorointi mahdollisuus on olematon verrattaessa esimerkiksi RTK mittauksen laitteen monitorointiin tai staattisenmittauksen laskennan ratkaisuun.

29.6.–16.7.2014 välisenä aikana suoritettujen mittausten epäonnistuminen oli tämän opinnäytetyön kannalta positiivinen ratkaisu. Jos mittaukset olisivat onnistuneet, olisi opinnäytetyössä saatettu tulla toisenlaiseen lopputulokseen, joka ainakin tämän tutkimuksen perusteella olisi ollut virheellinen. Mittausten onnis-

tuminen olisi vaatinut optimaalisen mittauspaikan valinnan, mikä käytännön töissä on joskus mahdotonta.

Myös tässä opinnäytetyössä käytetyt ohjelmat ratkaisun saamiseksi, ovat olleet sellaisia, että normaalimittaajilla niitä ei ole, tai jos ne ovat, niin silloin ei kannata käyttää PPP-mittausmoodia.

Viranomaisten olisi otettava huomioon myös yksittäiset käyttäjät. MML:n latauspalvelussa ei ole mainintaa esimerkiksi siitä, mikä on pakkaustapa, tai mikä on RINEX-formaatti ennen, kuin aloittaa datan lataamisen. Tässä opinnäytetyössä Rinex-datan käytössä ongelmia tuotti Maanmittauslaitoksen paikkatietokeskuksen datan pakkaus, jonka purkaminen ei onnistunut helposti. Myös RINEX-formaatin muuttuminen 2.11 Observation datasta M (mixed) 1.0 Compact Rinex-formaatiksi aiheutti vaikeuksia, koska ainakaan vanhemmat laskentaohjelmat eivät ymmärtäneet formaattia. Tämä tuli ilmi kun Romu2 E2 pisteen data oli taas ladattavissa. Myöskään ohjetta siitä, miten data on purettava, ei ole. Käyttäjän on selvitettävä asia itse. The Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) on julkaisut ohjeita, jotka minusta kuuluisivat MML:n latauspalvelun sivuille. Ladatut Hatanaka tiedostot ovat *.xxd = o-file, *.RXX = GPS nav-file ja RXV= GLONASS nav-file. Nämä puretaan *.RNX-, *.N- ja *.G-tiedostoiksi, jotka viedään laskentaohjelmaan. Purkamisessa Windows käyttäjät voivat käyttää WinZip- ja RNX2CRX/CRX2RNX-ohjelmia. Jälkimmäinen ohjelma vaatii Dos-ohjelman komentokehoteen käyttöä ja Dos-ohjelman hallintaa.

Vaikka tämän opinnäytetyön Precise Point Posiotining -mittaus ja laskenta eivät onnistuneet, niin Galileo-järjestelmän tultua operatiiviseen kuntoon ja, kun Pohjoismaiden alueelle laskettu nopeusmalli NKG_RF03vel saadaan yleiseen käyttöön, niin PPP-mittauksen testausta kannattaisi jatkaa. Testauksessa ei kannata kuitenkaan käyttää mittauksen optimointia, se kuuluu tutkijoille. Jos pyrki myksenä on arvioida mittauksen käytettävyyttä yleisesti, niin testaus on suoritettava vastaavissa olosuhteissa. Maanmittauslaitoksella on testikenttä, jossa maastotiimi testaa kaikki kilpailutettavat GPS-laitteet. Kyseinen testikenttä olisi sopiva myös PPP-mittauksen uudelleen testauksessa.

GPS, GLONASS ja Galileo ovat globaaleja järjestelmiä, joita täydentämään esimerkiksi Itä-Aasian ja Tyynenmeren alueella voidaan käyttää alueellisia järjestelmiä kuten Japanin Quasi Zenith Satellite System (QZSS) järjestelmä. QZSS järjestelmän käytössä on päästy International Federation of Surveyors kuukauden artikkelin (heinäkuu 2014) mukaan Precise Point Positioning-mittauksessa jo reaaliaikaiseen mittaukseen käyttäen MADOCA-LEX viestiä hyväksi. Jos vastaavanlaisia alueellisia järjestelmiä saataisiin Eurooppaan, tai lähialueilla, PPP-mittauksesta saattaisi tulla kilpailukykyinen RTK-mittauksen kanssa.

LÄHTEET

- Abdelazeem, M. & Çelik, R. 2014. Accuracy and repeatability investigation of CSRS-PPP online processing service. Viitattu 2.3.2015
<http://mycoordinates.org/accuracy-and-repeatability-investigation-of-csrs-ppp-online-processing-service/>
- Angrisano, A., Pacifico, A. & Valtaggio, M. 2008. Solving GPS gap - Coverage analysis of a superconstellation made up of GPS+EGNOS+S-QZSS. Viitattu 15.3.2015
<http://mycoordinates.org/solving-the-gps-gap/2/>
- Air Force Space Command. 2014. 20th Anniversary of Initial Operational Capability of the GPS Constellation. Viitattu 1.6.2014
<http://www.afspc.af.mil/news1/story.asp?id=123376652>
- Andrei, C-O., Salazar, D. & Chen, R. 2010. PERFORMANCE ANALYSIS OF THE PRECISE POINT POSITIONING TECHNIQUE AT BUCU IGS STATION. Viitattu 17.1.2015
http://users.aalto.fi/~coandrei/pdf/Andrei_GeoCAD10_v0520.pdf
- Ashby, N. 2004. THE SAGNAC EFFECT IN THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM. Viitattu 5.4.2015
http://areeweb.polito.it/ricerca/relgrav/solciclos/ashby_d.pdf
- Ashtech. 1997. GG24 OEM BOARD & SENSOR GPS+GLO-NASS Reference Manual. Viitattu 11.11.2014
<ftp://glonass-center.ru/REPORTS/OLD/ICD/USERGUID.PDF>
- Bidikar, B., Rao, G., Ganesh, L. & Kumar, S. 2014. Satellite Clock Error and Orbital Solution Error Estimation for Precise Navigation Applications. Viitattu 11.12.2014
<http://www.scirp.org/Journal/PaperInformation.aspx?PaperID=42845>
- Bilker-Koivula, M. & Ollikainen, M. 2014. SUOMEN GEOIDIMALLIT JA NIIDEN KÄYTTÄMINEN KORKEUDEN MUUNNOKSISSA. Geodeettisen laitoksen tiedote 29. Viitattu 16.1.2015
<http://www.fgi.fi/fgi/sites/default/files/publications/gltiedote/GLtiedote29.pdf>
- Boucher, C. & Altamimi, Z. 2011. Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. Versio 8: 18.5.2011. Viitattu 14.2.2015
<http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.ps>
- Bruyninx, C. 2006. Introducing GLONASS in the EUREF Permanent Network: First Results. Viitattu 7.2.2015
http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/06_darmstadt/IGS%20Posters%20PDF/p_5_Bruyninx_GLONASS_EPN.pdf

- Cai, C. 2009. Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GPS and GLONASS Measurements. Viitattu 6.2.2015
http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/YG/09.20291_ChangshengCai.pdf
- Dana, P. 2014. Geodetic Datum Overview. Viitattu 10.1.2015
http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/datum/datum_f.html
- Du, W. 2012. Informatics and Management Science IV. Viitattu 28.2.2015
<http://www.springer.com/engineering/production+engineering/book/978-1-4471-4792-3>
- EL-Hattab, A. 2013. Influence of GPS phase center variation of precise positioning. Viitattu 1.1.2015
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090997713000515>
- Esa navipedia. 2014. Carrier Phase Wind-up Effects. Viitattu 26.12.2014
http://www.navipedia.net/index.php/Carrier_Phase_Wind-up_Effect
- Esa navipedia. 2015. GLONASS Future and Evolutions. Viitattu 8.2.2015
http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_Future_and_Evolutions
- Esa navipedia. 2014. Precise Orbit Determination. Viitattu 26.12.2014
http://www.navipedia.net/index.php/Precise_Orbit_Determination
- FGI RINEX-latauspalvelu. 2015. Viitattu 7.3.2015
http://194.142.239.195:8080/geopp_gnweb/gnweb.html
- Finch, L. 2012. Asen 5050 Project GPS Orbit Accuracy. Viitattu 30.11.2014
http://ccar.colorado.edu/asen5050/projects/projects_2012/finch/finch_proj.html
- FINLEX. 2000. Laki Geodeettisesta laitoksesta 16.6.2000/581 2§. Viitattu 18.4.2015
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140581>
- FINLEX. 2014a. Laki maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskuksesta annetun lain sekä Geodeettisesta laitoksesta annetun lain kumoamisesta 27.6.2014. Viitattu 18.4.2015.
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140581>
- FINLEX. 2014b. Laki Maanmittauslaitoksesta annetun lain muuttamisesta 27.6.2014/580. Viitattu 18.4.2015.
[http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140580;](http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140580)
- Geng, J. 2010. Rapid Integer Ambiguity Resolution in GPS Precise Point Positioning. Viitattu 5.1.2015
http://eprints.nottingham.ac.uk/12116/1/Thesis_of_GENG_Jianghui.pdf
- Geodesy & Geodynamics. 2004. RIGID PLATE TECTONICS. Viitattu 21.2.2015
<http://www.geologie.ens.fr/~vigny/cours/GSoCAS-4.pdf>

- Sanastokeskus. 2014. Geoinformatiikan sanasto (TSK 45). Viitattu 31.12.2015
<http://www.tsk.fi/tiedostot/pdf/GeoinformatiikanSanasto.pdf>
- GPS.gov. 2014. Control Segment. Viitattu 27.12.2014
<http://www.gps.gov/systems/gps/control/>
- GPS.gov. 2014. Space Segment. Viitattu 5.5.2014; 17.4.2015
<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- Hagren, H. 1997. Kolmiulotteisen ympäristömme mallinnus. Viitattu 25.1.2015
http://foto.hut.fi/publications/esitelmät/hhaggren/maanmittaustieteiden_paivat_97.html
- Harima, K., Choy, S., Li, Y., Grinter, T., Chodhury, M. Rizos, C., Wakabayashi, Y. & Satoshi K. 2014. Performance of Real-Time Precise Point Positioning Using MADOCA-LEX Augmentation Messages. Viitattu 25.4.2015
http://www.fig.net/pub/monthly_articles/july_2014/harima_et.al.html
- Heiskanen, T. 2014. Geotrim, artikkelit. Viitattu 18.4.2015
<http://www.geotrim.fi/index.php/kaikki-artikkelit/itemlist/user/398-tuulaheiskanen?start=110>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. 2008. GNSS Global Navigation Satellite Systems. Viitattu 26.9.2014
<http://www2.pv.infn.it/~genova/gps/GpsGalileoGlonass.pdf>
- Huber, K. 2010. PPP: Precise Point Positioning-Constraints and Opportunities. Esitys: FIG Congress 2010. Viitattu 12.12.2014
http://www.fig.net/pub/fig2010/ppt/ts10c/ts10c_huber_heuberger_et_al_ppt_4040.pdf
- Huber, K., Berglez, P., Hofmann-Wellenhof, B., Weber, R. & Troger, M. Viitattu 12.12.2014
http://www.ovg.at/uploads/media/08_Huber_.pdf
- Huber, K., Heuberger, F., Abart, C., Karabatic, R., Weber, R. & Berglez, P. 2010. PPP: Precise Point Positioning-Constraints and Opportunities. Viitattu 25.12.2014
https://www.fig.net/pub/fig2010/papers/ts10c%5Cts10c_huber_heuberger_et_al_4040.pdf
- Huber, K. 2010. Innovative Algorithms for Rapid Precise Point Positioning (RAP-PPP). Viitattu 5.1.2015
http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i5080/files/projekte/Projekt_RAP_PP_en.pdf
- Häkli, P. 2010. Euref-Fin ja korkeudet. Viitattu 17.1.2015
http://www.kolumbus.fi/eino.uikkanen/H-II/PasiHakli/Hakli-EUREF-FIN_ja_korkeudet.pdf

- Häkli, P., Puupponen, J., Koivula, H. & Poutanen, M. 2009. Suomen geodeettiset koordinaatistot ja niiden väliset muunnokset. Viitattu 4.1.2015
<http://www.fgi.fi/fgi/sites/default/files/publications/gltiedote/GLtiedote30.pdf>
- ICSM (The Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping). 2015. Datums 1; About Projections. Viitattu 24.3.2015
<http://www.icsm.gov.au/mapping/datums1.html#difference>
- IERS, International Earth Rotation and Reference System Service. 2013. Viitattu 4.2.2015
<http://www.iers.org/IERS/EN/Organization/About/about.html>
- IGN, Institut Géographique National. 2014. Viitattu 4.2.2015
<http://itrf.ensg.ign.fr/general.php>
- IGS Products. 2013. IGS Product Table, GLONASS Satellite Ephemerides. Viitattu 3.4.2015
<http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>
- Ilmatieteenlaitos. 2014. Avaruussään vaikutus satelliittipaikannukseen. Viitattu 30.12.2014
<http://ilmatieteenlaitos.fi/satelliittipaikannus>
- Januszewski, J. 2013. COMPATIBILITY AND INTEROPERABILITY OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS IN DIFFERENT MODES OF TRANSPORT. PDF. Viitattu 5.2.2015
www.wt.pw.edu.pl/index.php/.../file/Z95-art_18.pdf
- Jivall, L. 2014 The maintenance of SWEREF 99, including the use of a deformation model. Viitattu 18.2.2015
<http://www.euref.eu/symposia/2014Vilnius/03-02-Jivall.pdf>
- Jet Propulsion Laboratory (JPL). TOPEX/Poseidon. Viitattu 1.1.2015
<http://sealevel.jpl.nasa.gov/missions/topex/>
- Julkishallinnon suositus JHS 153. 2008. Viitattu 3.1.2015
<http://www.jhs-suositukset.fi/suomi/jhs153>
- Julkishallinnon suositus JHS 153, liite 3. 2008. Viitattu 4.1.2015
http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS153_liite3/JHS153_liite3.pdf
- Julkishallinnon suositus JHS 184. 2012. Viitattu 4.2.2015
<http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS184/JHS184.pdf>
- Kenan Institute. 2014. GPS- Introduction to GPS. Viitattu 5.12.2014
http://www.kenaninstitute.unc.edu/nccle/GPS/mod1_timeline.htm

- Kenyon, S., Pacino M. & Marti U. 2009. Geodesy for Planet Earth. Springer 2012. Viitattu 11.2.2015
https://books.google.fi/books?id=XwYWcXVIXGkC&pg=PA80&lpg=PA80&dq=NKG_RF03vel&source=bl&ots=qDYMz7zKXO&sig=C4rLuoAZusYaV7fcH0uGa3nsJ0&hl=fi&sa=X&ei=1onbVN7PJIKiyAPogIHIAg&ved=0CCwQ6AEwAg#v=onepage&q=NKG_RF03vel&f=false
- Kierulf, H., Plag, H-P., Kristiansen, O. & Nørbech, T. 2003. Towards the true rotation of a rigid Eurasia. Viitattu 21.2.2015
http://www.epncb.oma.be/_documentation/papers/eurefsymposium2002/towards_true_rotation_of_rigid_eurasia.pdf
- Kleusberg, A. 1990. Comparing GPS and GLONASS. Viitattu 12.12.2014
<http://gauss.gge.unb.ca/gpsworld/EarlyInnovationColumns/Innov.1990.11-12.pdf>
- Knudsen, P. 2006. Proceedings of the 15th General Meeting of the Nordic Geodetic Commission. Viitattu 14.3.2015
[http://orbit.dtu.dk/en/publications/proceedings-of-the-15th-general-meeting-of-the-nordic-geodetic-commission\(3022c083-e839-4107-8a15-828871008a68\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/proceedings-of-the-15th-general-meeting-of-the-nordic-geodetic-commission(3022c083-e839-4107-8a15-828871008a68).html)
- KOMISSION ASETUS (EU) N:o 1089/2010. 2010. Viitattu 10.1.2015
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:323:0011:0102:FI:PDF>
- Kim, D., Serrano, L. & Langley, R. 2006. Phase Wind-Up Analysis. Viitattu 1.1.2015
<http://www.nxtbook.com/nxtbooks/questex/gps0906/index.php?startid=58>
- King, M., Edwards, S & Clarge, P. 2002. Precise Point Positioning: Breaking the Monopoly of Relative GPS Processing. Viitattu 2.11.2014
https://www.staff.ncl.ac.uk/peter.clarke/offprints/king_et al2002.pdf
- Lehmuskoski, P., Rouhiainen, P., Saaranen, V., Takalo, M. & Virtanen, H. 2005. XXII GEOFYSIKAN PÄIVÄT. Viitattu 27.4.2015
http://www.geofysiikanseura.fi/pdf/GFP2005_kirja.pdf
- Lidberg M., Häkli, P., Ensager, K. & Nørbech, T. 2010. The NKG 2008 GPS campaign. Viitattu 14.2.2015
http://www.nkg.fi/nkg/sites/default/files/8%20%20Lidberg_Ensager_nkg2008_transf_b.pdf
- Lilje, M. 2010. Report XXth EUREF Symposium in Gävle Sweden. Viitattu 13.2.2015
https://www.fig.net/commission5/reports/fig_com_5_rep_gavle.pdf
- LIVEVIEWGPS. 2014. Viitattu 7.2.2015
<http://www.liveviewgps.com/blog/russias-glonass-usas-gps-compare/>

- Maanmittauslaitos. 2012. KKJ -tuki päättyy Maanmittauslaitoksen palveluissa alkuvuodesta 2013. Viitattu 18.4.2015
<http://www.maanmittauslaitos.fi/tiedotteet/2012/11/kkj-tuki-paattyy-maanmittauslaitoksen-palveluissa-alkuvuodesta-2013>
- Maanmittauslaitos. 2014a. Paikannussatelliittijärjestelmät. Viitattu 20.12.2014
<http://www.fgi.fi/fgi/fi/teemat/paikannussatelliittij%C3%A4rjestelm%C3%A4t>
- Maanmittauslaitos. 2014b. 3D-Koordinaatistot. Viitattu 1.1.2015
<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/koordinaatit/3d-koordinaatistot>
- Maanmittauslaitos. 2014c. Koordinaatti ja korkeusjärjestelmät. Viitattu 1.1.2015
<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/koordinaatit/koordinaatti-korkeusjarjestelmat>
- Maanmittauslaitos. 2014d. Tasokoordinaatisto. Viitattu 1.1.2015
<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/koordinaatit/tasokoordinaatistot/tasokoordinaatisto>
- Maanmittauslaitos. 2014e. VVJ. 2014. Viitattu 4.1.2015
<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/koordinaatit/tasokoordinaatistot/vvj>
- Maanmittauslaitos. 2015a. Ammatillaisen karttapaikka. Viitattu 2.3.2015
<https://kiinteistotietopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tuotanto/ktp/sivusto/paasivu.html>
- Maanmittauslaitos. 2015b. FGI RINEX-latauspalvelu. Viitattu 7.3.2015
http://euref-fin.fgi.fi/fgi/sites/default/files/e2/E2_EUREF-FIN.pdf
- Mader, G. & Weston, N. 2008. GPS ANTENNA CALIBRATION AT THE NATIONAL GEODETIC SURVEY. Viitattu 1.1.2015
https://www.fig.net/pub/fig2008/ppt/ts05g/ts05g_02_weston_mader_ppt_2857.pdf
- Marreiros, J. 2012. Kinematic GNSS Precise Point Positioning. Viitattu 17.6.2014
http://sigarra.up.pt/up/en/up_pesquisa.pesquisa?pn_tab=0&pv_pesq=University+of+Porto+Ph.D.+Thesis+in+Surveying+Engineering+Faculty+of+Sciences+University+of+Porto+December+2012+&ie=ISO-8859-15&oe=ISO-8859-15&forcesubmit=0
- Metalliseosten ominaisuuksia. 2015. Viitattu 4.1.2015
http://www.taulukot.com/index.php?search_id=mekaniikka_termodynamiikka&lng=fi
- Mugnier, C. 1998. Crids and Datums of the Kingdom Of Belgium. PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING 10/1998. Viitattu 4.1.2015
http://www.researchgate.net/publication/235972678_The_Kingdom_of_Belgium

- Myller, S. 2014. PRECISE POINT POSITIONING SOVELTUVUUS SUOMES-SA. Opinnäytetyö 2015
- Myller, S. 2015. PRECISE POINT POSITIONING SOVELTUVUUS SUOMES-SA. Opinnäytetyö 2015
- New World Encyclopedia. 2007. Viitattu 25.1.2015
http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Cartesian_coordinate_system
- NGA GPS Ephemeris/Station/Antenna Offset Documentation. 2014a. Viitattu 30.12.2014
http://earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/gpsdoc2014_12a.html
- NGA, National Geospatial-Intelligence Agency, Office of Geomatics. 2014b. Viitattu 30.1.2015
http://earthinfo.nga.mil/GandG/publications/NGA_STND_0036_1_0_0_WGS84/NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84.pdf
- NGA, National Geospatial-Intelligence Agency, Office of Geomatics. 2014c. Viitattu 30.1.2015
<http://earth-info.nga.mil/GandG/coordsys/>
- Novatel 1999. MiLLennium-GLONASS GPSCard. Viitattu 20.11.2014
<http://www.novatel.com/assets/Documents/Manuals/om-20000040.pdf>
- Nørbech, T., Kierulf, H. 2007. An Approximate Transformation from ITRF2005 Current Epoch to EUREF89(ETRF89) in Norway for Offshore use. Viitattu 1.2.2015
http://geoforum.livesite.no/kurs-og-konferanser/publiserte_foredrag/2007/foredrag-fra-geodesi-og-hydrografidagene/norbech-transform_itrf2005_euref89-artikkel.pdf/at_download/file
- Pace, S., Frost, G., Lachow, I., Frelinger, D., Fossum, D., Wassem, D. & Pinto, M. 1995. The Global Positioning System, Assessing National Policies. Santa Monica: RAND. Viitattu 10.8.2014
http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph_reports/2007/MR614.pdf
- Pidwirny, M. & Jones, S. 2010. Structure of the Earth. Viitattu 11.11.2014
<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10h.html>
- Plag, H-P. 2006. NATIONAL GEODETIC INFRASTRUCURE Current Status and Future Requirements: The Example of Norway. Viitattu 1.1.2015
<http://www.nbmng.unr.edu/dox/b112.pdf>
- Plag, H-P., Kreemer, C. & Kierulf H. 2014. Viitattu 1.3.2015
http://www.researchgate.net/publication/267846232_Improved_determination_of_rigid_plate_motion_by_incorporating_intraplate_deformation_models

- Poutanen, M. 1998. GPS-paikanmääritys. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa. Viitattu 30.12.2014
- Poutanen, M. 2006. Suomen uusi korkeusjärjestelmä N2000, Maankäyttö 4/2006. Viitattu 16.1.2015
http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk406/mk406_970_poutanen.pdf
- Realflightsystem. 2011. GPS-constellation-v2.pdf. Viitattu 4.4.2015
<http://realfightsystems.com/techpubs/docs/GPS-constellation-v2.pdf>
- Real-World Relativity. 2014. The GPS Navigation System. Viitattu 11.11.2014
<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit5/gps.html>
- RF and Wireless Vendors and Resources. 2012. GPS vs GLONASS. Viitattu 7.2.2015
<http://www.rfwireless-world.com/Terminology/GPS-vs-GLONASS.html>
- Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C. & Ginter, T. 2012. Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End? Viitattu 17.6.2014
https://www.fig.net/pub/fig2012/papers/ts09b/TS09B_rizos_janssen_et_al_5909.pdf
- Royal Naval Museum Library. 2004. Viitattu 23.1.2015
http://www.royalnavalmuseum.org/info_sheets_john_harrison.htm
- Stanaway, R., Roberts, C., Blick, G. & Crook, C. 2012. Four Dimensional Deformation Modelling, the link between International, Regional and Local Reference Frames. Viitattu 4.12.2014.
https://www.fig.net/pub/fig2012/papers/ts02b/TS02B_stanaway_roberts_et_al_5906.pdf
- Stepniak, K., Wielgosz, P. & Paziewski, J. 2014, Abstract. Accuracy analysis of the Klobuchar ionosphere model transmitted by the GPS system. Viitattu 25.12.2014
<http://enviro.vgtu.lt/index.php/enviro2013/enviro9/paper/view/634/80>
- Strang, J. 2013. Viitattu 23.1.2015
<http://www.strang.fi/karttatieto/>
- Suorakulmaiset ja maantieteelliset koordinaatistot. 2014. Viitattu 1.1.2015
<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/koordinaatit/3d-koordinaatistot/suorakulmaiset-maantieteelliset-koordinaatistot>
- Suzuki, T., Kubo, N. & Takasu, T. 2014. Evaluation of Precise Point Positioning Using MADOCA-LEX via Quasi-Zenith Satellite System. Viitattu 26.4.2015
<http://www.taroz.net/paper/IONITM2014.pdf>
- Tateshita, H. 2013 Introduction of QZSS and Multi-GNSS Asia. Viitattu 25.4.2015
http://gnss-pnt.org/summer_seminar/handouts/jaxa.pdf

- Transverce Mercator. Viitattu 25.1.2015
http://www.remotesensing.org/geotiff/proj_list/transverse_mercator.html
- Tetewsky, A., Ross, J., Soltz, A., Vaughn, N., Anszperger, J., O'Brien, C., Graham, D., Craig, D. & Lozow, J. 2009. InsideGNSS. Viitattu 29.12.2014
<http://www.insidegnss.com/auto/julyaug09-tetewsky-appendices.pdf>
- The White House. 2007. Statement by the Press Secretary. Viitattu 17.4.2015
<http://georgewbush-whitehse.archives.gov/news/releases/2007/09/20070918-2.html>
- TTF (Time to First Fix). Viitattu 17.7.2014
http://faq.holux.com/images/f/fd/What_is_GPS_cold_start.pdf
- UNAVCO. 2014. What is the difference between GPS and GNSS? Viitattu 10.12.2014
<http://facility.unavco.org/kb/questions/167/What+is+the+difference+between+GPS+and+GNSS%3F>
- UNAVCO Campaign GPS Handbook. 2010. Viitattu 12.12.2014
<http://facility.unavco.org/kb/questions/660/UNAVCO+Campaign+GPS%7B47%7DGNSS+Handbook>
- United Nations General Assembly. 1999. Report of the Third United Nations Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space, A/GONF.184/3. Viitattu 26.9.2014
http://www.oosa.unvienna.org/pdf/sap/hsti/UNISPACE_report.pdf
- United Nations General Assembly. 1999. Report of the Third United Nations Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space, A/GONF.184/6. Viitattu 26.9.2014
http://download.springer.com/static/pdf/152/bfm%253A978-3-211-73017-1%252F1.pdf?auth66=1415381008_5ab5d399e3ac644556e04a457c6acf71&ext=.pdf
- United Nations General Assembly. 2015. Report of the Economic and Social Council. Viitattu 1.3.2015
http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/69/L.53
- Whalley, S. & Eng, B. 1990. Precise Orbit determination for GPS Satellite. Viitattu 7.2.2015
<http://eprints.nottingham.ac.uk/14554/1/254426.pdf>
- Warren, D. 2002. BROADCAST VS PRECISE GPS EPHEMERIDES: A HISTORICAL PERSPECTIVE. Viitattu 17.1.2015
http://www.colorado.edu/ASEN/asen6090/broadcast_vs_precise.pdf

- Waypoint Consulting Inc. 2005. Static Baseline Accuracies as a Function of Baseline Length, Observation Time and the Effects of using the Precise Ephemeris. Viitattu 11.11.2014
http://www.novatel.com/assets/Documents/Waypoint/Reports/Static_Accuracies.pdf
- Witchayangkoon, B.2000. ELEMENTS OF GPS PRECISE POINT POSITIONING. King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 1992, M.S. University of Maine, 1997, The Graduate School The University of Maine December, 2000. Viitattu 2.11. 2014
http://c-surveyor.com/uploads/167_0.pdf
- Xu, C., Wang, J. & Gao, J. 2011. Outlier Detection Performance in Precise Point Positioning. Viitattu 17.6.2014.
http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/xuc_etal2011a.pdf
- Zhang, X. & Jin, S. 2014. Viitattu 8.2.2015
http://www.researchgate.net/publication/261183563_Uncertainties_and_effects_on_geocenter_motion_estimates_from_global_GPS_observations

LIITTEET

1. Huber, sähköposti
2. Koivula, sähköposti
3. Lamothe, sähköposti
4. NKG 2003 GPS kampanjan pisteet
5. 5 (1-7) Helsingin pisteen laskenta CSRS-PPP-ohjelmalla
6. Helsingin pisteen laskenta Trimble Post-Processing Service Based on RTX Technology –ohjelmalla
7. Helsingin pisteen laskenta
8. Suomen E2 asemien EUREF-FIN maantieteelliset ja geosentriset koordinaatit
9. Neljäntoista VRS-verkon kiinteän tukiaseman Helmert-parametrit
10. Yhdeksäntoista E2-aseman EUREF-FIN Helmert-parametrit
11. 11 (1-3) Laskettu esimerkki

Liite 1 Sähköposti Katrin Huber 2015



Katrin Huber <katrin.huber@tugraz.at>

ke 14.1.2015 10:56

merkitse lukemattomaksi

Vastaanottaja: ■ Myller Seppo;

[Action Items](#)[+ Hae lisää sovelluksia](#)

Dear Seppo,

I think in that case, I meant that PPP has not been used for a broad user community until some years ago - the standard GNSS user still does not know what PPP is. Only in the last few years this technique was adopted for land (or also marine) applications that also require near real-time performance like e.g. precise farming etc...

Maybe the formulation was a bit confusing, but that is what I meant....

Katrin

Liite 2 Sähköposti Hannu Koivula 2014

Vastaanottaja: ■ Myller Seppo;

Kopio: □ Pasi Häkli <pasi.hakli@fgi.fi>; □ Heli Suurmäki <heli.suurmaki@fgi.fi>;

● Vastasi 24.9.2014 12:39.

Hei,

1. Suomessa ei ole yleisiä julkisia parametreja laatan liikkeelle (kaavassa Intra).
2. Laatan sisäiset liikkeet huomioidaan mm. mikäli oma pysyvä asema liitetään E2-luokkaan ja GL laskee sille koordinaatit laskentapalvelussaan.
<http://euref-fin.fgi.fi/fgi/fi/e2/e2-laskentapalvelu>
3. Rinex datat ovat olleet verkossa saatavilla kesäkuusta asti. Ohjeet:
<http://euref-fin.fgi.fi/fgi/fi/paikannuspalvelu/rinex-palvelu>
4. NKG_RF03vel -malli on pohjoismaisen geodeettisen komission (NKG) jäsenten kansallisista datoista yhdessä laskettu malli, joka on ollut vain NKG:n tutkijoiden käytettävissä. Malli ei ole ollut julkisesti jaossa. Olen laittanut NKG:n suuntaan palautetta asiasta.

t. Hannu

Liite 3 Sähköposti Philippe Lamothe 2014

RE: (2972156) RE: PPP direct software and tectonic plate model

Lamothe, Philippe (Philippe.Lamothe@NRCan-RNCan.gc.ca) [Lisää yhteysenkilö](#)

16.7.2014 17:14

Vastaanottaja: Seppo Myller;

Kopio: ISU Requests; Saumure, Francine; Bérubé, Mario; Lascelles, Patrice;

Hi Seppo,

No, the PPP software does not use a tectonic plate model. If you request data in ITRF, the data will be at the epoch of data collection.

If you are using NAD83(CSRS), and choose an epoch other than the data collection epoch, the PPP software applies a velocity model derived from GNSS measurements across Canada.

Cheers.

Philippe Lamothe, M.Sc
Geodetic Engineer/ Ingénieur en géodésie
Canadian Geodetic Survey / Levés géodésiques du Canada
Natural Resources Canada, 615 Booth, Room 440E Ottawa, Ontario K1A 0E9
Ressources naturelles Canada, 615, rue Booth, pièce 440E
Ottawa (Ontario) K1A 0E9
Government of Canada/Gouvernement du Canada
phlamoth@NRCan.gc.ca
(613) 943-3517
FAX/Télécopieur (613) 995-3215

Liite 4 NKG 2003 GPS kampanjan pisteet

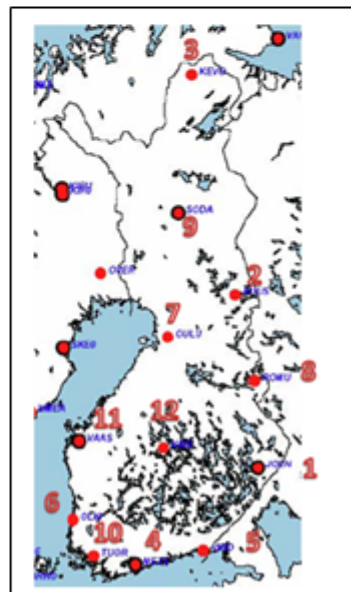
JHS 153 liitteessä 1 annetaan kaikkien EUREFFIN nimellä kutsutun, Suomen ETRS89-järjestelmän realisoinnin yhteydessä mitattujen ja ratkaistujen pisteiden koordinaatit. Taulukko 1 esittää pisteitä (12 kpl), jotka olivat mukana NKG 2003 GPS kampanjassa.

Taulukko 1. EUREF-FIN -koordinaatiston määrittelevät pisteet ja niiden maantieteelliset koordinaatit ja korkeus vertausellipsoidista (GRS80).

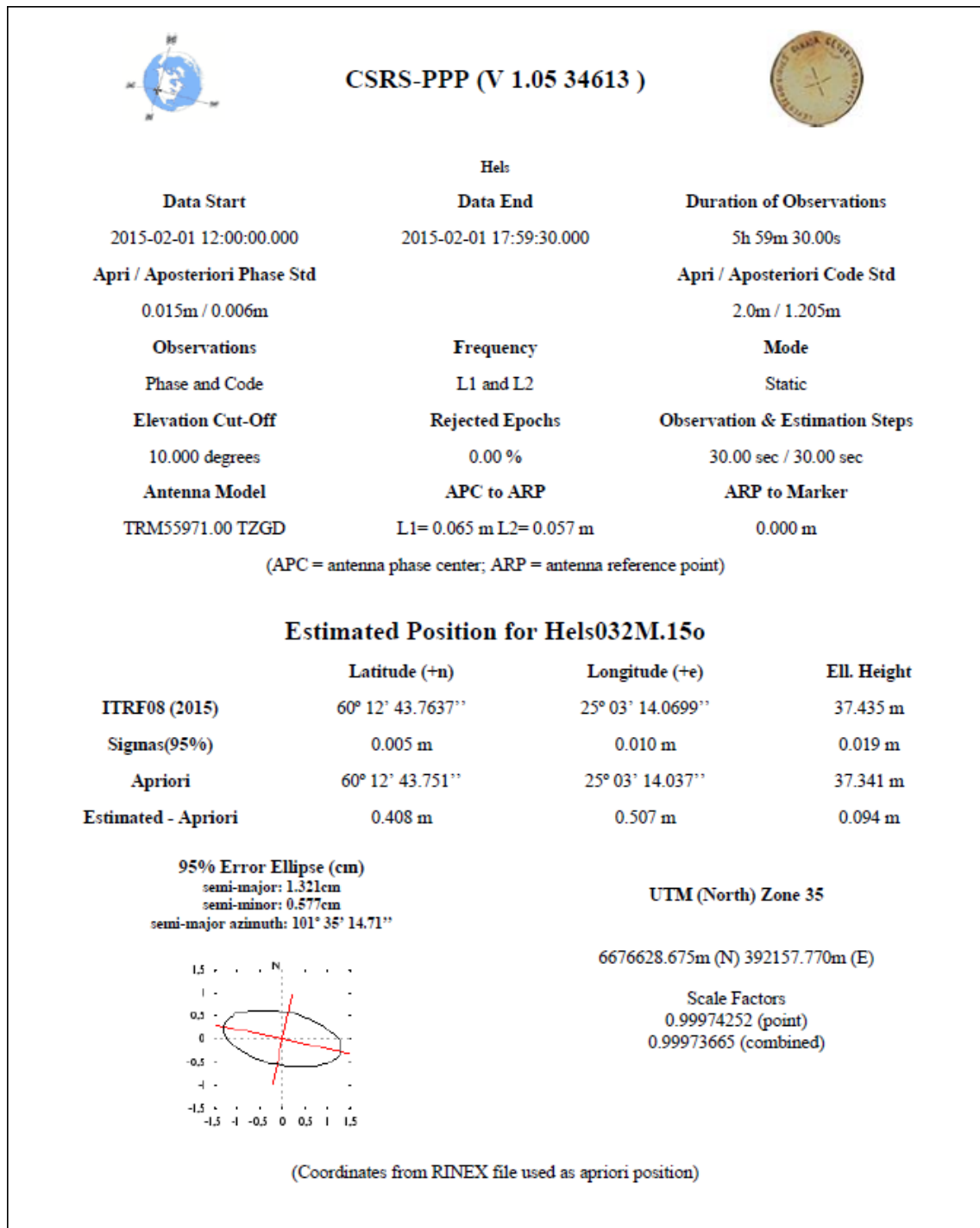
No.	Nimi	Lyh.	φ			λ			h m
			o	'	"	o	'	"	
Pysyvät GPS- asemat:									
	Metsähovi	Mets	60	13	2.89046	24	23	43.13336	94.568
	Tuorla	Tuor	60	24	57.04810	22	26	36.30941	60.552
	Virolahti	Viro	60	32	19.67472	27	33	17.96866	36.922
	Vaasa	Vaas	62	57	40.28640	21	46	14.27102	58.041
	Oulu	Oulu	65	5	11.49792	25	53	34.51516	88.767
	Joensuu	Joensuu	62	23	28.21582	30	5	46.14903	113.676
	Olkiluoto	Olki	61	14	22.74877	21	28	21.62478	30.534
	Kivetty	Kive	62	49	11.53609	25	42	8.12192	216.243
	Romuvaara	Romu	64	13	2.62511	29	55	54.10767	241.640
	Kevo	Kevo	69	45	21.19402	27	0	25.68856	135.866
	Sodankylä	Soda	67	25	15.08494	26	23	20.56358	299.731
	Kuusamo	Kuus	65	54	36.88747	29	2	0.50258	378.944

Maantieteelliset koordinaatit on muunnettu Geodeettisen laitoksen koordinaattimuunnospalvelulla (<http://coordtrans.fgi.fi/>) suorakulmaisiksi

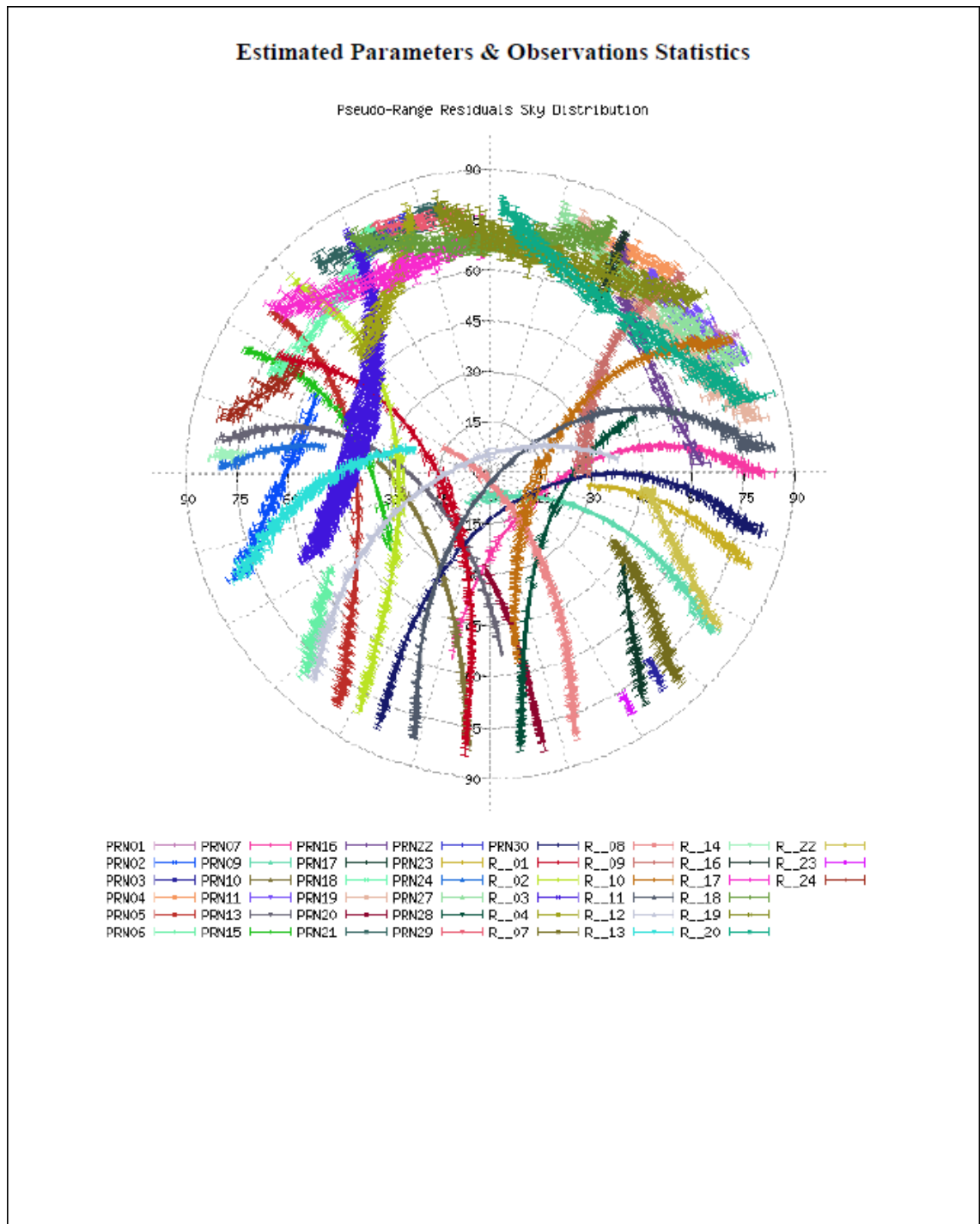
Asema	X	Y	Z
Mets 4	2892571,1204	1311843,2621	5512633,9523
Tuor 10	2917811,0738	1205222,5326	5523549,9259
Viro 5	2788248,5042	1454873,3013	5530280,0097
Vaas 11	2699864,6371	1078263,8253	5658064,6708
Oulu 7	2423778,7628	1176553,6774	5761860,8274
Joensuu 1	2564139,4232	1486149,5987	5628951,2632
Olki 6	2863210,2853	1126271,3627	5568267,2025
Kive 12	2632277,4925	1266957,2643	5651027,5239
Romu 8	2410839,4917	1388069,4512	5720515,1297
Kevo 3	1972158,4969	1005174,3460	5961798,6427
Soda 9	2200147,0018	1091638,1970	5866870,6035
Kuus 2	2282711,7894	1267071,7184	5800215,6688



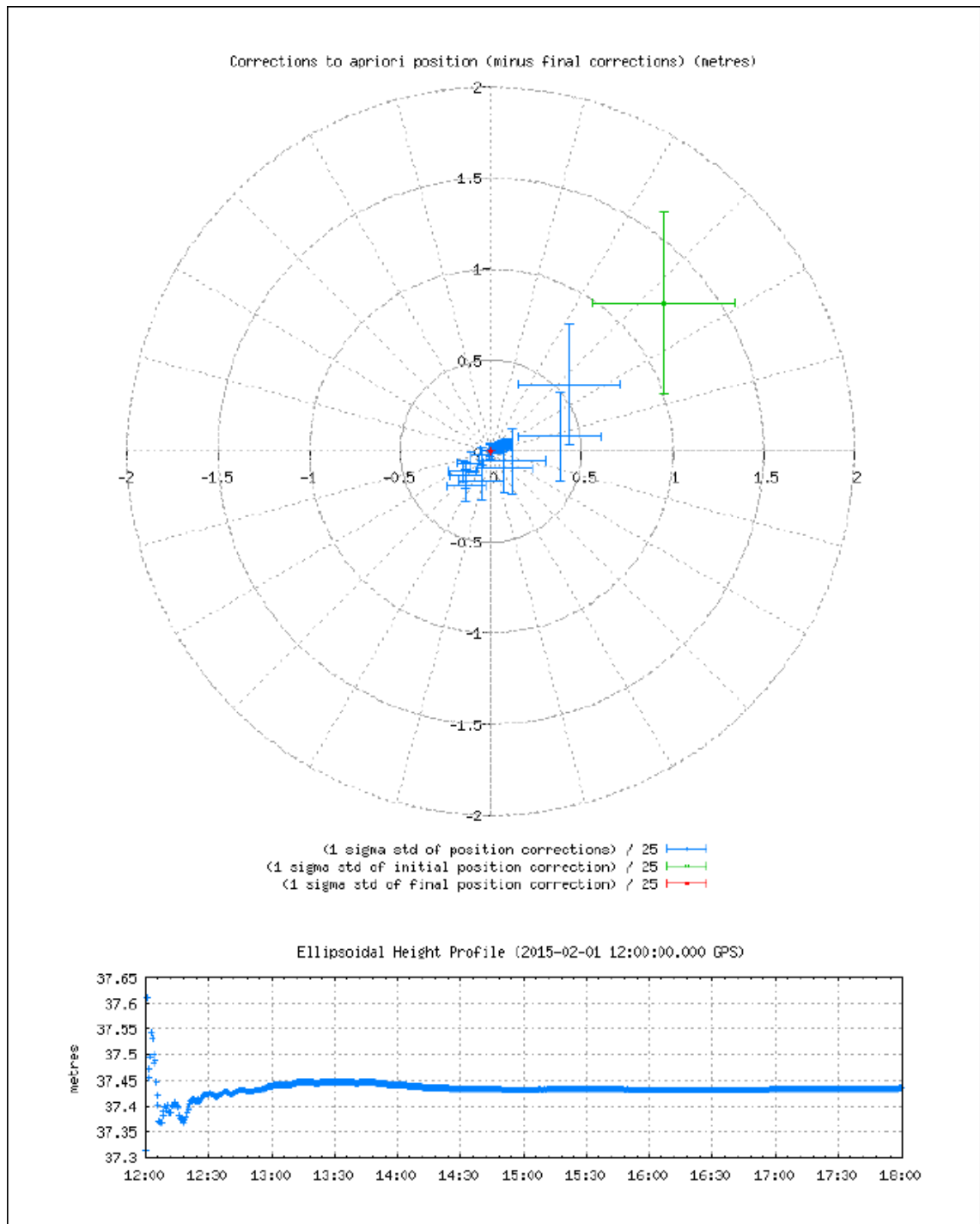
Liite 5 1(7) Helsingin pisteen laskenta CSRS-PPP ohjelmalla



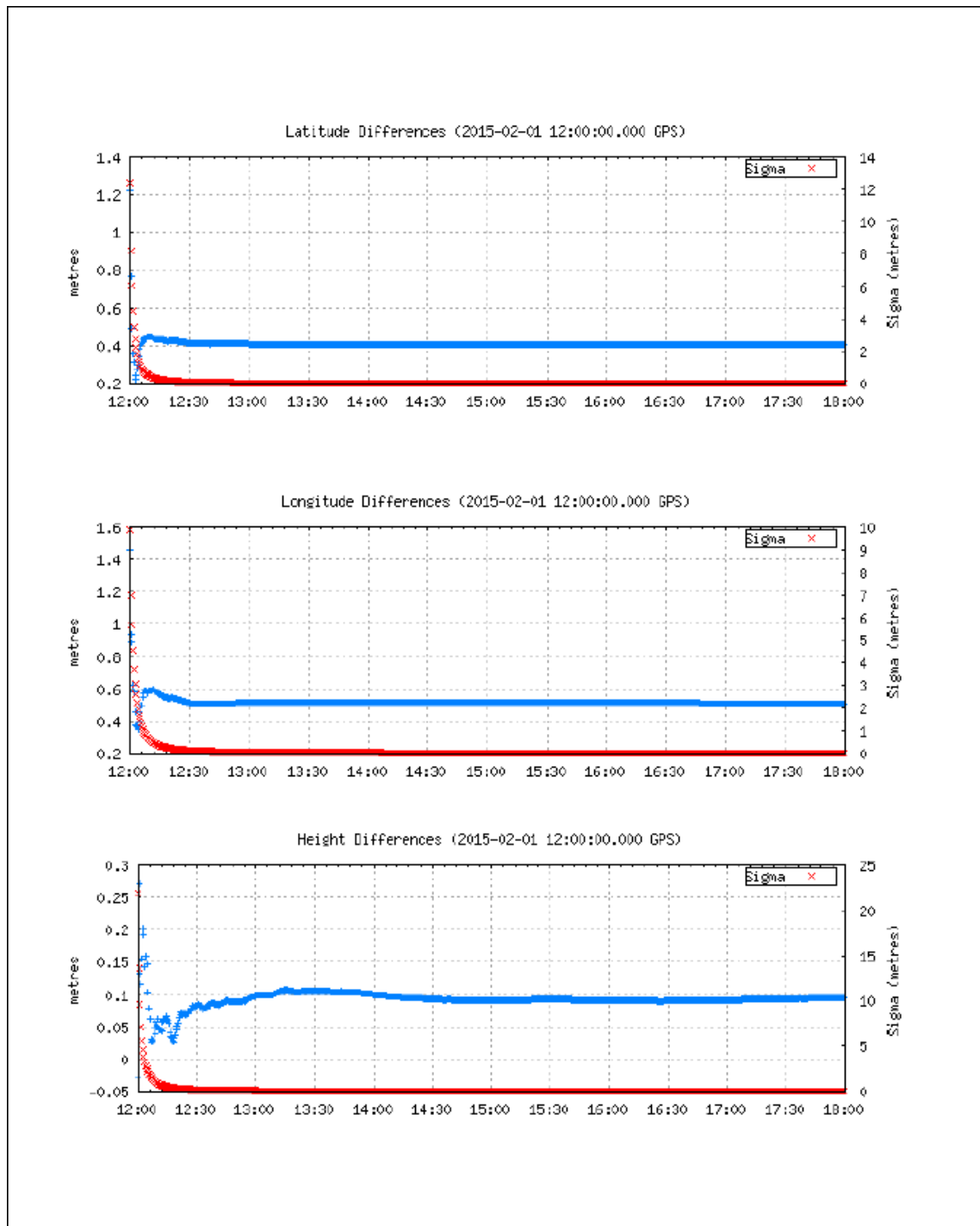
Liite 5 2(7). Helsingin pisteen laskenta CSRS-PPP ohjelmalla



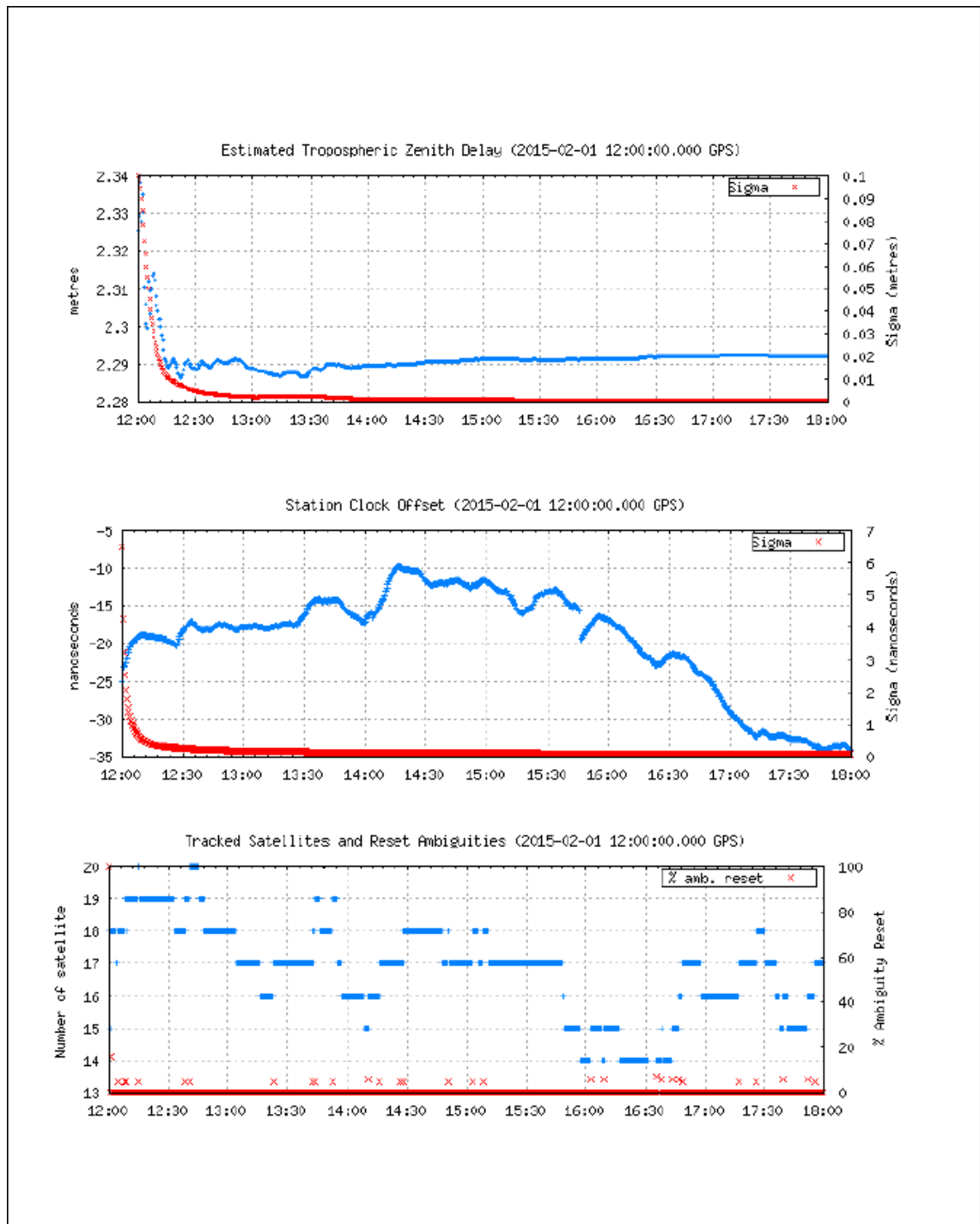
Liite 5 3(7). Helsingin pisteen laskenta CSRS-PPP ohjelmalla



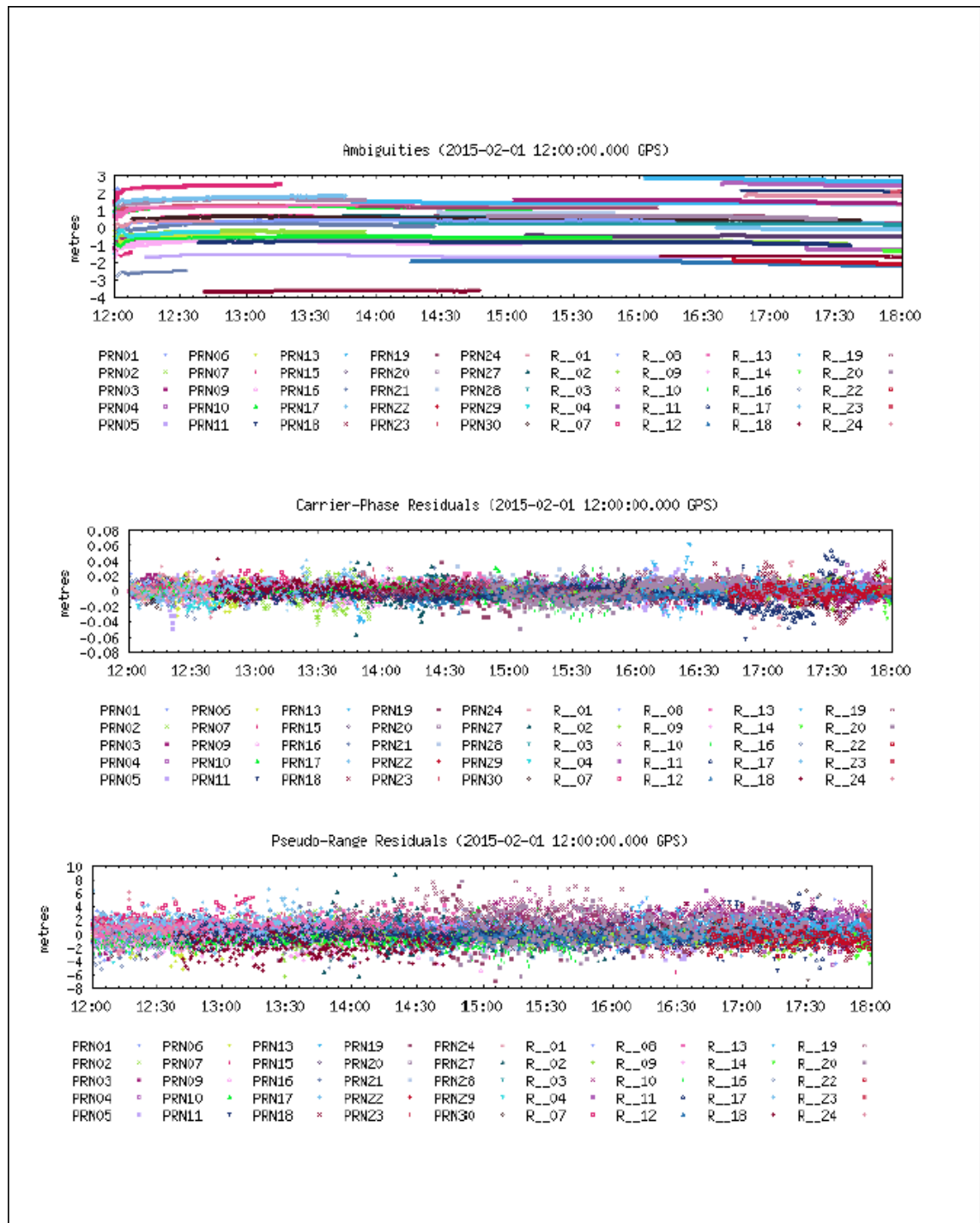
Liite 5 4(7). Helsingin pisteen laskenta CSRS-PPP ohjelmalla



Liite 5 5(7). Helsingin pisteen laskenta CSRS-PPP ohjelmalla



Liite 5 6(7). Helsingin pisteen laskenta CSRS-PPP ohjelmalla



Liite 5 7(7). Helsingin pisteen laskenta CSRS-PPP ohjelmalla

~~~~ Disclaimer ~~~~

Natural Resources Canada does not assume any liability deemed to have been caused directly or indirectly by any content of its PPP-On-Line positioning service.

If you have any questions, please feel free to contact:

Geodetic Survey Division
Canada Centre for Remote Sensing
Natural Resources Canada
Government of Canada
615 Booth Street, Room 440
Ottawa, Ontario K1A 0E9
Phone: 613-995-4410 FAX: 613-995-3215
EMail: information@geod.nrcan.gc.ca



Natural Resources
Canada

Resources naturelles
Canada

Canada

Liite 6 Helsingin pisteen laskenta Trimble Post-Processing Service Based on RTX Technology –ohjelmalla



Post-Processing Service Based on RTX Technology

TrimbleRTX.com

Contributor: seppo.myller@pkky.fi
 Reference Name: Hels032M.15o
 Upload Date: 03/03/2015 18:09:37 UTC

Report Time Frame:
 Start Time: 02/01/2015 12:00:00 UTC
 End Time: 02/01/2015 17:59:30 UTC
 Observation File Type(s): RINEX
 Observation File(s): Hels032M.15o
 Antenna:
 Name: TRM55971.00 TZGD
 Height: 0.000 m
 Reference: Bottom of antenna mount
 Receiver Name: TRIMBLE NETR9
 Coordinate Systems: ITRF2008
 Tectonic Plate: Eurasia (Auto-detected)
 Tectonic Plate Model: MORVEL56
 Processing Interval: 30 s

Statistics

# Total Obs	# Usable Obs	# Used Obs	Percent
720	720	708	98

Used Satellites

# Total Satellites:	41
GPS:	G01 G02 G04 G05 G06 G07 G09 G10 G11 G13 G15 G16 G17 G18 G19 G20 G21 G22 G23 G24 G27 G28 G29 G30
GLONASS:	R01 R02 R03 R04 R07 R08 R09 R10 R11 R12 R13 R14 R16 R17 R18 R20 R24

Processing Results

ITRF2008 at Epoch 2005.0		
Coordinate	Value	σ
X	2877741.084 m	0.006 m
Y	1345210.294 m	0.005 m
Z	5512290.251 m	0.008 m
Latitude	60° 12' 43.76021" N	0.004 m
Longitude	25° 03' 14.05755" E	0.005 m
El. Height	37.426 m	0.009 m

ITRF2008 at Epoch 2015.09		
Coordinate	Value	σ
X	2877740.908 m	0.006 m
Y	1345210.419 m	0.005 m
Z	5512290.313 m	0.008 m
Latitude	60° 12' 43.76419" N	0.004 m
Longitude	25° 03' 14.06978" E	0.005 m
El. Height	37.427 m	0.009 m

Report Information

Trimble RTX Solution ID: 4948729
 Solution Type: Static
 Software Version: 3.3.0.14133
 Creation Date: 03/03/2015 18:10:27 UTC

Disclaimer

Trimble Navigation Limited does not guarantee availability, reliability, and performance of the current RTX Post-Processing service and accepts no legal liability arising from, or connected to, the use of information on this document or use of this service.

Liite 7 Helsingin pisteen laskenta GIPSY 6.3 ohjelmalla

APPS Summary file for site HELS. Produced from RINEX file Hels032M.15o on Tue Mar 3 18:01:18 UTC 2015# The reference frame is ITRF 2008 (with semi-major axis = 6378137 m; flattening factor = 1/298.257222101)# Output data rate is 300 seconds. Minimum elevation angle is 7.5 degrees.# Satellite antenna phase center offset and maps taken from IGS Standards
 igs08_1830.atx.## Receiver antenna phase center offset and maps taken from IGS Standards igs08_1830.atx.# Receiver antenna phase center offset relative to the antenna reference is 0 m#
 The antenna reference point offset from the monument reference, based on the RINEX file header, is 0 m## Product used to process Hels032M.15o: JPL Final## Static point positioning mode (a single set of site coordinates are estimated);## Total number of Phase measurements: 724. RMS post-fit Phase residuals: 0.009 m. Number of excluded Phase measurements: 0 #
 Total number of Pseudorange measurements: 724. RMS post-fit PRange residuals: 0.587 m. Number of excluded PRange measurements: 0 ## Estimated Cartesian coordinates: X = 2877740.9201 m Y = 1345210.4232 m Z = 5512290.3099 m# Sigmas of Cartesian coordinates: SigX = 0.0017 m SigY = 0.0011 m SigZ = 0.0032 m# Estimated Geodetic coordinates (WGS84/GRS80): Lat = 60.21215661 deg East_Lon = 25.05390824 deg Height = 37.4308 m # Sigmas of Geodetic coordinates: SigLat = 0.0012 m SigLon = 0.0009 m SigHeight = 0.0035 m## Time variable estimated parameters:#Secs_from_start GPS_Time(yyyy:mm:dd:hh:mm:ss.ssss) HZTrop(m) WZTrop(m) Sig(m) TropGrad_N(m) Sig(m) TropGrad_E(m) Sig(m) Clock(m) Sig(m) 0.0000 2015:02:01:12:00:0.0000 2.2898 -0.0035 0.002 -0.0003 0.0002 -0.0007 0.0002 -2.174 0.037 300.0000
 2015:02:01:12:05:0.0000 2.2898 -0.0034 0.001 -0.0003 0.0001 -0.0007 0.0002 -1.221 0.037 600.0000 2015:02:01:12:10:0.0000 2.2898 -0.0035 0.001 -0.0002 0.0001 -0.0007 0.0002 -1.022 0.037 900.0000
 2015:02:01:12:15:0.0000 2.2898 -0.0029 0.001 -0.0002 0.0001 -0.0007 0.0002 -1.134 0.037 1500.0000 2015:02:01:12:20:0.0000 2.2898 -0.0020 0.001 -0.0002 0.0001 -0.0007 0.0002 -1.416 0.037 1800.0000
 2015:02:01:12:25:0.0000 2.2898 -0.0011 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0006 0.0002 -0.984 0.037 2100.0000 2015:02:01:12:30:0.0000 2.2898 -0.0003 0.001 0.0000 0.0001 -0.0006 0.0002 -0.668 0.037 2400.0000
 2015:02:01:12:35:0.0000 2.2898 -0.0005 0.001 0.0000 0.0001 -0.0005 0.0002 -0.965 0.037 2700.0000 2015:02:01:12:40:0.0000 2.2898 -0.0003 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0005 0.0002 -0.865 0.037 3000.0000
 2015:02:01:12:45:0.0000 2.2898 -0.0010 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0005 0.0002 -0.777 0.037 3300.0000 2015:02:01:12:50:0.0000 2.2898 -0.0020 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0005 0.0002 -0.867 0.037 3600.0000
 2015:02:01:12:55:0.0000 2.2898 -0.0022 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0005 0.0002 -0.930 0.037 3900.0000 2015:02:01:13:00:0.0000 2.2898 -0.0025 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0005 0.0002 -0.844 0.037 4200.0000
 2015:02:01:13:05:0.0000 2.2898 -0.0001 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0005 0.0002 -0.930 0.037 4500.0000 2015:02:01:13:10:0.0000 2.2898 -0.0012 0.001 -0.0001 0.0002 -0.0005 0.0002 -0.748 0.037 4800.0000
 2015:02:01:13:15:0.0000 2.2898 -0.0008 0.001 -0.0001 0.0002 -0.0005 0.0001 -0.803 0.037 5100.0000 2015:02:01:13:20:0.0000 2.2898 -0.0002 0.001 -0.0001 0.0002 -0.0006 0.0001 -0.400 0.037 5400.0000
 2015:02:01:13:25:0.0000 2.2898 0.0000 0.001 -0.0001 0.0002 0.235 0.037 5700.0000 2015:02:01:13:30:0.0000 2.2898 0.0001 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0006 0.0001 0.173 0.037 6000.0000
 2015:02:01:13:35:0.0000 2.2898 0.0001 0.001 -0.0001 0.0001 0.249 0.037 6300.0000 2015:02:01:13:40:0.0000 2.2898 0.0001 0.001 -0.0001 0.0001 0.235 0.037 6600.0000
 2015:02:01:13:45:0.0000 2.2898 0.0001 0.001 -0.0001 0.0001 0.249 0.037 6900.0000 2015:02:01:13:50:0.0000 2.2898 0.0000 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0006 0.0001 0.0000 0.001 -0.0005 0.0001 -0.390 0.037 7200.0000
 2015:02:01:13:55:0.0000 2.2898 0.0000 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0004 0.0001 -0.556 0.037 7500.0000 2015:02:01:14:00:0.0000 2.2898 0.0001 0.001 -0.0001 0.0001 -0.0004 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 -0.0004 0.0001 0.661 0.037 7800.0000
 2015:02:01:14:05:0.0000 2.2898 -0.0005 0.001 0.0000 0.0001 -0.0004 0.0001 1.605 0.037 8100.0000 2015:02:01:14:10:0.0000 2.2898 -0.0004 0.001 0.0001 -0.0004 0.0001 1.569 0.037 8400.0000
 2015:02:01:14:15:0.0000 2.2898 -0.0009 0.001 0.0001 -0.0004 0.0001 1.082 0.037 8700.0000 2015:02:01:14:20:0.0000 2.2898 -0.0012 0.001 0.0001 -0.0003 0.0001 0.995 0.037 9000.0000
 2015:02:01:14:25:0.0000 2.2898 -0.0007 0.001 0.0001 -0.0003 0.0001 0.960 0.037 9300.0000 2015:02:01:14:30:0.0000 2.2898 -0.0007 0.001 0.0001 -0.0003 0.0001 0.960 0.037 9600.0000
 2015:02:01:14:35:0.0000 2.2898 -0.0003 0.001 0.0002 0.0001 -0.0001 0.0001 0.960 0.037 9900.0000 2015:02:01:14:40:0.0000 2.2898 0.0001 0.001 0.0003 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 10200.0000
 2015:02:01:14:45:0.0000 2.2898 0.0003 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 10500.0000 2015:02:01:14:50:0.0000 2.2898 -0.0001 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 10800.0000
 2015:02:01:14:55:0.0000 2.2898 0.0003 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 11100.0000 2015:02:01:15:00:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 11400.0000
 2015:02:01:15:05:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 11700.0000 2015:02:01:15:10:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 12000.0000
 2015:02:01:15:15:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 12300.0000 2015:02:01:15:20:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 12600.0000
 2015:02:01:15:25:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 12900.0000 2015:02:01:15:30:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 13200.0000
 2015:02:01:15:35:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 13500.0000 2015:02:01:15:40:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 13800.0000
 2015:02:01:15:45:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 14100.0000 2015:02:01:15:50:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 14400.0000
 2015:02:01:15:55:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 14700.0000 2015:02:01:16:00:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 15000.0000
 2015:02:01:16:05:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 15300.0000 2015:02:01:16:10:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 15600.0000
 2015:02:01:16:15:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 15900.0000 2015:02:01:16:20:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 16200.0000
 2015:02:01:16:25:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 16500.0000 2015:02:01:16:30:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 16800.0000
 2015:02:01:16:35:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 17100.0000 2015:02:01:16:40:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 17400.0000
 2015:02:01:16:45:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 17700.0000 2015:02:01:16:50:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 18000.0000
 2015:02:01:16:55:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 18300.0000 2015:02:01:17:00:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 18600.0000
 2015:02:01:17:05:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 18900.0000 2015:02:01:17:10:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 19200.0000
 2015:02:01:17:15:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 19500.0000 2015:02:01:17:20:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 19800.0000
 2015:02:01:17:25:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 20100.0000 2015:02:01:17:30:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 20400.0000
 2015:02:01:17:35:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 20700.0000 2015:02:01:17:40:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 21000.0000
 2015:02:01:17:45:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 21300.0000 2015:02:01:17:50:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 21600.0000
 2015:02:01:17:55:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.792 0.037 21900.0000 2015:02:01:18:00:0.0000 2.2898 0.0002 0.001 0.0003 0.0001 0.0003 0.0001 0.0000 0.001 0.0000 0.0001 0.0000 0.0001 1.097 0.037 22200.0000

Liite 8 Suomen E2 asemien EUREF-FIN maantieteelliset (1) ja geosentriset koordinaatit (2)



15.12.2014

1

E2-asemien EUREF-FIN -koordinaatit

EUREF-FIN-koordinater för E2-stationer

EUREF-FIN coordinates for E2 stations

Päivitetty / Uppdaterad / Updated 15.12.2014

Asema/Station	°	'	°	'	°	'	m
DEQ2*	60	1	54.69789	20	23	5.29981	23.467
FINS	60	13	44.83422	19	57	4.56000	53.223
HETT	68	24	23.96029	23	39	55.01443	403.571
JOE2	62	23	28.06028	30	5	46.20528	113.674
KEV2	69	45	21.41962	27	0	25.67095	136.320
KILP	68	56	29.59089	20	54	50.86949	539.543
KIV2	62	49	11.65376	25	42	6.93878	216.859
KUU2	65	54	36.79260	29	2	0.80789	379.053
MET3	60	13	2.82779	24	23	40.16897	79.092
MIK3	61	34	26.66222	27	6	10.21069	167.174
OLK2	61	11	27.67876	21	30	20.83219	39.263
ORIV	61	36	58.54977	24	12	42.26403	155.730
OUL2	65	5	10.96843	25	53	33.13178	82.389
PYHA	64	29	51.26833	24	14	15.44649	26.117
ROM2	64	13	2.48812	29	55	54.47116	242.854
SAVU	67	57	39.01429	28	57	20.92663	265.071
SOD3	67	25	14.81922	26	23	21.39066	300.673
TORN	66	4	39.33674	24	19	55.17819	70.459
TUO2	60	24	57.04010	22	26	35.86981	59.319
VAA2	62	57	40.20044	21	46	14.00807	58.218
VIR2	60	32	19.60898	27	33	17.74524	36.919

* asema lopetettu 11/2014

2

Mikk	2709832.465	1386860.607	5586222.641
Vaas	2699868.288	1078261.293	5658063.619
Mets	2892584.506	1311799.211	5512619.557
Kuus	2282712.298	1267076.421	5800214.569
Fins	2984444.992	1083375.313	5513242.744
Kevo	1972152.879	1005171.270	5961801.488
Soda	2200149.758	1091650.558	5866868.312
Joen	2564142.709	1486152.437	5628949.030
Kilp	2147250.440	820562.047	5930136.878
Oulu	2423797.616	1176542.743	5761848.135
Hett	2156253.223	944971.058	5908310.525
Kiv	2632282.096	1266940.882	5651029.739
Olk	2866981.613	1129668.591	5565665.470
Oriv	2772556.581	1246719.241	5588449.232
Pyha	2510901.640	1130426.364	5733838.250
Savu	2100286.756	1162091.417	5889701.033
Torn	2363238.583	1068632.198	5807525.818
Tuo	2917813.279	1205216.164	5523548.731
Vir	2788251.649	1454871.100	5530279.006
Rom	2410840.814	1388075.869	5720514.378

Ei dataa laskentahetkellä

Liite 9 Neljäntoista VRS-verkon kiinteän tukiaseman Helmert-parametrit korkeus mukana

Affininen muunnos

Pisteitä

14

Keskivirhe

xy 0.008172

z 0.022575

Kertoimet

c 0.9999999877

d -0.0000000207

e 0.0000000047

f 0.9999999763

Siirtoparametrit

0.032, -0.030, -0.107

Mittakaava X

0.99999999

Kiertokulma X

0.00000030

Mittakaava Y

0.99999998

Kiertokulma Y

0.00000132

Käytetyt pisteet ja jäännösvirheet

pno	X	Y	Z	dX	dY	dXY	dZ
Koka	2993476.559	1143923.5125496182.034	-0.009	-0.006	0.010	-0.036	
Rau2	2873211.572	1130704.3735562262.993	0.001	0.002	0.002	-0.010	
Hels	2877741.413	1345210.0995512290.029	-0.011	-0.006	0.013	-0.030	
Vaas	2689630.972	1067705.5535664897.507	0.017	0.007	0.018	0.022	
Kala	2538683.259	1127542.7225722256.873	0.009	0.003	0.010	0.022	
Keit	2585967.189	1280716.4575669072.013	0.005	0.004	0.006	0.004	
Joen	2555033.438	1459763.2905639912.423	-0.005	-0.003	0.005	-0.013	
Ilom	2518620.622	1508950.2465643407.321	-0.006	-0.006	0.009	-0.026	
Puda	2375878.607	1210530.7685774729.477	0.009	0.006	0.010	0.029	
Ranu	2334048.893	1165325.5425800890.836	0.001	0.005	0.006	0.018	
Kuus	2274462.359	1269766.1185802758.920	0.004	0.008	0.009	0.017	
Soda	2196729.564	1098624.2155866756.216	0.006	-0.002	0.006	0.027	
Kilp	2138881.924	812588.5065934212.591	-0.016	-0.005	0.017	-0.014	
Utsj	1957568.056	998649.3145967638.590	-0.005	-0.007	0.009	-0.011	

Liite 10 Yhdeksäntoista E2-aseman EUREF-FIN Helmert-parametrit korkeus mukana

Affininen muunnos

Pisteitä

19

Keskivirhe

xy 0.012397

z 0.031794

Kertoimet

c 0.9999999636

d 0.0000000236

e -0.0000000235

f 0.9999999881

Siirtoparametrit

0.036, 0.024, -0.116

Mittakaava X

0.99999996

Kiertokulma X

-0.00000150

Mittakaava Y

0.99999999

Kiertokulma Y

-0.00000150

Käytetyt pisteet ja jäännösvirheet

pno	X	Y	Z	dX	dY	dXY	dZ
Kevo	1972152.879	1005171.2705961801.488	-0.014	-0.006	0.015	-0.033	
kilp	2147250.440	820562.0475930136.878	-0.020	-0.013	0.024	-0.005	
Hett	2156253.223	944971.0585908310.525	-0.010	-0.010	0.014	0.011	
savu	2100286.756	1162091.4175889701.033	-0.006	-0.002	0.006	0.006	
Soda	2200149.758	1091650.5585866868.312	0.003	0.000	0.003	0.020	
kuus	2282712.298	1267076.4215800214.569	0.010	0.009	0.014	0.021	
Torn	2363238.583	1068632.1985807525.818	0.015	0.009	0.017	0.050	
oulu	2423797.616	1176542.7435761848.135	0.020	0.013	0.024	0.041	
Pyha	2510901.640	1130426.3645733838.250	0.025	0.017	0.030	0.042	
joen	2564142.709	1486152.4375628949.030	-0.002	-0.005	0.005	-0.040	
Kiv	2632282.096	1266940.8825651029.739	0.008	0.007	0.010	0.001	
vaas	2699868.288	1078261.2935658063.619	0.022	0.014	0.026	0.044	
Mikk	2709832.465	1386860.6075586222.641	-0.007	-0.004	0.009	-0.039	
oriv	2772556.581	1246719.2415588449.232	0.002	0.001	0.002	-0.007	
Vir	2788251.649	1454871.1005530279.006	-0.016	-0.011	0.019	-0.051	
mets	2892584.506	1311799.2115512619.557	-0.017	-0.010	0.019	-0.043	
Olk	2866981.613	1129668.5915565665.470	0.004	0.004	0.006	0.010	
tuor	2917813.279	1205216.1645523548.731	-0.010	-0.003	0.011	-0.020	
Fins	2984444.992	1083375.3135513242.744	-0.008	-0.008	0.011	-0.009	

Liite 11 1(3) Laskettu esimerkki

Esimerkki aineisto, Simplified transformations from ITRF2008/IGS08 to ETRS89 for mari-time applications, 22.1.2013, on Ruotsin maanmittauslaitoksen aineistoa http://www.lantmateriet.se/Global/Kartor%20och%20geografisk%20information/GPS%20och%20m%C3%A4tning/Geodesi/Transformationer/Simplified_trans_ITRF2008_ETRS89_maritime.pdf. Laskennassa on tarkoitus ainoastaan avata kuinka laskenta on suoritettava. Laskennassa käytetyt parametrit eivät sovi Suomeen.

Koordinaatit (taulukko 14, Jivall 2013) ja kaavat laskennassa ovat suoraan lähteestä samoin, kuin laskennan parametrit (taulukko 15, Jivall 2013). Oman laskennan tulosta verrataan lähteessä annettuun lopputulokseen.

Taulukko 14. Lähtökoordinaatit (Jivall 2013).

Reference Frame	X	Y	Z
ITRF2008 epoch 2012.5	3565285.0000	855949.0000	5201383.0000

(11)

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ETRS89}} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + (1 + \delta) \mathbf{R} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRF}} \quad , \text{jossa} \quad \mathbf{R} = \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X = \begin{pmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{pmatrix}$$

Taulukko 15. Laskennassa on käytetyt parametrit (Jivall 2013)

Parameter	2012.5	2013.5	2014.5	2015.5
ΔX (m)	0.67678	0.72188	0.76705	0.81244
ΔY (m)	0.65495	0.69856	0.74221	0.78540
ΔZ (m)	-0.52827	-0.56039	-0.59261	-0.62483
ω_X (mas)	-22.742	-24.227	-25.716	-27.196
ω_Y (mas)	12.667	13.911	15.158	16.411
ω_Z (mas)	22.704	23.892	25.075	26.245
Δ (ppb)	-10.70	-11.68	-12.65	-13.62

Liite 11 2(3)

Ennen laskentaa kaarimillisekunnit on muutettava radiaaneiksi. Muunnoksessa voidaan käyttää muunnosohjelmaa esimerkiksi

<http://www.advancedconverter.com/unitconversions/angleconversion/arcsecond> s-to-radians tai, jos halutaan enemmän desimaaleja, lasketaan kerroin (kaava 11 Jivall 2013), jolla mas-arvo kerrotaan. Tässä oman laskennan tulos on laskettu viidellätoista desimaalilla.

$$\frac{(0.001 \cdot \pi)}{(3600 \cdot 180)} = 0.000000004848137$$

(11)

Alla ovat kiertoparametrien laskenta radiaaneiksi (kaava 12, Myller 2014), sekä parametrien ppb arvo on laskettu mittakaavakertoimeksi (kaava 13, Myller 2014).

$$\begin{aligned}\omega_x &= \frac{(-22.742) \cdot 0.001 \cdot \pi}{3600 \cdot 180} = -0.000000110256327 \\ \omega_y &= \frac{(12.667) \cdot 0.001 \cdot \pi}{3600 \cdot 180} = 0.000000061411349 \\ \omega_z &= \frac{(22.704) \cdot 0.001 \cdot \pi}{3600 \cdot 180} = 0.000000110072098\end{aligned}$$

(12)

$$\begin{aligned}\text{Mittakaava } (1 + \delta) &= \\ 1 + \frac{-10.70}{1000000000} &= 0.9999999893\end{aligned}$$

(13)

Seuraavassa kaavan 10 mukainen laskenta taulukko 14 lähtöpisteillä ja taulukko 15 parametreilla (kaava 14, Myller 2014)

$$\begin{pmatrix} 0.67678 \\ 0.65495 \\ -0.52827 \end{pmatrix} + 0.9999999893 \begin{bmatrix} 1 & 1.10072098 \times 10^{-7} & -6.1411349 \times 10^{-8} \\ -1.10072098 \times 10^{-7} & 1 & -1.10256327 \times 10^{-7} \\ 6.1411349 \times 10^{-8} & -(-1.10256327 \cdot 10^{-7}) & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 3565285.000 \\ 855949.000 \\ 5201383.000 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3565285.4134 \\ 855948.6799 \\ 5201382.7294 \end{pmatrix}$$

(14)

Liite 11 3(3)

Kun laskennan puneella rajattua lopputulosta verrataan lähtöaineiston koordinaatteihin (taulukko 16, Jivall 2013), niin koordinaatit ovat samat. Yllä olevat laskelmat voidaan voi suorittaa funktiolaskimella, jossa on matriisilaskenta, tietokoneella vastaavalla ohjelmalla, tai käsilaskennalla.

Taulukko 16. Lähtöaineiston lasketut koordinaatit (Jivall 2013).

ETRS 89, Baltic Sea (2012.5)	3565285.4134	855948.6799	5201382.7294
------------------------------	--------------	-------------	--------------