

VRS-GPS-MITTAUKSEN TARKKUUS HELSINGIN KAUPUNGIN ALUEELLA

**Lauri Raunu
Hannu Halkola**



Julkaisu 90/2007

Helsinki 2007
ISBN 978-952-473-913-9
ISSN 1458-2198

VRS-GPS-MITTAUKSEN TARKKUUS HELSINGIN KAUPUNGIN ALUEELLA

**Lauri Raunu
Hannu Halkola**

TIIVISTELMÄ

Insinööriyössä selvitettiin Helsingin kaupungin Kiinteistöviraston geoteknisen osaston käytössä olevan VRS-GPS-paikantimen Trimble 5800 absoluuttista mittaustarkkuutta Helsingin kaupungin koordinaatiston suhteen.

Työn alussa käydään läpi VRS-järjestelmän toimintaperiaate sekä koordinaattimuunnos.

Testimittaukset osoittivat koordinaattimuunnoksen ja kiintopisteistön laadun aiheuttavan merkittävää alueellista vaihtelua mittaustarkkuuksiin.

VRS-GPS-paikannin Trimble 5800 osoittautui testimittausten perusteella riittävän tarkaksi mittauslaitteeksi geoteknisen osaston kairauspisteiden koordinaattien määrittämiseen.

ABSTRACT

The aim of this final year project was to survey and calculate the absolute accuracy of Trimble 5800 VRS GPS receiver with respect to Helsinki City coordinates.

The written part of this project starts by explaining how a VRS system works and what the coordinate transformation is.

The results of the test surveys show that coordinate transformation and the quality of control points generate significant regional variation in measurement accuracy.

According to the test surveys, the accuracy of Trimble 5800 receiver proved to be good enough for marking the boring points of Helsinki City Geotechnical Division.

ALKUSANAT

Satelliittipaikannukseen perustuvat mittausmenetelmät ovat tulleet viime vuosina käyttöön perinteisten takymetrimittausten rinnalle. Geotekninen osasto on ottanut koordinaattimääryksiä varten käyttöön VRS-GPS laitteiston, jolla mittaustuloksia korjataan erillisen korjaussignaalin avulla siten, että tarkkuus on oleellisesti parempi kuin perinteisellä GPS laitteistolla vastaten ns. tukiasemalla varustetun GPS laitteiston tarkkuutta.

Koska laitevalmistajien omat käsitykset edustamiensa laitteiden tarkkuuksista ovat yleensä optimistisia ja toisaalta tarkkuuteen vaikuttaa tässä tapauksessa myös koordinaatistomuunnokset, päätettiin tehdä selvitys VRS-GPS laitteiston todellisesta tarkkuudesta Helsingin kaupungin alueella.

Tämä julkaisu perustuu Lauri Raunun insinööritoimintaan, joka on tehty toimistopäällikkö Hannu Halkola ohjauksessa. Insinööritoiminnan valvoja oli yliopettaja Vesa Rope Stadia Ammattikorkeakoulusta.

Helsingissä huhtikuussa 2007

Ilkka Vähäaho
osastopäällikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	5
ABSTRACT	6
ALKUSANAT	7
SISÄLLYSLUETTELO.....	8
LYHENTEET, KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT	10
1 JOHDANTO	12
2 GPS-MITTAUSMENETELMÄ.....	13
2.1 DGPS (Differential Global Positioning System) sekä WAAS/EGNOS/MSAS 13	
2.2 RTK (Real Time Kinematic).....	14
2.3 VRS-mittausmenetelmä.....	14
2.4 GPS ja muut satelliittipaikannusjärjestelmät.....	15
3 TARKKUUTEEN JA TOIMINTAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ.....	16
3.1 Mittauspaikka.....	16
3.1.1 Satelliittien näkyvyys	16
3.1.2 Monitieheijastus.....	16
3.1.3 Etäisyys tukiasemaan.....	17
3.1.4 Sähkömagneettiset häiriöt	17
3.2 Satelliitit	17
3.2.1 Satelliittien lukumäärä	18
3.2.2 Satelliittigeometria (DOP, Dilution of Precision)	19
3.2.3 Satelliittien ratavirheet, kellovirheet ja jälkilaskenta.....	19
3.3 Ilmakehän aiheuttamat virheet.....	20
3.3.1 Ionosfääri.....	20
3.3.2 Troposfääri	20
3.4 Käyttäjän virheet.....	20
3.5 Koordinaatit	21
4 KOORDINAATISTOT JA MUUNNOKSET.....	22
4.1 Koordinaatistot.....	22
4.1.1 Geosentriset kolmiulotteiset järjestelmät	22
4.1.1.1 WGS84.....	22
4.1.1.2 ITRS	22
4.1.1.3 EUREF89 ja EUREF-FIN	22
4.1.2 Helsingin kaupungin koordinaatisto	23
4.1.2.1 Koordinaatisto	23
4.1.2.2 Korkeusjärjestelmä.....	23
4.1.2.3 Epätarkkuudet	24
4.2 Koordinaattimuunnos.....	24
4.2.1 Tasomuunnos.....	24
4.2.2 Korkeuden määrittäminen	25

5	TESTIMITTAUKSET	26
5.1	Laitteisto.....	26
5.2	Testimittaukset.....	27
5.2.1	Mittausten suunnittelu ja tavoitteet.....	27
5.2.2	Mittausten suorittaminen ja tulokset.....	27
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	32
	LÄHTEET	33
	Liite 1: Koordinaattimuunnoksessa käytetyt vastinpisteet (1-16) ja testimittausten sijainnit (A-E)	35
	Liite 2: Mittaustulokset.....	36
	Liite 3: Maastotietokoneen näyttämät mittaustiedot.....	44
	Liite 4: Euref-Fin verkkotasointus	50

LYHENTEET, KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

Datumi	Geodesiassa termiä käytetään kuvaamaan sellaisten suureiden joukkoa, jotka tarvitaan Maan pintaan kiinnitetyn koordinaatiston määrittelemiseksi.
Epookki	Mannerlaattojen liikkeen ja mm. maannousun johdosta koordinaatit ja korkeudet muuttuvat jatkuvasti. Epookki on ajanhetki, jolloin koordinaatisto on sidottu suhteessa maapallon keskipisteeseen ja jolloin korkeusjärjestelmän nollataso on määritetty suhteessa meren keskivedenkorkeuteen.
Geoidi	Maan painovoimakentän tasa-arvopinta, joka yhtyy valtamerten keskivedenpintaan. Geoidin voidaan ajatella kuvaavan meren pintaa, joka ulotetaan myös mannerten alapuolelle. Geoidin korkeus (N) lasketaan vertausellipsoidin pinnasta. N on positiivinen ellipsoidin yläpuolella ja negatiivinen sen alapuolella.
Karttaprojektio	Kartoilla Maan kaareva pinta kuvataan yleensä tasona. Tämä tapahtuu projisioimalla kartalla kuvattavat kohteet tasolle karttaprojektion avulla. Projisointi voi tapahtua joko suoraan tasolle tai esimerkiksi lieriön tai kartion pinnalle, joka levitetään tasoksi. Suomessa yleisesti käytettävät karttaprojektiot ovat lieriöprojektioita.
Vertausellipsoidi	Maan pinnan muotoa kuvaava matemaattinen pinta. Ellipsoidin koko ja muoto määritellään yleensä isoakselin puolikkaan (a) ja litistysuhteen (f) avulla.
Vertausjärjestelmä	Joukko suureita, jotka tarvitaan Maan muotoa ja kokoa kuvaavan järjestelmän määrittelemiseksi. Geodeettisen vertausjärjestelmän määrittelemiseen tarvitaan seuraavat neljä suurta: vertausellipsoidin isoakselin puolikas (a), Maan geosentrinen vetovoimavakio (GM), dynaaminen muotokerroin (J2), pyörihdysliikkeen kulmanopeus (ω).
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989. 3D-koordinaattijärjestelmä, joka on kiinnitetty Euraasian mannerlaatan yhtenäiseen osaan ja yhtyy ITRS-järjestelmään epookkina 1989.0.
ETRF89	European Terrestrial Reference Frame 1989. ETRS89-järjestelmän realisaatio: 3D-koordinaatisto.
EUREF	European Reference Frame. IAG:n alatyöryhmä.
EUREF89	European Reference Frame.

	ETRS89-järjestelmän ensimmäinen realisaatio.
EUREF-FIN	ETRS89-järjestelmän realisaatio Suomessa.
FinnRef	Suomen pysyvien GPS-asemien verkko.
GPS	Global Positioning System. Satelliittipaikannusjärjestelmä.
GRS80	Geodetic Reference System 1980. Vertausjärjestelmä, jonka IAG päätti ottaa käyttöön vuonna 1979.
IAG	International Association of Geodesy. Kansainvälinen Geodeettinen Assosiaatio.
IERS	International Earth Rotation Service Kansainvälinen Maan pyörähdysliikettä ja sen parametreja seuraava organisaatio.
ITRS	International Terrestrial Reference System. Globaali, 3D-koordinaattijärjestelmä, jonka perussuureet ovat GRS80-järjestelmän mukaisia.
kkj	Kartastokoordinaattijärjestelmä.
WGS84	World Geodetic System 1984 on GPS-satelliittien käyttämä koordinaattijärjestelmä.

1 JOHDANTO

Insinööriyön aiheena on VRS-GPS-mittauksen tarkkuus Helsingin kaupungin alueella. Työ on tehty Helsingin kaupungin Kiinteistöviraston geotekniselle osastolle. Tutkittava laite on Trimble 5800 satelliittipaikannin.

VRS-järjestelmän pysyvien tukiasemien ja niiden avulla laskennallisesti mittaajan läheisyyteen luotavan virtuaalisen tukiaseman ansiosta mittaajan ei tarvitse huolehtia kiinteään tukiaseman pystyttämisestä tai etäisyydestä kiinteään tukiasemaan.

Mittalaitteiden maahantuojiin lupaamat mittaustarkkuudet perustuvat yleensä hyvissä mittausolosuhteissa ilman koordinaattimuunnosta saatuihin tuloksiin. Työn tavoitteena oli selvittää mittalaitteessa olevan koko Helsingin kaupungin kattavan muunnoskaavan toimivuus ja testimittauksin kokemuksia mittalaitteen laskemien koordinaattien tarkkuudesta paikallisen koordinaatiston suhteen.

Koordinaattimuunnoksen alueellista toimivuutta tutkittiin testimittauksin viidellä alueella eri puolilla Helsinkiä.

2 GPS-MITTAUSMENETELMÄ

GPS-järjestelmä on Yhdysvaltain puolustushallinnon kehittämä ja ylläpitämä satelliittipaikannusjärjestelmä. Järjestelmä muodostuu kolmesta eri osasta, jotka ovat satelliittilohko, valvontalohko ja käyttäjälohko. Satelliittilohkoon kuuluu 30 satelliittia (18.11.2006), jotka kiertävät maapalloa. Valvontalohkon muodostavat maan päällä olevat maa-asemat, joiden tehtävänä on satelliittien ratojen ja kellovirheiden määrittäminen. Käyttäjälohkon muodostavat käyttäjät, jotka mittaavat satelliittien signaaleja määrittääkseen sijaintinsa. Vuoden 2000 toukokuussa GPS-järjestelmästä poistettiin sen siviilikäytön tarkkuutta heikentänyt SA-moodi (Selective Availability), jolloin koordinaattivirheet pienenevät lähes kymmenesosaan. (4; 7.)

Paikannuksessa havaitaan satelliittien lähettämiä signaaleja, joiden perusteella mitataan etäisyydet vähintään kolmeen satelliittiin. Yhteen satelliittiin mitattu etäisyys antaa havaitsijan paikan jonnekin yhden pallon pinnalle. Kun etäisyys kahteen satelliittiin tunnetaan, tarkentuu paikka näiden kahden pallon leikkausviivalle. Kolmannen satelliitin avulla paikka määräytyy jo yksikäsitteisesti kolmen pallon leikkauspisteeseen. Vastaanottimen kellovirheen ratkaisemiseksi tarvitaan vielä yhteys neljanteen satelliittiin. (5, s. 21.)

Satelliittipaikannuksessa on siis kyse etäisyydenmittauksesta. Etäisyyksien mittauksessa voidaan hyödyntää joko satelliitin lähettämän signaalin paikannuskoodeja, siviilikäytössä C/A-koodia tai kantoaaltoja L1 ja L2. (4.)

2.1 DGPS (Differential Global Positioning System) sekä WAAS/EGNOS/MSAS

DGPS perustuu satelliittisignaalin koodin havaitsemiseen sekä pysyvien tukiasemien määrittämien korjausten käyttöön. Tunnetun sijaintinsa ja havaitsemansa etäisyyden avulla tukiasema laskee jokaisen satelliitin etäisyyteen korjauksen, joka lähetetään liikkuvalla satelliittipaikantimelle. Digita Oy lähettää Fokus-paikannuspalvelunsa korjausdatan radiolinkin välityksellä Radio Suomen taajuudella. Digita Oy lupaa käyttäjille paikannuksen tarkkuudeksi 2 m tai 10 m palveluluokasta riippuen. Mittaustarkkuuden arvioidaan heikentyvän DGPS-palvelua käytettäessä 30 cm jokaista sataa kilometriä kohden liikkuvan paikantimen etäisyyden lisääntyessä pysyvistä tukiasemista. Geotrim Oy:n tarjoama (VRS-DGPS) palvelu lähettää korjausdataa VRS-verkosta liikkuvan satelliittipaikantimen yhteydessä olevaan GPS-puhelimeen. Geotrim Oy lupaa tarkkuuden olevan puolen metrin luokkaa. (20; 21.)

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) –satelliittista saatavalla korjausdatalla on mahdollista parantaa satelliitivastaanottimen mittaustarkkuutta Euroopan alueella. Maanpäälliset tukiasemat laskevat DGPS:n tapaan korjausdataa tunnetun ja satelliiteista lasketun sijaintinsa perusteella ja lähettävät datan EGNOS-satelliitille, joka edelleen lähettää korjausdatan havaitsijan satelliittipaikantimelle. WAAS (Wide Area Augmentation Service) ja MSAS (Multi-functional satellite augmentation system) toimivat ja lähettävät vastaavalla tavalla korjausdataa liikkuvaan satelliittipaikantimeen kuin EGNOS, mutta WAAS toimii Yhdysvaltain ja MSAS Japanin alueella. (22; 23.)

2.2 RTK (Real Time Kinematic)

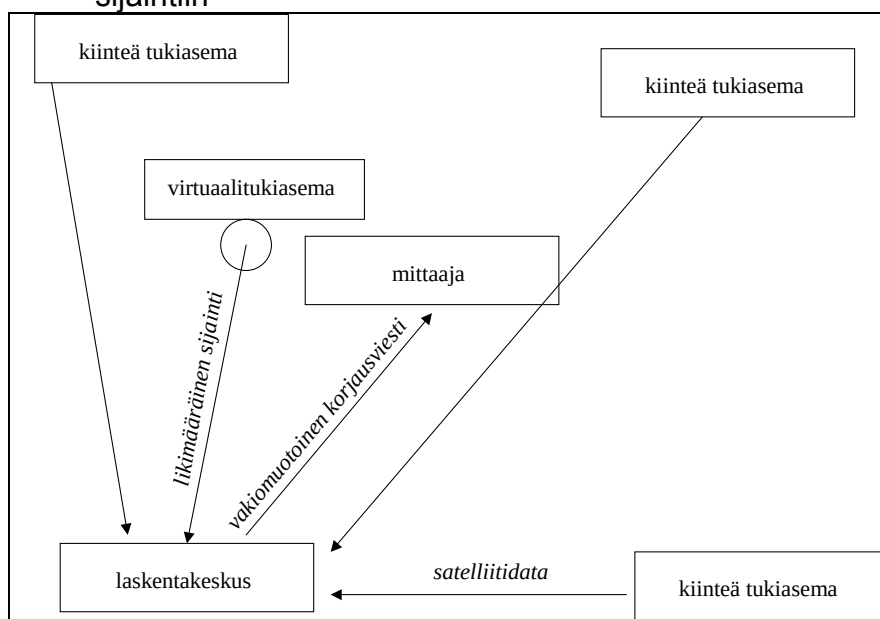
Reaaliaikaisessa suhteellisessa kinemaattisessa mittauksessa tunnetulla pisteellä paikallaan pysyvä tukiasema lähettää satelliittihavaintonsa ja koordinaattinsa liikkuvalle yksikölle. Liikkuva yksikkö yhdistää ne omien havaintojensa kanssa erotushavainnoksi. Tavoitteena on ratkaista tukiaseman ja liikkuvan vastaanottimen välinen avaruusvektori. Erotushavainnoilla pystytään pienentämään ja/tai eliminoimaan useita virhelähteitä. RTK-mittauksen heikkoutena on mittaustarkkuuden huonontuminen etäisyyden tukiasemasta kasvaessa. RTK-menetelmässä mittausalue rajoittuu useimmiten ilmakehätekijöiden vuoksi noin 10–30 kilometrin säteelle tukiasemasta. Laitevalmistajat lupaavat RTK-mittauksen tarkkuudeksi tyypillisesti tasokoordinaateille $10 \text{ mm} + 1...2 \text{ ppm}$ ja korkeudelle $20 \text{ mm} + 1...2 \text{ ppm}$, jossa ppm-osa kuvaa etäisyydestä riippuvaa virhettä ($\text{ppm (parts per million)} = \text{mm/km}$) (2, s. 11, 30.)

2.3 VRS-mittausmenetelmä

VRS (Virtual Reference Station) -järjestelmä on toteutettu jatkuvasti mittaavista GPS-tukiasemista, joita tarvitaan vähintään kolme, sekä laskentakeskuksesta, jonne GPS-tukiasemat lähettävät havaintodatansa. VRS:n käyttäjillä on yhteys laskentakeskukseen ja sen kautta välitetään korjaustiedot käyttäjän vastaanottimeen. Tukiasemien keskinäinen etäisyys on tyypillisesti noin 50-70 km. Käyttäen kaikkia VRS-verkon GPS-tukiasemia voidaan mallintaa virheitä koko verkon alueella ja myös paikallisesti. (6.)

Laskentakeskuksen on pystyttävä

- ratkaisemaan alkutuntemattomat eli signaalin kokonaiset aallonpituudet tukiasemien välisistä vektoreista
- laskennallisesti sijoittamaan yleensä mittaajan lähimmän tukiaseman datan siten, että se simuloi virtuaalista tukiasemaa
- sijoittamaan verkossa määritetyt virheiden korjaukset virtuaalisen tukiaseman sijaintiin



Kuva 1: VRS-mittauksen toimintaperiaate

Maastossa mittaa käynnistää GPS-laitteensa ja odottaa, että laite saa määritettyä oman karkean sijaintinsa. Mittaajan karkean sijainnin perusteella laskentakeskus määrittää virtuaalisen tukiaseman lähelle mittajan GPS-laitteen paikkaa ja aloittaa korjaustietojen lähettämisen mittajan vastaanottimeen. Vastaanotin käsittelee saamaansa korjausdataa samalla tavalla kuin jos se tulisi normaalilta RTK-tukiasemalta. VRS-verkossa määritetyt virheet interpoloidaan vastaamaan virheitä virtuaalisen tukiaseman läheisyyteen. Interpolointitekniikka mahdollistaa myös ekstrapoloinnin, eli virtuaalinen tukiasema on mahdollista luoda myös varsinaisen VRS-verkon rajaaman alueen ulkopuolelle. Mittauspaikan sijainnilla ei ole vaikutusta mittaustarkkuuteen noin 50 kilometriin asti verkon ulkopuolella mitattaessa. (2, s. 47; 6.)



Kuva 2: Osa Suomen kiinteää VRS-tukiasemaverkkoa

2.4 GPS ja muut satelliittipaikannusjärjestelmät

GPS-signaalin koodit on moduloitu kahteen kanta-aaltoon L1 ($f = 1575$ MHz, $\lambda = 19$ cm) ja L2 ($f = 1228$ MHz, $\lambda = 24$ cm). Paikannus kanta-aaltojen avulla sekä maanpäällisten paikantimien välisiä avaruusvektoreita havaitsemalla saadaan määritettyä vastaanottimen koordinaatit. Näiden kahden signaalin lisäksi on L2:n kanssa samaa taajuutta käyttävä L2C-koodi, joka on L2-signaalia voimakkaampi, ja vastaanotin pystyy pitämään sen lukituksessa paremmin ja mittaus onnistuu paremmin huonoissakin olosuhteissa. L2C-signaalia lähettävät satelliitit korvaavat vaiheittain vanhat satelliitit. Tällä hetkellä on 2 L2C-signaalia lähettävää satelliittia toiminnassa. Suunnitteilla on myös uutta L5-signaalia lähettävät satelliitit ($f = 1176,45$ MHz), jotka osaltaan myös parantavat mittaustarkkuutta ja luotettavuutta sekä edellytyksiä mitata huonommissa olosuhteissa. (19.)

GNSS (global navigation satellite system) -paikantimet pystyvät hyödyntämään sekä GPS-satelliittien että Venäjän ylläpitämän GLONASS-satelliittipaikannusjärjestelmän satelliittien lähettämiä signaaleja. Tulevaisuudessa paikantimissa voidaan hyödyntää myös Euroopan avaruusjärjestö ESA:n ylläpitämää GALILEO-satelliittipaikannusjärjestelmää. (19.)

3 TARKKUUTEEN JA TOIMINTAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

3.1 Mittauspaikka

Mittauspaikkaa suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon kohtien 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 ja 3.1.4 mittaustarkkuuteen vaikuttavat tekijät. On tärkeää tutustua mittausalueen maastoon ennen mittauksen aloittamista. Jos pienikin osa maastoon merkittävistä kohteista tai kartoitusalueesta sijaitsee alueella, jossa virhettä syntyy paljon tai mittaus on mahdotonta, vähintään osa työstä on tehtävä jollain muulla mittalaitteella ja -menetelmällä.

3.1.1 Satelliittien näkyvyys

Mittauspaikalla tulisi olla etenkin etelätaivasta näkyvissä riittävästi, sillä GPS-satelliittien radat ovat etelässä (1, s. 295; 3, s. 5). Katkaisukulmalla tarkoitetaan sitä korkeuskulmaa, jossa horisontin yläpuolella näkyvät satelliitit otetaan vastaanottimen sijainnin määrittämisessä mukaan. Vastaanottimen katkaisukulmana on yleensä 15°-20°. Korkealla näkyvien satelliittien signaaleissa on vähemmän virheitä kuin matalalla horisontissa näkyvissä, mutta näkyvien satelliittien lukumäärä on silloin pienempi. Pysyvät VRS-verkon tukiasemat käyttävät katkaisukulmaa 5°, sillä matalilta korkeuskulmilla tulevat signaalit sisältävät eniten ilmakehän aiheuttamia virheitä, joita käytetään muodostettaessa ionos- ja troposfääriin liittyvää virhemallia VRS-verkon alueelle. (4, s. 43; 5, s. 11; 3, s. 14; 6, s. 12-13.)

Satelliitteja saadaan enemmän laskentaan mukaan katkaisukulman ollessa pieni. Matalalta horisontissa olevien satelliittien signaaleja kuitenkin heikentävät maastossa olevat esteet, monitieheijastukset sekä signaalin pitkä kulkumatka ilmakehässä. (3, s.14.) Maaston este voi aiheuttaa vaihekatkon, jonka aikana yhteys satelliittiin menetetään. Vaihekatkon takia vastaanottimen on suoritettava alustus ja alkutuntemattomien ratkaisu uudestaan. (5, s. 185; 2, s. 23.)

3.1.2 Monitieheijastus

Monitieheijastumisessa signaali tulee antenniin useampaa kuin yhtä reittiä. Signaali tulee antenniin jonkun heijastavan pinnan kautta. Monitieheijastuminen aiheuttaa signaaliin vaihesiirtymän, joka on verrannollinen signaalien kulkumatkan eroon. Heijastavana pintana voi olla esimerkiksi veden pinta, verkkoaita, peltikatto tai havaitsijan auto. Antennin paikka tulee valita niin, ettei lähellä ole heijastavia pintoja. Mitä matalammalta signaali tulee vastaanottimeen, sitä todennäköisemmin tulee mukaan myös jostain pinnasta heijastunutta signaalia. Tämän on eräs syy siihen, minkä takia havaintoja ei pitäisi tehdä liian pienillä katkaisukulmilla. Vastaanottimen antennin rakenne eliminoi osan maasta päin heijastuneista signaaleista. (3, s. 14; 5, s. 137-138.)

3.1.3 Etäisyys tukiasemaan

Vastaanottimen lähelle luotavan virtuaalisen tukiaseman virhemallinnus tehdään kiinteän VRS-tukiasemaverkon ja laskentakeskuksen avulla. Tukiasemia tarvitaan vähintään kolme. Tukiasemien välinen etäisyys on yleensä noin 50-70 km. VRS-verkossa määritetyt virheet interpoloidaan vastaamaan virhettä virtuaalisen tukiaseman sijainnissa. Tukiasemien välille muodostetaan taso, joka kuvaa virheen määrää verkon alueella lineaarisesti. Mikäli virhe ei muutu lineaarisesti tukiasemien välillä, jää se interpolointivirheenä havaintoihin. Virtuaalinen tukiasema on mahdollista muodostaa myös VRS-verkon ulkopuolelle, jolloin samalla menetelmällä ekstrapoloidaan korjaustermit verkon ulkopuolelle. Geotrim Oy:n ylläpitämä tukiasemaverkko on nähtävissä internetissä (www.gpsnet.fi). (2, s. 21, 30, 36; 6, s.12-13.)

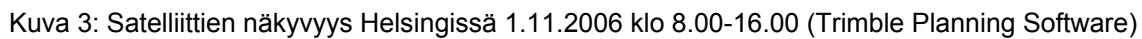
VRS-mittauksissa pysyvän tukiasemaverkon alueella etäisyys lähimpään tukiasemaan ei ole kriittinen tekijä. Verkon ulkopuolella suositeltu maksimietäisyys verkon reunasta on noin 50 km. Vastaanottimen etäisyydellä virtuaaliseen tukiasemaan on merkitystä kuten RTK-mittauksissakin. Vaikka mittauksen alustus ja sen myötä virtuaalinen tukiasema muodostuu automaattisesti, voi alustuksen asettaa myös itse tapahtumaan uudelleen. (2, s. 30; 6, s.13.)

3.1.4 Sähkömagneettiset häiriöt

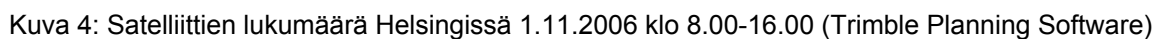
Sähkömagneettiset kentät voivat aiheuttaa satelliittimittaussignaaliin häiriötä tai vastaanottimen lukituksen katkeamisen johonkin satelliittiin. Sähkömagneettisia kenttiä voivat aiheuttaa esimerkiksi korkeajännitelinjat, GSM- tai radiolähtetimet, radio- tai televisiomastot ja tutka-asemat. (2, s. 25.)

3.2 Satelliitit

Satelliittien määrällä ja sijoittumisella on vaikutusta mittauksen tarkkuuteen. Mittausajankohdan suunnittelemiseen voidaan käyttää esimerkiksi satelliittimittauslaitteiden maahantuojiin edustajia sekä GPS-mittausten suunnitteluohjelmia. Ohjelmien avulla saadaan selville annetun sijainnin ja ajankohdan mukainen satelliittikonstellaatio. (8.)



Mittauslaitteen alustuksen suorittamiseen tarvitaan vähintään viisi yhteistä satelliittia tukiasemalle ja liikkuvalla yksiköllä. Kun alustus on suoritettu, riittää neljä yhteistä satelliittia mittauksen suorittamiseen. Yleensä tarkkuus paranee, kun satelliitteja on enemmän. Satelliittien suuremmalla lukumäärällä saadaan ylimääritystä alkutuntemattomien ratkaisuun johtuen yleensä paremmasta satelliittigeometriasta. (2, s. 25-26.)



3.2.2 Satelliittigeometria (DOP, Dilution of Precision)

Satelliittien sijainti on huono, jos satelliitit ovat vain toisella puolella taivasta tai maasta nähden samalla suoralla. Hyvän satelliittigeometrian vallitessa satelliitit ovat jakautuneet tasaisesti eri puolille taivasta. DOP-luvut ovat vastaanottimessa mittausta tehdessä, tai ne voidaan tarkastaa ennen mittausta suunnitteluohjelman avulla.

Erilaisia DOP-lukuja:

GDOP - geometrinen (kolmiulotteinen ja aika)

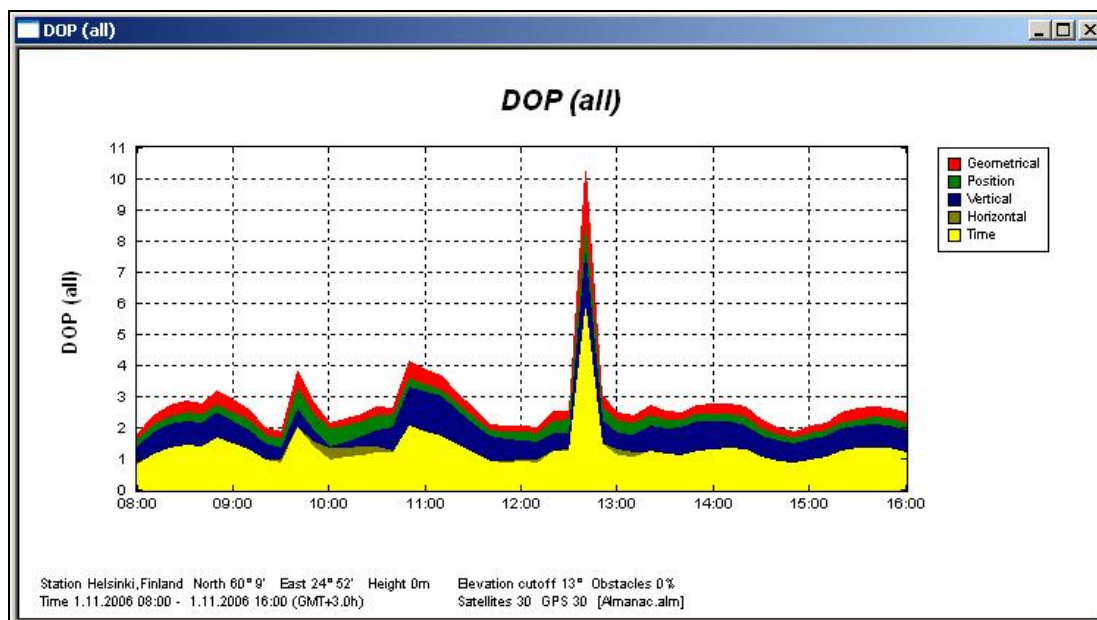
PDOP - paikka (kolmiulotteinen)

HDOP - vaakasijainti (tasokoordinaatit)

VDOP - korkeus

TDOP – aika

DOP saadaan nähtävissä olevien satelliittien sisään jäävän tilavuuden käänteisarvona. Mitä pienempi DOP, sitä tarkempi tulos. Jos PDOP > 6 tai GDOP > 8, ei mittauksia tulisi suorittaa. Kertomalla havainnon keskihajonta PDOP-arvolla saadaan arvio sijaintitarkkuudesta. (2, s. 26-27; 5, s. 178-179; 9.)



Kuva 5: Satelliittien DOP-luvut Helsingissä 1.11.2006 klo 8.00-16.00 (Trimble Planning Software)

3.2.3 Satelliittien ratavirheet, kellovirheet ja jälkilaskenta

Satelliittien ratatiedot perustuvat kaikissa satelliittimittauksissa ennustettuihin ratatietoihin. Tarkat ratatiedot ja kellokorjaukset ovat saatavissa tietoon jälkikäteen. Jälkilaskennan avulla päästään tarkempiin tuloksiin. Jälkilaskennassa on poistettavissa myös esimerkiksi satelliittien lähettämää huonoa dataa. (2, s. 16; 7.)

Niin kellovirheet ja ratavirheet, kuin vastaanottimen kellovirhekin ovat suurelta määrin ratkaistavissa reaaliajassa vastaanottimien ja satelliittien välisten erotushavaintojen, virtuaalitikiaseman ja vastaanottimen välisen vektorin sekä VRS-verkon alueelle muodostetun pienimmän neliösumman (PNS) verkkotasoituksen avulla. (2, s. 12-14; 7.)

3.3 Ilmakehän aiheuttamat virheet

Ilmakehä toimii GPS-signaalin etenemisen väliaineena. Rakenteeltaan ilmakehä on kerroksellinen ja erityisesti ionosfääri ja troposfääri vaikuttavat haitallisesti signaalin etenemiseen (4, s. 41).

3.3.1 Ionosfääri

Ionosfääri ulottuu noin 50 kilometristä noin tuhannen kilometrin korkeuteen maanpinnasta sisältäen huomattavan määrän elektroneja. Elektronitiheys muuttuu vuorokauden, vuodenajan ja auringon aktiivisuuden mukana. Myös ionosfääri jaetaan useaan elektronitiheydeltä toisistaan poikkeavaan kerrokseen. Elektronitiheydessä on myös auringossa tapahtuvien purkauksien johdosta epäsäännöllisiä ajallisia ja paikallisia vaihteluja. (7; 5, s. 126, 131.)

Ionosfäärillä on kantoaallon vaiheeseen aikaistava, mutta koodiin viivästyttävä vaikutus. Ionosfäärin näennäinen vaikutus signaalin kulkumatkaan vaihtelee vajaasta metrillä useaan kymmeneen metriin. Aktiivisen ionosfäärin aikana muutosnopeus voi olla kymmeniä senttimetrejä minuutissa. Erotusmittauksissa eli mitattaessa tukiaseman ja toisen vastaanottimen välistä vektoria ionosfäärin aiheuttama virhe poistuu lähes kokonaan. (7.)

3.3.2 Troposfääri

GPS-laskennassa troposfääriksi kutsutaan kaikkea ionosfäärin alla olevaa ilmakehän osaa. Yleensä troposfääri jaetaan kuivaan (90 %) ja kosteaan (10 %) osaan. Troposfäärin mallintaminen on vaikea tehtävä. Syy troposfäärin jakoon on, että troposfäärin kuiva osa on helpommin hallittavissa mallien avulla kuin vesihöyrypitoisuuden mittaaminen. Lisäksi vesihöyrymäärän mittaaminen on hankalaa ja kallista. Troposfäärin reaktiot ovat hyvin paikallisia, ja sen aiheuttama virhe on yksi suurimmista GPS-laskennassa aiheutuvista virheistä. (7; 5, s. 131-135.)

3.4 Käyttäjän virheet

Erityisesti on syytä tarkistaa, että GPS-vastaanottimen asetukset ovat oikeat. Mittaustarkkuusvaatimuksen ollessa suuri on kiinnittävä huomiota mittauksen havaintoajan pituuteen ja tarkkuuslukuihin. Antennikorkeus tulee asettaa vastaanottimeen. Mittausta tehdessä kannattaa käyttää laitteen omaa sauvaa, jossa on mitta-asteikko. Omalla mitalla antennin keskipisteen mittaaminen ei ole suositeltavaa. Antennin fyysinen keskipiste ei ole aina sama kuin antennin sähköinen keskipiste eli vaihekeskipiste, johon laskenta kohdistuu. Rasiatasaimen avulla varmistetaan mittasauvan pystyasento. (5, s.139, 214.)

3.5 Koordinaatit

Koordinaattien määrittäminen on satelliittimittaukseen liittyvä perustehtävä. GPS-vastaanottimesta ja laskentaohjelmista saadaan ratkaistua koordinaatit, mutta joskus vastaanottimen antamat arvot poikkeavat oikeista. Merkittävä syy virheeseen on GPS:n käyttämä eri koordinaatisto, sekä suoritettu koordinaatistomuunnos ja sen tarkkuus. Tästä tarkemmin kohdassa 4. (5, s. 31.)

4 KOORDINAATISTOT JA MUUNNOKSET

3-ulotteisesta WGS84-koordinaatistosta siirrytään paikannuslaskennan jälkeen muunnoksen avulla Helsingin kaupungin 2-ulotteiseen koordinaatistoon.

4.1 Koordinaatistot

Koordinaattijärjestelmä (reference system) sisältää määrittelyn, koordinaatiston orientoinnin, referenssiellipsoidin määrittelyn jne. Koordinaattijärjestelmä on realisoitava maastossa oleviin kiintopisteisiin käytettäessä sitä mittauksiin. Realisaatiota kutsutaan koordinaatistoksi (reference frame). (5, s. 51.)

4.1.1 Geosentriset kolmiulotteiset järjestelmät

4.1.1.1 WGS84

WGS84 on Yhdysvaltain puolustuslaitoksen karttahallinnon määrittämä GPS-satelliittien käyttämä globaali koordinaattijärjestelmä. WGS84 -koordinaattijärjestelmän käyttämä vertausellipsoidi on lähes sama kuin GRS80-vertausellipsoidi. Ellipsoidi syntyy, kun ellipsi pyörähtää symmetria-akselinsa ympäri. WGS84-järjestelmä on geosentrinen ja suorakulmainen. Sen origo on Maan massakeskipisteessä. Z-akseli yhtyy Maan pyörähdysakselin kanssa. X-akseli osoittaa 0-meridiaanin suuntaan ja Y-akseli on tätä vastaan kohtisuorassa. (4, s. 11; 5, s. 57; 10, s. 38; 11, s. 5-6.)

4.1.1.2 ITRS

IERS ylläpitää maailmanlaajuista koordinaattijärjestelmää ITRS. ITRS on globaali geosentrinen kolmiulotteinen koordinaattijärjestelmä, jonka perussuureet ovat GRS80-järjestelmän mukaisia. Koska järjestelmä on määritelty eri mannerlaatoilla olevien toistensa suhteen liikkuvien GPS-havaintoasemien avulla, täytyy se kiinnittää johonkin ajanhetkeen eli epookkiin. (5, s. 58-59; 11.)

4.1.1.3 EUREF89 ja EUREF-FIN

Vuonna 1990 IAG:n alakomissio EUREF päätti ottaa käyttöön Euroopassa koordinaatiston, joka on kiinnitetty Euraasian mannerlaatan deformatumattomaan osaan. Määriteltyä järjestelmää kutsutaan ETRS89:ksi, jonka realisaatio on nimeltään ETRF-89 ja joka on yhtenevä ITRS89:n kanssa epookkina 1989.0. ETRF89-koordinaatit eivät siis muutu ajan mukana. (5, s. 59-60; 11.)

Euroopan laajuinen EUREF89-kampanja toteutettiin vuonna 1989. Suomessa on mukana neljä kampanjassa ollutta pistettä. Tämän jälkeen on Suomessa kansallisesti verkkoa tihennetty. Geodeettinen laitos ylläpitää Suomen pysyvien GPS-tukiasemien verkkoa FinnRefiä, joka luo yhteyden kansainvälisiin järjestelmiin sekä on runkona EUREF-FIN-koordinaatistolle. Näin on syntynyt EUREF-FIN-koordinaatisto, joka on ETRS89-järjestelmän realisaatio Suomessa. (5, s. 59-60; 11; 12.)

Yhdysvaltain puolustushallinnon karttalaitos (NIMA) toteaa julkaisussa TR8530.2 mm, että ”sellaisia alueellisia datumeja, jotka perustuvat tarkasti ITRS:n realisaatioon, kuten ETRF89, voidaan pitää identtisinä WGS84:n kanssa”. VRS-mittauksilla saadaan EUREF-FIN-koordinaatteja, sillä VRS-verkon tukiasemat ovat sidottu Geodeettisen laitoksen FinnRef-verkkoon. (11; 2, s. 34.)

4.1.2 Helsingin kaupungin koordinaatisto

4.1.2.1 Koordinaatisto

Helsingin kaupungin geodeettisten mittauksien perustaksi oli 1900-luvun alussa luotu ns. satapulttiruudukko, joka alkoi käydä puutteelliseksi mittaustarkkuusvaatimusten kasvaessa ja laitteistojen kehittyessä. Kaupungin maa-alueen kasvun myötä vuosina 1917-18 päätettiin muodostaa kolmiomittauksien avulla kolmioverkko. Kolmioverkko laskettiin erilliseen koordinaattijärjestelmään, sillä valtakunnallista järjestelmää ei vielä ollut. Kaupungin jatkuvasti kasvava maa-alue johti kolmioverkon täydentämiseen vuosien 1945-1949 aikana, jolloin 1920-luvulla tehty perusverkko tarkastettiin ja siihen liitettiin itäinen, läntinen ja eteläinen perusverkko. (13, s. 74-77, 140-142.)

Kolmiomittaaminen perustuu tarkkaan taitekulmien mittaamiseen kolmiomittaustornista toiseen. Kun havainnot yhdistetään, saadaan kolmioita, joiden kulmat tunnetaan. Kun yhden kolmion sivun pituus tiedetään, voidaan kolmiomittaustornien väliset matkat ratkaista matemaattisesti. (1, s. 197.)

Helsingin Kallion kirkon tornin ristin ukkosenjohdatin valittiin Helsingin kaupungin koordinaatiston origoksi. Vuonna 1946 tapahtuneen origon sijainnin tarkastuksen yhteydessä huomattiin ukkosenjohdattimen olevan vinossa, eikä ollut tarkkaa tietoa siitä, oliko ukkosenjohdattimessa oleva kiintopiste sama kuin käyttöönottovuonna. Koko kiintopiste jouduttiin rakentamaan uudestaan. 1950-luvulla Kallion kirkon ristin koordinaatit $x=0$, $y=0$ muutettiin koordinaateiksi $x=20\ 000$ m, $y=50\ 000$ m negatiivisten koordinaattiarvojen välttämiseksi. Pisteverkkoa on rakentamisen aloittamisesta lähtien tihennetty nykyiseen yli tuhanteen pisteeseen, muun muassa monikulmiomittausta käyttäen. (13, s. 74-77, 140-142.)

4.1.2.2 Korkeusjärjestelmä

Helsingissä suunniteltiin ja rakennettiin vuosina 1927-29 korkeuskiintopistejärjestelmä, joka tarkkavaaittiin. Järjestelmäksi valittiin NN-järjestelmä (normaalinolla), joka perustui Katajanokalla sijaitsevaan valtakunnallisen vesiasteikon nollapisteeseen. Helsingissä on nykyisin käytössä korkeusjärjestelmä, joka on Helsingin alueella sama kuin N43-järjestelmä. Korkeusluvut ovat noin 5 cm pienempiä kuin N60-järjestelmässä maan kohoamisen takia. (13, s. 143.)

4.1.2.3 Epätarkkuudet

Helsingin kaupungin koordinaatisto on tasokoordinaatisto, jossa maanpinnan kaarevuutta ei ole otettu huomioon. Koordinaatisto muistuttaa lähinnä Azimuthal-projektiota, mutta ei tarkasti ottaen ole mikään tunnettu projektio. (14; 19, s. 12).

Koordinaatistoa laajennettiin etenkin 1960- ja -70-luvuilla uusille asuinalueille, jotka joet ja pellot erottivat toisistaan. Nämä pistelaajennukset erosivat muista Helsingin koordinaattipisteistä jopa 16 cm. Pisteet yhdistettiin myöhemmin verkkotasoituksella muuhun koordinaatistoon, jolloin virheet näennäisesti vähenivät. Vanhoja paljon virhettä sisältäviä pisteitä on kuitenkin edelleen jäljellä. (15.)

4.2 Koordinaattimuunnos

Helsingin kaupungilla on valtakunnallisista koordinaatistoista poikkeava oma koordinaatistonsa. GPS-mittaukset ja laskenta suoritetaan globaalissa geosentrisessä avaruuskoordinaatistossa, eikä saatavilla olevilla tuloksilla ole suoraan mitään tekemistä valtakunnallisen kartastokoordinaattijärjestelmän (kkj:n) eikä paikallisten koordinaatistojen kanssa. Koordinaattijärjestelmien välisessä muunnoksessa on suositeltavaa tehdä ensin 3-ulotteinen yhdenmuotoisuusmuunnos kahden järjestelmän välillä maan keskipisteen kautta. Yhdenmuotoisuusmuunnos voidaan kuvata seitsemällä parametrilla: origon siirto koordinaattiakselien suhteen (3 parametria), kierrot kolmen akselin ympäri (3 parametria) ja mittakaavamuunnos (1 parametri) siten, että koordinaatisto yhtyy tavoitteena olevaan koordinaatistoon. Kolmiulotteisen muunnoksen jälkeen koordinaatit on projisoitava karttatasolle. Tämän jälkeen on tehtävä vielä tasomuunnos tunnetuilla Helmert-kaavoilla. (14; 17.)

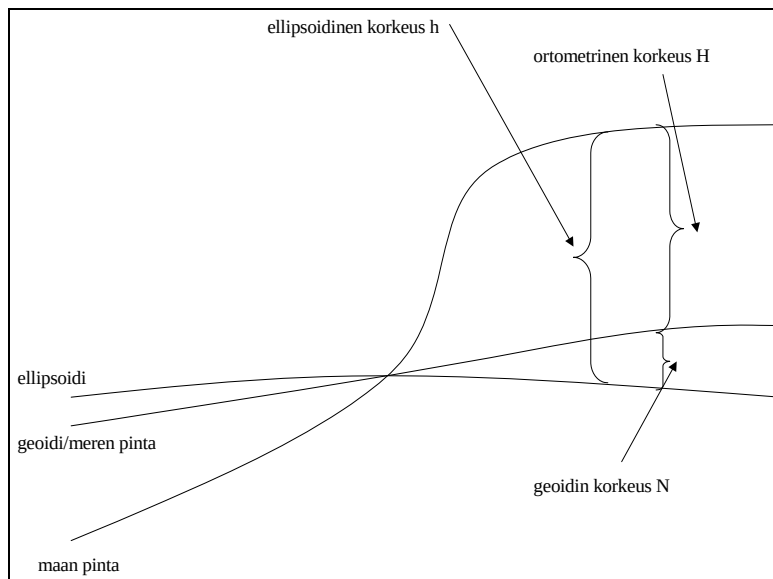
4.2.1 Tasomuunnos

Helsingin kaupungin koordinaatistolta puuttuva tarkka projektion määrittäminen hankaloittaa kolmiulotteisen yhdenmuotoisuusmuunnoksen laskemista. Tasomuunnos on määriteltävä kuudentoista maastossa sijaitsevan kiintopisteen koordinaattien perusteella. Osa kiintopisteistä sijaitsee Helsingin kaupungin rajojen sisäpuolella ja osa ulkopuolella. Jokaiselta muunnoksessa käytetyltä vastinpisteeltä tunnetaan Helsingin kaupungin koordinaatiston arvot, EUREF-FIN-koordinaatit. Muunnoksena on 4-parametrinen tasomuunnos. Muunnoksessa siirretään origon paikkaa, koordinaatisto kierretään ja akselien mittakaava muunnetaan.

Tasomuunnoksessa käytetyt kiintopisteet sisältävät jäännösvirhettä. Jäännösvirheellä tarkoitetaan sitä, kuinka paljon kiintopisteen mitattu arvo poikkeaa pisteen tasoitetusta arvosta. Pisteiden tasoresiduaalit ovat välillä 0,005 m – 0,095 m. Muunnoksessa käytettäviä pisteitä ei ole kuitenkaan voitu valita ainoastaan pistevirheiden määrän perusteella, vaan niiden täytyy sijoittua siten, että niitä on sekä alueen reunoilla että keskellä. Koordinaattimuunnoksen luotettavuus huononee pisteiden ympäröimän alueen ulkopuolelle mentäessä. (15; 18, s. 46.)

4.2.2 Korkeuden määrittäminen

Merenpinnasta, täsmällisemmin ilmaistuna geoidin pinnasta, mitattava korkeus on ortometrinen korkeus. Korkeus voidaan määrittää myös vertausellipsoidin eli Maan matemaattisen mallin pinnasta. Tällöin puhutaan ellipsoidisesta korkeudesta. Näiden kahden korkeuden välillä ei ole täsmällistä matemaattista suhdetta, vaan korkeuksien muuntaminen perustuu tavalla tai toisella mittauksiin. Jotta ellipsoidiset korkeudet pystyttäisiin tarvittaessa muuntamaan ortometrisiksi korkeuksiksi, tulee tuntea geoidin korkeudet. Ne saadaan selville geoidimallin avulla. Tutkittava laite, Trimble 5800, käyttää geoidimallina fin2000-geoidimallia. (Ellipsoidinen korkeus – geoidin korkeus = ortometrinen korkeus.) Lisäksi laskentaan on lisätty vakiokorjaus $-0,057$ m. (4.)



Kuva 6: Korkeuden määrittäminen

5 TESTIMITTAUKSET

5.1 Laitteisto

Geoteknisellä osastolla on käytössä Trimble 5800 -GPS-vastaanotin. Laitteisto sisältää vastaanottimen lisäksi ACU-tallentimen, kartoitussauvan sekä tukijalat. Acu-tallennin on graafinen näppäimistöllä ja kosketusnäytöllä varustettu maastotietokone. Lisäksi käytössä on GSM-puhelin, jolla vastaanotetaan korjausdata laskentakeskuksesta. Tiedonsiirto ACU-tallentimen ja vastaanottimen välillä tapahtuu joko langattomana Bluetooth-yhteytenä tai vaihtoehtoisesti tiedonsiirtokaapelin välityksellä.



Kuva 7: Trimble 5800 vastaanotin, ACU-tallennin ja GSM-puhelin liitettyinä tukijaloilla tuettuun kartoitussauvaan

5.2 Testimittaukset

5.2.1 Mittausten suunnittelu ja tavoitteet

Testimittaukset tehtiin 1.11. – 14.11. 2006 välisenä aikana. Mittausten tavoitteena oli selvittää ero satelliittipaikantimen laskemien koordinaattiarvojen ja Helsingin kaupungin koordinaatiston pisteselituskorteissa olevien koordinaattiarvojen välillä.

Referenssipisteet valittiin viideltä eri alueelta, joista neljä aluetta sisälsi 10 ja yksi alue 9 referenssipistettä. Tarkoituksena oli testata laitteen antamien mittaustulosten eroja mittaushaualueesta, satelliittien määrästä sekä yhdellä mittauskerralla tallennettujen havaintojen määrästä riippuen.

Lisäksi mitattiin tunnin havaintojaksot kahdella referenssipisteellä. Mittaukset suoritettiin staattisena FastStatic-mittauksena käyttäen VRS-verkon lähimpiä kiinteitä tukiasemia, jotka sijaitsevat Vantaalla, Hyvinkäällä, Lohjalla ja Pernajassa.

Ennen mittausten suorittamista Trimble Ltd:n Planning-ohjelman avulla tarkastettiin että mittaushaualueena oli satelliitteja käytössä vähintään kuusi ja PDOP-arvo oli enintään kuusi.

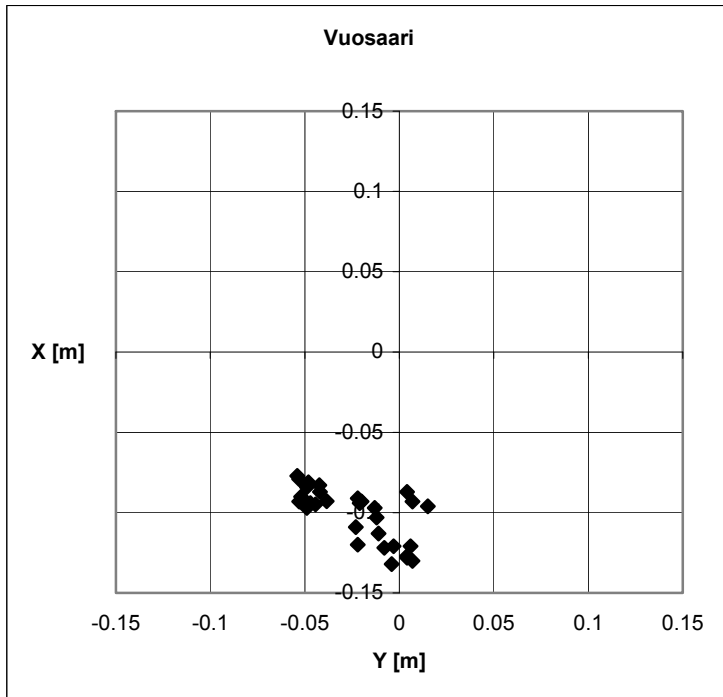
5.2.2 Mittausten suorittaminen ja tulokset

Ensimmäisenä mittauspäivänä 1.11. 2006 aamupäivän testimittausten pisteet sijaitsivat Vuosaaren golfkentän ympärillä. Mittaushetkellä oli kova tuuli ja räntäsade. Kartoitussauva asetettiin suoraan kiintopisteen päälle ja rasiatasaimen tasauskupla asetettiin tasausrenkaan keskelle. Sauvan stabiilius varmistettiin sauvaan liitettävien tukijalkojen avulla. Antennin päälle kerääntynyt räntä pyyhittiin pois ennen jokaista mittausta. Mittalaite suorittaa mittauksen alustuksen automaattisesti, mutta alustus tehtiin ennen mittausta tarvittaessa uudestaan, jotta varmistuttaisiin virtuaalisen tukiaseman olevan lähellä mittauspistettä.

Jokaiselta kymmeneltä pisteellä kerättiin 3, 10 ja 30 havaintoa mittauskertaa kohden sekunnin tallennusvälillä. Kolmen havainnon mittausta on mittalaitteen maastotietokoneessa nimellä Kartoituspiste. Kartoituspisteen tarkkuusvaatimuksina oletusasetuksina on vaakataarkkuudelle 0,020 m ja korkeustarkkuudelle 0,030 m. Maastotietokone hyväksyy ja tallentaa mittaustuloksen ainoastaan, jos laitteen näyttämä mittaustarkkuus on edellä mainittuja arvoja tarkempi. Satelliittien signaalien katkaisukulmana käytettiin maastotallentimessa oletusarvona olevaa kolmeatoista astetta. PDOP-arvon maksimirajana oli 6. Kymmenen ja kolmenkymmenen havainnon mittauksille asetettiin maastotietokoneeseen samat tarkkuusvaatimukset.

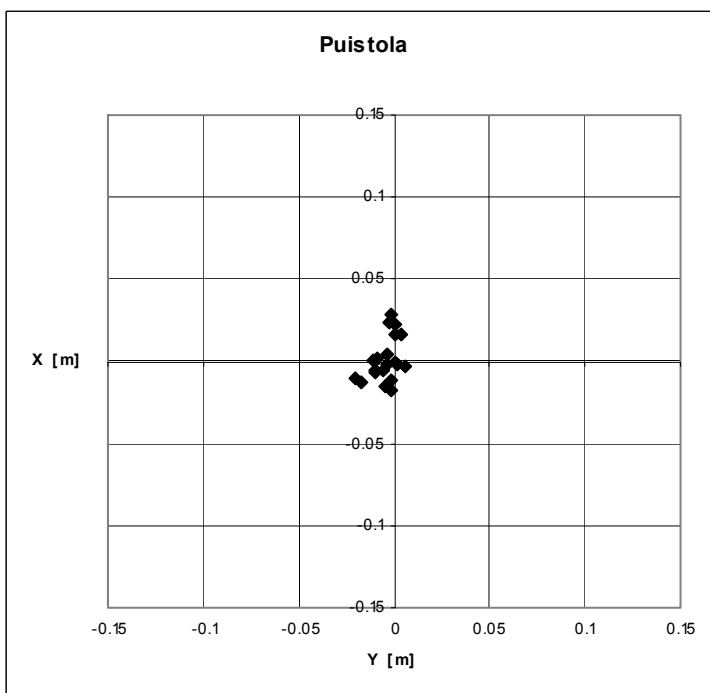
Tuloksista voi helposti havaita pohjoiskoordinaateissa esiintyvän systemaattisen virheen. Pohjoiskoordinaattien arvot ovat noin 0,10 m liian pieniä. Tasokoordinaateissa eri havaintomäärillä saavutetuissa tarkkuuksissa ei ole merkittäviä eroja.

Taulukko 1: Vuosaaren testimittauksen havaintojen tasokoordinaattien hajonta



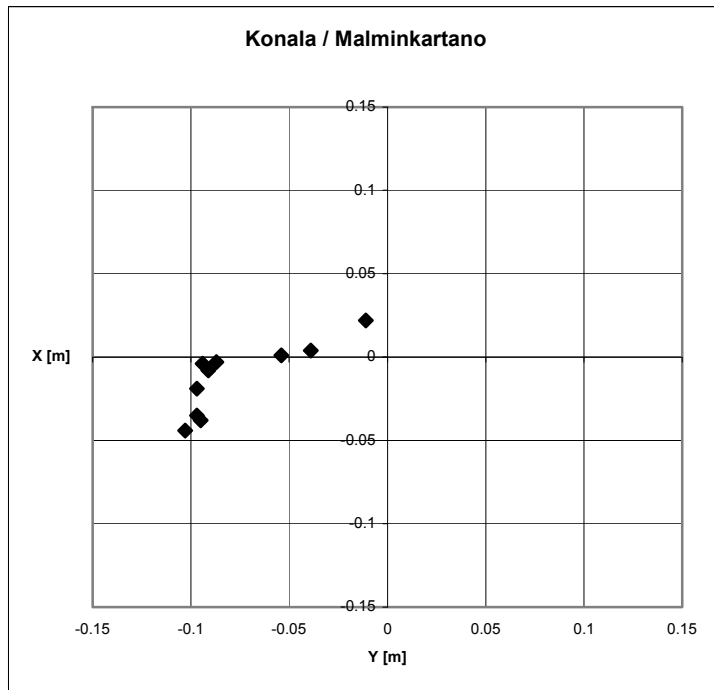
Ilmapäivällä 1.11. 2006 tehtiin mittaukset Puistolan alueella kymmenellä pisteellä. Jokaisella pisteellä mitattiin kolmen havainnon Kartoituspiste-mittaus sekä maastotietokoneessa Kiintopiste-nimellä oleva 180 havainnon mittaus. Puistolan mittauksen tulokset olivat testimittauksen parhaimpia. Kolmen ja sadankahdeksankymmenen havainnon mittauksien tarkkuuksissa ei ollut merkittävää eroa.

Taulukko 2: Puistolan testimittauksen havaintojen tasokoordinaattien hajonta

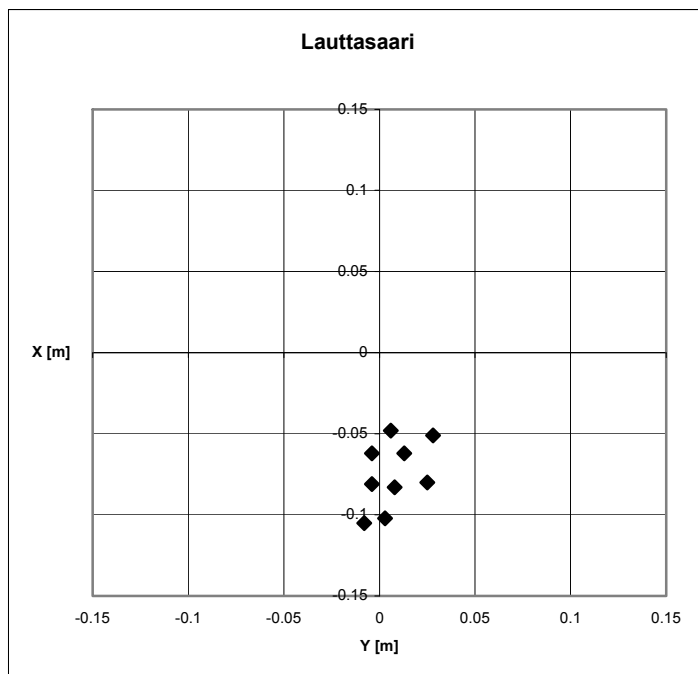


Konalassa ja Malminkartanossa testimittaukset tehtiin 2.11., Lauttasaassa 10.11., ja Hernesaaren ja Eiran alueella 13.11. 2006. Näillä alueilla mittaukset tehtiin Kartoituspiste- havainnoilla.

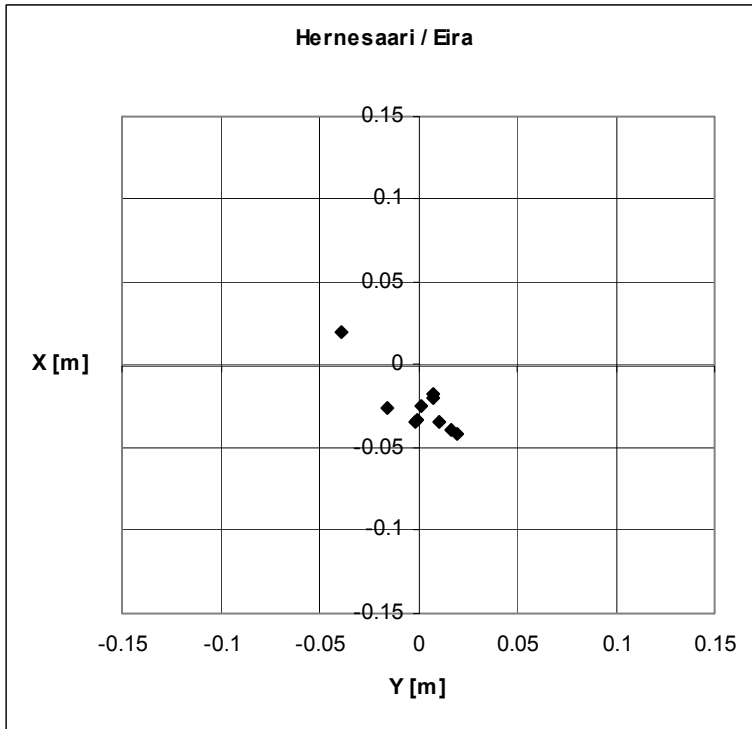
Taulukko 3: Konalan ja Malminkartanon testimittauksen havaintojen tasokoordinaattien hajonta



Taulukko 4: Lauttasaaren testimittauksen havaintojen tasokoordinaattien hajonta

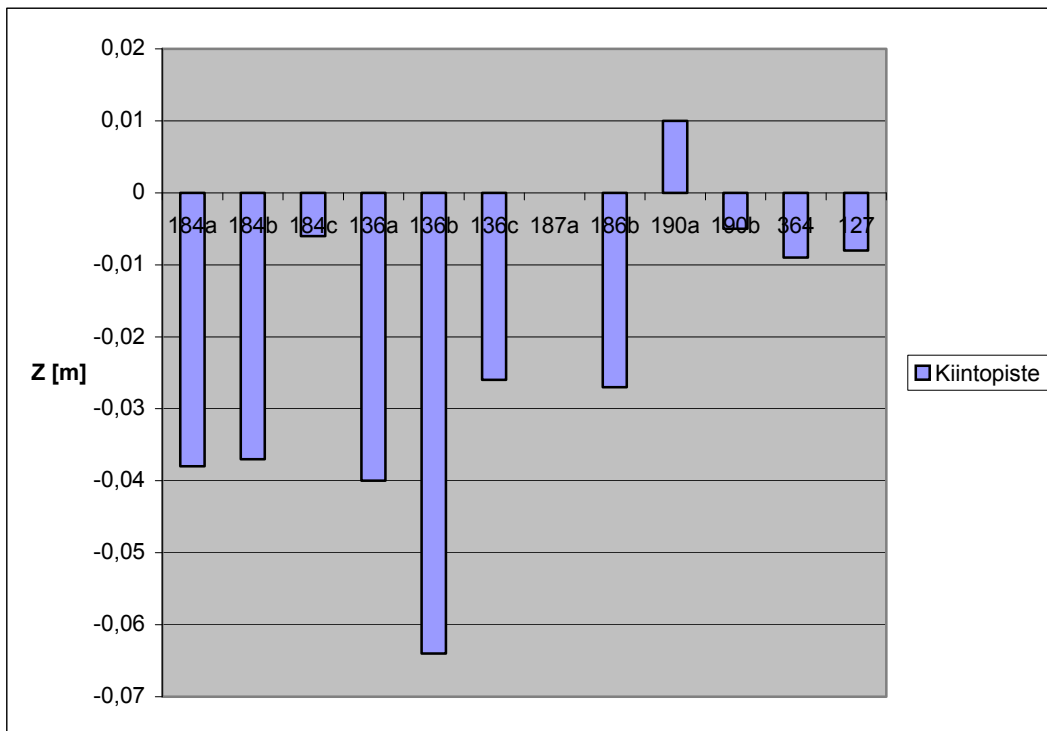


Taulukko 5: Hernesaaren ja Eiran testimittausten havaintojen tasokoordinaattien hajonta



Mittaustulosten korkeuskoordinaatteja verrattiin korkeuskiintopisteisten ja kolmioverkon pisteiden koordinaatteihin. Otos korkeuspisteiden osalta oli niin pieni, ettei sen perusteella voi tehdä päätelmiä. Taulukosta 6 voi kuitenkin todeta mittausten korkeuskoordinaattien olevan melko tarkkoja.

Taulukko 6: Havaintojen korkeuskoordinaattien ja tunnettujen korkeuksien hajonnat



Havainnoista on laskettu kaikkien neljänkymmenenyhdeksän Kartoituspisteen RMS (root mean square) eli keskihajonta (σ) referenssikoordinaattien suhteen. Keskivirhe ilmoittaa sen välin, minkä sisään päästään vastaavanlaisella mittauksella 68 %:n todennäköisyydellä. Tasokoordinaattien RMS oli 72 mm.

Kaava 1: Keskihajonta

$$RMS = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (X - X_0)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta X)^2}{n}}$$

X_0 tunnettu koordinaattiarvo

X havaittu koordinaattiarvo

ΔX havainnon poikkeama referenssikoordinaateista

n havaintojen määrä

15.11.2006 mitattiin Lauttasaassa ja Pihlajamäessä staattiset mittaukset. Tiedonsiirto maastotietokoneen ja vastaanottimen välillä varmistettiin yhdistämällä ne tiedonsiirtojohdolla langattoman yhteyden sijaan. Laitteiston vastaanottama ja tallentama mittausdata lähetettiin Geotrim Oy:lle, jossa suoritettiin jälkilaskenta. Kahden staattisen mittauksen tulokset ovat liitteenä mittaustuloksissa. Näiden kahden mittauksen perusteella ei voida kuitenkaan tehdä varmoja päätelmiä ainakaan staattisen mittauksen tarkkuuden hajonnasta.

Muunnokset Helsingin kaupungin koordinaatistoon tehtiin käyttämällä Maanmittauslaitoksen Helsingin kaupungin Kiinteistövirastolle tekemillä muunnosohjelmilla. Mittaustulokset poikkesivat kiintopisteisen koordinaateista keskimäärin 3 cm.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

VRS-paikantimen arvioima tarkkuus oli usein liian optimistinen. Laitteen näyttämä tarkkuus on laskettu alkutuntemattomien tarkkuuden, satelliittien lukumäärän ja satelliittigeometrian perusteella. Laite ei voi tietää, millä absoluuttisella tarkkuudella Helsingin kaupungin koordinaatiston suhteen mitataan.

Mittaushavaintojen määrällä ei ollut suurta vaikutusta mittaustarkkuuteen. Tallennettuaan useampia havaintoja pistettä kohden maastotallennin laskee havaintojen koordinaateista keskiarvon mitatulle pisteelle. Jos mittausolosuhteet huononevat pistettä mitatessa, heikentyy myös mittaustarkkuus.

Testin tulokset osoittavat VRS-paikantimen mittaustarkkuuksien vaihtelevan paljon Helsingin kaupungin alueella. Tuloksista voi havaita esimerkiksi Vuosaarella saman suuntaisen systemaattisen virheen verrattaessa samaan kiintopisteketjuun kuuluvien referenssipisteiden koordinaatteja mittaustuloksiin. VRS-paikantimen käyttämä koordinaattimuunnos on tehty kattamaan koko Helsingin kaupungin alue. Helsingin kaupungin koordinaatistossa paikoitellen esiintyvän sisäisen epätarkkuuden ja epähomogeenisuuden johdosta muunnos ei anna aina tarkkaa tulosta suhteessa mittausalueen kiintopisteisiin. Vertailun vuoksi Geodeettisen laitoksen vuosina 2003-2004 tehdyssä valtakunnallisessa tutkimuksessa mittaustuloksia verrattiin EUREF-FIN-pisteisiin, ja RMS oli 27 mm. Staattisen mittauksen tarkkuus voisi olla parempi jos mittauksessa käytettyjä kiinteitä VRS-verkon tukiasemia olisi lähempänä Helsingin kaupunkia.

Koordinaattimuunnoksen aiheuttaman virheen tarkkaa osuutta ei saatu määriteltä. Muunnoksen virheen määrittämiseksi olisi pitänyt tietää muunnoskaava. Maastotallentimeen on syötetty muunnoksessa käytetyt vastinpisteet, mutta tarkkaa kaavaa ei laitteesta löydy.

Mittaaja voi todeta VRS-paikantimen todellisen tarkkuuden paikallisesti kaupungin kiintopisteiden suhteen parhaiten mittaamalla satelliittipaikantimella koordinaatit kaupungin kiintopisteen päällä ja vertaamalla niitä tunnettuihin koordinaatteihin. Tämän työn testimittauksia lukuun ottamatta ei ole tiedossa missä päin Helsingin kaupunkia geoteknisen osaston VRS-paikantimen koordinaattimuunnoskaava toimii hyvin suhteessa mittausalueen kiintopisteisiin.

Koordinaattimuunnoksen aiheuttamaa mittausvirhettä voisi pienentää käyttämällä koko kaupungin kattavan koordinaattimuunnoksen sijasta paikallisia muunnoksia. Muunnoskaavan parametreja määriteltäessä tulisi käyttää suppeammalla mittausalueella olevia ja sitä ympäröiviä pisteitä, joiden sisäinen tarkkuus tekee muunnoksesta mittausalueella toimivamman.

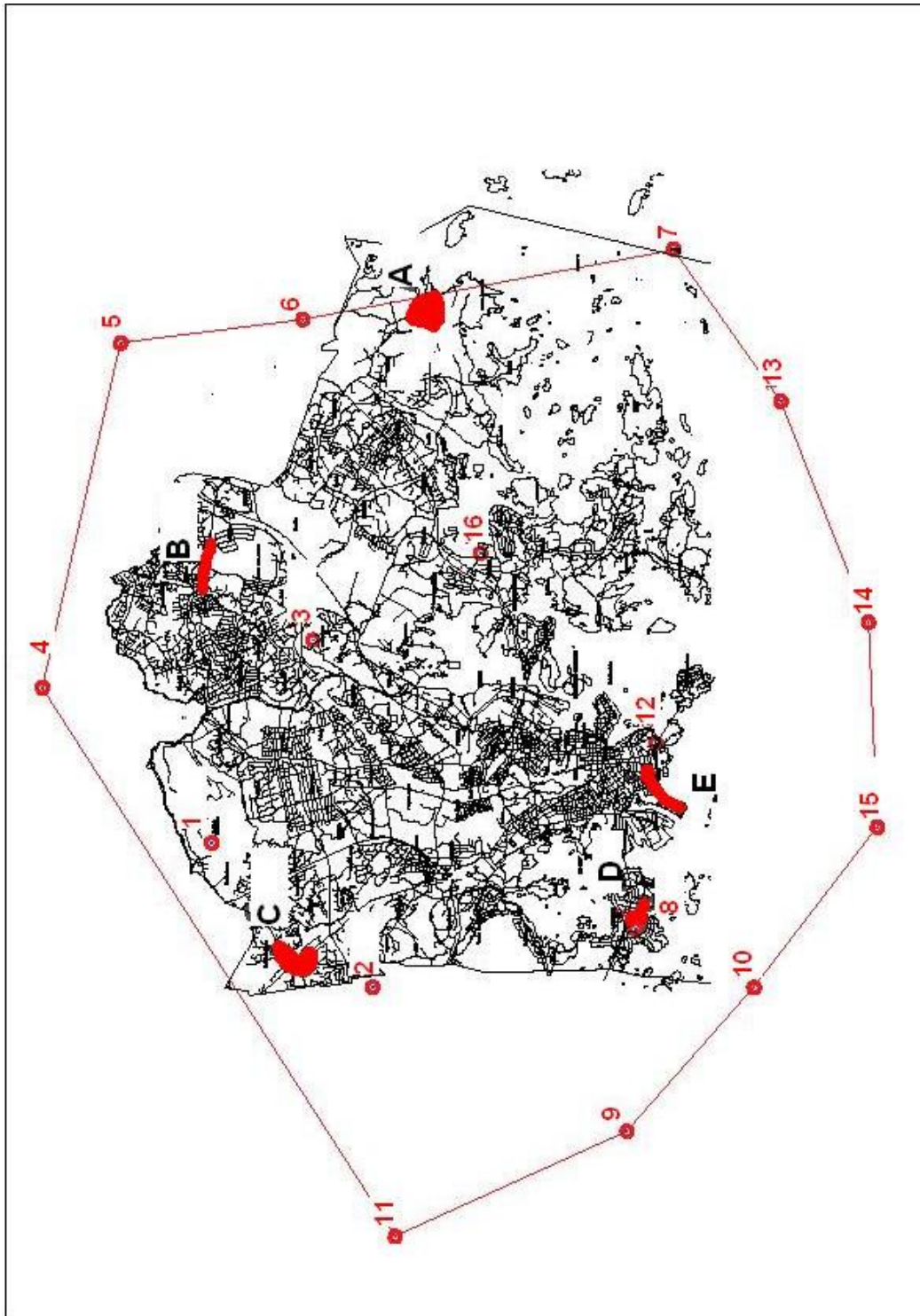
Suoritettujen testimittausten perusteella Trimble 5800 -vastaanottimella ja maastotietokoneen laskemalla koordinaattimuunnoksella tavoitetaan Helsingin kaupungin Kiinteistöviraston geoteknisen osaston asiakkailleen lupaama kairauspisteiden tarkkuus, mikä on tasokoordinaattien osalta 1 metri ja korkeudessa 10 cm.

LÄHTEET

- 1 RANTANEN, PASI: Maastomittauksen perusteet. Vammala, 2001.
- 2 HÄKLI, PASI & KOIVULA, HANNU: Virtuaali-RTK (VRS) tutkimus. Geodeettinen laitos, Masala, 2004.
- 3 POUTANEN, MARKKU: GPS-järjestelmä, radat, mittaukset ja virhelähteet. WWW-dokumentissa GPS-meteorologia, seminaari, www.fkf.net/GPS-raportti.PDF. Luettu 5.4.2006.
- 4 LAURILA, PASI: opetusmateriaali, GPS-paikannuksen perusteet. Rovaniemen AMK, 2005.
- 5 POUTANEN, MARKKU: GPS-paikanmäärittäminen. Hämeenlinna, Tähtitieteellinen laitos URSA, 1998.
- 6 OLLIKAINEN, MARKO: VRS-RTK-mittauksen uusi aikakausi. POSITIO 2/2004.
- 7 POUTANEN, MARKKU: GPS-mittauksen uudet mahdollisuudet. WWW-dokumentissa www.progis.fi/progis/Dokumentit/MarkkuPoutanen/GPS.html. Luettu 5.4.2006.
- 8 WWW-dokumentti, www.trimble.com/planningsoftware.html. Luettu 5.4.2006.
- 9 WWW-dokumentti, www.geostar.fi/teema/gpssanasto.php3. Luettu 5.4.2006.
- 10 Maanmittauslaitos: Kaavoitusmittausohjeet, 2003
- 11 Julkisen hallinnon neuvottelukunta: JHS-suositus 153, ETRS89-järjestelmän mukaiset koordinaatit Suomessa. WWW-dokumentissa www.jhs-suositukset.fi/suomi/jhs153. Luettu 5.4.2006.
- 12 Julkisen hallinnon neuvottelukunta: JHS-suositus 154, ETRS89-järjestelmään liittyvät karttaprojektiot, tasokoordinaatit ja karttalehtijako. WWW-dokumentissa www.jhs-suositukset.fi/suomi/jhs154. Luettu 5.4.2006.
- 13 KOSTET, JUHANI: Helsingin kaupunkimittauksen vaiheita. Jyväskylä, 1992.
- 14 ARPONEN, NUMMILA, GRÖHN, HEIKKILÄ, KAISLA, KARVINEN & RAITA: Helsingin kiinteistöviraston muistio, Helsingin seudun koordinaatistojen muunnoskaavoja ja eri koordinaatistoissa olevia aineistoja. Helsinki, 2003.
- 15 GRÖHN, JORMA: Kiinteistövirasto, Kaupunkimittausosasto, Helsinki. Henkilökohtainen tiedonanto, 5.4.2006.
- 16 SANTALA, JAAKKO: Paikalliset koordinaattijärjestelmät ja paikkatietojen yhteiskäyttö. Helsinki, 1992.

- 17 SANTALA, JAAKKO & VÄISÄNEN MAURI: Koordinaatti yhdistää – kunhan ollaan samassa järjestelmässä. POSITIO 2/2001.
- 18 SALMENPERÄ, HANNU: Runko- ja kartoitusmittaukset. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere, 1998.
- 19 WWW-dokumentti, http://www.trimble.com/srv_new_era_galileo.shtml. Luettu 13.9.2006.
- 20 WWW-dokumentti, http://www.digita.fi/digita_dokumentti.asp?path=1840;1852;7470;7474;7477. Luettu 18.11.2006.
- 21 WWW-dokumentti, <http://www.geotrim.fi/Tuoteryhma.asp?ID=378>. Luettu 18.11.2006.
- 22 WWW-dokumentti, <http://www.navis.pp.fi/sanasto.html#WAAS>. Luettu 18.11.2006.
- 23 WWW-dokumentti, <http://www.eralehti.fi/?id=6032>. Luettu 18.11.2006.

Liite 1: Koordinaattimuunnoksessa käytetyt vastinpisteet (1-16) ja testimittausten sijainnit (A-E)



Muunnospisteiden jäännösvirheet: 1= 0,037m, 2= 0,007m, 3= 0,057m, 4= 0,027m, 5: 0,062m, 6= 0,034m, 7= ei tiedossa, 8= 0,033m, 9= 0,005m, 10= 0,064m, 11= 0,020m, 12= 0,017m, 13= 0,095m, 14= 0,039m, 15= 0,020m, 16= 0,016m.
Mittausalueet: A= Vuosaari, B= Puistola, C= Kona / Malminkartano, D= Lauttasaari, E= Hernesaari / Eira

Liite 2: Mittaustulokset

Vuosaari
mittaukset

							□taso (m)	□korkeus (m)
	mitattu x	mitattu y	mitattu z	x	y	z		
184a	22905,952	61845,324	4,208	22906,061	61845,347	4,246	0,111	0,038
184b	22905,941	61845,325	4,209				0,122	0,037
184c	22905,964	61845,334	4,240				0,098	0,006
5115a	23125,347	62010,721		23125,441	62010,768		0,105	
5115b	23125,344	62010,719					0,109	
5115c	23125,348	62010,715					0,107	
5116a	23230,624	62103,519		23230,717	62103,539		0,095	
5116b	23230,623	62103,518					0,096	
5116c	23230,626	62103,517					0,094	
5117a	23262,901	62186,071		23262,985	62186,120		0,097	
5117b	23262,906	62186,067					0,095	
5117c	23262,895	62186,068					0,104	
5100a	23283,297	62347,987		23283,390	62348,025		0,101	
5100b	23283,307	62347,983					0,093	
5100c	23283,295	62347,981					0,105	
5127a	22758,416	62522,570		22758,519	62522,582		0,104	
5127b	22758,406	62522,571					0,114	
5127c	22758,397	62522,574					0,122	
5128a	22618,071	62430,244		22618,158	62430,240		0,087	
5128b	22618,065	62430,247					0,093	
5128c	22618,062	62430,255					0,097	
5129a	22644,607	62295,588		22644,735	62295,584		0,128	
5129b	22644,608	62295,588					0,127	
5129c	22644,605	62295,591					0,130	
5074a	22706,969	62175,797		22707,101	62175,801		0,132	
5074b	22706,980	62175,798					0,121	
5074c	22706,980	62175,807					0,121	
136a	23435,410	62062,298	5,602	23435,491	62062,346	5,642	0,094	0,040
136b	23435,404	62062,304	5,578				0,097	0,064
136c	23435,414	62062,292	5,616				0,094	0,026
keskiarvo							0,106	0,035
keskiarvo a							0,105	0,039
keskiarvo b							0,107	0,051
keskiarvo c							0,107	0,016

Liite 2: Mittaustulokset

Vuosaari

	mitattux-x (m)	mitattuy-y (m)	mitattuz-z (m)	
184a	-0,109	-0,023	-0,038	a=3 havaintoa
184b	-0,120	-0,022	-0,037	b=10 havaintoa
184c	-0,097	-0,013	-0,006	c=30 havaintoa
5115a	-0,094	-0,047		
5115b	-0,097	-0,049		
5115c	-0,093	-0,053		
5116a	-0,093	-0,020		
5116b	-0,094	-0,021		
5116c	-0,091	-0,022		
5117a	-0,084	-0,049		
5117b	-0,079	-0,053		
5117c	-0,090	-0,052		
5100a	-0,093	-0,038		
5100b	-0,083	-0,042		
5100c	-0,095	-0,044		
5127a	-0,103	-0,012		
5127b	-0,113	-0,011		
5127c	-0,122	-0,008		
5128a	-0,087	0,004		
5128b	-0,093	0,007		
5128c	-0,096	0,015		
5129a	-0,128	0,004		
5129b	-0,127	0,004		
5129c	-0,130	0,007		
5074a	-0,132	-0,004		
5074b	-0,121	-0,003		
5074c	-0,121	0,006		
136a	-0,081	-0,048	-0,040	
136b	-0,087	-0,042	-0,064	
136c	-0,077	-0,054	-0,026	
keskiarvo	-0,101	-0,023	-0,035	
keskiarvo	-0,100	-0,023	-0,039	
a				
keskiarvo	-0,101	-0,023	-0,051	
b				
keskiarvo	-0,101	-0,022	-0,016	
c				

Liite 2: Mittaustulokset

Puistola
mittaukset□ taso □ korkeus
(m) (m)

	mitattu x	mitattu y	mitattu z	x	y	z		
187a	29063,543	55105,331	14,799	29063,521	55105,331	14,799	0,022	0,000
186b	29063,522	55105,320	14,772				0,011	0,027
7362a	29126,637	55061,426		29126,639	55061,430		0,004	
7362b	29126,634	55061,424					0,008	
7379a	29131,615	54921,806		29131,611	54921,810		0,006	
7379b	29131,627	54921,810					0,016	
3532a	29130,989	54783,522		29130,987	54783,531		0,009	
3532b	29130,982	54783,521					0,011	
3301a	29151,098	54713,763		29151,108	54713,783		0,022	
3301b	29151,095	54713,766					0,021	
190a	29161,808	54623,260	13,985	29161,815	54623,270	13,975	0,012	0,010
190b	29161,800	54623,265	13,970				0,016	0,005
7364a	29035,776	55318,663		29035,794	55318,665		0,018	
7364b	29035,783	55318,663					0,011	
7365a	28990,099	55430,282		28990,099	55430,281		0,001	
7365b	28990,097	55430,283					0,003	
7366a	28934,977	55598,192		28934,980	55598,186		0,007	
7366b	28934,996	55598,190					0,016	
7367a	28900,307	55748,457		28900,278	55748,459		0,029	
7367b	28900,302	55748,456					0,024	
keskiarvo							0,013	0,010
keskiarvo a							0,013	0,005
keskiarvo b							0,014	0,016

Liite 2: Mittaustulokset

Puistola

	mitattux-x (m)	mitattuy-y (m)	mitattuz-z (m)	
187a	0,022	0,000	0,000	a=3 havaintoa b=180 havaintoa
186b	0,001	-0,011	-0,027	
7362a	-0,002	-0,004		
7362b	-0,005	-0,006		
7379a	0,004	-0,004		
7379b	0,016	0,000		
3532a	0,002	-0,009		
3532b	-0,005	-0,010		
3301a	-0,010	-0,020		
3301b	-0,013	-0,017		
190a	-0,007	-0,010	0,010	
190b	-0,015	-0,005	-0,005	
7364a	-0,018	-0,002		
7364b	-0,011	-0,002		
7365a	0,000	0,001		
7365b	-0,002	0,002		
7366a	-0,003	0,006		
7366b	0,016	0,004		
7367a	0,029	-0,002		
7367b	0,024	-0,003		
keskiarvo	0,001	-0,005	0,003	
keskiarvo a	0,002	-0,004	0,005	
keskiarvo b	0,001	-0,005	-0,016	

Liite 2: Mittaustulokset

Konala / Malminkartano
mittaukset□ taso □ korkeus
(m) (m)

	mitattu x	mitattu y	mitattu z	x	y	z
3191	26860,132	44489,758		26860,167	44489,855	0,103
3205	26794,276	44554,230		26794,295	44554,327	0,099
3194	27179,423	44738,224		27179,427	44738,318	0,094
3172	26206,746	44638,084		26206,742	44638,123	0,039
3123	26401,017	44430,570		26400,995	44430,581	0,025
3174	26410,058	44218,740		26410,102	44218,843	0,112
3180	26225,351	44175,941		26225,350	44175,995	0,054
3072	26065,131	44296,521		26065,139	44296,612	0,091
3125	26635,647	44230,435		26635,650	44230,522	0,087
1037	27379,618	43622,807		27379,656	43622,902	0,102

keskiarvo

0,081

	mitattux-x (m)	mitattuy-y (m)	mitattuz-z (m)
3191	-0,035	-0,097	3 havaintoa / mittaus
3205	-0,019	-0,097	
3194	-0,004	-0,094	
3172	0,004	-0,039	
3123	0,022	-0,011	
3174	-0,044	-0,103	
3180	0,001	-0,054	
3072	-0,008	-0,091	
3125	-0,003	-0,087	
1037	-0,038	-0,095	

keskiarvo

-0,012

-0,077

Liite 2: Mittaustulokset

Lauttasaari
mittaukset□taso □korkeus
(m) (m)

	mitattu x	mitattu y	mitattu x	y	z		
			z				
7172	17498,699	45534,096		17498,804	45534,104	0,105	
7221	17506,330	45504,979		17506,413	45504,971	0,083	
7222	17530,780	45310,397		17530,842	45310,384	0,063	
7143	16862,016	45848,348		16862,078	45848,352	0,062	
7145	17069,314	45916,697		17069,362	45916,691	0,048	
7053	17279,101	45352,664		17279,182	45352,668	0,081	
364	17250,600	45299,234	34,891	17250,651	45299,206	34,900	0,058 0,009
7057	17160,180	45372,997		17160,260	45372,972	0,084	
7055	17168,145	45418,441		17168,247	45418,438	0,102	
keskiarvo						0,076	

	mitattux-x (m)	mitattuy-y (m)	mitattuz-z (m)	
7172	-0,105	-0,008		3 havaintoa / mittaus
7221	-0,083	0,008		
7222	-0,062	0,013		
7143	-0,062	-0,004		
7145	-0,048	0,006		
7053	-0,081	-0,004		
364	-0,051	0,028	-0,009	
7057	-0,080	0,025		
7055	-0,102	0,003		
keskiarvo	-0,075	0,007		

Liite 2: Mittaustulokset

Hernesaari / Eira
mittaukset□ taso □ korkeus
(m) (m)

	mitattu x	mitattu y	mitattu z	x	y	z		
7215	16629,371	49008,730		16629,397	49008,746		0,031	
7242	16695,129	48988,787		16695,149	48988,779		0,022	
7214	16477,905	48928,848		16477,944	48928,831		0,043	
5022	16371,433	48889,802		16371,467	48889,791		0,036	
5021	16169,223	48633,723		16169,203	48633,762		0,044	
127	16699,300	49304,705	2,677	16699,334	49304,707	2,685	0,034	0,008
12	16689,147	49406,309		16689,180	49406,310		0,033	
7110	16731,257	49518,204		16731,282	49518,202		0,025	
7113	16746,855	49620,759		16746,872	49620,751		0,019	
7114	16827,042	49228,258		16827,083	49228,238		0,046	

keskiarvo

0,033

mitattux-x (m) mitattuy-y (m) mitattuz-z (m)

7215	-0,026	-0,016		3 havaintoa / mittaus
7242	-0,020	0,008		
7214	-0,039	0,017		
5022	-0,034	0,011		
5021	0,020	-0,039		
127	-0,034	-0,002	-0,008	
12	-0,033	-0,001		
7110	-0,025	0,002		
7113	-0,017	0,008		
7114	-0,041	0,020		

keskiarvo

-0,025

0,001

Liite 2: Mittaustulokset

staattinen
mittaukset

wgs-84 (maantieteelliset)	mitattu x	mitattu y	x	y
3	60° 14' 19.01486"	25° 00' 24.34934"	60° 14' 19.01455"	25° 00' 24.35152"
364	60° 09' 34.04211"	24° 51' 52.87527"	60° 09' 34.04258"	24° 51' 52.87654"
euref-fin (suorakulmaiset)				
3	6679652,472	389634,778	6679652,461	389634,811
364	6671085,626	381484,687	6671085,640	381484,707
hki koordinaatisto				
3	26072,116	53177,498	26072,107	53177,532
364	17250,636	45299,186	17250,651	45299,206

tas (m)	mitattux-x (m) / mitattu lat.-lat.	mitattuy-y (m) / mitattu long.-long.
	0,00031"	-0,00218"
	-0,00047"	-0,00127"
0,035	0,011	-0,033
0,024	-0,014	-0,020
0,035	0,009	-0,034
0,025	-0,015	-0,020
keskiarvo	0,030	

Liite 3: Maastotietokoneen näyttämät mittaustiedot

Vuosaari	1.11.			
	rdop(max.)	hdop(max.)	vdop(max.)	rms
184a	9,3	5,0	7,8	14,8
184b	4,4	2,4	3,7	11,3
184c	5,8	3,2	4,9	9,6
5115a	1,1	0,8	0,8	11,9
5115b	1,9	1,3	1,3	12,2
5115c	1,3	0,9	1,0	19,8
5116a	1,4	0,9	1,0	16,8
5116b	1,4	0,9	1,0	32,0
5116c	1,4	0,9	1,0	15,7
5117a	2,3	1,6	1,6	23,4
5117b	1,6	1,1	1,1	17,7
5117c	2,3	1,6	1,6	14,6
5100a	1,5	1,0	1,1	23,6
5100b	2,1	1,4	1,6	28,1
5100c	1,5	1,0	1,1	30,0
5127a	2,6	1,5	2,1	7,2
5127b	2,6	1,5	2,1	10,6
5127c	2,6	1,5	2,1	21,5
5128a	1,9	1,0	1,6	19,4
5128b	2,9	1,6	2,5	26,3
5128c	1,8	1,0	1,6	34,0
5129a	1,7	0,9	1,4	24,0
5129b	1,7	0,9	1,4	25,6
5129c	1,7	0,9	1,4	30,3
5074a	2,4	1,0	2,2	44,8
5074b	2,5	1,0	2,3	63,5
5074c	2,5	1,0	2,3	32,4
136a	4,1	1,4	3,9	35,0
136b	2,9	1,0	2,8	39,9
136c	4,1	1,4	3,9	32,1
keskiarvo	2,6	1,4	2,1	24,3

Liite 3: Maastotietokoneen näyttämät mittaustiedot

	Vuosaari	1.11.		
	satelliitteja(min.)	vaakatarkkuus(m)	korkeustarkkuus(m)	
184a	6	0,017	0,027	a=3
184b	6	0,011	0,017	havaintoa
184c	6	0,015	0,022	b=10
5115a	7	0,008	0,008	havaintoa
5115b	7	0,010	0,010	c=30
5115c	7	0,013	0,013	havaintoa
5116a	7	0,009	0,009	
5116b	7	0,008	0,009	
5116c	7	0,008	0,009	
5117a	6	0,012	0,012	
5117b	6	0,007	0,007	
5117c	6	0,010	0,011	
5100a	7	0,011	0,013	
5100b	7	0,009	0,011	
5100c	7	0,009	0,010	
5127a	6	0,010	0,014	
5127b	6	0,008	0,011	
5127c	6	0,007	0,010	
5128a	8	0,011	0,018	
5128b	7	0,010	0,016	
5128c	7	0,007	0,012	
5129a	8	0,008	0,014	
5129b	8	0,007	0,011	
5129c	7	0,007	0,011	
5074a	6	0,013	0,030	
5074b	6	0,013	0,029	
5074c	6	0,005	0,013	
136a	7	0,009	0,026	
136b	7	0,007	0,020	
136c	7	0,005	0,015	
keskiarvo	7	0,009	0,015	

Liite 3: Maastotietokoneen näyttämät mittaustiedot

Puistola	1.11.			
	rdop(max.)	hdop(max.)	vdop(max.)	rms
187a	1,3	0,6	1,1	19,7
187b	1,4	0,6	1,2	24,1
7362a	2,4	1,0	2,1	9,8
7362b	2,4	1,0	2,1	11,9
7379a	2,3	1,0	2,1	28,0
7379b	1,6	0,7	1,5	10,7
3532a	1,6	0,7	1,4	27,3
3532b	1,6	0,7	1,4	26,1
3301a	1,9	0,9	1,7	24,4
3301b	1,4	0,7	1,2	17,2
190a	1,9	1,0	1,6	21,3
190b	1,9	1,0	1,6	22,8
7264a	2,2	1,1	2,0	14,5
7264b	2,2	1,1	2,0	23,4
7365a	2,3	1,0	2,0	12,0
7365b	1,6	0,7	1,4	17,4
7366a	2,2	1,0	2,0	18,9
7366b	1,6	0,7	1,4	12,3
7367a	3,3	1,4	3,0	22,4
7367b	2,2	0,9	2,0	18,4
keskiarvo	2,0	0,9	1,7	19,1

	satelliitteja(min.)	vaakatarkkuus(m)	korkeustarkkuus(m)	a=3 havaintoa b=180 havaintoa
187a	9	0,007	0,014	
187b	8	0,007	0,015	
7362a	9	0,005	0,011	
7362b	9	0,005	0,010	
7379a	9	0,006	0,012	
7379b	8	0,007	0,013	
3532a	8	0,008	0,015	
3532b	9	0,005	0,010	
3301a	9	0,009	0,017	
3301b	9	0,008	0,014	
190a	8	0,009	0,015	
190b	8	0,010	0,016	
7264a	9	0,008	0,014	
7264b	9	0,005	0,010	
7365a	10	0,005	0,010	
7365b	10	0,005	0,011	
7366a	10	0,007	0,014	
7366b	9	0,006	0,012	
7367a	8	0,008	0,019	
7367b	9	0,005	0,012	
keskiarvo	9	0,007	0,013	

Liite 3: Maastotietokoneen näyttämät mittaustiedot

Konala / Malminkartano	2.11.	rdop(max.)	hdop(max.)	vdop(max.)	rms
	3191	8	4,3	6,7	23,1
	3205	2,7	1,9	1,9	20,7
	3194	2,9	1,8	2,3	32,3
	3172	1,8	0,8	1,6	14,1
	3123	2,5	1,1	2,2	15,1
	3174	1,7	0,7	1,5	13,2
	3180	1,6	0,8	1,4	12,3
	3072	1,5	0,7	1,4	16,9
	3125	1,4	0,7	1,2	32,1
	1037	1,5	0,7	1,3	24,7
keskiarvo		2,56	1,4	2,2	20,5

	satelliitteja(min.)	vaakatarkkuus(m)	korkeustarkkuus(m)	3 havaintoa / mittaus
3191	6	0,014	0,022	
3205	6	0,013	0,013	
3194	7	0,016	0,020	
3172	8	0,007	0,014	
3123	8	0,014	0,026	
3174	9	0,006	0,012	
3180	8	0,006	0,011	
3072	8	0,006	0,011	
3125	9	0,008	0,014	
1037	10	0,010	0,019	
keskiarvo	8	0,010	0,016	

Liite 3: Maastotietokoneen näyttämät mittaustiedot

Lauttasaari	10.11.				
		rdop(max.)	hdop(max.)	vdop(max.)	rms
	7172	7,5	4,1	6,3	36,8
	7221	6,9	4,3	5,4	62,6
	7222	1,3	0,9	0,9	24,8
	7143	0,9	0,4	0,8	7,9
	7145	6,6	2,5	6,1	15,4
	7053	2,6	1,1	2,3	10,6
	364	2,2	0,8	2,0	20,5
	7057	1,4	0,7	1,2	11,1
	7055	1,6	1,0	1,2	13,9
keskiarvo		3,4	1,8	2,9	22,6

	satelliitteja(min.)	vaakatarkkuus(m)	korkeustarkkuus(m)	
7172	6	0,019	0,028	3
				havaintoa /
				mittaus
7221	7	0,019	0,024	
7222	7	0,012	0,013	
7143	6	0,014	0,024	
7145	6	0,009	0,023	
7053	6	0,008	0,017	
364	7	0,008	0,019	
7057	7	0,006	0,011	
7055	6	0,013	0,016	
keskiarvo	6	0,012	0,019	

Liite 3: Maastotietokoneen näyttämät mittaustiedot

Hernesaari / Eira		13.11.			
		rdop(max.)	hdop(max.)	vdop(max.)	rms
	7215	1,3	0,9	0,9	19,9
	7242	2,2	1,5	1,6	22,6
	7214	1,6	1,1	1,2	14,6
	5022	1,4	0,9	1,0	14,8
	5021	1,6	1,0	1,2	17,8
	127	2,4	1,2	2,0	31,9
	12	2,6	1,0	2,4	13,7
	7110	3,1	1,0	2,9	31,5
	7113	2,9	1,0	2,7	28,6
	7114	2,7	0,9	2,5	14,5
keskiarvo		2,2	1,1	1,8	21,0

	satelliitteja(min.)	vaakatarkkuus(m)	korkeustarkkuus(m)	3
7215	7	0,008	0,009	havaintoa / mittaus
7242	6	0,010	0,011	
7214	6	0,009	0,010	
5022	7	0,007	0,008	
5021	7	0,012	0,016	
127	8	0,014	0,023	
12	7	0,011	0,028	
7110	6	0,009	0,026	
7113	7	0,009	0,026	
7114	7	0,005	0,014	
keskiarvo	7	0,009	0,017	

Liite 4: Euref-Fin verkkotasoitus

**3D Network Adjustment**
www.trimble.com

Copyright (C) 2001 - 2002 by Trimble Navigation Limited.

hkigeo

User Name	Geotrim	Date & Time	12:14:00 30/11/2006
Coordinate System	Finnish National Grid	Zone	KKJ 24 South
Project Datum	KKJ South	Geoid Model	
Coordinate Units	Meter		
Distance Units	Meter		
Height Units	Meter		
Angle Units	Degrees		

Network Adjustment in WGS84.

Number of GPS Baselines	13
Number of Total Station Measurements	0
Number of Control Points in WGS84	3
Number of Adjusted Points	6
Confidence level	1 σ
Significance Level for Tau Test	1.00 %
Standard Error of Unit Weight	0.606
Number of Iterations	1
Refraction Coefficient	0.140

- Observations which were rejected by the statistical test are marked.

Liite 4: Euref-Fin verkkotasointus

1. Baselines Input in WGS84 (Components and Std.Dev.)

Observation	ΔX_m	σ_{mm}	ΔY_m	σ_{mm}	ΔZ_m	σ_{mm}	Solution
Hyvinkaa-3	30876.1901	15.6	23662.3001	17.7	21642.3345	25.9	Double Diff. / Fixed / Lc
Hyvinkaa-364	41133.8649	18.6	19741.1772	20.7	26034.3137	35.5	Double Diff. / Fixed / Lc
Hyvinkaa-Lohja	51368.5202	11.4	24337.0410	10.8	20861.0958	20.8	Double Diff. / Fixed / Lc
Hyvinkaa-Pernaja	11908.3126	9.4	65732.7967	9.6	-9981.2646	16.6	Double Diff. / Fixed / Lc
Hyvinkaa-Vantaa	25412.8896	10.8	20652.4500	10.5	18100.1948	19.2	Double Diff. / Fixed / Lc
Lohja-3	20492.3252	18.3	47999.3451	20.7	-781.2457	30.2	Double Diff. / Fixed / Lc
Lohja-364	10234.6714	23.4	44078.2144	23.6	-5173.2433	52.4	Double Diff. / Fixed / Lc
Pernaja-3	42784.5061	15.5	42070.4926	17.6	11661.0629	25.7	Double Diff. / Fixed / Lc
Pernaja-364	53042.1514	17.7	45991.6324	17.8	16053.0819	37.2	Double Diff. / Fixed / Lc
Vantaa-3	5463.3163	11.9	3009.8487	13.7	-3542.1110	19.7	Double Diff. / Fixed / L1
Vantaa-364	15720.9730	13.3	-911.2730	13.2	-7934.1000	27.9	Double Diff. / Fixed / L1
Vantaa-Lohja	25955.6324	11.7	44989.4933	12.3	-2760.9014	20.7	Double Diff. / Fixed / Lc
Vantaa-Pernaja	37321.2012	10.0	45080.3489	10.6	8118.9354	18.1	Double Diff. / Fixed / Lc

- Standard deviations of the static baselines have been multiplied with the factor 10.00.

2. WGS84 Control Points Input (Cart. Coordinates and Std.Dev.)

Point	X	σ	Y	σ	Z	σ
Hyvinkaa	2845663.1990m	0.0mm	1318103.4810m	0.0mm	5535418.6970m	0.0mm
Lohja	2897031.7140m	0.0mm	1293766.4370m	0.0mm	5514557.5930m	0.0mm
Pernaja	2833754.9030m	0.0mm	1383836.2860m	0.0mm	5525437.4490m	0.0mm

3. Adjusted Baselines in WGS84 (Components and Std.Dev.)

Observation	ΔX	σ	ΔY	σ	ΔZ	σ
Hyvinkaa-3	30876.2008m	4.6mm	23662.3029m	5.3mm	- 21642.3225m	7.7mm
Hyvinkaa-364	41133.8591m	5.3mm	19741.1756m	5.4mm	- 26034.3158m	10.9mm
Hyvinkaa-Lohja	51368.5150m	0.0mm	- 24337.0440m	0.0mm	- 20861.1040m	0.0mm
Hyvinkaa-Pernaja	- 11908.2960m	0.0mm	65732.8050m	0.0mm	-9981.2480m	0.0mm
Hyvinkaa-Vantaa	25412.8899m	3.2mm	20652.4508m	3.4mm	- 18100.1999m	5.7mm
Lohja-3	- 20492.3142m	4.6mm	47999.3469m	5.3mm	-781.2185m	7.7mm
Lohja-364	- 10234.6559m	5.3mm	44078.2196m	5.4mm	-5173.2118m	10.9mm
Pernaja-3	42784.4968m	4.6mm	- 42070.5021m	5.3mm	- 11661.0745m	7.7mm
Pernaja-364	53042.1551m	5.3mm	- 45991.6294m	5.4mm	- 16053.0678m	10.9mm
Vantaa-3	5463.3109m	4.9mm	3009.8520m	5.5mm	-3542.1226m	8.2mm
Vantaa-364	15720.9692m	5.5mm	-911.2752m	5.6mm	-7934.1158m	11.2mm
Vantaa-Lohja	25955.6251m	3.2mm	- 44989.4948m	3.4mm	-2760.9041m	5.7mm
Vantaa-Pernaja	- 37321.1859m	3.2mm	45080.3542m	3.4mm	8118.9519m	5.7mm

Liite 4: Euref-Fin verkkotasoitus

4. Baseline Residuals (Residuals and Standardized Residuals)

Observation	Northing Res.	Stand. Res.	Easting Res.	Stand. Res.	Height Res.	Stand. Res.	Red.No.
Hyvinkaa-3	-3.5mm	-0.317	-2.0mm	-0.236	15.8mm	1.276	2.27
Hyvinkaa-364	4.1mm	0.449	1.0mm	0.087	-4.7mm	-0.250	2.26
Hyvinkaa-Lohja	1.1mm	0.177	-0.5mm	-0.095	-10.0mm	-0.748	3.00
Hyvinkaa-Pernaja	-7.9mm	-1.599	0.5mm	0.114	23.6mm	2.149	3.00
Hyvinkaa-Vantaa	-3.1mm	-0.686	0.6mm	0.137	-4.2mm	-0.374	2.17
Lohja-3	4.2mm	0.318	-3.1mm	-0.303	28.9mm	1.927	2.47
Lohja-364	1.5mm	0.106	-1.9mm	-0.146	35.4mm	1.201	2.60
Pernaja-3	5.0mm	0.467	-4.7mm	-0.565	-16.3mm	-1.332	2.26
Pernaja-364	3.0mm	0.280	1.1mm	0.124	14.6mm	0.752	2.28
Vantaa-3	-2.7mm	-0.376	5.3mm	0.940	-11.8mm	-1.539	1.62
Vantaa-364	-4.1mm	-0.588	-0.4mm	-0.080	-15.9mm	-1.285	1.62
Vantaa-Lohja	5.0mm	0.976	1.7mm	0.297	-6.0mm	-0.488	2.34
Vantaa-Pernaja	-5.8mm	-1.368	-1.7mm	-0.367	22.3mm	2.187	2.12

5. Adjusted Points in WGS84 (Cart. Coordinates and Std.Dev.)

Point	X	σ	Y	σ	Z	σ
3	2876539.3998m	4.6mm	1341765.7839m	5.3mm	5513776.3745m	7.7mm
364	2886797.0581m	5.3mm	1337844.6566m	5.4mm	5509384.3812m	10.9mm
Hyvinkaa	2845663.1990m	0.0mm	1318103.4810m	0.0mm	5535418.6970m	0.0mm
Lohja	2897031.7140m	0.0mm	1293766.4370m	0.0mm	5514557.5930m	0.0mm
Pernaja	2833754.9030m	0.0mm	1383836.2860m	0.0mm	5525437.4490m	0.0mm
Vantaa	2871076.0889m	3.2mm	1338755.9318m	3.4mm	5517318.4971m	5.7mm

6. Adjusted Points in WGS84 (Geogr. Coordinates and Std.Dev.)

Point	Latitude	σ	Longitude	σ	Height	σ
3	N 60° 14' 19.01486"	6.0mm	E 25° 00' 24.34934"	4.7mm	62.9476m	7.1mm
364	N 60° 09' 34.04211"	5.6mm	E 24° 51' 52.87527"	5.1mm	52.8851m	10.9mm
Hyvinkaa	N 60° 37' 51.19660"	0.0mm	E 24° 51' 12.39955"	0.0mm	150.7835m	0.0mm
Lohja	N 60° 15' 07.73880"	0.0mm	E 24° 03' 53.09487"	0.0mm	100.7629m	0.0mm
Pernaja	N 60° 27' 00.71834"	0.0mm	E 26° 01' 41.21144"	0.0mm	59.1971m	0.0mm

Vantaa	N 60° 18' 10.38867"	2.9mm	E 24° 59' 57.11815"	2.9mm	52.6135m	6.1mm
------------------------	------------------------	-------	------------------------	-------	----------	-------

7. Adjusted Points Error Ellipses

Point	Semimajor Axis	Semiminor Axis	Angle	95% confidence radius
3	6.1mm	4.5mm	-18.1°	13.3mm
364	5.8mm	4.9mm	28.1°	13.1mm
Hyvinkää	0.0mm	0.0mm	90.0°	0.0mm
Lohja	0.0mm	0.0mm	90.0°	0.0mm
Pernaja	0.0mm	0.0mm	90.0°	0.0mm
Vantaa	3.0mm	2.9mm	-46.8°	7.2mm