

Tuomas Toivonen, Juho Ylikoski

# Verkko-RTK-mittaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

25.4.2013

Tekijät Otsikko	Tuomas Toivonen, Juho Ylikoski Verkko-RTK-mittaus
Sivumäärä Aika	81 sivua + 8 liitettä 25.4.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaaja	yliopettaja Vesa Rope
<p>Tämän insinööriyön aiheena oli tutkia ja vertailla VRSnet.fi- ja SmartNet verkko-RTK-palveluiden toimivuutta ja tarkkuutta pääasiassa Etelä-Suomen alueella sekä perehtyä satelliittimittausten yleiseen teoriaan ja mittauskäytäntöihin. Työn ensisijaisena tavoitteena oli esitellä tutkittavien verkko-RTK-tekniikoiden välisiä eroja ja vertailla niillä saavutettavaa tarkkuutta eri mittausolosuhteissa. Lisäksi tavoitteena oli mitata eri valmistajien (Trimble, Leica, Topcon) RTK-satelliittivastaanottimilla molemmissa tukiasemaverkoissa ja arvioida niiden tarkkuutta ja toimintaa.</p> <p>Työssä esitellään reaaliaikaisten kinemaattisten mittausten lisäksi satelliittimittauksen eri perusmenetelmät sekä kerrotaan niiden ensisijaiset käyttökohteet. Työssä perehdytään myös nykyisiin ja tulevaisuudessa mahdollisesti käyttöön otettaviin satelliittijärjestelmiin.</p> <p>Insinööriyössä tutkittiin RTK-tukiasemaverkkojen ja laitteiden toimivuutta maastomittauksin avoimissa, vähäpeitteisissä ja peitteisissä ympäristöissä. Mittaukset suoritettiin Geo-deettisen laitoksen mittaamalla 1. luokan kolmiopisteillä, joiden koordinaattiarvoja käytettiin tutkimuksen havaintojen referenssiarvoina, joihin mittaushavaintoja verrattiin. Tutkimusta ei voitu lopulta suorittaa alkuperäisessä muodossaan sille laaditun aikataulun puitteissa. Tästä syystä varsinainen tutkimus on suunniteltua suppeampi.</p> <p>Insinööriyön mittaukset tehtiin lopulta ainoastaan SmartNet-verkossa käyttäen MAX-korjauksia. Maastomittaukset tehtiin Leican sekä Topconin RTK-vastaanottimilla. Tutkimus osoitti, että SmartNetin verkko-RTK-palvelun MAX-korjauksilla päästään normaaleissa mittausolosuhteissa 95 %:n todennäköisyydellä parempiin tuloksiin kuin pohjoiskoordinaatissa 50 mm, itäkoordinaatissa 35 mm ja korkeuskoordinaatissa 83 mm. Keskimääräiset alustusajat ovat noin 15 sekuntia ja 95 % alustuksista on todennäköisesti nopeampia kuin 28 sekuntia. Tuloksissa on kuitenkin hieman laitekohtaisia eroja.</p> <p>Tulokset osoittavat, että SmartNet-tukiasemaverkon MAX-korjaukset ovat oikein käytettynä tehokas ja varsin tarkka mittausmenetelmä.</p>	
Avainsanat	GNSS, verkko-RTK-mittaus, SmartNet

Authors Title	Tuomas Toivonen, Juho Ylikoski Network-RTK Measurement
Number of Pages Date	81 pages + 8 appendices 25 April 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructor	Vesa Rope, Principal Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to examine and compare the functionality and accuracy qualities of VRSnet.fi and SmartNet Network RTK solutions mostly in Southern Finland.</p> <p>The functionality and accuracy qualities of the satellite receivers of Trimble, Leica and Topcon are also analyzed in this project.</p> <p>The final year project considers general methods and applications of satellite surveying.</p> <p>The research was done by conducting field surveys in the area of Southern Finland. The surveys were conducted in different types of surroundings. All the field surveys were made at first class triangulation points, which are set by the Finnish Geodetic Institute. The measured observations were compared to the reference values of these triangulation points.</p> <p>Certain changes had to be made to the plans to complete the project on schedule. The field surveys were made by using SmartNet MAX-corrections and with Leica's and Topcon's satellite receivers only.</p> <p>As a result of the survey, it was shown that the SmartNet service with Max-correction gives better values than 50 mm in Northcoordinate, 35 mm in Eastcoordinate and 83 mm in Height in 95 percent of the measurements. The average time to get fix-solution was 15 seconds. 95 percent of the measurements were faster than 28 seconds.</p> <p>Results show that SmartNet Max-correction is an efficient and quite accurate measuring method.</p>	
Keywords	GNSS, Network-RTK, SmartNet

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Satelliittimittausten teoriaa	2
2.1	Absoluuttinen paikannus	2
2.2	Differentiaalinen GPS (DGPS)	4
2.3	RTK (Real Time Kinematic)	6
2.4	Verkko-RTK	9
2.5	VRSnet.fi	11
2.6	SmartNet	13
3	Mittaustarkkuus ja siihen vaikuttavat tekijät	15
3.1	Satelliittijärjestelmät	15
3.1.1	GNSS (Global Navigation Satellite System)	15
3.1.2	GPS (Global Positioning System)	16
3.1.3	GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)	17
3.1.4	Galileo	18
3.1.5	Beidou	19
3.2	Ilmakehä	20
3.3	Satelliittigeometria	22
3.4	Satelliittien lukumäärä	25
3.5	Satelliittien kello- ja ratavirheet	26
3.6	Vastaanottimesta johtuvat virheet	28
3.7	Datalinkki	28
3.8	Mittauspaikan vaikutukset	29
3.8.1	Mittauspaikan valinta ja vaikutus mittaamiseen	29

3.8.2	Estepiirrokset	31
3.8.3	Monitieheijastukset	32
3.8.4	Sähkömagneettiset häiriöt	34
3.9	Mittaustoiminta ja käyttäjä	35
3.9.1	Havaintojen määrä ja toistot	36
3.9.2	Antennityyppi ja antennikorkeuden mittaus	36
3.9.3	Koordinaattijärjestelmät	37
4	Tutkimusmittaukset	39
4.1	Valmistelut	39
4.1.1	Pisteiden valinta	40
4.1.2	Pisteiden maastoetsinnät ja sopivien pisteiden valinta	42
4.1.3	Pisteiden laatu ja koordinaattijärjestelmä	44
4.1.4	Mitattavuus ja stabiilius	44
4.1.5	Peitteisyys	44
4.1.6	Monitieheijastus	46
4.1.7	Etäisyys tukiasemiin/lähimpään tukiasemaan	46
4.1.8	Tavoitettavuus	48
4.1.9	Havainnot	49
4.2	Mittauskalusto	50
4.3	Käyttökoulutus ja kaluston testaus	52
4.4	SmartNet- ja VRSnet.fi-tukiasemaverkot	52
4.5	Mittausalue	53
5	Tutkimustulokset	53
5.1	Kaavat	54
5.2	Mittaustarkkuus	55
5.3	Karkeat virheet	57
5.4	Tuloksista poistetut korkeushavainnot	60
5.5	Alustusajat	61
5.6	Etäisyys lähimpään tukiasemaan	64

5.7	Satelliittien lukumäärän ja satelliittigeometrian vaikutus tarkkuuteen ja alustusaikoihin	65
5.8	Peitteisyyden vaikutus mittauksiin	69
5.9	Kalustovertailu	71
6	Ongelmat	73
7	Kohdatut haasteet	74
8	Yhteenveto	76
9	Kiitokset	77
	Lähteet	78
	Liitteet	
	Liite 1. Ashtech Web Mission Planning	
	Liite 2. Mittaussuunnitelma 24.10.2012.	
	Liite 3. Mitattava piste	
	Liite 4. Mittaustapa	
	Liite 5. Esimerkki havaintojen taulukoinnista	
	Liite 6. Havaintolomake	
	Liite 7. Karkeat virheet	
	Liite 8. Tuloksista poistetut korkeushavainnot	

## Lyhenteet

DGPS	<i>Differential GPS</i> . Differentiaalinen GPS.
ETRF	<i>European Terrestrial Reference Frame</i> . ETRS-järjestelmän realisaatio.
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i> , Euraasian mannerlaattaan kiinnitetty koordinaattijärjestelmä. Kiinnitetty ITRS-järjestelmään epookissa 1989.0.
EUREF-FIN	ETRS89-järjestelmän kansallinen (suomalainen) realisaatio.
FIX-ratkaisu	FIX-ratkaisulla tarkoitetaan tarkkaa alkutuntemattomien ratkaisua, jossa alkutuntemattomat on ratkaistu kokonaisluvuiksi. Fix-ratkaisussa mittaus-tarkkuus on senttimetriluokkaa.
FLOAT-ratkaisu	Likimääräinen alkutuntemattomien ratkaisu, jossa alkutuntemattomat jätetään reaalityluvuiksi. FLOAT-tilassa mitattaessa pisteen koordinaatit saattavat poiketa useita metrejä oikeista.
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> . Maailmanlaajuisesti toimiva siviilikäyttöön suunniteltu satelliittijärjestelmä.
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> . GSM-verkossa toimiva pakettikytkentäinen tiedonsiirtopalvelu.
Inklinaatiokulma	Kulma jossa satelliitin rata leikkaa päiväntasaajan tason.
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i> . Kansainvälinen maakeskinen koordinaatisto. ITR-järjestelmän realisaatio.
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i> . Globaali 3D-koordinaattijärjestelmä, jonka perussuuret ovat GRS80-järjestelmän mu-

kaisia ja koordinaatiston orientointi on BIH:n (Bureau International de l'Heure) vuoden 1984.0 orientoinnin mukainen. Pisteille on määritelty suorakulmaiset avaruuskoordinaatit ja niiden vuotuinen liike.

- PDOP *Position Dilution of Precision*. Paikannuksen taso- ja korkeustarkkuuden yhdistetty epävarmuus.
- RMS *Root Mean Square*. Neliöllinen keskiarvo on yksi lukujoukkoa tai jakaumaa kuvaavista matemaattisista keskiluvuista.
- RTCM *Radio Technical Commission for Maritime Services*. Vuonna 1947 perustettu itsenäinen organisaatio. Määrittää muun muassa tukiasemien lähettämän havaintodatan sisällön.
- RTK *Real Time Kinematic*. Satelliittimittausmenetelmä, jossa käytetään vähintään kahta satelliittivastaanotinta, joista toinen sijaitsee tunnetulla pisteellä ja toisella kartoitetaan halutut kohteet reaaliajassa.

#### Satelliittigeometria

Satelliittien keskinäinen sijainti taivaalla. Satelliittigeometrian mittarina käytetään DOP-lukuja. Mitä pienempi luku on, sitä parempi on myös satelliittigeometria.

#### Satelliittikonstellaatio

Satelliittien keskinäiset asemat avaruudessa. Ne satelliitit, joita vastaanotin käyttää sijaintinsa laskemiseen tietyllä hetkellä. Konstellaation geometria vaikuttaa paikannuksen tarkkuuteen.

- TEC *Total Electron Content*. Ionosfäärin elektronipitoisuus.

- Trilateraatio GPS-vastaanotin määrittelee sijaintinsa trilateraation avulla ajoittamalla satelliittijärjestelmän kolmesta satelliitista tulevat signaalit. Trilateraatioissa lasketaan kolmen ympyrän leikkauspiste, jolloin saadaan selville vastaanottimen sijainti.

- UMTS *Universal Mobile Telecommunications System*. Kolmannen sukupolven (3G) matkapuhelinteknologia. Mahdollistaa nopean tiedonsiirron.



- VRS™ *Virtual Reference Station*. Virtuaalinen tukiasema.
- WGS84 *World Geodetic System 1984*. GPS-satelliittien käyttämä koordinaattijärjestelmä ja koordinaatisto. WGS84 on Yhdysvaltain puolustushallinnon karttalaitoksen määrittelemä järjestelmä.

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on tutkia ja vertailla VRSnet.fi- ja SmartNet- verkko-RTK-palveluiden ja niiden käyttämien menetelmien ja verkkoratkaisujen toimivuutta sekä tarkkuutta Etelä-Suomen alueella. Tämän lisäksi tarkoituksena on vertailla, miten eri laitevalmistajien verkko-RTK-vastaanottimet suoriutuvat erilaisista mittaustilanteista ja minkälaisiin mittaustarkkuuksiin päästään niitä käyttämällä. Aihetta käsitellään käytännönläheisesti, jotta tutkimus palvelee mahdollisimman hyvin käytännön maastomittauksia.

Geotrim Oy:n VRSnet.fi-palvelu on ollut käytössä Suomessa jo yli 10 vuotta. Järjestelmää on tutkittu jo muutamissa tutkimuksissa, ja se on todettu oikein käytettynä tehokkaaksi ja tarkaksi menetelmäksi. Syksyllä 2012 julkaistiin Leica Geosystems Oy:n oma versio RTK-tukiasemaverkkoratkaisusta, SmartNet-palvelu. Koska SmartNet-palvelua ei ole laajemmin tutkittu eikä vertailua eri tavalla toteutettujen verkko-RTK-ratkaisujen välillä ole Suomessa aiemmin tehty, on tälle tutkimukselle selvä tilaus. Aihetta tutkitaan tässä insinööriyössä vain reaaliaikaisten kinemaattisten (RTK) mittausten lähtökohdistta. Molempien palveluiden tuottamia muita osia, kuten DGPS-korjausta tai jälkilaskentapalvelua ei tutkittu.

Tämän tutkimuksen ensimmäisessä osiossa keskitytään satelliittimittausten teoriaan, käsitellään erilaisia satelliittimittauksen tekniikoita ja perehdytään käytettyihin satelliittijärjestelmiin. Tämän jälkeen keskitytään satelliittimittauksissa ja erityisesti verkko-RTK-mittauksissa huomioon otettaviin asioihin, jotka vaikuttavat mittaustarkkuuteen. Useat tutkimuksessa esitetyt asiat pätevät kaikkiin satelliittimittauksiin, mutta niistä ei voi laatia täydellistä satelliittimittausten ohjeistusta, sillä jokainen mittaustilanne, olosuhde ja ajankohta on aina erilainen.

Tutkimuksen loppupuolella käsitellään suoritettuja mittauksia alkaen pisteiden valinnasta ja päättyen käytettyihin mittauserneisiin. Insinööriyön päätösosassa esitellään tutkimuksella saavutetut tulokset ja niistä laaditut johtopäätökset. Lopuksi käsitellään tutkimuksen suorittamisessa ilmenneitä ongelmia ja pyritään etsimään niille ratkaisuja.

## 2 Satelliittimittausten teoriaa

Satelliittipaikannuksessa kohteen sijainti saadaan selville mittaamalla etäisyydet vastaanottimesta maata kiertäviin satelliitteihin. Kun etäisyydet tunnetaan, voidaan vastaanottimen sijainti laskea kolmiomittauksen eli trilateraation avulla. Jotta tarkka sijainti saadaan selville, tarvitaan sekä satelliittien sijainnit (ratatiedot) että kellotiedot. [1, s. 298.]

Satelliitin ja vastaanottimen välisen etäisyyden määrittäminen on mahdollista kahdella eri menetelmällä (koodihavainnot ja vaihehavainnot). Näihin menetelmiin perustuvia mittaustapoja on useita. Yksinkertaisinta, mutta myös epätarkinta mittaustapaa kutsutaan absoluuttiseksi paikannukseksi. Siinä käytetään apuna satelliitin signaalin mukana kulkevaa koodia, jonka avulla lasketaan signaalin kulkuaika ja siten satelliitin ja vastaanottimen välinen etäisyys. Tällä tavoin voidaan saavuttaa parhaimmillaan muutamien metrin paikannustarkkuus. [1, s. 300.]

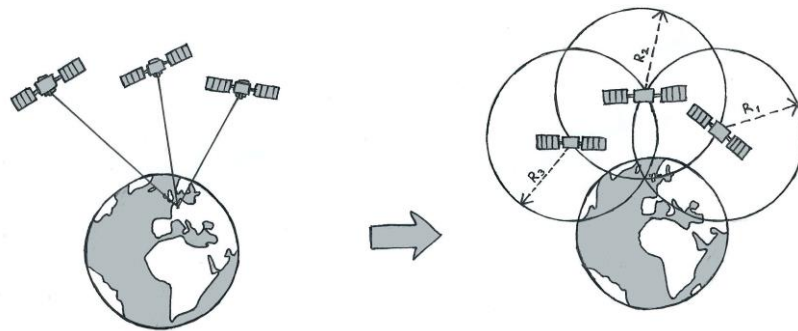
Pyrittäessä koodihavainnoilla absoluuttista paikannusta tarkempaan paikannukseen voidaan käyttää differentiaalista paikannusta (DGPS). Tällöin tietyt mittauksen systemaattiset virheet on mahdollista poistaa käyttämällä kahta vastaanotinta, joista toinen sijaitsee tunnetulla pisteellä. Tämä tukiasemavastaanotin lähettää liikkuvalla vastaanottimelle korjausdataa radiolinkin välityksellä, joka parantaa paikannustarkkuutta verrattuna absoluuttiseen paikannukseen. [1, s. 301.]

Tarkimpaan paikannustarkkuuteen päästään käyttämällä satelliitin kantoaallon mittamiseen (vaihehavainnot) perustuvaa paikannusmenetelmää, jota kutsutaan suhteelliseksi mittaukseksi. Suhteellisessa mittauksessa paikannukseen käytetään satelliittisignaalin kantoaaltoa ja kahta samanaikaisesti toimivaa käyttäjän havaintolaitetta, joista toinen sijaitsee usein tunnetulla pisteellä. Menetelmällä päästään parhaimmillaan alle senttimetrin tarkkuuksiin. [1, s. 301.]

### 2.1 Absoluuttinen paikannus

Suurin osa satelliittipaikannuksen käyttäjistä saa sijaintitietonsa absoluuttista paikannusta hyödyntämällä. Tarkkuutensa puolesta absoluuttista paikannusta voi käyttää harrastekäytössä ja monissa navigoinnin sovelluksissa. [1, s. 302.]

Vastaanottimen paikan määrittäminen absoluuttisessa paikannuksessa perustuu satelliittisignaalin mukana kulkevan koodin käyttöön (C/A-koodi). Absoluuttisessa mittaustavassa havaintajan sijainti lasketaan suoraan satelliittien suhteen. Sijainti on satelliittien ja etäisyyksien määrittämien pallopintojen leikkauskohdassa (kuva 1). Jotta tarkka sijainti voidaan määrittää, tarvitaan etäisyydet vähintään kolmeen satelliittiin. Ensimmäinen etäisyydenmittaus rajoittaa paikan pallon pinnalle, jonka keskipisteessä on satelliitti ja säteenä mitattu etäisyys. Toinen mittaus rajoittaa paikan ympyrän kaarelle, sillä kahden pallon leikkauskäyrä on ympyrä. Kolmannella mittauksella paikka saadaan rajattua kahteen pisteeseen, koska pallo voi leikata ympyrän vain kahdessa pisteessä. Vaikka tällöin mahdollisia paikan ratkaisuja onkin kaksi, on oikea ratkaisu mahdollista valita, koska haettu ratkaisu on yleensä maapallon pinnalla. Toinen ratkaisukohta nimittäin sijaitsee avaruudessa, ja sen sijainti muuttuu suurella nopeudella satelliittien rataliikkeen mukana. [1, s. 302.]



Kuva 1. Absoluuttisen paikannuksen periaate. (Kuva Tuomas Toivonen.)

Vastaanottimen kellovirheen korjaamiseen tarvitaan kuitenkin havainnot vähintään neljään satelliittiin, jolloin saavutetaan yleensä alle 20 metrin paikannustarkkuus. Etäisyyden mittaus C/A-koodin avulla perustuu tarkkaan ajanmittaukseen. Tästä syystä satelliiteissa on varmuuden vuoksi useampi kuin yksi kello. Yleensä kelloja on kahdesta kolmeen. Kellot ovat atomikelloja ja stabiloituja kvartsikelloja. Kellojen kellovirheitä seurataan jatkuvasti valvonta-aseilla ja kellojen käyntivirheet välitetään käyttäjille paikannussignaalin avulla. Vastaanottimien kvartsikellot eivät ole tarkkuudeltaan yhtä tarkkoja satelliittien kelloihin verrattuna. Kuitenkin vastaanottimen kellojen käyntivirhe on mahdollista määrittää yksinkertaisesti mittaustekniikan avulla mittaamalla etäisyys vähintään neljään satelliittiin, jolloin kellovirhe vaikuttaa kaikkiin mittauksiin yhtä paljon. Täl-

löin kyseessä on systemaattinen virhe, joka on yksinkertaista ratkaista havaintoyhtälöistä. [1, s. 303–305.]

Absoluuttiseen paikannukseen liittyy useita virhelähteitä, mutta se on moneen käyttöön silti erinomainen nopeutensa ja yksinkertaisuutensa ansiosta. Koordinaattitarkkuus käytettäessä absoluuttista paikannusta on parhaimmillaan muutamien metrien luokkaa ja usein paljon heikompi. [1, s. 299–306.]

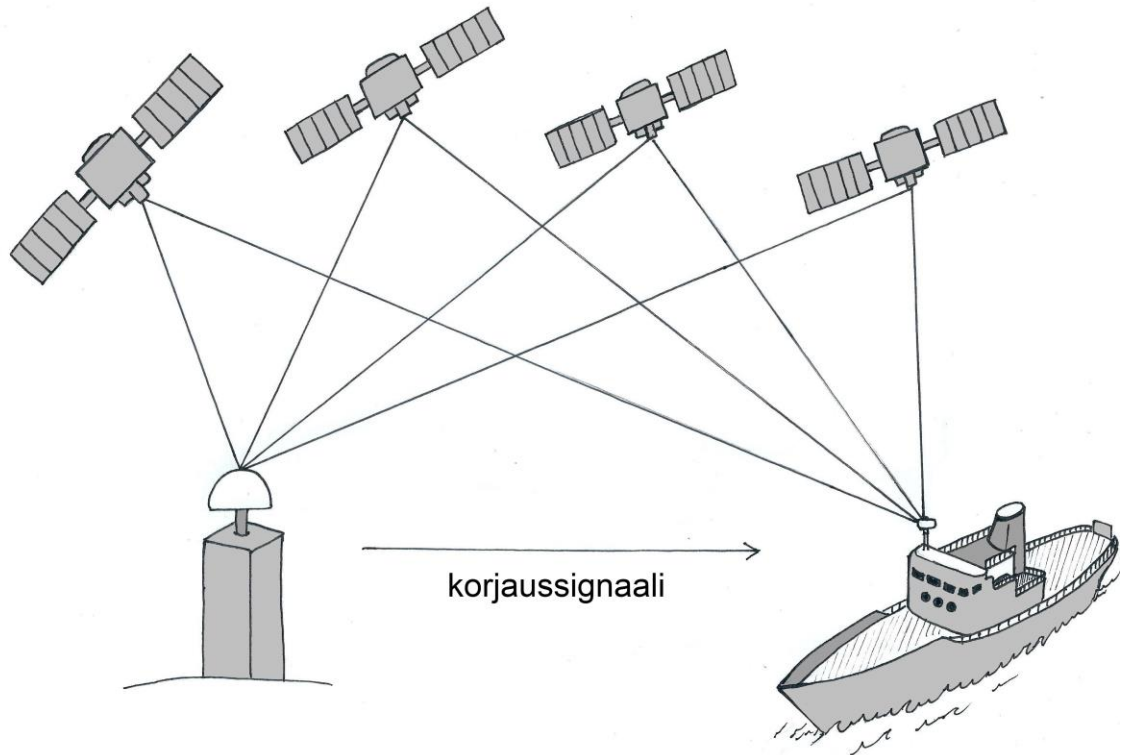
## 2.2 Differentiaalinen GPS (DGPS)

Differentiaalinen GPS perustuu satelliittisignaalin koodin (C/A-koodi) havaitsemiseen, tarkoituksena mitata satelliittisignaalin kulkuaikaa. Lisäksi paikannuksessa käytetään tukiasemien laskemia korjauksia. Tukiasema tietää omat tunnetut koordinaattinsa (mitattu aikaisemmin käyttämällä staattisia GNSS-mittauksia) sekä tunnettujen satelliittien tarkat sijainnit ja oman etäisyytensä jokaiselle ajanhetkelle (saadaan satelliittien lähettämistä ratatiedoista sekä rataennusteista). Tukiasema laskee sekä tunnetun että havaitsemansa etäisyyden avulla (mitatun ja lasketun etäisyyden erotus) jokaiselle satelliitille korjauksen, jonka se lähettää tämän jälkeen liikkuvalla yksikölle eli paikantimelle. [2, s. 10.]

Saatuun korjaukset liikkuva DGPS-vastaanotin lisää korjaukset omiin, havaitsemiinsa etäisyyksiin ja saa näin korjatut etäisyydet. Toinen vaihtoehto on, että tukiasema laskee korjaukset vain omaan sijaintiinsa ja lähettää ne tämän jälkeen liikkuvalla DGPS-vastaanottimelle. Kuitenkin kuvatussa tilanteessa myös liikkuvalla vastaanottimella on oltava samat satelliitit seurannassa, kuin mitä tukiasemalla, jotta korjaus olisi käyttökelpoinen. Tavallisesti ensimmäistä tapaa käytetään reaaliaikaisissa sovelluksissa ja jälkimmäinen palvelee lähinnä jälkilaskenta-DGPS:ssä. [2, s. 10.] Differentiaalisen paikannuksen periaate on esitetty kuvassa 2.

Tilanteessa, jossa liikkuvan vastaanottimen sekä tukiaseman paikkoihin vaikuttavat hyvin samankaltaiset virheet (yhteiset virheet), kumoutuvat liikkuvan vastaanottimen virheet korjauksilla lähes kokonaan. Koska suurimmat paikannukseen vaikuttavat virheet, kuten satelliittien ratavirheet sekä ionosfäärivirheet, vaikuttavat hyvin samankaltaisesti vielä pitkänkin etäisyyden päässä, voi liikkuvan vastaanottimen etäisyys tukiasemaan olla useita satoja kilometrejä paikannustarkkuuden siitä oleellisesti heiken-

tymättä. Näin ollen harvallakin tukiasemaverkko ratkaisulla voidaan kattaa hyvin laajoja alueita. [2, s. 10.]



Kuva 2. Differentiaalisen paikannuksen (DGPS) periaate. Tukiasema laskee tunnetun sijaintinsa ja satelliittien sijainnin perusteella korjaukset, jotka se lähettää liikkuvalla yksikölle, joka lisää ne omiin havaintoihinsa. (Kuva Tuomas Toivonen.)

DGPS:ssä korjaukset on tapana lähettää radiolinkin kautta liikkuvalla yksikölle [2, s. 10]. Korjausten avulla paikannustarkkuus on liikkuvalla yksiköllä metriluokkaa (0,5–5 m) ja näin oleellisesti parempi kuin esimerkiksi absoluuttisessa paikannuksessa, jossa tarkkuudet ovat yleisesti heikommat (alle 10 m:n tarkkuus). [3.]

Saatavan korjauksen laatuun vaikuttaa kuitenkin sekä tukiaseman etäisyys vastaanotimesta että korjauksen viive, jotka molemmat kasvaessaan heikentävät korjauksen laatua ja luotettavuutta. Tukiaseman ja vastaanottimen välisen etäisyyden kasvaessa tukiaseman lähettämän korjauksen laatu heikkenee ilmakehäolosuhteiden muuttuessa erilaisiksi siirryttäessä kauemmas tukiasemasta (ilmakehäolosuhteet eivät ole enää samat tukiasema- sekä vastaanotin-päässä). Vastaavasti korjauksen viiveen vaikutus tulee esiin korjaustiedon vanhetessa. Viivettä voi aiheutua tukiaseman prosessoinnista, korjausten laskemisesta sekä korjauksen välityksestä ja päivitystiheydestä. Vanhentu-

neen korjauksen (korjaussignaali on suuri viive tai sen päivitysnopeus on hidas) laatu on heikentynyt ja siten epäluotettavampi, koska olosuhteet muuttuvat eikä korjaustieto vastaa täysin sitä ajanhetkeä tai olosuhdetta, jolloin se on laskettu. [2, s. 11.]

Suomessa differentiaalikorjausta tarjoavat useat organisaatiot, kuten Merenkululaitos (radionavigointi), Indagon Oy (@-Focus-palvelu), Geotrim Oy (VRS DGPS/DGNSS). DGPS-palveluja käytetään erityisesti paikkatiedon keruun mittauksiin, sekä merenkulun tarkoituksiin [2, s. 11]. Se on kuitenkin tärkeä myös monille muille ammattiryhmille, esimerkiksi metsätaloudessa monitoimikoneiden, kuormatraktoreiden ja puutavara-autojen kuljettajille, joiden kulunohjauksessa siitä on tullut tärkeä työkalu [4, s. 55]. C/A-koodihavaintojen avulla ei saavuteta aivan yhtä hyvää tarkkuutta kuin käyttämällä vaihehavaintoja. Kuitenkin useisiin GIS-sovelluksiin (paikkatiedon keruu) ja auto- ja laivaliikenteeseen tämäkin tarkkuus on täysin riittävä [1, s. 308]. Etuna koodihavainnoissa suhteessa vaihehavaintoihin on yksinkertaisuus, koska käytettäessä koodihavaintoja kantoaallon kokonaisaallonpituuksia ei ratkaista, vaan mitataan ainoastaan signaalin kulku-aika. Tästä syystä koodihavainnot ovat erityisesti eduksi katveisilla alueilla. [2, s. 11.]

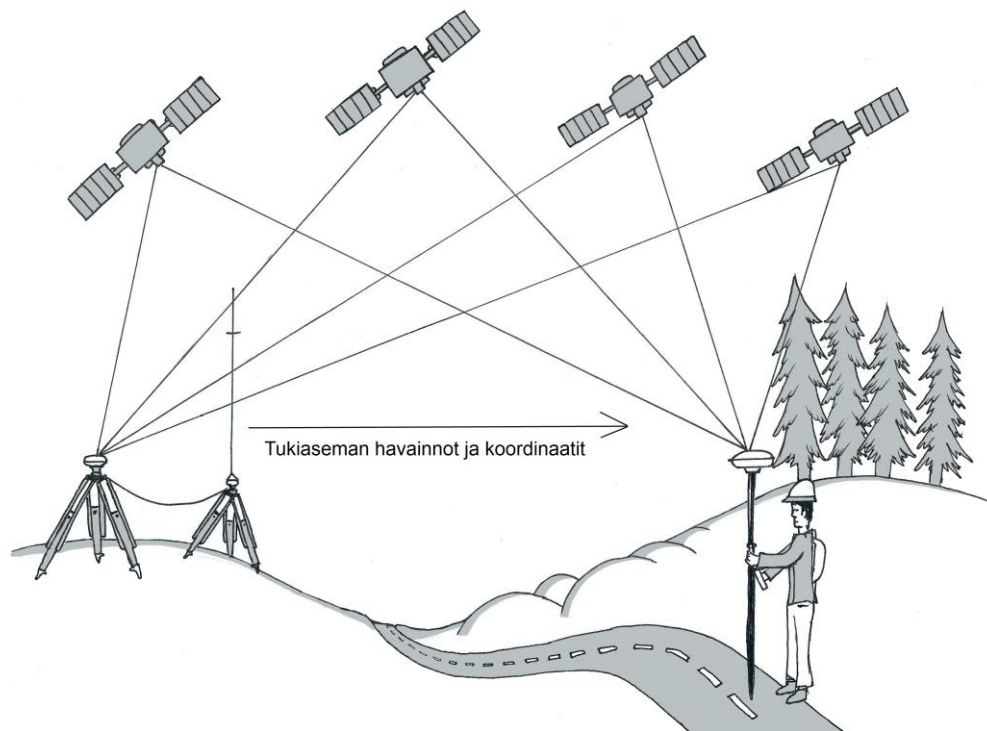
### 2.3 RTK (Real Time Kinematic)

Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus, eli RTK-mittaus on yleisesti käytetty perusmenetelmä satelliittimittauksissa. Tarkkuutensa puolesta se sopii erinomaisesti kartoitus- ja maastomallimittauksiin, joiden lisäksi sitä käytetään yleisesti myös merkintämittauksissa [1, s. 322]. RTK-mittauksessa hyödynnetään satelliittisignaalin vaihehavaintoja. Tämä tarkoittaa sitä, että havaintosuurena käytetään kantoaallon vaiheen mittaamista. Menetelmässä ratkaistaan havaintojakson alkuhetkellä antennin ja satelliitin väliin jäävät kokonaiset kantoaallon aallonpituudet, joita kutsutaan alkutuntemattomiksi. Nämä ratkaistaan RTK-mittauksissa niin sanotusti lennosta, eli on-the-fly (OTF) -menetelmällä. Tällä tavoin saavutetaan senttimetriluokan paikannustarkkuus. [2, s. 11.]

RTK-mittauksessa käytetään tunnetulla pisteellä sijaitsevaa vertailuvastaanotinta, jota kutsutaan tukiasemaksi. Tämä vastaanotin lähettää omat, mittaamansa vaihehavainnot liikkuvalla vastaanottimelle [1, s. 322]. Liikkuva vastaanotin yhdistää saadut havainnot omiin havaintoihinsa erotushavainnoiksi. Erotushavainnoilla (tukiaseman ja liikkuvan

vastaanottimen havaintojen välinen erotus), voidaan pienentää tai eliminoida useita satelliittimittauksiin liittyviä virhelähteitä. Tällaisia virheitä ovat satelliittien rata- ja kellovirheet, vastaanottimien kellovirheet sekä ilmakehän aiheuttamat virheet. Mittausten tavoitteena on ratkaista tukiaseman ja liikkuvan vastaanottimen välinen vektori. Vektori ratkaistaan kuten perinteisissä staattisissa mittauksissakin, kuitenkin erona on, että ratkaisu tehdään reaaliajassa, eikä jälkilaskentana. [2, s. 11.] Reaaliaikaisen mittauksen periaate on esitetty kuvassa 3.

Kun alkutuntemattomat on ratkaistu kokonaisluvuiksi (tätä kutsutaan FIX-ratkaisuksi), saavutetaan oleellisesti parempi tarkkuus kuin differentiaalisissa mittauksissa. Kuitenkin, jos FIX-ratkaisussa mukana oleva, niin sanottu ratkaisuun lukittu satelliitti katoaa näkyvistä tai vaihtoehtoisesti uusi satelliitti tulee näkyviin, tulee ratkaisuun uusi alkutuntematon, joka vastaanottimen on ratkaistava [2, s. 11]. Mittausalue RTK-menetelmää käytettäessä on yleensä ilmakehätekijöistä johtuen noin 10–30 kilometrin säteellä tukiasemasta, kuitenkin yli 20 km:n etäisyydet tukiasemasta ovat jo harvinaisia. [2, s. 11; 1, s. 323.]



Kuva 3. Reaaliaikaisen kinemaattisen mittauksen periaatekuva. Tukiasema lähettää havaintonsa ja koordinaattinsa liikkuvalla vastaanottimelle, joka ratkaisee lennossa alkutuntemattomat kokonaisluvuiksi, sekä tukiaseman ja vastaanottimen välisen vektorin. (Kuva Tuomas Toivonen.)



RTK-data lähetetään liikkuvalla vastaanottimella radiomodeemilla tai GSM-puhelimen välityksellä. Riippuen maastosta toimintasäde radiomodeemilla on muutamia kilometrejä, kuitenkin enintään kymmenen [1, s. 323]. GSM-yhteyttä käytettäessä välimatkan pituudella ei ole merkitystä, vaan ainoastaan mittausmenetelmä asettaa käytön rajoitukset. GSM-yhteyden haittapuolena ovat kuitenkin käytöstä syntyvät tietoliikennekustannukset sekä normaaleja GSM-modeemeja käytettäessä mahdollisuus vain yhden käyttäjän samanaikaisiin mittauksiin. [2, s. 11.]

RTK-data ei sisällä korjauksia samoin kuin esimerkiksi differentiaalinen GPS, vaan se sisältää tukiaseman suorittamat havainnot ja koordinaatit. Radioteitse lähetetyn datan etuina GSM:n välityksellä lähetettyyn dataan ovat sen käytön ilmaisuus sekä mahdollisuus useiden käyttäjien yhtäaikaisiin mittauksiin. Luonnollisesti haittana ovat signaalin heikko kantavuus sekä alttius maaston pinnanmuodoille. [2, s. 11.]

RTK-mittaus on vaativa mittautapa sekä laskennan että tiedonsiirtonsa suhteen, koska vastaanottimen pitää ratkaista alkutuntemattomat lennosta. Kuitenkin nykytekniikka mahdollistaa vain alle minuutin havainnot, joilla alkutuntemattomat voidaan ratkaista. Välimatkan kasvaessa liikkuvan vastaanottimen sekä tukiaseman välillä, kasvaa myös alustukseen eli alkutuntemattomien ratkaisuun käytetty aika. Myös satelliittien lukumäärä on kriittinen tekijä RTK-mittauksissa, sillä sekä tukiasemalla että vastaanottimella tulisi olla vähintään viisi satelliittia seurannassa ja näiden tulisi lisäksi olla yhteisiä. Kuitenkin vasta 6–7 yhteistä satelliittia takaa riittävän mittauksen luotettavuuden.

Käytännön kokemukset ovat myös osoittaneet, että usein 10 kilometrin etäisyys tukiasemasta on maksimietäisyys mittauksen suorittamiselle. Tämän toimintarajan määrittävät ionosfäärin häiriöt, joiden osuus mittaustarkkuuteen lisääntyy etäisyyden kasvaessa. RTK-menetelmä on myös varsin herkkä maaston peitteisyydelle, joten puustosta, rakennuksista tai muista kohteista syntyvät näkemäesteet tai monitieheijastukset saattavat haitata mittauksia. [1, s. 323.]

## 2.4 Verkko-RTK

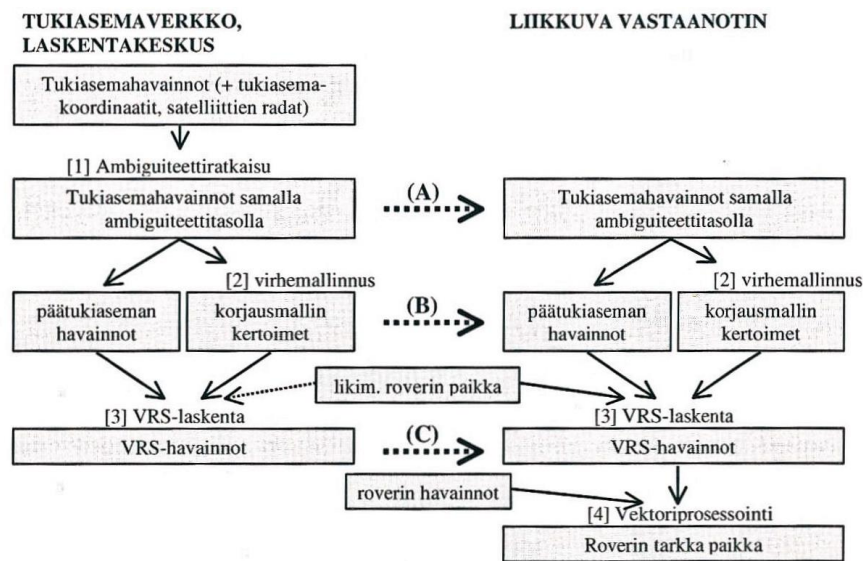
Käytettäessä reaaliaikaista kinemaattista mittausta mittausalue on varsin rajattu tukiaseman ympäristössä johtuen ionosfäärissä syntyvistä virheistä ja häiriöistä. Onkin tavallista, että jo mainittu 10 kilometrin etäisyys tukiasemasta on liian suuri mittausten suorittamiseksi. Etäisyyden kasvaessa tukiasemasta tätä suuremmaksi, ionosfääriin liittyvät virheet alkavat olla samaa suuruusluokkaa kuin paikannussignaalin kantoaallon pituus, jolloin kokonaisten aallonpituuksien eli alkutuntemattomien ratkaisussa ei voida saavuttaa riittävää luotettavuutta. Kahdenkymmenen kilometrin päässä tukiasemasta mittaukset onnistuvat vain aivan poikkeuksellisen hyvissä olosuhteissa. [1, s. 323.]

1990-luvun lopusta alkaen onkin alettu kehittää RTK-mittaamiseen uusia menetelmiä, joilla perinteisen RTK-mittauksen puutteista on pyritty pääsemään eroon. Yksi tällaisista menetelmistä on linkittää monta tukiasemaa yhdeksi yhtenäiseksi tukiasemien verkoksi. Tukiasemaverkossa yksittäiset tukiasemat ovat osa kokonaista verkkoa ja niiden avulla lasketaan verkkoratkaisu. Käytettäessä tällaista tukiasemien verkostoa käytetään siitä nimitystä verkko-RTK-menetelmä (Network RTK) [2, s. 12]. Tällainen tukiasemien verkosto mahdollistaa ilmakehän virheiden paremman mallintamisen kuin perinteisissä RTK-mittauksissa, jolloin ionosfääriin ja troposfääriin liittyvät virheet voidaan paremmin korjata. [1, s. 323.]

Verkkoratkaisun avulla mittausalue voi olla huomattavasti suurempi perinteisiin RTK-mittauksiin verrattuna. Käytännössä mittaajan ei verkko-RTK:ta käyttäessään tarvitse enää huolehtia etäisyyden kasvamisesta tukiasemaan liian suureksi, koska tukiasemia on kattavassa verkossa joka puolella. Lisäksi mittaajan tarvitsee investoida vain liikkuvan vastaanottimen hankintaan, mikä tarkoittaa merkittävää kustannussäästöä, kun omaa tukiasemaa ei tarvita. Kustannussäästöä voidaan katsoa syntyvän myös tehokkuuden kasvamisena, sillä mittaajan ei tarvitse enää käydä pystyttämässä tukiasemaa ennen jokaista mittausta [2, s. 12]. Toisaalta verkko-RTK:n käyttölisenssit ovat usein varsin hintavia, joten järjestelmän käytöstä kertyy kustannuksia selvästi enemmän kuin perinteisissä RTK-mittauksissa. [5.]

Verkko-RTK:n kaaviokuvassa esitellään (kuva 4) VRS-menetelmän (yksi yleisimmin käytetyistä tukiasemaratkaisuista) pääperiaatteet. Verkko-RTK-menetelmä on mahdollista jakaa kolmeen vaiheeseen (vaiheet on selostettu pääpiirteittäin):

1. verkkoratkaisu tukiasemaverkolle
2. korjausmallin kertoimien määrittäminen
3. korjausdatan käyttö



Kuva 4. Verkko-RTK:n kaaviokuva [2].

Ensimmäisessä vaiheessa ratkaistaan tukiasemaverkon alkutuntemattomat. Lopullisessa verkkoratkaisussa voidaan käyttää ainoastaan niitä alkutuntemattomia, jotka on ratkaistu kokonaisluvuiksi (kutsutaan FIX-ratkaisuksi). Toisessa vaiheessa mallinnetaan verkkoratkaisun perusteella eri virhetekijät verkon alueella. Virhetekijät jaetaan dispersiivisiin (ionosfääristä johtuviin) ja ei-dispersiivisiin (troposfääristä ja kiertoradoista johtuviin) virheisiin niiden erilaisten ominaisuuksien mukaan. Ionosfääristä johtuvat virheet on päivitettävä huomattavasti useammin, koska ionosfäärin olosuhteiden muutokset tapahtuvat paljon nopeammin verrattuna troposfääristä tai satelliittien radoista aiheutuviin virheisiin. Kolmannessa vaiheessa mallinnettujen korjauskertoimien, päätukiaseman havaintojen ja liikkuvan vastaanottimen likimääräisen sijainnin avulla muodostetaan virtuaalidataa. Tämän jälkeen liikkuva vastaanotin ratkaisee oman tarkan paikkansa käyttäen virtuaalidataa tukiasemahavaintoina. [2, s. 12; 6.]

Erilaisia verkko-RTK-menetelmiä on tähän mennessä esitetty muutamia. Tällaisia menetelmiä ovat mm. Calgaryn yliopistossa kehitetty *Multiref<sup>TM</sup>*, saksalaisen Geo++:n *GNSMART*, Trimble Navigation Ltd.:n virtuaalitukiasemakonsepti *VRS<sup>TM</sup>* sekä Leican ja Geo++:n MAC. Suomessa kaupallisia verkko-RTK-palveluja tarjoavat Geotrim Oy (*VRSnet.fi*) ja Leica Geosystems Oy (*SmartNet*). [2, s. 13.]

## 2.5 VRSnet.fi

Geotrim Oy:n ylläpitämä Trimblen *VRSnet.fi*-tukiasemaverkko valmistui koko maan kattavaksi vuonna 2005. Yli sata GNSS-tukiasemaa on yhdistetty tietoliikenneyhteyksillä Vantaalla sijaitsevaan laskentakeskukseen. Nämä yhdessä muodostavat tukiasemaverkon. Laskentakeskus kokoaa tukiasemien datat, tarkistaa niiden laadun, mallintaa tukiasemaverkon verkon alueelle GNSS-virheiden vaikutukset ja muodostaa liikkuvalla vastaanottimelle virtuaalista GNSS-dataa. Liikkuva vastaanotin on yhteydessä laskentakeskukseen GPRS- tai UMTS-yhteydellä. [7.]

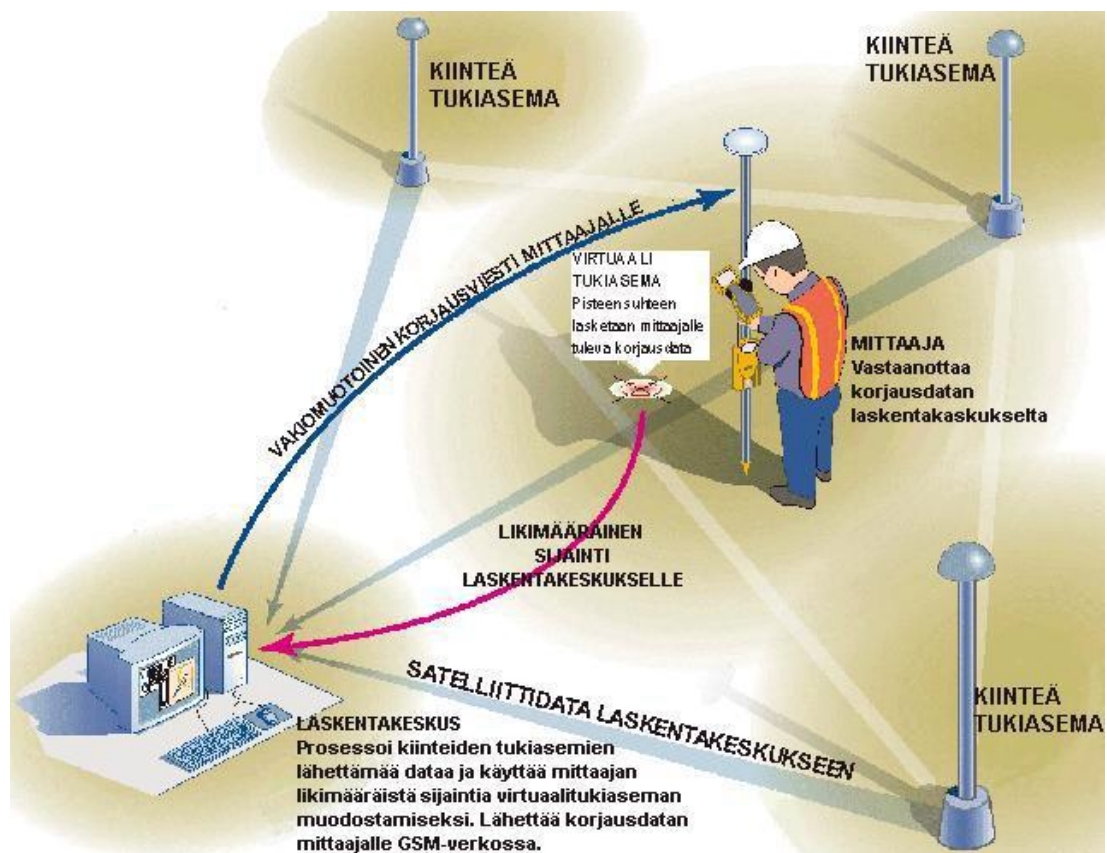
*VRSnet.fi*:ssä liikkuvan lähelle generoidaan pysyvän tukiasemaverkon avulla virtuaalitukiasema, jonka suhteen käyttäjä laskee oman paikkansa. Laskentakeskus generoi virtuaaliselle tukiasemalle pysyvän tukiasemaverkon avulla virtuaalista dataa. Virtuaalinen data lähetetään liikkuvalla kuten RTK-mittauksissakin esimerkiksi RTCM- (Radio Technical Commission for Maritime Services) tai CMR/CMR+ (Compact Measurement Record) -formaateissa GPRS- tai UMTS-tekniikalla. [8.]

*VRSnet.fi*-palvelu toimii pääpiirteissään seuraavasti (kuva 5).

1. Kiinteät tukiasemat vastaanottavat satelliittien lähettämää havaintodataa ja lähettävät sitä laskentakeskukselle.
2. Liikkuva vastaanotin/mittaaja lähettää likimääräisen sijaintinsa laskentakeskukselle.
3. Laskentakeskus prosessoi kiinteiden tukiasemien lähettämän datan ja käyttää liikkuvan vastaanottimen likimääräistä sijaintia virtuaalitukiaseman muodostamiseksi.

4. Tukiasema muodostaa virtuaalitukiaseman (mittaajan lähelle) ja lähettää korjausdatan mittaajalle datayhteyden välityksellä. [8; 1, s. 324.]

Virtuaalitukiasema on kuvitteellinen tukiasemapiste, joka lasketaan erikseen jokaisessa mittaustilanteessa. Virtuaalisen tukiaseman data on generoitu ympärillä olevien pysyvien tukiasemien datasta. Tavoitteena on tuottaa mahdollisimman samankaltaista dataa, kuin mitä samassa paikassa oleva todellinen tukiasema tuottaisi. Lopputuloksena saadaan mittausalueelle virtuaalista dataa, jota käytetään todellisilla vastaanottimilla tehtyjen havaintojen tukiasemahavaintoina. [2, s. 14.]



Kuva 5. VRS-menetelmän toimintaperiaate [8].

VRSnet.fi-verkon käyttäjiä ovat Maanmittauslaitos ja muut valtion organisaatiot, kunnat sekä useat mittausalun yritykset, jotka suorittavat verkossa omia mittauksiaan. Verkon käyttäjälle riittää sen käyttöön pelkkä paikantava vastaanotin ja maksettu käyttömaksu (lisenssi). Palvelusopimuksesta riippuen korjauspalvelua on tarjolla DGPS- ja RTK/VRS-tarkkuuksilla. [8.]

## 2.6 SmartNet

Leica Geosystems alkoi rakentaa koko Suomen kattavaa SmartNet RTK-tukiasemaverkkoa vuonna 2011, ja sen virallinen julkistaminen tapahtui paikkatietomarkkinoilla 6.11.2012. Järjestelmälle tehtiin kuitenkin vielä julkistuspäivän jälkeen tarkistuslaskennat ja täydessä laajuudessaan se saatiin käyttöön 17.12.2012. SmartNet-tukiasemaverkkoon kuuluu 98 tukiasemaa. [9.]

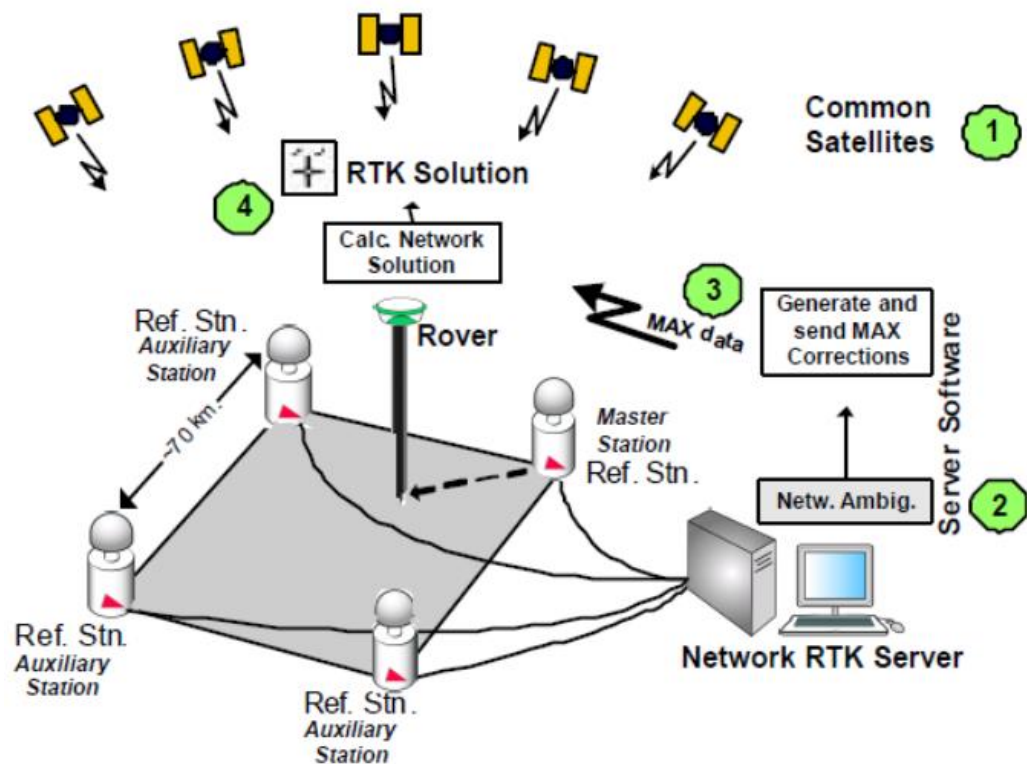
SmartNet-järjestelmän käyttö on mahdollista myös vanhemman sukupolven vastaanottimilla. Tämä on mahdollista, koska järjestelmä lähettää MAC-korjauksen lisäksi myös i-MAX-, FKP-, PRS- ja VRS-korjauksia. SmartNet-korjauspalvelua on tarjolla erilaisissa palvelumuodoissa joko RTK- ja DGPS-tarkkuudella. Järjestelmän sovellusmahdollisuudet ovat laajat, joten järjestelmää voidaan käyttää maanmittauksen lisäksi myös esimerkiksi koneohjauksessa, maataloudessa sekä monissa paikkatiedon keruun sovelluksissa. [10.]

Leican uusin menetelmä tunnetaan nimellä MAC, joka koostuu sanoista Master Auxiliary Concept. Korjauksesta käytetään myös nimeä MAX. Menetelmän ovat kehittäneet yhteistyössä Leica ja Geo++. Korjaukset lähetetään kansainvälisesti standardoidussa RTCM v3.1-muodossa. Standardin mukaisella menetelmällä tarkoitetaan menetelmää, jossa palvelinohjelmisto käyttää kansainvälisesti tunnettuja standardin mukaisia algoritmeja luodakseen verkko-RTK-korjaukset. Näin kaikille liikkuville vastaanottimille välitettävä tieto, on valmistajasta riippumatta samanmuotoista ja standardoitua. MAX-korjaukset ovat myös jäljitettävissä, sillä havainnot eivät perustu virtuaaliseen tukiasemaan vaan fyysisiin tukiasemiin. [10.]

MAX-menetelmässä lähetetään raakahavainnot, alkutuntemattomat ja sijaintitiedot yhdelle verkon asemalle. Tästä asemasta käytetään nimeä Master eli verkon pääasema. Kaikille muille asemille eli verkon apuasemille (Auxiliary) lähetetään alkutuntemattomilla korjatut havainnot ja koordinaattierot. [10.] Seuraavassa on kuvattu järjestelmän toiminta vaiheittain (katso myös kuva 6).

1. Verkon tukiasemat vastaanottavat satelliittien havaintodataa (GNSS) ja välittävät sitä tiedonsiirtoverkon kautta laskentakeskukseen.

2. Palvelinohjelmisto ratkaisee verkon alkutuntemattomat ja laskee ionosfäärin virheet jokaiselle satelliitti- ja sensoriparille sekä jokaiselle taajuudelle. Lisäksi ohjelmisto tuottaa ja lähettää MAX-korjaukset.
3. MAX-data sisältää kaiken alkuperäisen havaintotiedon, kaikki korjaukset ja koordinaattitiedot pääasemalle sekä korjaus- ja koordinaattierot verkon apuasemille.
4. Liikkuva vastaanotin vastaanottaa datan ja laskee itsenäisesti verkkoratkaisun soveltaen omaan sijaintiinsa sopivia korjausarvoja. [11.]



Kuva 6. MAX-menetelmän toimintaperiaate [10].

MAX-ratkaisussa liikkuva vastaanotin kontrolloi verkkoratkaisua, mikä on merkittävä ero verrattuna esimerkiksi VRS-menetelmään, jossa palvelin kontrolloi verkkoratkaisua. Tekniikalla pyritään siihen, että liikkuva vastaanotin voi arvioida sen käyttämän RTK-ratkaisun laatua ja monitoroida etäisyydestä riippuvien virheiden korjausten tehokkuutta sen omassa laskennassa. Huomatessaan huonon RTK-ratkaisun esimerkiksi muutuneiden ilmakehäolosuhteiden vaikutuksesta voi liikkuva vastaanotin vaihtaa eri strategiaan ja laskea sopivamman verkkoratkaisun. Palvelimen kontrolloimassa verkkorat-

kaisussa käytetään usein vain yhtä strategiaa kaikille vastaanottimille, jolloin verkkoratkaisu on optimoitu koko verkolle, ei yksittäiselle liikkuvalla. Näin toteutettu verkkoratkaisu ei ole siis välttämättä yksittäisen vastaanottimen kannalta paras mahdollinen, jolloin voidaan esimerkiksi hävitä alustuksen nopeudessa. [10.]

Leican SmartNet-palvelu on käytössä viidessätoista Euroopan maassa (tilanne 29.11.2012) mukaan lukien kaikki Pohjoismaat Islantia lukuun ottamatta. [12.]

### **3 Mittaustarkkuus ja siihen vaikuttavat tekijät**

Mittaustarkkuuteen vaikuttaa useampikin tekijä, kuten käytetty satelliittijärjestelmä tai järjestelmät, ilmakehäolosuhteet, satelliittien lukumäärä ja satelliittigeometria sekä mitaajan toiminta. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin niitä asioita, jotka tulee huomioida reaaliaikaisissa verkko-RTK-mittauksissa, mutta teoria on kuitenkin laajennettavissa muihinkin satelliittimittauksiin.

#### **3.1 Satelliittijärjestelmät**

##### **3.1.1 GNSS (Global Navigation Satellite System)**

GNSS (Global Navigation Satellite System) -monisatelliittijärjestelmä koostuu useasta erillisestä satelliittijärjestelmästä. Järjestelmään kuuluvat kokonaisina Yhdysvaltain puolustushallinnon ylläpitämä GPS-järjestelmä sekä Venäjän armeijan ylläpitämä GLONASS-satelliittijärjestelmä [1, s. 289]. Molemmat näistä järjestelmistä toimivat koko maapallon alueella 24 tuntia vuorokaudessa [13; 14]. Näiden järjestelmien lisäksi GNSS-järjestelmässä voidaan käyttää kiinalaisten kehittämän Beidou-järjestelmän jo laukaistuja satelliitteja sekä eurooppalaisen Galileo-järjestelmän satelliitteja [15]. Kuitenkin sekä Beidou- että Galileo-järjestelmät eivät ole vielä käytössä täydessä laajuudessaan, joten niiden käyttö osana GNSS-järjestelmää rajoittuu muutama satelliittiin.

Mainittujen järjestelmien lisäksi myös muilla mailla on kehitteillä erilaisia satelliittijärjestelmiä, jotka voivat tulevaisuudessa olla osa yhteistä GNSS-järjestelmää. Kuitenkin tällä hetkellä GNSS-järjestelmässä käytettävät satelliitit koostuvat pääosin GPS- ja GLONASS-järjestelmien satelliiteista ja geostationaarisista satelliiteista. GPS- ja GLONASS-järjestelmien muodostamasta kehitysvaiheesta käytetään nimitystä GNSS I. Kun



järjestelmään lisätään Euroopan tuleva Galileo-järjestelmä, käytetään nimitystä GNSS II. [16, s. 65.]

GNSS-monisatelliittijärjestelmän odotettuja etuja verrattuna yksittäisen satelliittijärjestelmän, kuten GPS:n käyttöön, ovat parempi satelliittien näkyvyys sekä parempi käytön luotettavuus ja tarkkuus. Periaatteessa voidaankin tehdä seuraava oletus: Mitä enemmän satelliitteja vastaanotin pystyy samanaikaisesti havaitsemaan, sitä luotettavampia saadut havainnot ovat. Luonnollisesti tämä on kuitenkin vain oletus, joka ei välttämättä päde kaikissa mittaustilanteissa. Haastavissa ja peitteisissä olosuhteissa mittaamisen voidaan kuitenkin katsoa helpottuvan GNSS:n myötä, kun taivaalla on samanaikaisesti useampia satelliitteja vastaanottimen käytettävissä. Tällöin esimerkiksi peitteisyyden vaikutukset vähenevät ja satelliittimittauksissa käyttökelpoiset mittausympäristöt laajenevat, kun satelliitteja on useita joka ilmansuunnassa ja vastaanotin voi käyttää esimerkiksi vain vahvimpia signaaleja. [16, s. 65–68.]

Seuraavassa on kuvattu ja esitelty lyhyesti eri satelliittijärjestelmiä, jotka tulevat olemaan osa valmista GNSS-järjestelmää. Jokaisen järjestelmän kohdalla on kerrottu niiden nykyisestä käytöstä sekä pohdittu järjestelmien tulevaisuutta.

### 3.1.2 GPS (Global Positioning System)

GPS on Yhdysvaltojen puolustushallinnon ylläpitämä satelliittipaikannusjärjestelmä, joka koostuu noin 30 satelliitista, jotka kulkevat kuudella eri kiertoradalla noin 20 200 km:n korkeudella. Satelliittien määrä järjestelmässä vaihtelee hieman sen mukaan, miten ja milloin vanhoja satelliitteja korvataan uusilla. Kuitenkin järjestelmässä on aina vähintään 24 operatiivista satelliittia, joiden lisäksi siinä on aina myös joitakin varasatelliitteja. [13] Järjestelmä on ollut operatiivisessa käytössä vuodesta 1978 lähtien, ja vuodesta 1995 alkaen se on ollut operatiivisesti täysin valmis [4].

Järjestelmän ensimmäinen Block I -satelliitti laukaistiin avaruuteen vuonna 1978. Block I -sarjan satelliitit palvelivat vuoteen 1995 asti, jolloin viimeinen niistä poistettiin käytöstä. Seuraavan sukupolven Block II -satelliiteista ensimmäinen laukaistiin avaruuteen vuonna 1989. Tätä seuraavien viiden Block II -satelliittilaukaisujen jälkeen järjestelmä oli alustavassa operatiivisessa valmiudessa, sillä täysi 24 satelliitin konstellaatio oli saavutettu. Kuitenkin osa satelliiteista oli vielä vanhoja Block I -sarjan satelliitteja, joten järjestelmän ei katsottu olevan vielä operatiivisesti täysin valmis. Kaksi vuotta myö-

hemmin vuonna 1995 järjestelmä julistettiin täysin valmiiksi. Tässä vaiheessa käytössä oli 24 toisen sukupolven Block II/IIA -satelliittia. [4.]

Seuraavat avaruuteen lähetettävät satelliitit ovat Block IIF -sarjan satelliitteja. Niiden laukaisut aloitettiin vuonna 2010, ja viimeisin laukaisuista tapahtui 12. lokakuuta 2012, jonka jälkeen GPS-konstellaatiossa on kolme Block IIF -sarjan satelliittia. Näihin satelliitteihin on muun muassa lisätty uusi taajuus (L5), jonka lisäksi satelliittien elinikää on pyritty kasvattamaan entisestä ja satelliittien kellot ovat aiempaa tarkemmat. [13.]

GPS-järjestelmä jaetaan kolmeen osaan eli lohkokon, jotka ovat avaruusosa, valvontaosa ja käyttäjät. Avaruusosa koostuu satelliiteista. Valvontaosa koostuu keskusasemasta, useista maa-asemista ja kolmesta maa-antennista. Colorado Springsissa Yhdysvalloissa sijaitseva keskusasema valvoo ja ohjaa järjestelmän toimintaa ja tekee tarvittavia korjauksia ja päivityksiä järjestelmään. Maa-asemat seuraavat satelliitteja ja keräävät niistä tietoja keskusasemalle. Maa-antennien tehtävänä on välittää tarvittavat tiedot satelliitteihin. [4, s. 32–33.]

GPS-satelliittien radat ovat lähes ympyräratoja, joiden ratatason päiväntasaajasta mitattu kaltevuus eli inkliinaatiokulma on  $55^\circ$ . Satelliittien kiertoaika on 11 h ja 58 min. Nykyisellään satelliitit lähettävät kantoaaltoja kahdella eri taajuudella L1 (1575,4200 MHz) ja L2 (1227,6000 MHz). Navigoinnissa käytettävät koodit, C/A- ja P-koodi on moduloitu kantoaaltoihin. Näistä C/A-koodi on julkinen ja tarkemman paikkaratkaisun tuotava P-koodi on varattu vain sotilaalliseen käyttöön [1, s. 293–294]. Nykyään GPS-järjestelmä on eniten hyödynnetty satelliittijärjestelmä maailmassa. Järjestelmässä on tällä hetkellä meneillään uudistus ja modernisointi, jonka ensisijaisena tarkoituksena on lisätä paikannuksessa käytettäviä taajuuksia sekä pidentää satelliittien käyttöikää. [16.]

### 3.1.3 GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)

GLONASS-satelliittijärjestelmä on aikaisemmin Neuvostoliiton ja nykyisin Venäjän avaruushallinnon kehittämä ja ylläpitämä satelliittijärjestelmä, jonka ensimmäinen satelliittilaukaisu tapahtui vuonna 1982. Järjestelmän ilmoitettiin olevan täydessä toimintavalmiudessaan jo vuonna 1993, mutta todellisuudessa vasta vuosien 1995–1996 vaihteessa satelliittikonstellatio oli suunnitelmien mukainen ja järjestelmä lopullisessa laajuudessaan. [4, s. 25.]

Neuvostoliiton hajoamisen jälkeen järjestelmä kuitenkin rappeutui vähitellen ja siihen tuli aukkoja. Tästä syystä järjestelmä oli käytössä monta vuotta vain rajoitetusti. Kuitenkin vuoteen 2011 mennessä sen puutteet saatiin korjattua, ja järjestelmä on tällä hetkellä täydellisessä operatiivisessa käytössä. Järjestelmä koostuu noin 31 satelliitista (määrä vaihtelee hieman, kuten GPS:llä), joista 24 on operatiivisessa käytössä ja loput ovat niin sanottuja varasatelliitteja. Satelliitit kiertävät maata keskikorkealla kiertoradalla (Medium Earth orbit) 19 100 km:n korkeudella, ja niiden inkliinaatiokulma on 65 astetta, joten järjestelmän peitto napa-alueilla on hieman GPS:ää parempi. Satelliittien kiertoaika on 11 h 15 min. [4, s. 26–27.]

GLONASSin toimintaperiaate on hyvin samanlainen kuin GPS:n. Kuitenkin suurin ero järjestelmien välillä on satelliittien lähettämässä signaaleissa. Kun kaikki GPS-satelliitit lähettävät samaa taajuutta ja ne erotetaan toisistaan koodin perusteella, on GLONASS-satelliiteilla kaikilla sama koodi, mutta ne lähettävät eri taajuutta, jonka perusteella ne erotetaan toisistaan. Taajuudet 1602–1615 MHz on varattu siviilikäyttöön, minkä lisäksi armeijalle on omat taajuutensa (1246–1256 MHz). Taajuuksia tarvitaan vain vähän, koska maapallon eri puolilla olevat satelliitit voivat käyttää samoja taajuuksia. [17, s. 20.]

GLONASS-satelliitit lähettävät kahdenlaista koodia, jotka vastaavat GPS:n C/A- ja P-koodeja. Koodit ovat salaamattomia, eikä niihin ole lisätty näennäissatunnaisia virheitä. Tästä syystä koodiin perustuva paikannus oli tarkkaa heti GLONASSin alkuvaiheessa, kun signaalia ei ollut häiritty. [4, s. 27]

#### 3.1.4 Galileo

Euroopan komissio ilmoitti vuonna 1999 eurooppalaisen satelliittipaikannusjärjestelmän rakentamisesta. Järjestelmän oli tarkoitus tuoda vaihtoehto GPS:lle ja irrottaa Eurooppa Yhdysvaltojen poliittisesta, sotilaallisesta ja taloudellisesta riippuvuudesta, jossa Eurooppa olisi ilman omaa järjestelmää. Uusi järjestelmä päätettiin nimetä Galileoksi kuuluisan italialaisen tähtitieteilijän mukaan. [4, s. 182.]

Alkuperäisen suunnitelman mukaan Galileon arvioitiin olevan operatiivisessa käytössä vuonna 2010 [4, s. 182]. Tämän jälkeen suunnitelmat ovat kuitenkin muuttuneet, ja uuden arvion mukaan järjestelmä tulisi operatiiviseksi vuonna 2014 [16]. Kuitenkin täydessä laajuudessaan järjestelmän odotetaan olevan aikaisintaan vasta vuonna 2020

[18]. Tällä hetkellä järjestelmä on siinä kehitysvaiheessa, että testisatelliitit (GIOVE-A ja GIOVE-B) ovat kiertäneet jo useamman vuoden radoillaan. Ensimmäiset kaksi virallista Galileo-satelliittia laukaistiin kiertoradoilleen lokakuussa 2011, ja siitä vuoden päästä lokakuussa 2012 laukaistiin järjestelmän edelliset kaksi satelliittia (tilanne 10.1.2013). Tällä hetkellä Galileo-järjestelmä koostuu yhteensä neljästä virallisesta Galileo-satelliitista. Näiden operatiivisten ja toistensa kanssa identtisten satelliittien avulla pystytään jo osoittamaan järjestelmän suorituskyky käytännössä, ennen jäljellä olevien operatiivisten satelliittien käyttöönottoa. Samalla voidaan myös luotettavasti seurata ja testata järjestelmän toimintaa, sillä tulevaisuudessa laukaistavat satelliitit tulevat olemaan täsmälleen samanlaisia jo operatiivisten neljän satelliitin kanssa. [19.]

Valmis Galileo-järjestelmä tulee toteutuessaan käsittämään 30 satelliittia (27 operatiivisessa käytössä ja 3 varalla), jotka lentävät kolmella eri kiertoradalla noin 23 200 km:n korkeudessa. Niiden suunniteltu inkliinaatiokulma on 56 astetta, joka takaa hieman paremman peiton napa-alueille kuin GPS. Kiertoaika satelliiteilla on 11 h 58 min. Järjestelmän kaksi päävalvonta-asemaa sijaitsevat Fucinossa Italiassa ja Oberpfaffenhofenissa Saksassa. Tämän lisäksi järjestelmään tulee lukuisia maa-asemia ympäri maailmaa. [19.]

### 3.1.5 Beidou

Kiina pyrkii omalla Beidou-satelliittijärjestelmällään (käytetään myös nimitystä COMPASS) eroon paikannusriippuvuudestaan Yhdysvaltoihin ja GPS:ään [18]. Järjestelmän on ensisijaisesti tarkoitus palvella Kiinan omaa armeijaa, mutta tuottaa lisäksi myös siviileille tarkkaa paikannusta [20]. Kiina on ilmoittanut saavansa oman maailmanlaajuisen satelliittipaikannusjärjestelmänsä (Beidou-2) valmiiksi vuoteen 2020 mennessä. Järjestelmän nimi Beidou tulee kiinan kielestä ja tarkoittaa Otavan tähtikuviota.

Valmiin satelliittipaikannusjärjestelmän on tarkoitus koostua 35 paikannussatelliitista, joista 30 kiertää maata keskikorkealla kiertoradalla ja loput viisi geostationarisella radalla. Vuoden 2012 lopulla Kiina avasi paikallisen Aasian ja Tyynenmeren kattavan järjestelmänsä kaupalliseen käyttöön. [16; 21; 22.]

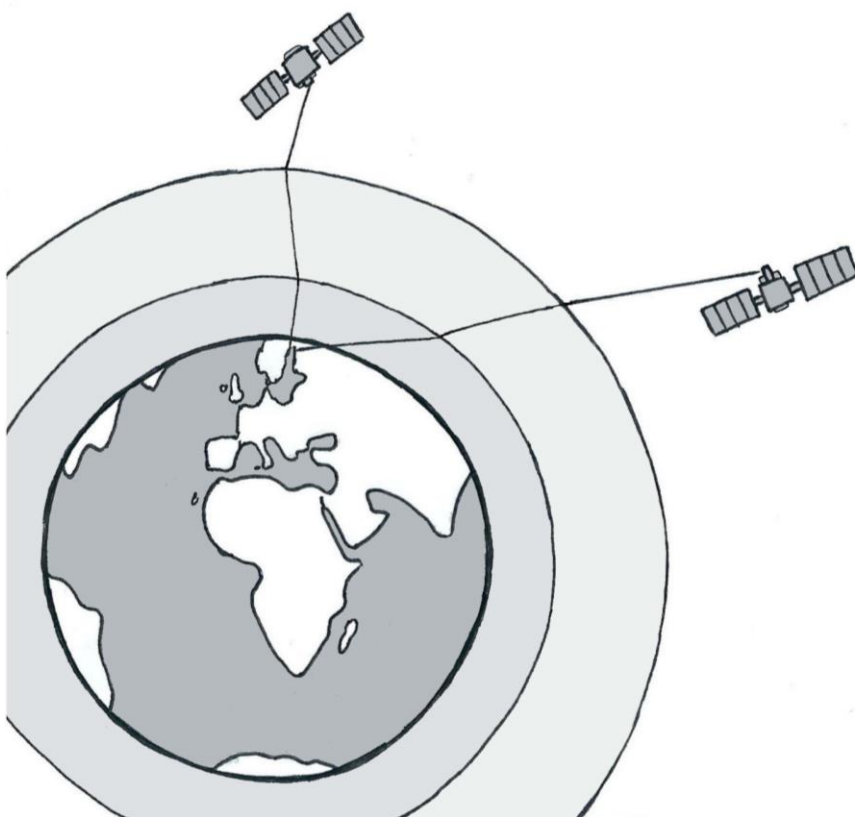
### 3.2 Ilmakehä

Vastaanottimen vastaanottama satelliittisignaali kulkee ilmakehän läpi (kuva 7). Ilmakehä jaetaan kahteen kerrokseen satelliittisignaaliin vaikuttavien ominaisuuksien mukaan [2, s. 28]. Alempaa ilmakehän kerrosta kutsutaan troposfääriksi (paksuus napalueilla n. 8 km ja päiväntasaajalla n. 18 km) ja ylempää kerrosta ionosfääriksi (alaraja n. 70 km korkeudella, mutta ei selkeää ylärajaa) [23; 24]. Ionosfäärin kokonaiselektroni-tiheys (TEC) ja sen muutos vaikuttavat signaalin kulkuun. Ionosfäärivirheen suuruus on satelliitin ja antennin väliseen etäisyyteen 1–50 metriä zenitissä eli antennista pystysuoran komponentin arvona. [2, s. 28.]

Ionosfääri on dispersiivinen väliaine, joten eri taajuudet kulkevat siinä eri nopeudella. Tämä johtuu vapaiden elektronien suuresta määrästä. Dispersiivisyys aiheuttaa sen, että radioaaltojen kulun vaihe- ja ryhmänopeudet ovat erilaisia [25, s. 24]. Ionosfääri vaikuttaa näin erisuuruisella määrällä eri taajuuksilla lähetettyihin satelliittisignaaleihin, ja siksi ionosfäärin vaikutus voidaan suurelta osin poistaa monitaajuushavaintojen avulla laskennassa. [2, s. 28.]

Troposfääristä johtuvan virheen mallintaminen on kuitenkin vaikeaa. Troposfääri ei ionosfäärin tavoin ole radioaalloille dispersiivinen ja sen vaikutus ei näin riipu satelliittitaajuudesta [25, s. 26]. Troposfääri jaetaan yleensä kahteen komponenttiin: kuivaan ja kosteaan [26, s. 132]. Useimmiten erilaiset mallit poistavat 90 % troposfäärin vaikutuksesta (kuiva osa), mutta jäljelle jäävä 10 % (kosteaa) jää yhdeksi ratkaistavaksi tuntemattomaksi laskennassa tai se jätetään kokonaan ratkaisematta. [2, s. 28; 26, s. 132.]

Kuiva osa on helpommin hallittavissa mallien avulla kuin kostea, sillä ilmakehän vesihöyrypitoisuuden ennustaminen on käytännössä mahdotonta [26, s. 132]. Muita troposfäärivirheeseen vaikuttavia tekijöitä vesihöyryn lisäksi ovat ilmanpaine ja lämpötila. Troposfäärivirheen suuruus on satelliitin ja antennin väliseen etäisyyteen zenitissä noin kahden metrin luokkaa. [2, s. 28.]

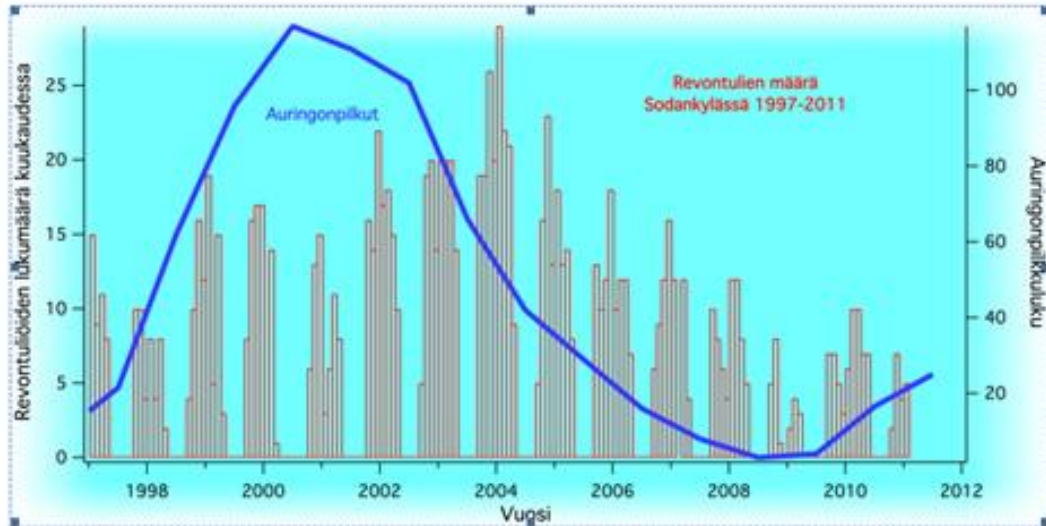


Kuva 7. Ilmakehän vaikutus satelliittisignaalin kulkuun. Lähellä horisonttia olevan satelliitin signaali kulkee pidemmän matkan ilmakehässä kuin zeniittiä lähellä olevan satelliitin. (Kuva Tuomas Toivonen.)

Molempien ionosfäärin ja troposfäärin aiheuttamien virheiden suuruudet annetaan zeniitissä. Virhe on suurempi alemmilla korkeuskulmilla kun signaali kulkee pidemmän matkan ilmakehän läpi. Tämän vuoksi mitatessa tulisi asettaa korkeus- eli katkaisukulma selvästi (10–15 astetta, riippuen olosuhteesta) havaitsijan horisontin yläpuolelle. Katkaisukulmalla tarkoitetaan sitä korkeuskulmaa, jonka alapuolella lentäviä satelliitteja ei oteta mukaan mittaukseen. Katkaisukulman valinnalla ehkäistään tämän lisäksi myös monitieheijastusten ja mahdollisten esteiden aikaansaamaa virhettä. [2, s. 29.]

Ionosfäärin aktiivisuus ja etenkin sen muutosnopeus on aika ajoin erittäin suurta. Aktiivinen ionosfääri aiheuttaa vaihekatkoja signaaliin, joten ionosfäärin ollessa aktiivisimmillaan lienee parempi jättää ainakin RTK-mittaukset väliin. Ionosfääri on aktiivinen voimakkaiden Auringon purkausten aikana, joista aiheutuvat esimerkiksi revontulet. Revontulet syntyvät kun Auringosta tulevat varatut hiukkaset joutuvat Maan magneettikenttään ja sitä kautta ilmakehään. Auringon ollessa aktiivinen satelliittimittauksissa esiintyy ongelmia, tai ne epäonnistuvat kokonaan. [2, s. 30.]

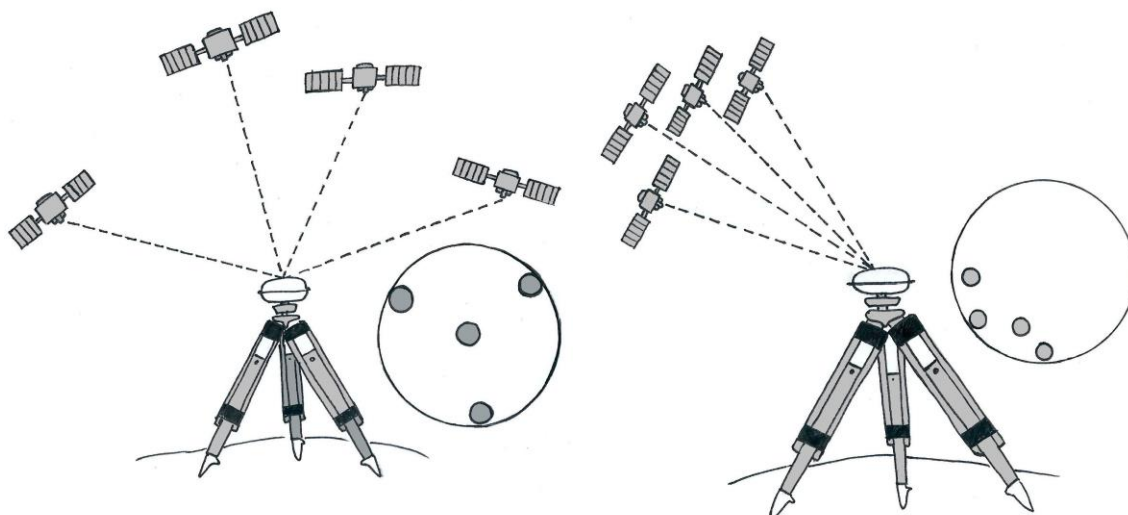
Auringon aktiivisuus noudattaa noin 11 vuoden jaksoja (kuva 8). Edellinen maksimi oli vuosien 2001 ja 2002 vaihteessa ja seuraava tulee olemaan huipussaan vuonna 2013 [27]. Lisäksi ionosfäärin aktiivisuus vaihtelee vuodenajan ja vuorokaudenajan mukaan. Marraskuussa ionosfäärin aktiivisuus on keskimäärin neljä kertaa suurempi kuin heinäkuussa ja päivällä keskimäärin viisi kertaa suurempi kuin yöllä. [2, s. 30.]



Kuva 8. Revontulien määrä Sodankylässä vuosina 1997–2011 (pilarit) sekä auringon aktiivisuudesta kertova auringonpilkkujen lukumäärä ajanjakson aikana (sininen viiva) [27].

### 3.3 Satelliittigeometria

Satelliittigeometrialla tarkoitetaan sitä, miten satelliitit ovat jakautuneena taivaalle vastaanottimeen nähden (kuva 9). Satelliittigeometrialtaan huonossa tilanteessa satelliitit ovat jakautuneet epätasaisesti taivaalle esimerkiksi niin, että kaikki satelliitit ovat vain toisella puolella taivasta tai ne ovat asettuneet jonoon. Kuvailussa tilanteessa satelliittien etäisyyksistä lasketun sijainnin tarkkuus on yleensä huonompi kuin hyvän satelliittigeometrian vallitessa. Vastaavasti tilanteessa, jossa satelliitit ovat jakautuneet taivaalle tasaisesti (tasainen peitto), satelliittigeometria on parempi ja usein myös mittaustarkkuus. [2, s. 26.]



Kuva 9. Kaksi erilaista satelliittigeometriaa. Vasemmalla hyvän satelliittigeometrian vallitessa kaikki satelliitit ovat eri puolilla taivasta sekä korkealla että matalalla. Oikealla huonon satelliittigeometrian aikana kaikki satelliitit ovat jakautuneet jonoon samalle puolelle taivasta. (Kuva Tuomas Toivonen.)

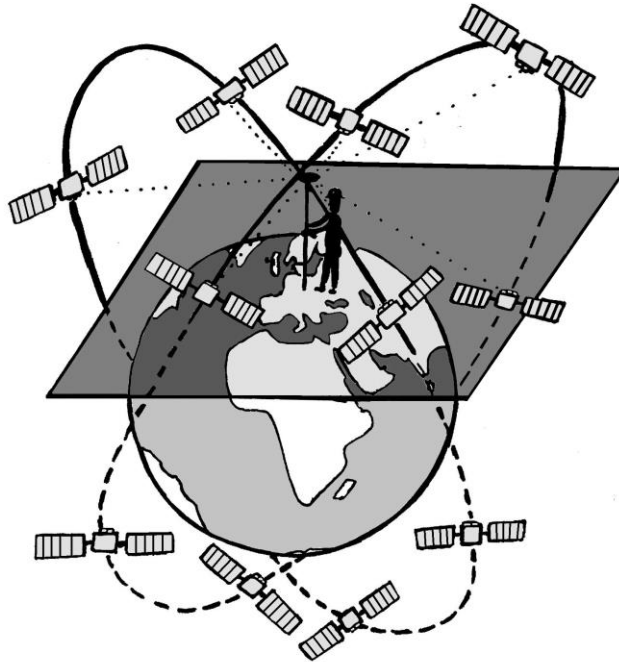
Erialaista satelliittigeometriaa voidaan kuvata niiden tarkkuutta kuvaavilla DOP-luvuilla (Dilution of Precision). Näistä yleisimmin käytetyt ovat GDOP (Geometric Dilution of Precision) ja PDOP (Positional Dilution of Precision) [2, s. 27]. PDOP-arvo koostuu sekä taso- (HDOP) että korkeustarkkuuden (VDOP) epävarmuudesta. GDOP-arvo huomioi PDOP-arvon lisäksi vastaanottimen kellovirheen vaikutuksen sijaintitarkkuuteen. [28, s. 56.]

Mitä pienempi DOP-luku on, sitä parempi satelliittigeometria on mittaamiselle. Yleisesti erilaisille DOP-luvuille käytetään raja-arvoja  $PDOP < 6$  ja  $GDOP < 8$ , eikä tätä suuremmilla arvoilla mittauksia tulisi suorittaa. Toisaalta jo näitä arvoja huomattavasti pienemmillä DOP-arvoilla saattaa esiintyä ongelmia RTK- tai verkko-RTK-mittauksissa. Paikannustarkkuus on suoraan verrannollinen DOP-arvoon, sillä kertomalla havainnon keskiahajonta PDOP-arvolla, saadaan arvio sijaintitarkkuudesta (mitä suurempi DOP-arvo, sitä heikompi tarkkuus). [2, s. 27.]

Satelliittimittauksissa korkeustarkkuus on heikompi kuin tasotarkkuus. Tasotarkkuuden paremmuus verrattuna korkeustarkkuuteen selittyy satelliittigeometrisilla seikoilla. Korkeussuunnassa satelliitteja ei ole mahdollista havaita horisontin alapuolelta (kuva 10), jolloin geometria korkeuden määrittämiseksi on luonnollisesti huonompi kuin tasossa.

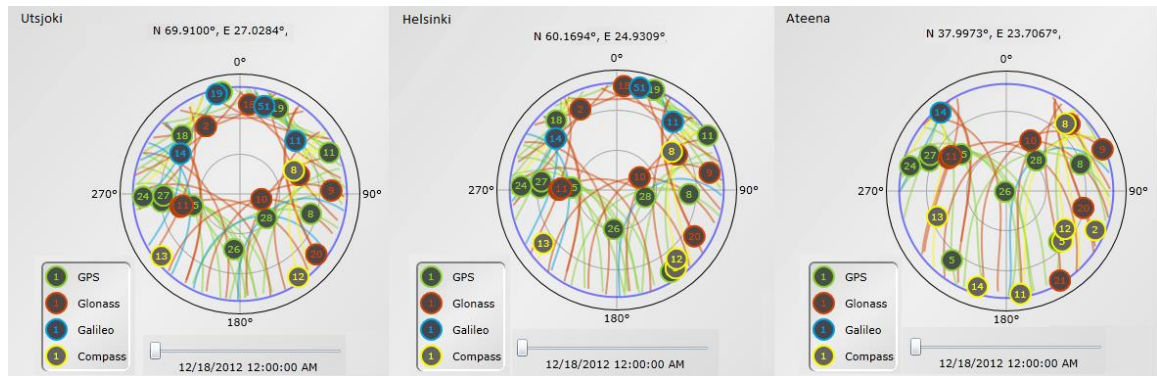


Vaakasuunnan paremmuus johtuu samasta seikasta, sillä satelliitteja on mahdollista havaita joka suunnalla (0–360 astetta).



Kuva 10. Havainnekuva korkeustarkkuuden heikkoudesta verrattuna tasotarkkuuteen. Tasossa satelliitteja on mahdollista havaita 360 astetta ympäriinsä, mutta korkeussuunnassa havaittavana ovat vain horisontin yläpuoliset satelliitit eli 180 astetta. Myös ionosfäärin ja troposfäärin virheet tulevat suurempina korkeustarkkuuteen. (Kuva Tuomas Toivonen.)

Pohjoisilla leveysasteilla huonompi korkeustarkkuus johtuu myös osaltaan siitä, että satelliitit näkyvät alhaisilla korkeuskulmilla verrattuna lähempänä päiväntasaajaa sijaitseviin alueisiin (kuva 11). Toisaalta pohjoisilla leveysasteilla pohjoistaivaalla näkyy myös sellaisia satelliitteja, joita ei etelämpänä voida nähdä, jolloin tasotarkkuus pohjoisilla leveysasteilla voi muodostua paremmaksi kuin etelämpänä. Kuitenkin Ionosfäärin sekä troposfäärin aiheuttamat virheet ovat suurempia korkeustarkkuuteen kuin tasotarkkuuteen. [2, s. 27.]



Kuva 11. Satelliittikonstellatit tarkasteltuna eri leveysasteilta 18.12.2012. Satelliittikonstellatioista huomataan, että korkeustarkkuus Ateenassa on keskimäärin parempi kuin Suomessa, koska satelliitit lentävät *korkeammalla*. Vastaavasti tasotarkkuus on Ateenassa huonompi, koska pohjoistaivaalla ei ole lainkaan satelliitteja ja näin satelliittigeometria on huonompi. [29.]

Monissa satelliitivastaanottimissa on mahdollisuus asettaa DOP-arvoille raja-arvot, joiden mukaan mittauksia suoritetaan. Asetuksista voidaan esimerkiksi määrittää, että DOP-arvojen kasvaessa liian suuriksi havaintojen tallentaminen lopetetaan ja uusia havaintoja ei voida tehdä, ennen kuin DOP-arvo on laskenut määriteltyä arvoa pienemmäksi. Raja-arvot on määritetty usein valmiiksi jo tehdasasetuksissa, jotka käyttäjällä on kuitenkin mahdollisuus määritellä vastaamaan paremmin kulloistakin mittaustilannetta. [30, s. 54.]

### 3.4 Satelliittien lukumäärä

RTK- ja verkko-RTK-mittauksissa FIX-ratkaisun saamiseen tarvitaan vähintään viisi yhteistä satelliittia tukiasemalle ja vastaanottimelle (vain GPS). Käytettäessä sekä GPS- että GLONASS-satelliitteja, alustuksessa on oltava vähintään 7 yhteistä satelliittia (taulukko 1). Alustuksessa liikkuva vastaanotin ratkaisee satelliittien ja vastaanottimen antennin välisten kokonaisten aallonpituuksien määrän mittausten alkuhetkellä (hetki, jolloin vastaanotin alkaa seurata satelliitteja). Kun alustus on saatu muodostettua, sen ylläpitämiseen ja mittausten suorittamiseen riittää neljäkin yhteistä satelliittia. Usein mittaustarkkuus kuitenkin paranee, kun satelliitteja on vastaanottimen näkyvissä useampia. Suuremmalla ratkaisuun kelpaavien satelliittien määrällä saavutetaan usein parempi satelliittigeometria ja lisäksi alkutuntemattomien ratkaisuun saadaan ylimäärittystä. [2, s. 25.]

Laskemalla katkaisukulmaa voidaan ratkaisuun ottaa mukaan alhaalla lentäviä satelliitteja. Kuitenkin ympäristön esteet voivat heikentää matalilla korkeuskulmilla lentävien satelliittien signaaleja. Tämän vuoksi korkeuskulman valinnassa joudutaan usein kompromissiin satelliittien lukumäärän maksimoimiseksi, mutta myös monitieheijastusten ja esteiden vaikutuksen minimoimiseksi. Ratkaisu korkeuskulman suhteen tehdään aina vallitsevat olosuhteet huomioiden. Ohjearvona pidetään usein 10–15 astetta. Kuitenkin jos satelliitteja on muutenkin riittävästi, ei katkaisukulman laskeminen ole tarpeen ja katkaisukulma voi olla ohjearvoja korkeampi. Korkealla katkaisukulmalla vältetään toisaalta myös tehokkaasti monitieheijastumisen riskiä. [2, s. 26.]

Satelliittien lukumäärää sekä satelliittigeometrian muutoksia eri ajanhetkillä on hyvä seurata etenkin reaaliaikaisissa GNSS-mittauksissa. Tämä voidaan kuitenkin tehdä jo ennakkolta erilaisilla suunnitteluohjelmilla ja GNSS-almanakoilla. Suunnittelusta on hyötyä valittaessa optimaalisia mittausajankohtia. Satelliittigeometrialtaan huonoina ajankohtina voidaan esimerkiksi pitää taukoa mittauksista ja ajoittaa pakolliset ruokailut niin, että ne osuvat satelliittigeometrialtaan huonoihin ajanjaksoihin. [2, s. 26.]

Taulukko 1. FIX- ja FLOAT-ratkaisuun tarvittavien satelliittien määrät. GG tarkoittaa sekä GPS- että GLONASS-satelliitteja. Pelkkä G tarkoittaa ainoastaan GPS-satelliitteja.

	GG-RTK	G-RTK
Fix-ratkaisu	7*	5
Fix-ratkaisun säilyminen	4*	4
Float-ratkaisu	4*	4
*mukana oltava vähintään 1 satelliitti kummastakin järjestelmästä		

### 3.5 Satelliittien kello- ja ratavirheet

Liikkuvan vastaanottimen etäisyys satelliitteihin on kyettävä selvittämään tarkasti kertomalla signaalin nopeus käytetyllä ajalla. Tästä syystä sekä satelliitin kellon että paikantimen kellon tulisi olla samassa ajassa. Kuitenkin satelliittien atomikellot ovat tarkempia kuin vastaanottimissa käytetyt kvartsikellot, jolloin niiden välillä on aikaeroa, joka on synkronoitava. Voidaankin sanoa, että kellojen aikaero ja paikannuksen tarkkuus ovat suoraan verrannollisia toisiinsa. Toisin sanoen, mitä tarkemmin kellojen aikaero pystytään selvittämään, sitä tarkempia paikannustuloksia saadaan. Edellä esitet-

ty väite ei kuitenkaan pidä täysin paikkansa, sillä moni muukin asia vaikuttaa paikannustarkkuuteen. [4, s. 45–46.]

Jo äärimmäisen pienetkin aikaerot ja kellovirheet aiheuttavat virheitä satelliitin ja vastaanottimen välisiin laskettuihin etäisyyksiin. Tästä syystä pelkän radiosignaalin kulkuajan perusteella laskettuja välimatkoja kutsutaan näennäisetäisyyksiksi (pseudorange). Kun kellovirheet tunnetaan ja poistetaan, saadaan geometrinen etäisyys eli paikannuksen virhe. Paikannustarkkuudesta tulee sitä parempi, mitä tarkemmin tämä virhe pystytään poistamaan. Satelliitin omaa atomikelloa verrataankin jatkuvasti koko satelliittijärjestelmän yhteiseen referenssiaikaan (GPS), joka saadaan GPS-järjestelmässä sen pääkellosta Floridasta. [4, s. 46.]

Kuitenkin satelliitin oman atomikellon aikaa ei korjata, ainoastaan navigointisignaaliin liitetään tieto siitä, kuinka suuri ero atomikellojen ajan ja pääkellon referenssiajan välillä on milläkin hetkellä sekä kuinka suureksi eron odotetaan muodostuvan seuraavina hetkinä. Tämä navigointisignaali ja sen sisältämä kellokorjaus välittyvät järjestelmän maa-asemien ja satelliittien kautta aina paikantavalle vastaanottimelle saakka. [4, s. 46–47.]

Kuitenkaan täydellisyyttä ei voida tässäkään tapauksessa saavuttaa, vaan kellovirheestä aiheutuu etäisyyksien mittaamiseen aina virhettä. Virhettä voi olla hetkellisesti enemmän tai vähemmän. Satelliittien sijoittamisella keskikorkeille kiertoradoille on pyritty saamaan niiden kiertoradat mahdollisimman vakioiksi ja näin helposti tulevaisuuteen ennustettaviksi. Kuitenkin avaruuden voimat saavat satelliitit huojumaan kiertoradoillaan. Satelliitin lentorataan vaikuttavia voimia ovat esimerkiksi auringon vetovoima, sekä aurinkotuuli, jotka saavat molemmat yksin tai erikseen aikaan sen, että satelliitit poikkeavat lasketuilta kiertoradoiltaan. Yleensä vaikutukset mittauksiin eivät kuitenkaan muodostu suuriksi, ja niiden arvioidaan olevan noin yksi metri yhden rata kierroksen aikana. [4, s. 57–58.]

Kuitenkin satelliittien todelliset paikat avaruudessa saattavat siirtyä yhden vuorokauden aikana jopa tuhansien metrien päähän niiden laskennallisista paikoista, joten kiertoratoja on korjattava ajoittain. Tällainen siirto-operaatio saattaa kestää yli vuorokauden, jolloin kyseistä satelliittia ei luonnollisesti voida käyttää paikannustarkoituksiin. [4, s. 58.]

### 3.6 Vastaanottimesta johtuvat virheet

Vastaanottimen sähköinen keskipiste (vaihekeskipiste) ei tarkoita antennin fyysistä keskipistettä. Laskenta tehdään vaihekeskipisteestä, mutta antennin paikka suhteessa kiintopisteeseen mitataan kuitenkin johonkin fyysiseen merkkiin antennissa. Mitä tarkemmin antennin vaihekeskipisteen ja fyysisen keskipisteen ero tunnetaan, sitä pienempi on antennin paikan määrityksestä johtuva havaintoihin jäävä virhe. Sähköisen keskipisteen paikka on riippuvainen antennin rakenteen lisäksi myös signaalin tulosuunnasta, taajuudesta ja intensiteetistä. Näin ollen esimerkiksi GPS:n L1- ja L2-signaaleille paikka ei ole täysin sama. Koska antennin sähköisen keskipisteen paikka on riippuvainen signaalin tulosuunnasta, siinä on vakiopoikkeaman lisäksi ajallinen, satelliittigeometriasta riippuvainen komponentti. Sekä ajallinen vaihtelu että antennin lähiympäristön vaikutus tekevätkin vaihekeskipisteen mallintamisen vaikeaksi. [26, s. 139–140.]

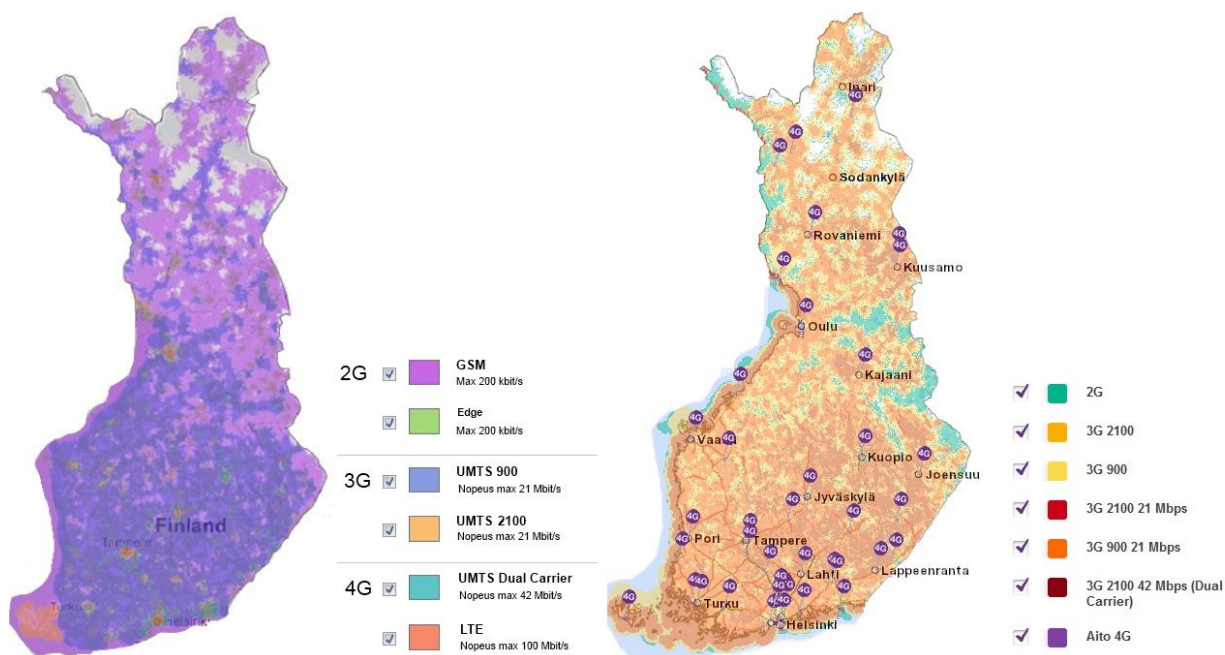
Sähköisen keskipisteen tuottaman virheen lisäksi mittalaitteessa käytetty ohjelmisto voi aiheuttaa virheitä. Tällöin kyse on ohjelmiston virheellisestä toiminnasta, tai vaihtoehtoisesti käyttäjän väärin määrittelemistä asetuksista tai muuten vääränlaisesta käytöstä. Luonnollisesti inhimilliset virheet saattavat aiheuttaa vääriä tuloksia. Mittalaitteiden käyttäjille täytyisikin antaa aina asianmukainen koulutus laitteiston käyttöön. [2, s. 30.]

### 3.7 Datalinkki

Satelliittivastaanottimilla voidaan vastaanottaa tukiaseman lähettämää korjaussignaalia eri yhteysmuodoissa. Perinteisesti on käytetty radio- tai GSM-liikennettä. GSM, GPRS ja UMTS ovat kaksisuuntaisia yhteyksiä. Nykyisin käytetään nopeampia GPRS- tai UMTS-yhteyksiä. [2, s. 31]

Radioliikenne mahdollistaa useamman käyttäjän mittaukset ilman tietoliikennekustannuksia. Huonona puolena on se, että liikenne on yksisuuntaista ja kuuluvuus varsinkin peitteisessä maastossa on huono. GSM-, GPRS- ja UMTS-yhteyksien kuuluvuus on koko valtakunnan laajuista (kuva 12) muutamia erämaa-alueita lukuun ottamatta, mutta näiden yhteyksien käyttämisestä aiheutuu dataliikenteen siirtokustannuksia. [2, s. 31.]

GSM-modeemin käyttö omalla RTK-tukiasemalla mahdollistaa vain yhden käyttäjän samanaikaiset mittaukset. Verkko-RTK-järjestelmissä sekä VRSnet.fi:llä että SmartNetillä voi olla samanaikaisesti useampia käyttäjiä. GPRS- ja UMTS-yhteydet vähentävät tietoliikennekustannuksia tehokkaasti, koska niitä käytettäessä kustannukset perustuvat siirretyn datan määrään eivätkä käytettyyn yhteysaikaan, kuten vanhemmilla teknologioilla (GSM). GPRS-datayhteyden peittoalue on Suomessa laajempi kuin nopeampien UMTS-yhteyksien, joten tämä tulisi ottaa huomioon vastaanottimien asetusten määrittämisessä, kun mitataan kuuluvuuden rajamaastossa. Yhteyden katkeaminen johtaa mittauksen alustuksen menetykseen. [2, s. 31.]



Kuva 12. Elisan (vasen) ja Soneran (oikea) verkkojen kuuluvuudet Suomessa. Molempien operaattoreiden kuuluvuusalueet kattavat käytännössä koko Suomen joitakin erämaa-alueita lukuun ottamatta. Uusien nopeiden (UMTS/3G ja LTE/4G) yhteyksien kuuluvuusalueet eivät kuitenkaan mahdollista vielä mittauksia koko maassa. [muokattu 31; 32.]

### 3.8 Mittauspaikan vaikutukset

#### 3.8.1 Mittauspaikan valinta ja vaikutus mittaamiseen

Satelliittien näkyminen taivaalla on satelliittimittaamisessa ensiarvoisen tärkeää. Tästä johtuen mittauspaikan valinta on ehkä tärkein yksittäinen huomioitava asia suunniteltaessa mittauksia. Mittauspaikkaa valittaessa on huomioitava, ettei satelliittisignaali kulje kiinteiden esteiden läpi ja peitteisyys vaikuttaa signaalin kulkuun häiritsevästi. Esimer-

kiksi puut, rakennukset tai muut esteet voivat aiheuttaa ongelmia mittaamiseen. Esteet aiheuttavat katkoja satelliittien näkyvyydessä, voivat aiheuttaa kohinaa signaaliin tai pahimmassa tapauksessa estää satelliittien näkymisen kokonaan. [2, s. 23.]

Joka kerta kun satelliittisignaali vastaanottimeen katkeaa, tapahtuu vaihekatko, jolloin alkutuntemattomat joudutaan ratkaisemaan uudelleen. Sama ilmiö tapahtuu kuitenkin myös silloin, kun uusia satelliitteja ilmestyy vastaanottimen näkyville ennen kuin laite on suorittanut alustuksen. Tämä hidastaa mittausten aloittamista alustuksen tekemisen hidastuessa. Pahimmassa tapauksesta alustusta ei saada ratkaistuksi lainkaan, koska vastaanottimen ympäristön esteet peittävät satelliittien näkymisen taivaalla tai alustukseen käytetyt satelliitit ehtivät liikkua esteiden taakse, ennen kuin tarvittava alustus on suoritettu. [2, s. 23.]

Vastaavasti sen jälkeen kun vastaanotin on suorittanut tarvittavan alustuksen, voi lopullinen ratkaisu sisältää vähemmän satelliitteja kuin alkuperäinen, jolloin saavutettu mitaustarkkuus ei ole välttämättä enää yhtä hyvä. Esteen ei kuitenkaan tarvitse olla välttämättä täysin signaalia läpäisemätön, vaan esimerkiksi jo yksittäisen puun oksisto voi aiheuttaa ongelmia (kuva 13). Erityisesti tuulisella säällä oksien ja lehtien heiluessa signaali saattaa katkeilla jatkuvasti, jolloin mittaamisesta tulee mahdotonta. Vastaanotin joutuu tällaisessa tilanteessa ratkaisemaan jatkuvasti uusia alkutuntemattomia, eikä näin pysty pysyvän alustuksen tekoon. Esteen vaikutuksesta kärsivää satelliittisignaalia tai satelliittisignaaleja ei tällaisessa tilanteessa yleensä pystytä mittauksissa käyttämään. [2, s. 23.]

Mittaukset pyritään suorittamaan olosuhteiltaan satelliittimittauksiin edullisissa paikoissa, joissa ei ole esteitä 20 asteen korkeuskulman yläpuolella. Tämä ei kuitenkaan ole metsäisessä maastossa aina helppoa, saati rakennusten keskellä kaupunkialueilla. Useimmiten mittauksissa käytetään katkaisukulmana kymmentä tai viittätoista astetta. [2, s. 24.]



Kuva 13. Kuva pisteeltä 0102. Jopa yksittäiset puut voivat haitata mittauksia. Oikeassa alakulmassa myös pisteestä piirretty estepiirros, joka osoittaa esteiden suunnan (piirroksessa pohjoinen ylhäällä). (Kuva Tuomas Toivonen.)

### 3.8.2 Estepiirrokset

Estepiirros tulee tehdä, kun halutaan selvittää mitattavan pisteen paras havaintoajankohta. Estepiirroksessa esitetään satelliittimittauksin mitattavan pisteen ympäristön peitteisyys sekä mahdolliset monitieheijastusten aiheuttajat. Estepiirroksen tekemiseen tarvitaan käsisuuntakehä vaakakulmien selvittämiseksi sekä kaltevuusmittari korkeuskulmien mittaamiseen. Estepiirrokseseen piirretään kaikki pisteen ympärillä olevat yli 10 asteen korkeuskulman ylittävät esteet (korkeuskulman valinta riippuu mittaustilanteesta). [33, s. 9.]

Vastaanottimen katkaisukulma valitaan yleensä sen mukaan, minkä oletetaan soveltuvan parhaiten kulloiseenkin mittaustilanteeseen. Tyypillisimmin estepiirrokseseen piirrettävät esteet johtuvat kasvillisuudesta tai rakennuksista, joiden lisäksi myös muut satelliittisignaalin etenemiseen vaikuttavat tai monitieheijastuksia mahdollisesti aiheuttavat



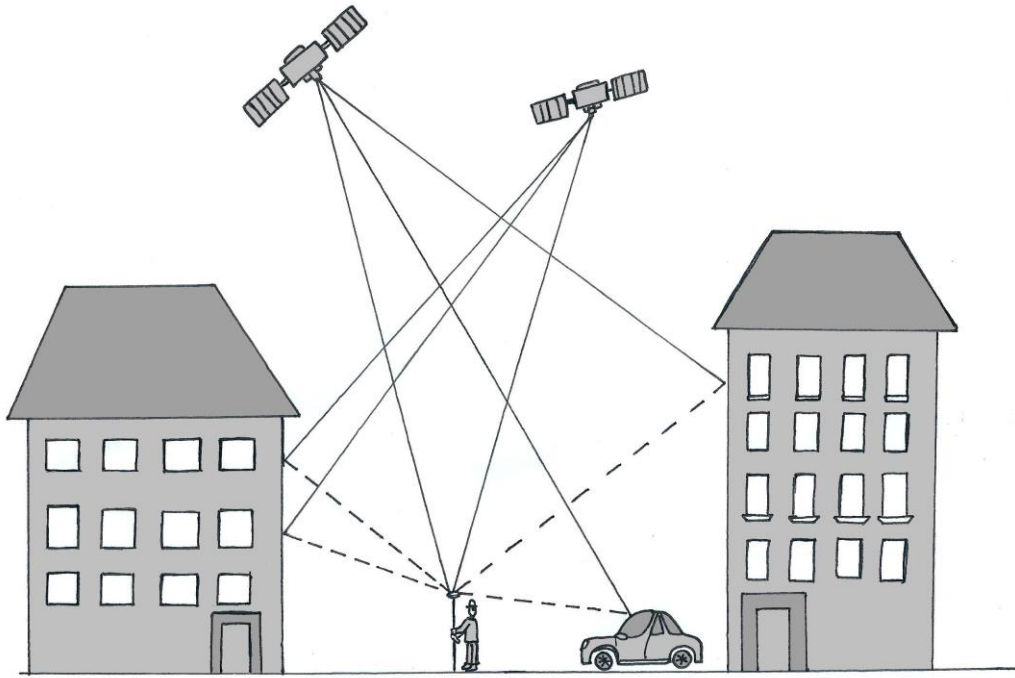
rakenteet ja pinnat tulee kuvata estepiirroksessa. Estepiirrosten tekeminen lisää mittauksista syntyviä kustannuksia, sillä niiden tekeminen ja käsittely vie runsaasti aikaa. Lisäksi estepiirroksia tulee tehdä jo ennen varsinaisia mittauksia.

Estepiirrosten tekeminen vähentää kuitenkin riskiä suorittaa mittaukset huonon satelliitigeometrian aikana, koska estepiirroksen avulla mittaustilannetta voidaan simuloida ennakolta. Simulointi tehdään tarkoitukseen suunnitelluilla erilaisilla planning-ohjelmistoilla (liite 1), joihin halutut esitiedot mitattavasta pisteestä syötetään (pisteen sijainti ja peitteisyys, suunniteltu mittausajanjakso, käytetty satelliittijärjestelmä). Planning-ohjelmistojen käyttö on selitetty seikkaperäisemmin tämän insinöörityön alaluvussa 3.9 *Mittaustoiminta ja käyttäjä*. Näin mittauksesta saadaan jo ennen niiden suorittamista varsin luotettavaa tietoa ja ne voidaan suunnitella mahdollisimman tehokkaiksi optimoimalla oikeat mittausajankohdat. Estepiirroksen tekeminen soveltuu käytettäväksi yksittäisille mitattaville pisteille. [33, s. 9; 34, s. 10.]

### 3.8.3 Monitieheijastukset

Monitieheijastuksella (multipath error) tarkoitetaan sitä, että satelliitista tuleva signaali tulee vastaanottimeen suoraviivaisen signaalin sijasta heijastuneena. Käytännössä monitieheijastumisessa signaali saapuu antenniin useampaa kuin yhtä reittiä. Mitattaessa esimerkiksi rakennusten välissä voi satelliitista tulla vastaanottimeen sellainen signaali, jota vastaanottimen ei ympäristön esteiden takia tulisi edes havaita. Kyseinen signaali on tässä tilanteessa tullut vastaanottimeen heijastuneena rakennuksesta tai muusta heijastavasta pinnasta. Tällaisesta signaalista havaittu satelliitin ja vastaanottimen väliin jäävä etäisyys on kuitenkin väärä, eikä näin ollen ole käyttökelpoinen. [2, s. 24.]

Edellä mainittua tilannetta huomattavasti yleisempi tilanne on, että vastaanottimeen saapuu signaali samasta satelliitista kahteen kertaan (kuva 14). Tällöin toinen satelliit-signaaleista on heijastuneena jostakin vastaanottimen lähellä sijaitsevasta pinnasta, kuten vedestä, rakennuksista, kulkuneuvoista tai mistä tahansa muusta heijastavasta pinnasta [2, s. 24]. Mitä matalampia mittauksissa käytetyt katkaisukulmat ovat, sitä todennäköisempää on, että osa saaduista signaaleista on monitieheijastuneita. [26, s. 137.]



Kuva 14. Monitieheijastumisessa satelliitista tuleva signaali tulee suoraviivaisen signaalin sijasta heijastuneena. Kaupungeissa heijastumisen aiheuttavat usein rakennukset ja ajoneuvot. (Kuva Tuomas Toivonen.)

Monitieheijastukset vaikuttavat enemmän koodihavaintoihin kuin vaihehavaintoihin. Vaikutus voi pahimmillaan olla yksittäiseen koodipseudoetäisyyteen (absoluuttinen paikannus) kymmeniä metrejä. Suhteellisen paikannuksen vaihehavainnossa vaikutus on maksimissaan noin viisi senttimetriä [2, s. 24]. Näistä syistä vastaanottimen/antennin paikka olisi valittava niin, ettei lähistöllä ei ole heijastavia pintoja. Laitteiden valmistajat ovat kuitenkin pyrkineet eliminoidaan maasta tulevat heijastukset antennien teknisillä ratkaisulla. Antennielementin alapuolella voi olla esimerkiksi maalevy, jonka lisäksi erilaisia rengasmaisia rakenteita kuten (choke ring) voi olla antennin yläpuolella (kuva 15). Näillä teknisillä ratkaisulla voidaan absorboida ainakin osa syntyvistä maaheijastuksista. [26, s. 138.]



Kuva 15. Leican Choke Ring GNSS -antenni. Rengasmaisella rakenteella pystytään poistamaan suurin osa horisonttitason alapuolelta tulevista heijastuksista. Choke ring-malliset antennit ovatkin muodostuneet lähes säännöksi tarkimmissa geodeettisissa mittauksissa. [26, s. 139; kuva 35.]

Kuitenkin on todettava, että kaikkea ei antennin teknisillä ratkaisuille ja rakenteella voida poistaa, sillä signaali ei kulje täysin suoraviivaista reittiä. Esimerkiksi kohdatessaan maalevyn reunan, voi signaali taipua kulman ympäri. Tämä johtuu yksinkertaisesti sähkömagneettisen säteilyn luonteesta, sillä normaali GPS-antenni on vain hieman kanta-aallon aallonpituutta suurempi [26, s. 138]. Tästä syystä vastuu monitieheijastumisesta on myös aina mittaajalla.

#### 3.8.4 Sähkömagneettiset häiriöt

Sähkömagneettisella häiriöllä voidaan tarkoittaa mitä tahansa sähkömagneettista ilmiötä, joka voi heikentää laitteen toimintaa. Sähkömagneettisia häiriöitä ovat mm. signaalin kohina, ei toivottu signaali tai muutos signaalin etenemisympäristössä. [36.]

Sähkömagneettiset kentät saattavat aiheuttaa erilaisia häiriöitä vastaanottimen signaaliin. Joissain tapauksissa jopa vastaanottimen lukitus satelliittiin saatetaan menettää sähkömagneettisesta häiriöstä (ks. määritelmä yllä) johtuen. Erilaisia sähkömagneettisia kenttiä voi syntyä esimerkiksi korkeajännitelinjoiden, GSM- tai radiolähettimien ja radio- ja TV-mastojen läheisyydessä. [2, s. 25.]

### 3.9 Mittaustoiminta ja käyttäjä

Havaitsija voi vaikuttaa itse suuresti mittausten onnistumiseen ja niissä saavutettuun tarkkuuteen. Havaitsija tekee esimerkiksi valinnan mittauspaikan ja mittausajankohdan suhteen. Kysymys on satelliittimittausten osalta lähinnä siitä, millaisen peitteisyyden alueella mittauksia suoritetaan ja millainen satelliittigeometria mittaushetkellä vallitsee. Näihin asioihin käyttäjällä on kuitenkin mahdollisuus vaikuttaa tutustumalla mittauskohteeseen ennakolta. Näin peitteiset tai muuten satelliittimittauksille haastavat alueet (monitieheijastumisten vaara suuri, alttius sähkömagneettisille häiriöille tms.) alueet voidaan valita mitattavaksi korvaavalla menetelmällä, esimerkiksi takymetrimittauksin. Luonnollisesti yksittäisiä pisteitä mitattaessa pisteistä voidaan laatia myös tarvittaessa estepiirrokset (ks. alaluku 3.8.2 *Estepiirrokset*).

Tulevaa mittaustilannetta voidaan tarvittaessa simuloida myös erilaisilla planning-ohjelmistoilla, jotka sisältävät ennusteet satelliittien tulevista lentoradoissa. Mittaaja syöttää ohjelmaan mittauspaikan tarkat tai likimääräiset koordinaatit, valitsee mittaus-ten keston ja ajankohdan, jäljentää pisteestä tekemänsä estepiirroksen (vain mitattaessa yksittäisiä pisteitä) ja valitsee mittauksissa käytetyt satelliittijärjestelmät sekä halutun katkaisukulman. Tämän jälkeen ohjelma kertoo luotettavan ennusteen satelliittien näkymisestä esimerkiksi seuraavan 24 tunnin aikana valitussa sijainnissa. Tämän lisäksi muita ohjelmasta saatavia hyödyllisiä tietoja ovat ennustetut DOP-arvot sekä satelliittien lukumäärät eri kellonaikoina. [2, s. 31.]

Lisäksi mittaajalla on mahdollisuus vaikuttaa mittauksissa käyttämänsä laitteen asetuksilla mittaustarkkuuteen esimerkiksi säätämällä käytettyä katkaisukulmaa tai havaintoaikaa. Käyttäjän mittauksissa suorittamat virheet siirtyvät usein suoraan saatuihin tuloksiin, ja näin käyttäjän rooli mittauksissa on hyvin merkittävä. Onkin tärkeää, että käytetty laitteisto testataan ja huolletaan säännöllisesti sekä sitä kohdellaan asianmukaisesti. Tällaisia toimenpiteitä ovat muun muassa laitteiden säännöllinen kalibrointi ja huoltotoimenpiteenä pakkokeskistysalustojen tarkistaminen säännöllisesti. Luonnollisesti myös valittu mittausmenetelmä tulisi sovittaa tilanteen mukaiseksi. [2, s. 31.]

Käyttäjällä on myös mahdollisuus vaikuttaa mittauksissa käytettyihin mittausparametreihin. Käyttäjällä on esimerkiksi mahdollisuus määrittää, millaiset DOP-arvot hyväksytään vielä mittauksissa. Näillä käyttäjän päätöksillä voi olla suuri vaikutus mittausten

onnistumiseen, ja niillä voidaan minimoida turhien virheiden määrää havainnoissa. [2, s. 31.]

### 3.9.1 Havaintojen määrä ja toistot

Väärin ratkaisujen selvittämiseen ei ole olemassa montaa keinoa. Tämä johtuu käytännössä RTK- ja verkko-RTK-mittausten piikkimittausluonteesta, eli käytännössä vastaanotin laskee vain yhtä vektoria, jonka vuoksi se ei voi laskea luotettavia tarkkuusarvioita. Näin varsinaista tarkkuuskontrollia ei ole, ja virheet tulevat suoraan lopputulokseen. Virheiden mahdollisuutta voidaan kuitenkin pienentää tekemällä toistomittauksia samalla pisteellä tai suorittamalla ajoittain kontrollimittauksia tunnetulla pisteellä. [2, s. 32.]

Toistomittaukset pyritään suorittamaan erilaisen satelliittigeometrian aikana ja aina eri alustuksella, jolloin varmistutaan siitä, että saatu ratkaisu on oikea. Valitettavasti käytäntö on osoittanut, että lyhyellä aikavälillä on mahdollista saada samalla tavalla virheellinen tulos, kuten todetaan Geodeettisen laitoksen ”*Virtuaali-RTK (VRS™) tutkimuksessa*”. Tällaisessa tilanteessa satelliittigeometrian ja ilmakehän on pysyttävä varsin vakioina, ja eri ratkaisut on korreloitu näiden muuttujien suhteen, vaikka kokonaislukuratkaisut onkin ratkaistu toisistaan riippumattomasti. Käytännössä on mahdollista, että vastaanotin ratkaisisi eri alustukset samalla tavoin väärin, jolloin virhe jäisi näin huomaamatta. [2, s. 32.]

### 3.9.2 Antennityyppi ja antennikorkeuden mittaaminen

Erilaisilla GNSS-antenneilla on erilaiset sähköiset ominaisuudet. Näitä kuvataan vakio-  
korkeuseroilla (offset) antennin referenssipisteestä. Etenkin korkeusero on laskennassa huomioitava, koska antennin sähköinen keskipiste ja piste, johon korkeus mitataan, eivät ole täsmälleen samat. Jos korjauseroa ei korjattaisi, ero siirtyisi suoraan korkeuden virheenä tuloksiin. Korkeuserokorjaus huomioidaan valitsemalla vastaanottimen valikosta oikea antennityyppi ja kohta, mihin antennikorkeus mitataan. Tämän jälkeen vastaanotin huomioi tarvittavan korjauksen laskennassaan. [2, s. 31.]

Jokaiseen vastaanotintyyppiin kuuluu yleensä oma antennityyppi, jolloin eri laitemerkkien antennit ja vastaanottimet eivät ole yleensä keskenään yhteensopivia [25, s. 18].

RTK-mittauksissa käytetään lähes poikkeuksetta kartoitussauvaa, jolloin antennikorkeuden mittaus ei muodostu vaikeaksi, kunhan oikea mittauskohta on valittu laitteen asetuksista. Tämän jälkeen oikea antennikorkeus on kartoitussauvan kyljestä löytyvän mitta-asteikon osoittama korkeus, edellyttäen että käytetään saman valmistajan antennia ja kartoitussauvaa.

### 3.9.3 Koordinaattijärjestelmät

GNSS-laskenta, oli se reaaliaikaista tai jälkilaskentaa, tulisi suorittaa satelliittiratojen määrittämässä koordinaatistossa. Tämän vuoksi käytettäessä satelliittien lähettämiä ratoja olisi koordinaatistona käytettävä WGS84:ää ja tarkkoja ratoja käytettäessä ITRF-n:ää. Havainnot tulisivat muuntaa haluttuun paikalliseen koordinaatistoon vasta niiden laskennan jälkeen. ITRF-koordinaatisto on tarkimpia globaaleista koordinaatistoista, mutta sen koordinaatit ovat riippuvaisia ajasta, jolloin koordinaatisto huomioi mm. mannerlaattojen liikkeitä. Tämän vuoksi ITRF-koordinaatteja ei voi käyttää käytännön mittauksiin. [2, s. 33.]

Suomessa ei ole tarkkoja WGS84-koordinaatteja. Kuitenkin WGS84-järjestelmän virallisen määritelmän mukaan *"kansallisia tai alueellisia tiukasti ITRF-koordinaatistoihin perustuvia koordinaatistoja voidaan myös pitää identtisinä WGS84:lle"* [2, s. 33; muokattu 37]. Suomen ETRS89-koordinaattijärjestelmän realisaatio EUREF-FIN perustuu ITRF-koordinaatistoon. Tämä tarkoittaa sitä, että käytännön mittauksissa on mahdollista käyttää EUREF-FIN-koordinaatteja aivan kuin ne olisivat WGS84-koordinaatteja. Kaavoitusmittausohjeet 2003 määrittelee valtakunnallisiksi koordinaattijärjestelmiksi Suomessa KKJ:n ja ETRS89:n, jonka realisaatio EUREF-FIN siis on. [2, s. 33.]

### WGS84

World Geodetic System 1984 eli WGS84-koordinaattijärjestelmä on tärkeä, koska se on GPS-järjestelmän koordinaattijärjestelmä. Sitä ja siihen läheisessä suhteessa olevia järjestelmiä käytetään joka puolella maailmaa, mikä tekee siitä globaalin koordinaattijärjestelmän. WGS84 on geosentrinen suorakulmainen koordinaattijärjestelmä. Geosentrisessä järjestelmässä origo sijaitsee Maan painopisteessä. Koordinaattiakselien määrittely vastaa ellipsoidikeskisen suorakulmaisen koordinaatiston määrittelyä, kuitenkin pienin tarkennuksin. [1, s. 147.]

WGS84-järjestelmässä paikka voidaan esittää maantieteellisten koordinaattien tai suorakulmaisten karttakoordinaattien avulla. Jos käytössä ovat projektiotasolla määritellyt suorakulmaiset karttakoordinaatit, ne on yleensä määritetty UTM-projektiossa. [1, s. 147.]

## ETRS89

European Terrestrial Reference System 1989 eli ETRS89 on Suomessa yleistynyt koordinaattijärjestelmä. ETRS89-järjestelmän suomalaista realisaatiota kutsutaan EU-REF-FIN-järjestelmäksi. Järjestelmän vertausellipsoidi on GRS80. [1, s. 148.]

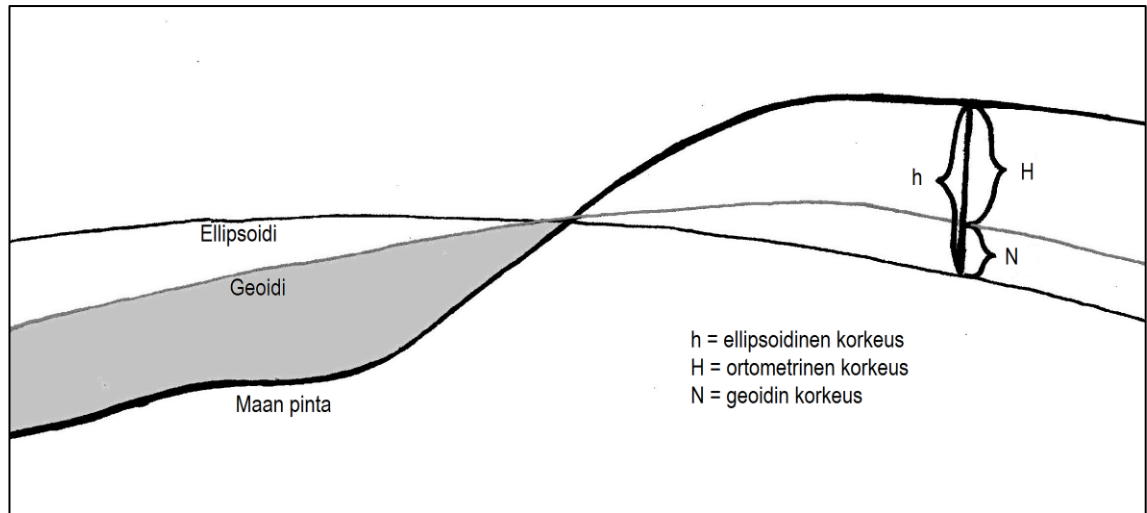
EUREF89-järjestelmä on kiinnitetty Euraasian mannerlaattaan, jotta järjestelmän koordinaatit eivät muuttuisi ajan mukana. Järjestelmä on yhteneväinen ITRF-järjestelmän kanssa epookissa 1989.0. Suomessa toimittaessa valtakunnallisissa kartastotöissä tai paikkatietopalveluissa suositellaan ETRS89-järjestelmän kanssa käytettäväksi UTM-projektioon perustuvaa suorakulmaista projektiota. Universal Transverse Mercator eli UTM-projektio on oikeakulmainen, poikittaisasentoinen ja leikkaava lieriöprojektio. [1, s. 148.]

Suomessa käytettävä ETRS-TM35FIN-projektio poikkeaa muista UTM-projektioista kaistan leveyden osalta, koska koko maa kuvataan yhdessä kaistassa, jonka keskimeridiaani on  $27^\circ$  itäistä pituutta. Projektion nimessä Transverse Mercator eli TM tarkoittaa poikittaisasentoista Mercatorin projektiota, 35 on standardin mukaisen UTM-projektion kaistan numero ja FIN viestii, että suomalainen projektio poikkeaa standardin mukaisesta projektioista. [1, s. 149.]

## Ellipsoidinen korkeus

Satelliittipaikannuksessa tuotetaan ellipsoidisia korkeuksia WGS84-järjestelmän vertausellipsoidin suhteen. Ellipsoidinen korkeus on matemaattiseen pintaan perustuva geometrinen suure (kuva 16). Ortometrinen korkeus perustuu vastaavasti fysikaaliseen pintaan eikä näin ole geometrinen suure. Ellipsoidinen korkeus on mahdollista muuntaa ortometriseksi korkeudeksi, jos tiedetään geoidin korkeudet. Ellipsoidisten ja ortometristen korkeuksien välillä ei ole täsmällistä matemaattista suhdetta, vaan korkeuksien muuntaminen perustuu vain käytännön mittauksiin. Jotta ellipsoidiset korkeudet voidaan muuntaa ortometrisiksi korkeuksiksi, on tunnettava geoidin korkeudet. Geoidimalli

riittää yleisiin muunnoksiin, mutta parempaa tarkkuutta vaadittaessa korkeuksien muunnos pitää määrittää paikallisin mittauksin runkopisteiden suhteen. [1, s. 152.]



Kuva 16. Ellipsoidinen ja ortometrinen korkeus sekä geoidin korkeus. (Kuva Tuomas Toivonen.)

## 4 Tutkimusmittaukset

### 4.1 Valmistelut

Mittausten valmistelutyössä tuli huomioida useita asioita. Ennen mitausten aloittamista oli laadittava mitaussuunnitelma (liite 2). Mittaussuunnitelmassa kerrottiin tutkimusmittausten lähtökohta ja tutkimusmittauksille asetetut tavoitteet. Tämän lisäksi suunnitelmassa esiteltiin pisteiden ja mittaustavan valinta, tutkimuksen raportointimenetelmät ja laadunvalvonta sekä kerrottiin ohjeellinen aikataulu.

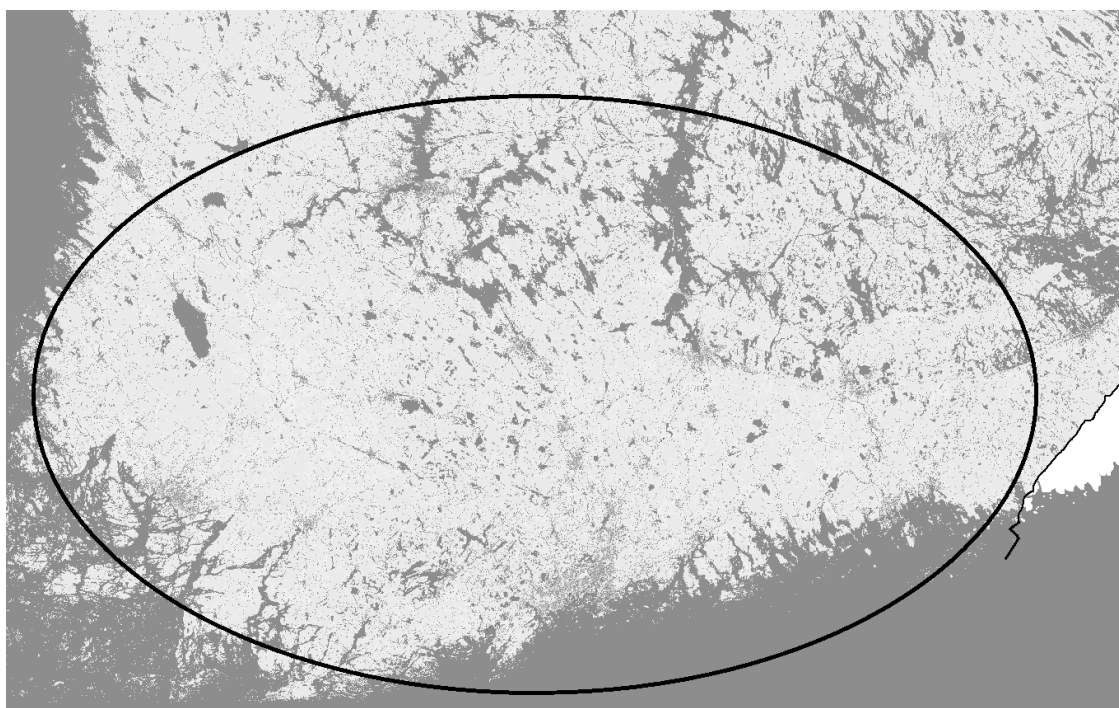
Mittaussuunnitelma esiteltiin kaikille tutkimuksen osapuolilla. Kaikilla tutkimukseen RTK-vastaanottimensa antaneilla yrityksillä oli näin mahdollisuus vaikuttaa osaltaan mitausten suorittamiseen. Mittaussuunnitelmaan tehtiin myös pieniä tarkennuksia heidän vaatimuksiensa tai toiveidensa perusteella. Joitakin muutoksia tuli muun muassa mitaustapaan, jotta siitä saatiin luotettavampi (kartoitussauvan ja statiivin käyttö korvattiin jalustan käytöllä). Tämän lisäksi mitaussuunnitelman tekoon ja mitaustapaan saatiin hyödyllisiä vinkkejä Geodeettiselta laitokselta.



Varsinaisia mittauksia ei kuitenkaan toteutettu alkuperäisen mittaussuunnitelman mukaisesti, sillä VRSnet.fi RTK-tukiasemaverkkoa ei valitettavasti päästy tutkimuksessa laaditun aikataulun puitteissa testaamaan ja lisäksi Trimblen laitetta ei suunnitelmasta poikkeavasti saatu tutkimuskäyttöön.

#### 4.1.1 Pisteiden valinta

Pisteiden valinta oli tärkeä osa tutkimusmittauksia. Mittauksissa haluttiin käyttää mahdollisimman laadukkaita kolmiopisteitä, jotta mittausten testipisteistö olisi mahdollisimman luotettava ja virheetön. Alun perin testipisteiksi valittiin tutkimusalueelta (kuva 17) yhteensä 56 ensimmäisen luokan kolmiopistettä (ETRS89-määritetty), joiden etäisyydet molempien käytettyjen RTK-tukiasemaverkkojen tukiasemiin olivat likimäärin yhtä pitkät.



Kuva 17. Mittausten suorittamiseen valittu alue. Mittausalue valittiin niin, että pisteen etäisyys sai olla enintään 200 km Helsingistä, mikä oli vielä mahdollista mittaamiseen varatun aikataulun puitteissa. [muokattu 38]

Pisteiden likimäärin yhtä pitkillä etäisyyksillä eri tukiasemaverkkojen tukiasemiin pyrittiin minimoimaan mitattavan pisteen ja tukiaseman välisen etäisyyden vaikutus saatuun mittaustulokseen eri verkkojen välillä. Luonnollisesti pisteiden etäisyydet eri verkko-RTK-palveluntarjoajien tukiasemiin eivät ole yhdenkään pisteen kohdalla täsmälleen

samat, koska palveluntarjoajien tukiasemat sijaitsevat erilaisista verkkoratkaisuista ja hieman poikkeavasta tukiasematiheydestä johtuen eri paikoissa. Tukiasemien etäisyydet valittuihin pisteisiin ovat kuitenkin mahdollisimman lähellä toisiaan, jotta selvää hyötyä pisteen toiselle verkolle edullisemmasta sijainnista ei kummallekaan tukiasemaverkolle synny.

Vaikka pisteiden valinta toteutettiin alkuperäisen suunnitelman mukaisesti niin, että mitattavat pisteet olisivat olleet optimaalisia molemmille RTK-verkkoratkaisuille, ei järjestelyä olisi lopulta tarvinnut toteuttaa, sillä VRSnet.fi-tukiasemaverkkoa ei valitettavasti päästy mittauksissa testaamaan, kuten luvussa 4.1 *Valmistelut* jo aikaisemmin todettiin. Kuitenkin mittausten valmisteluvaiheessa molemmat tukiasemaverkot olivat vielä mukana tutkimuksessa, joten suunnitelmat tehtiin senhetkisen tilanteen mukaan.

Mitattavien pisteiden valinnassa pyrittiin ottamaan huomioon lisäksi pisteiden stabiiliuden vaatimukset, jolloin ne tuli olla rakennettu liikkumattomiin rakenteisiin, kuten suuriin maakiviin tai kallioon (kuva 18). Käytännössä kaikki tutkitut ensimmäisen luokan kolmiopisteet oli kuitenkin rakennettu liikkumattomiin rakenteisiin, ja yhtään pistettä ei tarvinnut jättää pois soveltumattoman rakennusalan vuoksi.



Kuva 18. Esimerkki luotettavasta pisteen perustamistavasta suuressa liikkumattomassa kalliossa. Pisteellä lisäksi selkeä keskusmerkki. (Kuva Tuomas Toivonen.)

Pisteiden etsinnässä käytettiin hyödyksi Geodeettisen laitoksen julkaisua ”*EUREF-FIN-koordinaatisto ja EUREF-pistetihennykset*” (tiedote 24), josta tutkimusalueen ensimmäisen luokan EUREF-FIN-pisteet haettiin. Tämän jälkeen valittujen pisteiden tarkemmat tiedot haettiin Maanmittauslaitoksen ylläpitämästä Ammattilaisen karttapaikasta, josta tulostettiin myös kaikista pisteistä pistekortit. Tutkimuksessa pisteistä käytetyt numerot ovat Geodeettisen laitoksen numeroinnin mukaisia.

#### 4.1.2 Pisteiden maastoetsinnät ja sopivien pisteiden valinta

Ennen varsinaisia maastokatselmuksia oli pisteiden etsintä aikataulutettava ja käytettävät ajoreitit suunniteltava. Ajoreittien suunnittelussa pyrittiin suurten teiden käyttöön ja mahdollisimman taloudelliseen siirtymiseen pisteeltä toiselle. Suunnittelussa apuna käytettiin Google Maps -karttapalvelua, jonka avulla päivittäin ajettavat reitit suunniteltiin. Lisäksi matka-aikojen pituudet optimoitiin palvelulla niin, että jokaisena päivänä maastoetsinnät kestivät likimäärin yhtä kauan.

Pisteiden etsintä maastosta suoritettiin viiden vuorokauden aikana lokakuussa. Suoriteuissa etsinnöissä löydettiin esikarsituista 56 pisteestä yhteensä 46. Kaikkia valittuja pisteitä ei lopulta edes etsitty, koska ne sijaitsivat joko luvanvaraisella alueella (Puolus-

tusvoimien harjoitusalueet), olivat satelliittimittauksiin soveltumattomia (todettiin piste-korteista) tai kyseiseltä alueelta huomattiin olevan jo tarpeeksi pisteitä. Kaikki löydetyt pisteet valokuvattiin ja niistä piirrettiin estepiirrosluonnokset myöhempää tarkastelua varten.

Maastokatselmuksen jälkeen pisteiden määrää karsittiin vielä lähes puolella ja mittauksiin valittiin valokuvien ja pisteistä puhtaaksi piirrettyjen estepiirrosten perusteella 27 sopivinta (kuva 19). Valinnassa painotettiin pisteiden mitattavuuden vaatimuksia. Pisteellä tuli olla selkeä keskusmerkki, sekä jalustan (kolmijalka) pystyttämisen oli oltava mahdollista ilman erityisjärjestelyjä. Erityisjärjestelyinä pidettiin puuston kaatoa tai muuta pisteen mittaamiseksi vaadittavaa välttämätöntä toimenpidettä, joka olisi tullut suorittaa pisteen mittaamiseksi.

Pisteiden valinnassa pyrittiin lisäksi otannan monipuolisuuteen myös pisteiden peitteisyyksien osalta. Kuitenkin myös mittausolosuhteen haluttiin olevan turvallinen, joten liukkailla tai jyrkillä kallioilla sijaitsevia pisteitä ei valinnassa hyväksytty. Lisäksi sellaiset pisteet, joissa riski monitieheijastuksille oli suuri, jätettiin valitsematta. Pisteistä tehtyjen estepiirrosten perusteella pisteet luokiteltiin kolmeen peitteisyysluokkaan: avoin, vähäpeitteinen ja peitteinen. Kaikista luokista pyrittiin valitsemaan yhtä monta pistettä, jos se oli mahdollista.



Kuva 19. Mittauksiin valitut ensimmäisen luokan kolmiopisteet. Pisteitä pyrittiin valitsemaan tasaisesti koko mittausalueelta (ks. kuva 17). [muokattu 38]

#### 4.1.3 Pisteiden laatu ja koordinaattijärjestelmä

Kaikki mittauksissa käytetyt pisteet (27 kpl) olivat Geodeettisen laitoksen vuosina 1996–1997 mittaamia ensimmäisen luokan kolmiopisteitä (ETRS89), joille oli mitattu ellipsoidiset korkeudet (GRS80). Tasokoordinaattien mittaamisessa päädyttiin käyttämään ETRS89-koordinaatteja, koska ne ovat toinen Suomen valtakunnallisista koordinaattijärjestelmistä ja koska ne palvelevat ITRF-koordinaatteja paremmin käytännön mittauksia. [2, s. 33].

Korkeuden mittaamisessa päädyttiin ellipsoidisten korkeuksien käyttämiseen. Tämä oli perusteltua, sillä käytettäessä ellipsoidisia korkeuksia geoidimallin tarkkuudella ei ole vaikutusta saatuun mittaustulokseen (vrt. ortometrinen korkeus). Ammatillaisen kartta-aikeista saatuja Geodeettisen laitoksen pisteille mittaamia koordinaatteja (pisteiden koordinaattitiedot päivitetty mittaussijainkohdan jälkeen) käytettiin tutkimuksessa referenssikoordinaatteina, joihin insinööriyön mittauksissa saatuja tuloksia verrattiin. Kaikki mitatut pisteet olivat liikkumattomissa alustoissa joko suurissa maakivissä tai kalliossa. Kaikissa mitatuissa pisteissä oli selkeä keskusmerkki.

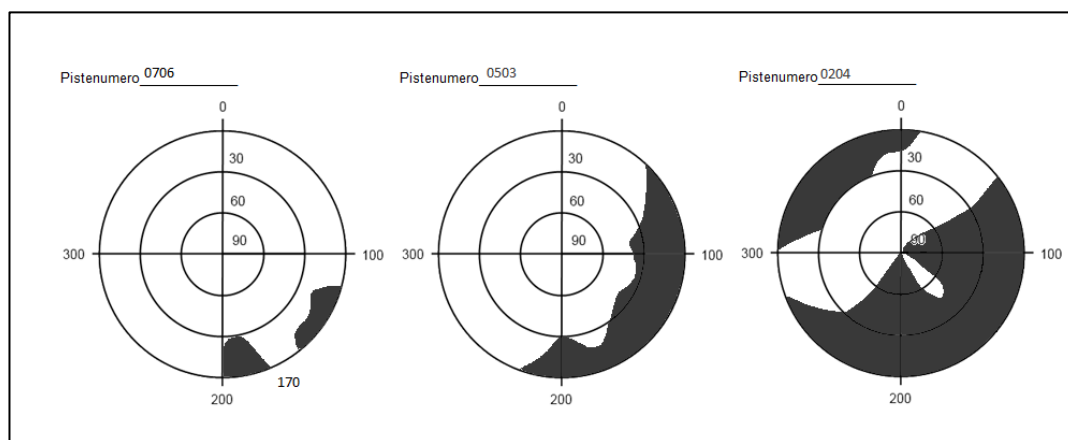
#### 4.1.4 Mitattavuus ja stabiilius

Mitattavan pisteen tuli sijaita sellaisessa paikassa, jossa sen käyttäminen mittaamiseen oli mahdollista normaalein satelliittimittauksissa käytettävien mittausten menetelmin. Koska mittaukset haluttiin suorittaa jalustalla, oli kolmijalan pystyttäminen pisteelle oltava mahdollista vaivattomasti ilman jo aiemmin mainittuja erikoisjärjestelyjä. Lisäksi pisteiden perustamistavan tuli olla sellainen, että mitattuihin koordinaatteihin voitiin luottaa myös mittaushetkellä. Pisteiden tuli olla perustettu peruskallioon, isoihin stabiileihin maakiiviin tai muutoin liikkumattomaan alustaan. [2, s. 35.] Perustamistavan luotettavuus todennettiin kiintopisterekisteritietojen lisäksi maastokatselmuksessa.

#### 4.1.5 Peitteisyys

Mitattuja pisteitä oli yhteensä 27 kappaletta. Pisteiden peitteisyydet määriteltiin maastokatselmuksissa, jolloin niistä piirrettiin estepiirrosluonnokset. Myöhemmin luonnokset piirrettiin myös puhtaaksi jatkokäsittelyn ja tarkastelun helpottamiseksi. Alkuperäiset estepiirroset piirrettiin noin 160 cm:n korkeudelta pisteen yläpuolelta, joka oli suunniteltu antennikorkeus mittauksissa.

Pisteet jaettiin kolmeen luokkaan (kuva 20) pisteestä tehdyn estepiirroksen ja sen perusteella arvioidun peitteisyyden mukaan. Arviointia ei voitu perustaa yksin estepiirroksista laskettuihin pisteen kokonaispeitteisyyttä kuvaaviin prosenttiosuuksiin, sillä siinä tapauksessa peitteen laadulla tai suunnalla ei olisi ollut merkitystä lopputulokseen, vaan kaikki esteet olisivat olleet sataprosenttisesti läpäisemättömiä ja samanarvoisia, mikä ei luonnollisesti ole realismia maastossa. Arvioinnissa hyödynnettiin osin siksi myös pisteistä otettuja valokuvia, joista piirretyn esteen laatua ja todellista peittävyttä voitiin paremmin arvioida (liite 3). Pisteiden jako eri peitteisyysluokkiin tehtiinkin siten perustuen omaan harkintaan ja tulkintaan enemmän kuin pelkkiin prosenttiosuuksiin.



Kuva 20. Esimerkkejä estepiirrosten luokittelusta peitteisyyden mukaan. Vasemmalla avoin piste, keskellä vähäpeitteinen ja oikealla peitteinen piste. (Kuva Tuomas Toivonen.)

Pisteen peitteisyyttä kuvaavat luokat olivat avoin, vähäpeitteinen ja peitteinen. Avomiksi pisteiksi valittiin kaikki ne pisteet, joissa esteitä ei ollut lainkaan tai joissa oli vain alhaisilla korkeuskulmilla enintään muutamassa ilmansuunnassa. Vähäpeitteisissä pisteissä esteitä oli selvästi avoimia pisteitä laajemmalla alueella ja esteet ulottuivat korkeammalle. Peitteisissä pisteissä esteitä oli paljon kaikissa ilmansuunnissa tai esteet olivat laadultaan signaalia läpäisemättömiä ja ulottuivat hyvin korkeille korkeuskulmille.

Pisteiden peitteisyydet muuttuivat hieman maastokatselmusten ja mittausviikkojen välillä (viimeisetkin lehdet putosivat ja lunta satoi). Muuttuneista olosuhteista huolimatta jo valittuihin luokituksiin ei kuitenkaan tehty muutoksia, koska niiden katsottiin vastaavan edelleen tarpeeksi hyvin vallitsevaa tilannetta. Taulukkoon 2 on listattu pisteiden luokittelu peitteisyyden mukaan.

Taulukko 2. Pisteiden luokittelu niiden peitteisyyden perusteella.

Peitteisyysluokka:	Pistenumero:											
Avoin piste	G36	G602	0105	0202	0203	0304	0402	0505	0601	0706	0707	5024
Vähäpeitteinen piste	0102	0503	0603	0604	1001	1101						
Peitteinen piste	0104	0204	0207	0307	0502	0606	1701	1705	2006			

#### 4.1.6 Monitieheijastus

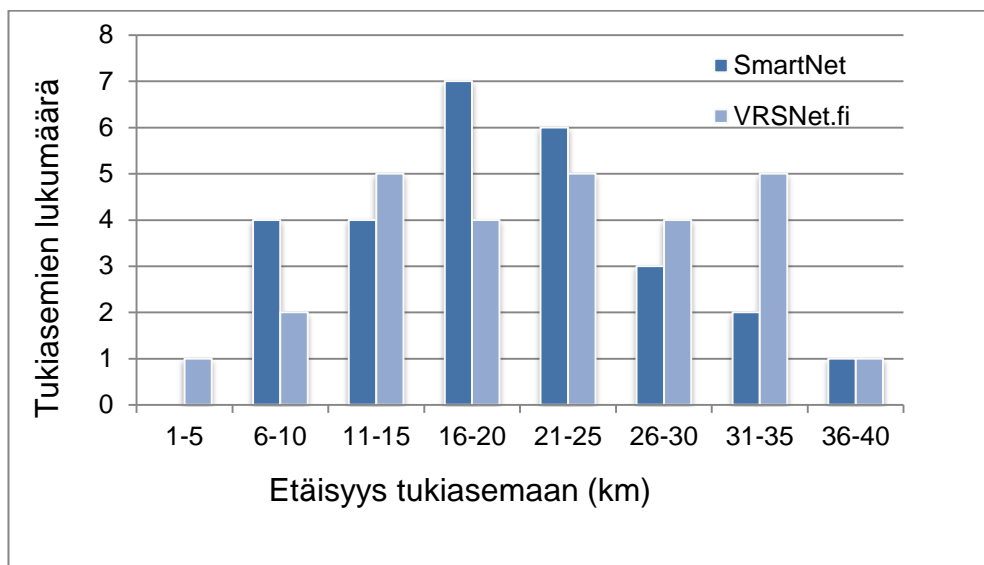
Kuten edellä luvussa 4.1.2 *Pisteiden maastoetsinnät ja sopivien pisteiden valinta* todettiin, pisteet pyrittiin valitsemaan niin, että monitieheijastumisen mahdollisuus oli mahdollisimman pieni. Monitieheijastumisten aiheuttamat virheet haluttiin tutkimuksessa välttää, koska niiden tutkiminen ja paikallistaminen olisi ollut hyvin haastavaa ja virhe liittyisi lähinnä eri valmistajien käyttämien erilaisten antennien ominaisuuksiin, joita ei tutkimuksessa kuitenkaan pyritty vertailemaan. Tästä syystä ongelmasta pyrittiin pääsemään eroon minimoimalla monitieheijastusten mahdollinen esiintyvyys tuloksissa. Lisäksi katkaisukulmana käytettiin varmuuden vuoksi varsin korkeaa 15 astetta, koska monitieheijastumisen vaara on aina sitä suurempi, mitä alemmaa signaali vastaanottiin tuleen. Mittausten aikana autoa ei myöskään pysäköity lähelle mittausta paikkaa, jotta vältettiin turhat heijastukset.

Kaikkia mahdollisia monitieheijastuksia ei voida tietenkään täysin poistaa edes mittausolosuhteiden valinnalla, eikä laiteteknisesti, joten vaara niiden vaikutusten eksymiseen on myös tässä tutkimuksessa [26, s. 139]. Tutkimuksessa monitieheijastumista ei tarkasteltu työn tuloksissa.

#### 4.1.7 Etäisyys tukiasemiin/lähimpään tukiasemaan

Pisteet valittiin niin, että niiden etäisyydet tukiasemiin olivat tasapuoliset molempien RTK-tukiasemaverkkojen osalta (kuva 21). Pisteiden keskimääräinen etäisyys lähimpään tukiasemaan oli SmartNet-verkossa 20,2 km ja VRSnet.fi-verkossa 22,1 km, joten lähimpien tukiasemien keskimääräiset etäisyydet olivat hyvin lähellä toisiaan. VRS-tekniikassa lähimmän tukiaseman etäisyydellä mitattavaan pisteeseen on todettu olevan vain hyvin vähän vaikutusta mittaustarkkuuteen ja alustusaikaan. Tämä on osoitet-

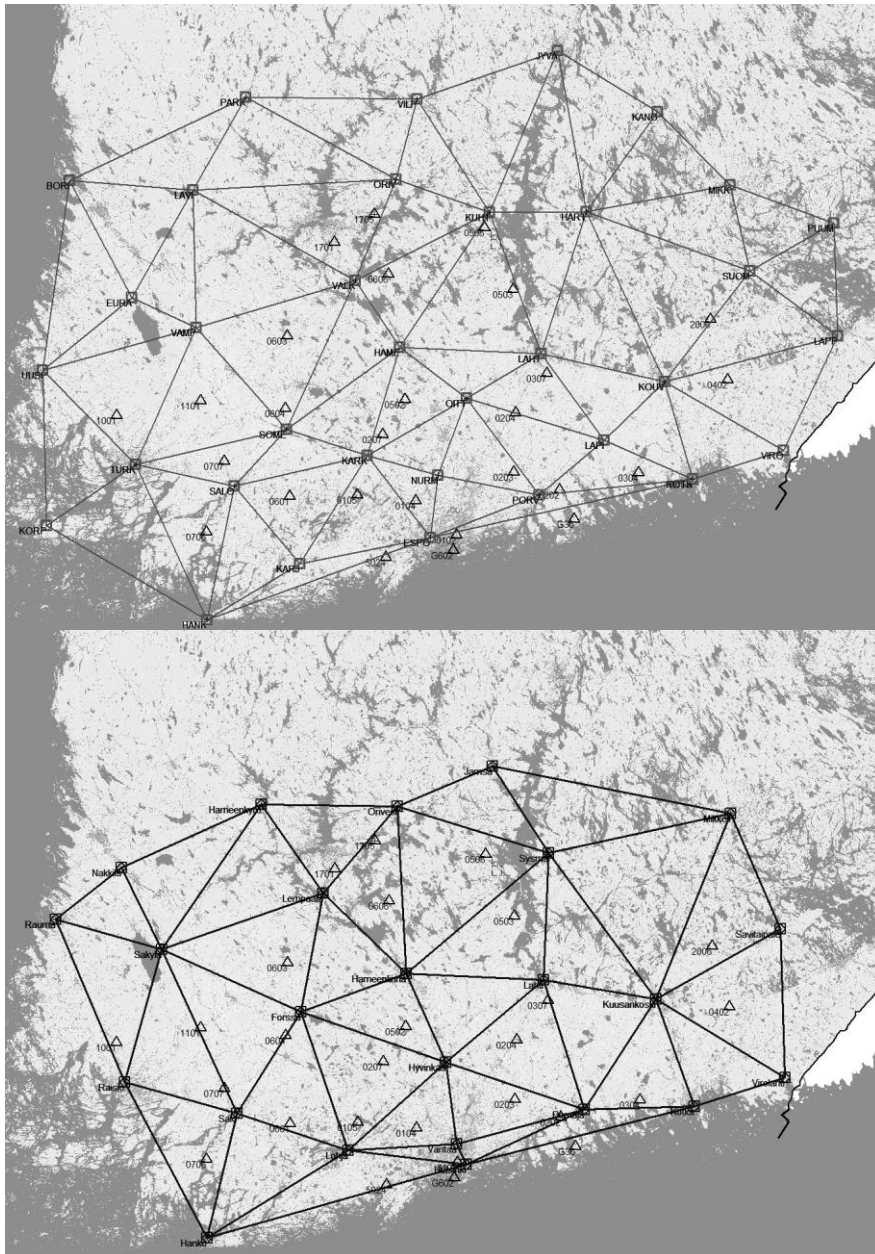
tu muun muassa Geodeettisen laitoksen ”*Virtuaali-RTK (VRS™) tutkimuksessa*”. Toisaalta verkon ulkopuolella mitattaessa etäisyyden kasvaessa alustusajat pitenevät ja tarkkuus heikkenee. [2, s. 46.]



Kuva 21. Mitattujen pisteiden etäisyydet lähimpään tukiasemaan.

SmartNetin MAX-korjausten osalta vastaavaa tutkimustietoa tukiaseman etäisyyden vaikutuksesta mittaustarkkuuteen tai alustusaikaan ei tutkimuksen teon aikaan vielä ollut, joten pisteiden valinnassa luontevinta oli pyrkiä yhteneviin etäisyyksiin eri verkkojen välillä tasapuolisen asetelman takaamiseksi. Kuten aiemmin insinööriyön luvuissa 4.1 *Valmistelut* ja 4.1.1 *Pisteiden valinta* todettiin, lopulta mittauksissa käytettiin vain SmartNet-tukiasemaverkkoa, joten lähimmän tukiaseman etäisyyden vaikutusta mittaustarkkuuteen ja alustusaikaan voitiin tutkia tässä tutkimuksessa vain SmartNetin MAX-korjausten osalta. Kuvassa 22 on esitetty VRSnet.fi- ja SmartNet-tukiasemaverkkojen tukiasemat tutkimusalueella.





Kuva 22. RTK-tukiasemaverkkojen tukiasemat mittausalueella ja niiden sijainti suhteessa mitattaviin pisteisiin. SmartNetin (yllä) tukiasemia on esitetynä kartalla laajemmalta alueelta kuin VRSnet.fi:n, mistä johtuen tukiasemia on kartalla huomattavasti enemmän. Kolmioinnilla pyritään ainoastaan havainnollistamaan tukiasemien verkkomaista rakennetta, ei kuvaamaan verkkojen toimintaa. [muokattu 38]

#### 4.1.8 Tavoitettavuus

Pisteiden tavoitettavuus ei ollut ensisijaisena arviointikriteerinä pisteiden valinnassa. Kuitenkin, koska alkuperäinen laadullisesti hyvien pisteiden aineisto oli kooltaan suuri, oli pisteitä mahdollista valita myös paremman tavoitettavuuden perusteella, jos pisteet muuten olivat tasalaatuisia.

Mitatut pisteet valittiin mahdollisimman hyvien liikenneyhteyksien varrelta, jos se oli mahdollista. Kuitenkin jos piste muuten oli laadullisesti ja olosuhteiltaan hyvä, tavoitettavuus oli toissijainen. Mittausten suoritusajankohta (helmikuu) asetti kuitenkin tiettyjä vaatimuksia pisteiden tavoitettavuudelle, jolloin kaikkein huonokuntoisimpien teiden varrella sijaitsevat pisteet jätettiin mittausten ulkopuolelle. Teiden kuntoa mittausten aikana ei voitu maastokatselmuksessa luotettavasti arvioida, koska olosuhteet olivat hyvin erilaiset ja maastokatselmusten aikaan ei vielä tiedetty mittausten tarkkaa ajankohtaa.

#### 4.1.9 Havainnot

Mittaukset haluttiin toteuttaa niin, että kaikki saadut havainnot olisivat toisistaan riippumattomia. Mittaushavainnot toteutettiin niin, että jokaista havaintoa varten suoritettiin oma itsenäinen alustus. Kaikki suoritettavat havainnot ja niiden alustukset ovat näin vertailukelpoisia toistensa kanssa. Jokaista pistettä kohden mitattiin molemmilla vastaanottimilla yhteensä 15 havaintoa, jotka mitattiin viiden havainnon sarjoissa, joista muodostui siis kolme erillistä havaintosarjaa. Ensimmäiset kaksi havaintosarjaa (10 havaintoa) tehtiin peräjälkeen samalla vastaanottimella. Ensimmäisten havaintosarjojen jälkeen käytettävä vastaanotin vaihdettiin ja seuraavat kaksi havaintosarjaa mitattiin toisella vastaanottimella.

Kun ensimmäiset kaksi havaintosarjaa oli mitattu molemmilla vastaanottimilla, vaihdettiin käytettävä vastaanotin havaintosarjat aloittaneeseen vastaanottimeen ja mitattiin sillä viimeinen havaintosarja. Tämän jälkeen vastaanotin vaihdettiin vielä kertaalleen ja mitattiin viimeinen (kolmas) havaintosarja myös toisella vastaanottimella. Vastaanottimien mittausjärjestys pisteillä määriteltiin niin, että havaintosarjan aloittava vastaanotin ei ollut koskaan sama kuin edellisellä pisteellä, jolloin molemmille vastaanottimille tulisi aloitusvuoroja yhtä paljon. Muutaman pisteen kohdalla toisella laitteella alustuksen saaminen oli kuitenkin huomattavasti helpompaa, jolloin mittaukset päädyttiin aloittamaan sillä vastaanottimella, jolla alustus saavutettiin ensimmäisenä.

Alkuperäisen suunnitelman mukaan molemmilla laitteilla suoritettujen ensimmäisten kahden havaintosarjan jälkeen oli tarkoitus pitää pieni tauko ennen viimeisiä havaintosarjoja, jotta satelliittigeometria ehtisi muuttua riittävästi sarjojen välillä ja tuloksista tulisi näin vertailukelpoisempia. Havaintosarjoihin käytetty aika oli kuitenkin hieman

oletettua pidempi, jolloin satelliittigeometrian todettiin ehtivän muuttua tarpeeksi myös samalla laitteella tehdyn toisen ja kolmannen sarjan välillä, joten tauoista luovuttiin.

Kaksi ensimmäistä havaintosarjaa suoritettiin peräkkäin samalla vastaanottimella, koska näin mittaustapahtuma nopeutui huomattavasti verrattuna tilanteeseen, jossa vastaanotin olisi pitänyt vaihtaa jokaisen sarjan välillä. Menettelyllä vähennettiin myös riskiä mittaajan aiheuttamiin virheisiin, kun kriittisiä vastaanottimen vaihtoja tuli vähemmän. Turhia vastaanottimen vaihtoja pyrittiin myös välttämään osin talvisten olosuhteiden vuoksi, sillä antennin ja kannattimen kierteiden pelättiin jäätyvän kiinni pakkasessa. Jäätymistä myös tapahtui mittausten aikana.

Kaikissa tehdyissä havainnoissa käytettiin tallennusvälinä yhtä sekuntia ja havaintoaikana 15 sekuntia, jolloin jokainen saatu mittaushavainto koostuu 15 epookista. Havaintoajan ja epookkien määrän vaikutusta mittaustarkkuuteen ei kuitenkaan tutkittu tässä insinööriyössä.

Alustuksen kesto aika määriteltiin niin, että jos alustuksen kesto ylitti avoimella tai vähäpeitteisellä pisteellä 2 minuuttia, alustus kirjattiin epäonnistuneeksi. Peitteisellä pisteellä alustukseen sai kulua aikaa 3 minuuttia, ennen kuin se kirjattiin epäonnistuneeksi. Epäonnistuneita alustuksia tilastoitiin mittausten aikana yhteensä 14 kappaletta.

## 4.2 Mittauskalusto

Tutkimukseen saatiin mukaan kahden valmistajan RTK-kalustot (kuva 23). Alkuperäisen suunnitelman mukaan tutkimuksen käytössä olisi ollut yhteensä kolmen eri valmistajan RTK-vastaanottimet. Valitettavasti Geotrim Oy:n vetäytyttyä pois tutkimuksesta ei Trimblen vastaanotinta tutkimusmittauksiin saatu ja mittaukset suoritettiin vain kahden valmistajan kalustoilla.

Laitetestissä mukana olleet laitteet olivat Leica Viva GS14 GNSS -vastaanotin ja siihen liitettävä Leica CS15 -maastotallennin, sekä Topcon HiPer SR ja sen parina Topcon Tesla -maastotietokone. Molemmat laitteistot sisälsivät lisäksi kantolaukun sekä tarvittavat akut antennille ja maastotietokoneelle.

Tämän lisäksi mittauksiin saatiin Leica Geosystems Oy:ltä puujalusta (kolmijalat), pakkokeskistysalusta optisella luodilla (Leica GDF122), kannatin kierteellä (Leica GRT146) ja korkeusmittari (Leica GZS4). Molempien laitteiden maahantuoijat hyväksyivät käytetyn mittausmenetelmän ja mittauksissa käytettävän kaluston.

Normaalitilanteessa RTK-mittauksissa käytetään lähes poikkeuksetta kartoitussauvaa. Tässä tutkimuksessa päädyttiin kuitenkin käyttämään sauvaa stabiilimpaa jalustaa (kolmijalka), jolloin mittausalustasta tuli mahdollisimman vakaa. Jalustan käytöllä pyrittiin myös välttämään kartoitussauvan mahdollisesta huojunnasta aiheutuvaa virhettä tuloksiin. Tämän lisäksi vastaanottimien sujuva vaihtaminen mittauksen välillä kartoitussauvaa heilauttamatta todettiin haasteelliseksi, joten jalustaa käyttämällä tämä virhelähde voitiin mittauksista poistaa. Jalustan käyttöä puolsivat myös molempien laitteiden maahantuojiensa edustajat.



Kuva 23. Insinööriyön mittauksissa käytetyt RTK-kalustot. Ylärivissä korkeusmittari, pakkokeskistysalusta optisella luodilla, kannatin kierteellä sekä Leican GNSS-antenni. Alhaalla Topconin antenni ja maastotietokone sekä Leican maastotietokone. (Kuva Juho Ylikoski.)

#### 4.3 Käyttökoulutus ja kaluston testaus

Laitteiden käyttökoulutus oli ensisijaisen tärkeää, jotta mittaukset pystyttiin toteuttamaan suunnitellusti. Molempiin käytettyihin RTK-kalustoihin saatiin käyttökoulutus laitteiden maahantuojien edustajilta. Käyttökoulutuksessa määritettiin laitteille oikeat asetukset. Asetukset pyrittiin asettamaan molemmilla laitteilla mahdollisimman yhteneviksi, jotta poikkeavasti määritellyt asetukset eivät vaikuttaisi saavutettuun mittaustulokseen. Laitteiden toimintaa testattiin käyttökoulutuksen yhteydessä suorittamalla muutamia testimittauksia laitteilla. Testimittauksen jälkeen tallennettu mittaustulos tarkistettiin ja tulosten oikeellisuus varmistettiin ennen kalustojen luovutusta.

Mittauksissa käytetyt vastaanottimet olivat maahantuojien itsensä testaamia. Käytetyt laitteet olivat maahantuojien uusimpia markkinoilla olevia RTK-vastaanottimia. Insinööriyön tekijät vastasivat muun mittauksissa käytetyn kaluston testauksesta.

Käyttökoulutuksen yhteydessä päätettiin myös mittaustapaan (mittaustapa kuvattuna liitteessä 4) liittyvistä asioista molempien valmistajien kanssa, kun molempien valmistajien testimittauksiin antama kalusto oli lopullisesti selvillä. Antennikorkeus sovittiin mittaavaksi kiintopisteen keskikohdasta vastaanottimen kierteiden alapintaan. Tässä apuvälineenä määritettiin käytettäväksi Leican korkeusmittaria (Leica GZS4), joka kiinnitetään antennin kannattimen (Leica GRT146) kylkeen. Antennin kannattimen kierteet olivat yhteensopivat molempien valmistajien antennien kanssa.

Kuitenkin antennikorkeuden mittauksessa tuli ottaa huomioon, että laitteille syötetyt korkeudet olivat Leican osalta samat kuin korkeusmittarilla mitatut, mutta Topconin osalta eroavat. Topconin vastaanottimen osalta mitattuun antennikorkeuteen tuli lisätä 5 mm, sillä sen antenniosan kierteet olivat 5 mm lyhyemmät kuin Leican. Vastaanotin jäi näin 5 mm Leican vastaanotinta ylemmäs, kun se kiinnitettiin antennin kannattimeen.

#### 4.4 SmartNet- ja VRSnet.fi-tukiasemaverkot

Mittaukset suoritettiin helmikuussa 2013 viikon 6 aikana SmartNet-tukiasemaverkossa. Mittauspäiviä oli yhteensä 7, jona aikana mittauksia tehtiin kaikilla valituilla 27 pisteellä. Mittausviikon aikana SmartNet-tukiasemaverkossa ei ollut käyttökatoja, ja mittaukset

saatiin suoritettua ilman suuria ongelmia. Mittauksissa käytettiin ainoastaan Leica SmartNet-tukiasemaverkon MAX-korjauksia, joten muita verkon palveluja ei testattu. VRSnet.fi-verkkoa ei valitettavasti päästy mittauksissa testaamaan, joten vertailua tukiasemaverkkojen ja eri verkkotekniikoiden välillä ei voitu tehdä.

#### 4.5 Mittausalue

Tutkimuksen mittausalue on esitetty likimääräisesti kuvassa 17, lisäksi kuvassa 19 on esitetty kaikki tutkimuksessa mitatut pisteet. Mitattavat pisteet on pyritty valitsemaan tasaisesti koko käytetyltä mittausalueelta.

### 5 Tutkimustulokset

Kaikki mittaukset suoritettiin Leican Viva GS14 GNSS- ja Topconin Hiper SR RTK-kalustoilla. Mittaukset suoritettiin EUREF-FIN-koordinaatistossa. Tuloksissa annetut tarkkuutta kuvaavat luvut ovat mittaushavaintojen poikkeamia pisteiden referenssikoordinaateista pohjoinen (N) ja itä (E). Korkeuskomponenttina käytettiin ellipsoidista korkeutta (U), jonka poikkeamat referenssiarvoon on ilmoitettu tuloksissa. Referenssikoordinaatteina käytettiin Geodeettisen laitoksen ensimmäisen luokan kolmiopisteille mitattavia koordinaatteja, jotka haettiin Maanmittauslaitoksen ylläpitämästä Ammattilaisen karttapaikasta.

Tutkimustulosten käsittelyssä esitetään SmartNet-tukiasemaverkossa MAX-korjausta käyttämällä saavutettuja tarkkuuksia ja alustusaikoja yleisesti. Puhuttaessa tässä insinööriydessä tästä lähin SmartNetistä tarkoitetaan siis ainoastaan sen MAX-korjausta; muihin palvelumuotoihin tuloksia ei tule yleistää. Lisäksi tuloksissa esitellään mittauksissa ilmenneet karkeat virheet sekä perehdytään niiden mahdollisiin aiheuttajiin. Tämän lisäksi arvioidaan myös käytettyjen vastaanottimien tarkkuutta ja pyritään selvittämään, mistä eri vastaanottimien välillä ilmenneet erot mahdollisesti johtuivat.

Mittaushavaintoja tallennettiin mittauksen aikana yhteensä 807 kappaletta (taulukointiesimerkki liite 5). Kaikki mittaushavainnot tilastoitiin havaintolomakkeisiin (liite 6), joista käyvät ilmi muun muassa mittauksen ajankohta, havaintosarja ja DOP-arvot mittauksen aikana sekä muut mittauksen aikana huomioitavat asiat.

## 5.1 Kaavat

Tutkimuksen mittauksista on laskettu tietyn havaintojoukon tai kaikkien havaintojen Root mean square (RMS) eli keskihajonta ( $\sigma$ ) referenssikoordinaattien suhteen. Keskihajonta osoittaa, kuinka paljon otoksen arvot poikkeavat keskiarvosta/odotusarvosta. Se kuvaa hyvin sitä, miten havainnot vastaavat referenssikoordinaattiarvoa sisältäen myös otoksen systemaattiset virheet. Keskihajonta osoittaa normaalijakautuneessa aineistossa sen välin, minkä sisälle mitatut arvot 68 %:n todennäköisyydellä osuvat vastaavalla tavalla toteutetuissa mittauksissa. Keskihajonta on laskettu seuraavalla kaavalla.

$$RMS = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum(x-x_0)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum(\Delta x)^2}{n}}, \text{ missä}$$

$x_0$  on tunnettu koordinaattiarvo

$x$  on havaittu koordinaattiarvo

$\Delta x$  on havainnon poikkeama referenssikoordinaateista

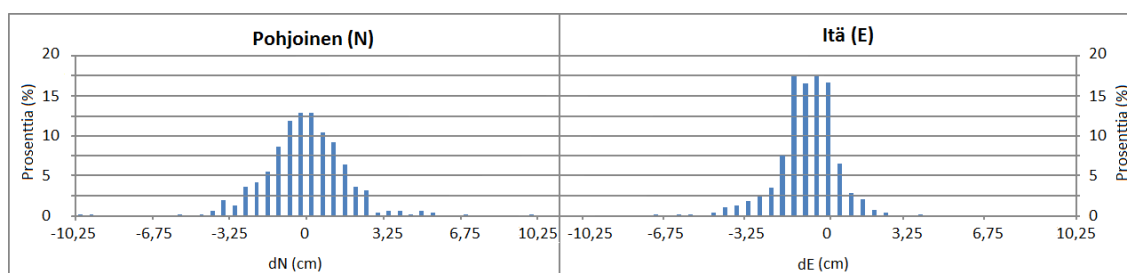
$n$  on havaintojen lukumäärä

Keskihajontojen lisäksi alustusaikojen laskennassa on käytetty keskiarvon laskentaa. Normaalijakautuneeseen havaintoaineistoon on käytetty laajennuskertoimia, joiden avulla on laskettu aineistolle kokonaisepävarmuus kertomalla sillä havaintoaineiston hajonta. Näinä arvoina on käytetty normaalijakautuneelle aineistolle arvoja 1,9600 ja 2,5758, jotka vastaavat normaalijakautuneessa aineistossa todennäköisyyksiä 95 % ja 99 %. Tutkimuksen havaintoaineisto ei kuitenkaan noudata aivan täsmällisesti normaalijakaumaa, vaan aineiston reunoilla arvot poikkeavat yksittäisten havaintojen osalta normaalijakautuneesta aineistosta. Tätä pientä poikkeamaa ei ole laskennassa kuitenkaan huomioitu, pois lukien alustusaikojen laskenta, vaan aineistoa on käsitelty kuin se olisi täysin normaalijakautunutta.

## 5.2 Mittaustarkkuus

SmartNet-tukiasemaverkon mittaustarkkuuden käsittelyssä päätettiin huomioida ainoastaan avoimilla ja vähäpeitteisillä pisteillä suoritettut mittaushavainnot. Nämä ovat kuitenkin sellaisia ympäristöjä, joissa RTK-mittauksia pääasiallisesti käytetään ja joihin ne myös parhaiten soveltuvat. Peitteisissä olosuhteissa RTK- ja verkko-RTK-mittausten suorittaminen vaikeutuu ja tulokset ovat yleensä hieman huonompia kuin nyt esitetyt. Tämä huomio voidaan todeta myös tämän insinööriyön tuloksista. Peitteisyyden vaikutusta mittaustulokseen on tarkasteltu tarkemmin tämän insinööriyön luvussa 5.8 *Peitteisyyden vaikutus mittauksiin*, jossa mittaustarkkuus on esitetty havaitun pisteen peitteisyyden suhteen. Peitteisillä pisteillä mittaaminen onnistui kuitenkin myös tutkimuksemme varsin hyvin. Havainnoista laskettujen poikkeamien hajonnan todettiin kuitenkin kasvavan peitteisyyden lisääntyessä.

Kuvassa 24 esitetään mitattujen pohjois- (N) ja itäkoordinaattien (E) poikkeamat referenssikoordinaatin arvosta. Tulokset asettuvat varsin hyvin normaalijakaumaan ja jakaumien nollakohdat osuvat kohtalaisen hyvin niiden referenssikoordinaattien kohdalle. Kuvissa ei kuitenkaan esitetä joitakin yksittäisiä suurempia poikkeamia, joita testimittauksissa esiintyi muutamia. Tämän lisäksi kaikista tämän insinööriyön mittaustuloksista on poistettu yhteensä 10 karkeaa virhettä (esitetty insinööriyön luvussa 5.3), sekä kolmen pisteen kaikki korkeushavainnot (yhteensä 45 kappaletta). Korkeushavaintojen poistoon johtaneet syyt on perusteltu luvussa 5.4 *Tuloksista poistetut korkeushavainnot*.

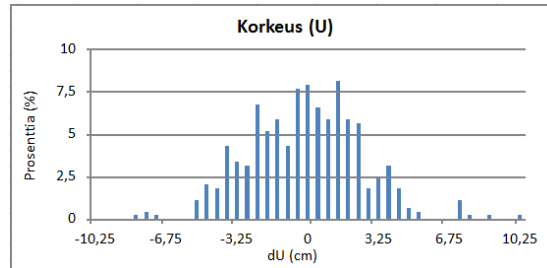


Kuva 24. Mitattujen koordinaattien poikkeamat referenssikoordinaateista pohjois- ja itäkoordinaatissa. Poikkeamat on esitetty mittauksissa käytettyjen vastaanottimien yhdistetystä havaintoaineistosta. Poikkeamat on esitetty senttimetreinä referenssikoordinaatista.

Kuvassa 25 esitetään mitattujen korkeuskoordinaattihavaintojen (U) poikkeamat referenssikoordinaattien arvoista. Tulokset ovat varsin hyvin normaalijakautuneet, mutta



korkeushavaintojen hajonta on selvästi suurempi kuin tasokoordinaattien (NE). Korkeusjakauman nollakohta osuu varsin hyvin referenssikoordinaattien kohdalle. Jakauman reunoilta on poistettu muutama suurempi yksittäinen poikkeama.



Kuva 25. Mitattujen koordinaattiarvojen poikkeamat referenssikoordinaatista korkeuskoordinaatissa. Poikkeamat ovat senttimetreinä referenssikoordinaatista.

Taulukossa 3 on esitettynä tarkkuuksille lasketut keskihajonnat (RMS) avoimille ja vähäpeitteisille pisteille millimetreinä. Tämän lisäksi jokaiselle tarkkuuden komponentille on laskettu myös arviot, joita tilastollisesti parempia tuloksia antavat 95 ja 99 prosenttia havainnoista. Nämä arvot on laskettu käyttämällä normaalijakautuneen havaintoaineiston laajennuskertoimia, jolloin tulokset ovat tarkkuuden arvioita, eivät todellisia tarkkuuden arvoja. SmartNet-tukiasemaverkossa suoritettujen mittaushavaintojen keskihajonnaksi saatiin pohjoiskoordinaatissa (N) 26 mm, itäkoordinaatissa (E) 18 mm ja korkeuskoordinaatissa (U) 42 mm.

Mittaustulokset on laskettu käyttäen sitä oletusta, että luku nolla(0) kuuluu havainnoille laskettujen poikkeamien odotusarvolle lasketulle luottamusvälille, jolloin laajennuskertoimet voidaan laskea poikkeamina odotusarvosta 0. Mittalaitteiden todellisia kalibrointikohtia taso- ja korkeuskoordinaateille ei voitu laskea tilastollisesti pienen yhdellä pisteellä suoritettujen havaintoaineiston perusteella (15 havaintoa/piste). Kaikkia suoritettuja havaintoja ei myöskään voitu käyttää kalibrointikohdan/odotusarvon laskennassa, koska verkon ei voitu luottaa tuottavan täysin homogeenisia tuloksia koko mittausalueellaan. Esimerkiksi Master-tukiaseman etäisyydellä mittaustaikanaan todettiin olevan hyvin pieni, mutta silti saadun tuloksen kannalta merkityksellinen vaikutus mittaustarkkuuteen. Näin eri tukiasemaetäisyyksillä havaittuja poikkeamia ei voitu pitää tilastollisesti vertailukelpoisina keskenään.

Taulukko 3. Mittaushavaintojen hajonta pohjois-, itä- ja korkeuskoordinaatin osalta. Poikkeamat referenssiarvoista on ilmoitettu millimetreinä.

Tarkkuus (mm)	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)
RMS	26	18	42
95 %	50	35	83
99 %	66	46	109

### 5.3 Karkeat virheet

Taulukossa 4 on esitetty mittauksissa havaitut karkeat virheet (ks. myös liite 7). Karkeat virheet havaittiin vasta mittaustulosten käsittelyn yhteydessä. Havainnot olivat selvästi virheellisiä ilman, että mittaustilanteessa olisi havaittu mitään selvästi normaalia poikkeavaa. Karkeat virheet eivät näin osoita selvää säännönmukaisuutta, jotta ne olisi voitu tunnistaa jo mittaustilanteessa.

Karkean virheen suuruudeksi määriteltiin tässä insinööriyössä mitatun arvon yli 30 cm:n poikkeama joko tason tai korkeuden referenssikoordinaattiarvoon. Karkean virheen raja olisi voitu määritellä tätäkin selvästi tiukemmaksi, esimerkiksi kolmen hajonnan päähän odotusarvosta/keskiarvosta, kuten usein on tapana. Kuitenkin tällöin mittaushavainnoista liian suuri osa olisi poistettu tulosten laskennasta, ja näin tulokset olisivat vääristyneet. Muita havaintoja ei tuloksista hylätty, vaikka myös muutamissa muissa havainnoissa yleisesti hylkäysperusteena käytetty  $3\sigma$  ylittyikin [39].

Geodeettisen laitoksen ”Virtuaali-RTK (VRS™) tutkimuksessa” [2, s. 43] esitetään, että karkeitä virheitä pystyisi suurelta osin välttämään, kun oppii tuntemaan tietyt säännönmukaisuudet ja merkit olosuhteiden ja karkeiden virheiden esiintyvyyden välillä. Tällaisiksi merkeiksi on esitetty muun muassa satelliittien vähäistä lukumäärää, huonoa satelliittigeometriaa, pitkiä alustusaikoja sekä satelliittisignaalin ja korjausdatan katkonaisuutta. Kuitenkaan tässä tutkimuksessa esiintyneiden karkeiden virheiden ilmenemisestä mittauksissa ei voida tehdä yhtä selviä huomioita, sillä tutkimusmittauksissa esille tulleet suuret poikkeamat eivät noudata selvää säännönmukaisuutta keskenään.

Tämän tutkimuksen karkeasti virheellisiä havaintoja tuli sekä nopeilla että hitailla alustuksilla. Tämän lisäksi laitteiden esittämät GDOP-arvot olivat mittaushetkellä varsin matalia (2–3,4), joten poikkeuksellisen korkeita arvoja ei havainnoissa esiintynyt, tai

ainakaan karkeasti virheelliset havainnot eivät poikenneet muista samalla pisteellä tehdyistä havainnoista. Lisäksi aikaisemmin huomattu karkeiden virheiden todennäköisyyttä lisännyt satelliittien vähäinen lukumäärä mittauksessa ei ainakaan tässä tutkimuksessa osoita suurempaa väärän ratkaisun todennäköisyyttä, sillä kaikissa väärissä ratkaisuissa oli käytössä enemmän kuin 11 satelliittia. Satelliittisignaalisissa tai korjausdatassa ei myöskään ollut poikkeuksellista määrää katkoja vääriä ratkaisuja tuottaneilla pisteillä, ja ongelmia satelliittisignaalisissa ja korjausdatan saatavuudessa ilmeni myös sellaisilla pisteillä, joissa kaikki tehdyt havainnot olivat onnistuneita.

Mittauspaikan peitteisyyden kasvun voidaan kuitenkin tämän tutkimuksen havaintoaineiston perusteella osoittaa lisäävän väärin havaintojen todennäköisyyttä, sillä vääriä havaintoja tuli peitteisillä pisteillä yhtä paljon kuin avoimilla ja vähäpeitteisillä yhteensä, vaikka pisteitä oli lukumääräisesti vain yksi kolmasosa kaikista mitatuista pisteistä. Kuitenkin vääriä havaintoja tuli yllättäen myös täysin avoimilla pisteillä, joten pelkällä mittauspaikan runsaalla peitteisyydelläkään ei selitetä kaikkia vääriä ratkaisuja.

Kaikki karkeiksi virheiksi määritellyt havainnot tehtiin Topconin vastaanottimella, joten virheellisen ratkaisun voidaan tämän perusteella todeta johtuneen enemmänkin käytetystä vastaanottimesta, kuin tukiasemaverkosta. Kuitenkin jos karkeat virheet olisi määriteltävä tiukemmilla kriteereillä ja hylkäysperusteena olisi ollut esimerkiksi  $3\sigma$ , olisi joitakin karkeita virheitä tilastoitu myös Leican vastaanottimelle.

Laitteiden eri tavalla määritetyt alustusten luotettavuustasot saattavat myös osaltaan selittää, miksi kaikki karkeiksi virheiksi määritellyt väärät havainnot osuivat Topconin vastaanottimella suoritettuihin mittauksiin. Mittauksissa käytetylle Topcon Hiper SR-vastaanottimelle määriteltiin käyttökoulutuksen ja laitetestauksen yhteydessä luotettavuustasoksi keskitason luotettavuus, joka vastaa 99 %:n alustuksen luotettavuutta. Leican GNSS-vastaanottimen Viva GS14 luotettavuustasoa ei manuaalisesti pystytty muuttamaan ja mittauksen aikana käytettiin tehdasasetusta, joka on laitteen teknisten tietojen mukaan 99,9 %.

Topconin vastaanottimella todennäköisyys väärän alustuksen tekemiseen oli siis yksi sadasta. Kuitenkin kun havaintoja tehtiin molemmilla vastaanottimilla yhteensä noin 400, nousee väärin ratkaisujen esiintyvyys ilmoitettua suuremmaksi. Kuitenkin Topconin vastaanottimen osalta on todettava, että tutkimuksessa käytetyllä vastaanottimella ei ollut tehty kuin vähäisiä testimittauksia SmartNet-verkossa ennen tämän insinööri-

työn mittauksia. Laitteen asetukset eivät näin ollen olleet vielä välttämättä aivan optimaaliset, ja muun muassa luotettavuustaso olisi voitu asettaa tiukemmaksi, jos karkeasti virheellisiä havaintoja olisi tehty jo maahantuojan omissa testimittauksissa.

Tässä tutkimuksessa ilmenneiden karkeiden virheiden voidaan todeta johtuneen pääosin käytetystä vastaanottimesta, eikä niitä voida näin pitää SmartNet-tukiasemaverkosta johtuvina virheellisinä tuloksina. Kuitenkin Leican vastaanottimella suoritetuissa havainnoista ei löytynyt määrittelymme mukaisia karkeita virheitä, vaikka havaintoja tehtiin molemmilla vastaanottimilla yhtä paljon. Voidaankin todeta, että Topconin vastaanottimella virheellisten ratkaisujen todennäköisyys on ilmoitettua suurempi käytettäessä keskitason luotettavuutta. Väärän ratkaisun todennäköisyys kasvaa myös mittauspäivän peitteellisuuden lisääntyessä. Kuitenkin tämän tyyppisiin mittauksiin sisältyy aina mahdollisuus väärin tulosten ilmenemiseen, mikä käyttäjän tulisi itse tiedostaa [2, s. 43]. Suurempaa tarkkuutta vaativat mittaukset tulisikin suorittaa mahdollisesti myös erilaisen satelliittigeometrian vallitessa, jotta varmistutaan tulosten oikeellisuudesta.

Taulukko 4. Insinööriyön mittauksissa esiintyneet karkeat virheet ja niiden havaintotiedot. Taulukossa on esitetty muun muassa havaintojen poikkeamat referenssikoordinaateista (Taso (NE) ja Korkeus (U)) sekä vastaanottimen näyttämät taso- ja korkeustarkkuudet (Taso, laite ja Korkeus, laite). Taulukkoon on koottu myös muita havainnoista tilastoituja tietoja.

Piste	Kantavektori (km)	Taso (NE)	Korkeus(U)	GDOP	Taso, laite	Korkeus, laite	Satelliitit	Alustus (s)	Klo.	Peitteisyys
0204	23,7	<b>0,511</b>	<b>0,622</b>	3,4	0,006	0,011	6+5	8	11:40	Peitteinen
0207	12,1	<b>0,199</b>	<b>0,406</b>	2,6	0,005	0,011	6+6	7	8:40	Peitteinen
0304	21,8	<b>0,106</b>	<b>-0,337</b>	2,2	0,005	0,009	8+7	7	17:20	Avoin
0402	28,9	<b>1,445</b>	<b>-2,133</b>	2,2	0,005	0,01	9+5	67	13:10	Avoin
0402	28,9	<b>1,503</b>	<b>0,650</b>	2,2	0,006	0,009	8+7	7	13:15	Avoin
0604	42,9	<b>0,129</b>	<b>-0,321</b>	3	0,007	0,013	6+5	8	17:00	Vähäpeitteinen
0707	12,5	<b>0,074</b>	<b>-0,366</b>	-	0,004	0,006	9+7	-	15:15	Avoin
1705	31,9	<b>2,144</b>	<b>2,345</b>	2,9	0,008	0,012	7+6	19	11:50	Peitteinen
1705	31,9	<b>1,155</b>	<b>0,191</b>	2,0	0,005	0,009	8+6	10	11:55	Peitteinen
1705	31,9	<b>2,075</b>	<b>2,325</b>	2,2	0,006	0,009	7+7	19	11:55	Peitteinen

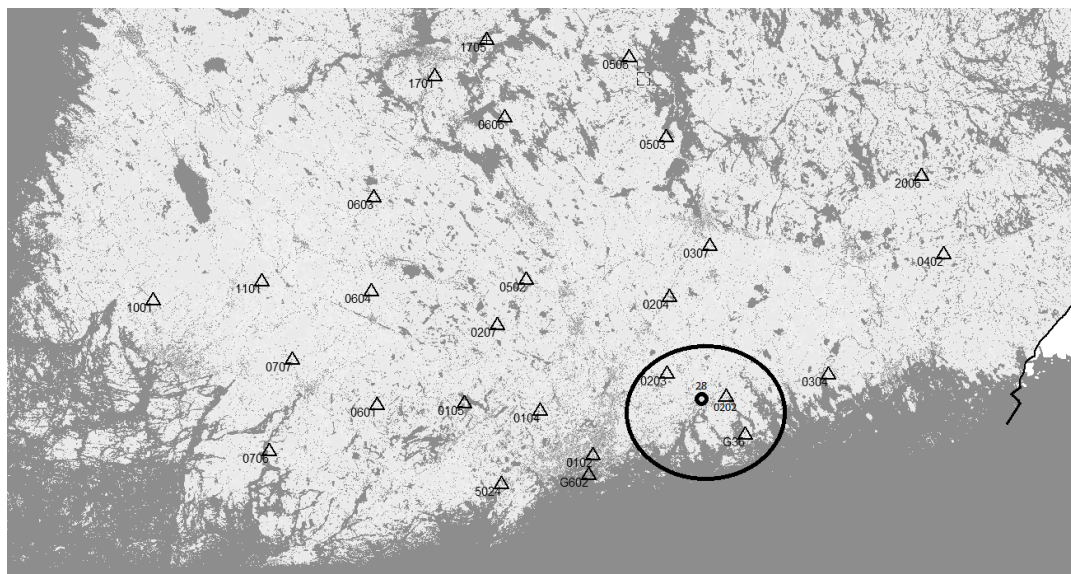
#### 5.4 Tuloksista poistetut korkeushavainnot

Tulosten käsittelyn yhteydessä paikallistimme systemaattisen virheen korkeushavainnoissa (liite 8). Virhe ilmeni pisteiden G36 ja 0202 mittauksen osalta kaikissa korkeuden mittaushavainnoissa ja pisteen 0203 osalta kahdessa ensimmäisessä havaintosarjassa. Systemaattista virhettä ei kuitenkin ilmennyt enää pisteen 0203 kummankaan laitteen viimeisissä havaintosarjoissa, joissa havaittu arvo oli lähellä referenssiarvoa.

Kuvattu virhe ilmeni niissä mittaushavainnoissa, jotka oli havaittu käyttäen Master-tukiasemana Porvoon tukiasemaa (Ref ID 28). Virhe ilmeni molemmilla vastaanottimilla ja oli suuruudeltaan keskimäärin noin 57 mm. Virhe oli molemmilla vastaanottimilla myös samaan suuntaan, eli havaittu arvo oli keskimäärin noin 57 mm referenssikoordinaattiarvon alapuolella.

Virheen aiheuttajaksi pystyttiin paikallistamaan Porvoon tukiasema (kuva 26), sillä samalla lailla systemaattisesti virheellisiä havaintoja ei muiden tukiasemien havaintojen osalta ilmennyt. Olosuhteet eivät olleet mittauspäivinä poikkeukselliset, ja muilla samojen päivien aikana havaituilla pisteillä ongelmia ei ilmennyt.

Systemaattisen korkeusvirheen aiheuttaneilla pisteillä olisi kuitenkin tullut tehdä samanlaiset mittaukset myös toisena päivänä erilaisen satelliittigeometrian vallitessa, jotta virheen aiheuttajasta olisi voitu varmistua. Nyt voidaan ainoastaan olettaa virheen aiheutuneen Porvoon tukiasemasta ja sen tuottamasta väärästä korjaussignaalista. Kuitenkin tämän insinööriyön kannalta asian tarkempaa tutkimista ei todettu tärkeäksi ja siksi toistomittauksia ei suoritettu. Asiasta kuitenkin informoitiin Leica Geosystemsia.



Kuva 26. Porvoon tukiaseman sijainti kartalla sekä ympäröitynä ne pisteet, joiden mittauksessa sitä käytettiin Master-tukiasemana. [muokattu 38]

## 5.5 Alustusajat

Alustusajat on mahdollista jakaa kahteen eri luokkaan, eli niin sanottuihin kylmäkäynnistykseen ja normaaleihin lennosta tapahtuviin alustuksiin. Kylmäkäynnistyksellä tarkoitetaan sitä aikaa, joka kuluu laitteen käynnistämisestä siihen, kun laite alustaa eli tekee kokonaislukuratkaisun ensimmäistä kertaa. Kuitenkaan vastaanottimet eivät nykyään yleensä suorita kaikkia alustukseen vaadittavia toimintoja automaattisesti vastaanottimen käynnistämisen jälkeen ja käyttäjän on itse valittava osa toiminnoista suoritettaviksi. Käyttäjän valittavina toimintoina ovat usein ainakin mittausohjelman valinta sekä laitteen yhdistäminen käytettävään tukiasemaan tai tukiasemaverkkoon/laskentakeskukseen.

Koska eri valmistajien laitteet eivät tässä tutkimuksessa käytettyjen laitteiden osalta suorita täsmälleen samoja toimintoja kylmäkäynnistyksessä ja lisäksi käyttäjän näppäilynopeudella on vaikutusta kylmäkäynnistykseen kuluneeseen aikaan, ei kylmäkäynnistykseen kuluvaa aikaa voitu luotettavasti mitata. Kuitenkin molempien laitteiden kylmäkäynnistykseen kuluneen ajan voidaan todeta olevan likimain samansuuruinen, vaikka aikoja ei virallisesti tilastoitukaan.

Lennoista tapahtuvalla alustuksella tarkoitetaan tässä tutkimuksessa sitä aikaa, joka kuluu vastaanottimelta uuden kokonaislukuratkaisun tekemiseen sen jälkeen kun vastaanotin on menettänyt kaikki satelliittit seurannastaan eikä vastaanota enää korjausdataa tukiasemaverkolta. Käytännössä järjestely toteutettiin niin, että käytettävä vastaanotin peitettiin foliosta tehdyllä satelliittisignaalia läpäisemättömällä laatikolla (kuva 27) niin kauaksi aikaa, että vastaanottimen maastotietokone ilmoitti alustuksen menetyksi ja yhtään satelliittia ei ollut enää seurannassa. Koska Leican ja Topconin antenniyksiköt eivät ole toiminnaltaan aivan samanlaiset ja muun muassa datayhteyden lähetys ja vastaanotto hoidetaan eri paikasta, peitettiin myös maastotietokone varmuuden vuoksi foliolla, jotta asetelma oli molemmille laitteille tasapuolinen.



Kuva 27. Käytettävä vastaanotin peitettiin foliosta tehdyllä laatikolla, joka esti satelliittisignaalin vastaanottamisen. (Kuva Tuomas Toivonen.)

Tutkimuksessa jokaiselle havainnolle suoritettiin oma alustus. Näin jokainen saatu mitaushavainto on alkutuntemattomien ratkaisun suhteen riippumaton. Taulukossa 5 on esitetty alustusaikojen keskimääräiset kestot SmartNet-verkon havaintodatan perus-

teella. Molempien laitteiden tilastoidut alustusajat on mitattujen alustusaikojen osalta yhdistetty ja tulokset esitetään verkon keskimääräisinä alustusaikoina. Keskimääräisen alustusajan lisäksi taulukossa on esitetty myös arvot, joita nopeampia alustuksia 95 % ja 99 % alustuksista tuottaa. Tilastoidut havainnot on esitetty sekä RTK-mittauksille tyypillisissä ympäristöissä (avoin ja vähäpeitteinen), että kaikkien tilastoitujen alustusaikojen osalta. Laitekohtaisesti alustusaikoja on tarkasteltu tämän insinööriyön luvussa 5.8 *Peitteisyyden vaikutus mittauksiin*.

Epäonnistuneita alustuksia oli 14 kappaletta tutkimuksen 821 (havainnot+epäonnistuneet alustukset) tilastoidusta havainnosta, eli noin 1,7 % havainnoista kirjattiin epäonnistuneiksi (epäonnistuneen alustuksen määrittely löytyy tämän insinööriyön luvusta 4.1.9 *Havainnot*). Suurin osa epäonnistuneista alustuksista tuli peitteisillä pisteillä, mutta myös muutama epäonnistunut alustus kirjattiin avoimilla ja vähäpeitteisillä pisteillä. Yhdistävänä tekijänä muilla kuin peitteisillä pisteillä tapahtuneille epäonnistuneille alustuksille oli kellonaika. Kaikki avoimilla tai vähäpeitteisillä pisteillä tehdyt epäonnistuneet alustukset tapahtuivat keskipäivän aikoihin, jolloin satelliittigeometria oli mittausviikon aikana keskimäärin muita ajankohtia huonompi.

Määritellyn aikarajan puitteissa epäonnistuneita alustuksia ei jatkettu aikarajan täytyttyä. Kuitenkin yleensä epäonnistuneen alustuksen jälkeen seuraava alustus oli jo nopea, eikä ongelmia ilmennyt. Muutaman kerran, kun epäonnistuneita alustuksia tuli useampi peräkkäin, haettiin alustusta pisteen vierestä avoimemmalta paikalta ja siirryttiin alustuksen saamisen jälkeen itse pisteelle. Tämä onkin usein käyttökelpoinen menettelytapa, jos mittauskohde sijaitsee olosuhteiltaan muuta ympäristöä peitteisemmässä paikassa.

Taulukko 5. Mittaushavaintojen keskimääräiset alustusajat sekunteina SmartNet-verkossa.

<b>AVOIN JA VÄHÄPEITTEINEN</b>	<b>Verkko</b>
keskiarvo:	13
95 %	25
99 %	53
<b>KAIKKI PISTEET</b>	<b>Verkko</b>
keskiarvo:	15
95 %	29
99 %	69



## 5.6 Etäisyys lähimpään tukiasemaan

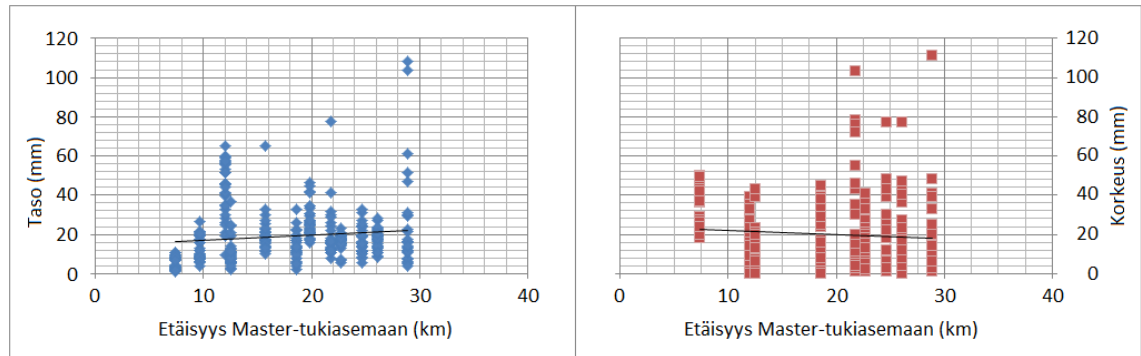
Kantavektorin pituuden vaikutusta SmartNet-ratkaisussa tutkittiin avoimien pisteiden havaintojen osalta (havaintoja yhteensä 12 pisteeltä). Muilla pisteillä tehtyjä havaintoja ei vertailuun voitu ottaa, koska pisteen peitteisyyden vaikutus mittaushavaintoihin olisi näkynyt tuloksissa. Pisteen etäisyyden vaikutuksen tutkimiseen käytetty mittaussaineisto on kuitenkin tilastollisesti varsin pieni (yhteensä 359 havaintoa), joten esitetyt tuloksia tulee pitää enemmänkin suuntaa antavina.

Oletuksena mittauksissa oli, että kantavektorin pituudella ei ole suurta vaikutusta mittaustarkkuuteen samoin kuin perinteisissä RTK-mittauksissa, koska verkon tulee tuottaa homogeenisia tuloksia koko verkon alueella mittaajan sijainnista riippumatta. VRSnet.fi-järjestelmää tutkittaessa tulokset ovat olleet varsin homogeenisia koko verkon toiminta-alueella, ja etäisyydestä riippuva tekijä on ollut hyvin pieni [2, s. 45].

Ideaalisessa tilanteessa SmartNet-tukiasemaverkko tuottaisi yhtä lailla homogeenisia tuloksia koko verkon toiminta-alueella, ja etäisyydestä riippuvainen virhetekijä olisi lähellä nollaa, toisin sanoen kuvan 28 trendiviivat olisivat vaakasuoria.

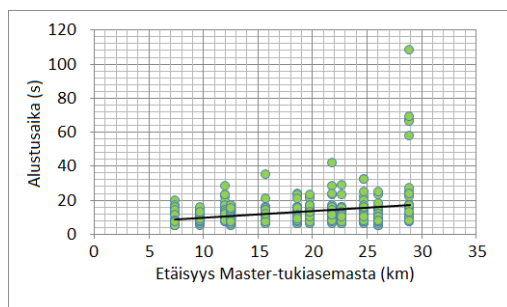
Kuvassa 28 on esitetty tulokset sekä taso- että korkeuskoordinaateille etäisyyden suhteen lähimpään SmartNet-tukiasemaverkon Master-tukiasemaan. Tukiasemaetäisyydet vaihtelivat välillä 7–29 km. Kuvasta voidaan nähdä, että tasotarkkuuden trendiviiva on loivasti nouseva, eli etäisyydestä riippuva virhetekijä on olemassa, mutta se on pieni.

Korkeustarkkuuden osalta trendiviiva on jopa lievästi laskeva, mikä tarkoittaa, että etäisyydestä johtuva virhe on hyvin pieni, tai sitä ei ole. Kuitenkin havainnoissa on suurta hajontaa ja suuremmalla aineistolla trendiviivan voisi olettaa muodostuvan samanlaiseksi kuin tason osalta. Nykyisellään havaintoaineiston pienuudesta johtuen yhdellä pisteellä (Master-tukiaseman etäisyys alle 10 km) suoritettujen normaalia heikommat havainnot vaikuttavat saavutettuun tulokseen liian suurella painolla ja tulos ei näin vastaa oletettua normaalitilannetta. Kuitenkin tämän tutkimuksen havaintojen perusteella SmartNet-tukiasemaverkko tuottaa hyvin tasalaatuisia tuloksia koko insinööriyden tutkimusalueella sekä taso- että korkeuskoordinaattien osalta käytettäessä MAX-korjauksia.



Kuva 28. Master-tukiaseman etäisyyden vaikutus taso- ja korkeustarkkuuksiin. Kuvassa on esitetty kaikki avoimilla pisteillä suoritettavat mittaushavainnot, joille on muodostettu tarkkuuden trendiviivat.

Kuvassa 29 on esitetty Master-tukiaseman etäisyyden vaikutus saavutettuihin alustusaikoihin. Alustusajan voidaan todeta kasvavan siirryttäessä kauemmas Master-tukiasemasta. Alustusaikojen osalta havainnoissa oli varsin suurta hajontaa varsinkin kaikkein pisimmän kantavektorin (29 km) osalta. Kuvaan piirretty trendiviiva on kuitenkin varsin maltillisesti kasvava, mikä tarkoittaa, että alustusajat eivät pitene kovin radikaalisti etäisyyden kasvaessa.



Kuva 29. Master-tukiaseman etäisyyden vaikutus alustusaikoihin.

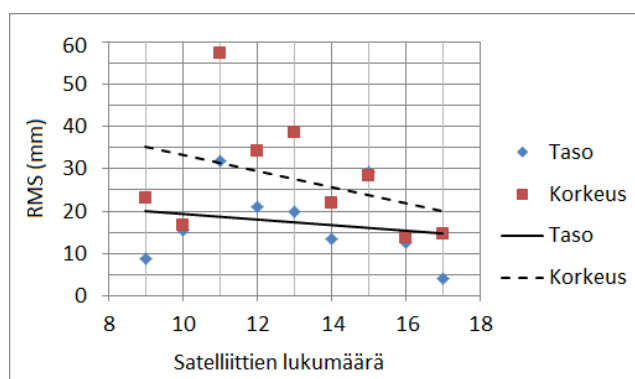
## 5.7 Satelliittien lukumäärän ja satelliittigeometrian vaikutus tarkkuuteen ja alustusaikoihin

Liikkuva vastaanotin tarvitsee vähintään viisi yhteistä satelliittia tukiaseman kanssa, jotta alkutuntemattomien ratkaisu olisi mahdollinen (vain GPS). Jos ratkaisuun halutaan sekä GPS- että GLONASS-satelliitteja, vaaditaan alustukseen vähintään 7 tukiasemalle ja vastaanottimelle yhteistä satelliittia. Kun alkutuntemattomat on saatu ratkaistua, mittaamiseen riittää neljäkin yhteistä satelliittia. Kuitenkin usein mitä enemmän satelliit-

teja on vastaanottimen käytettävissä, sitä parempia tuloksia on mahdollista odottaa. [2, s. 47.]

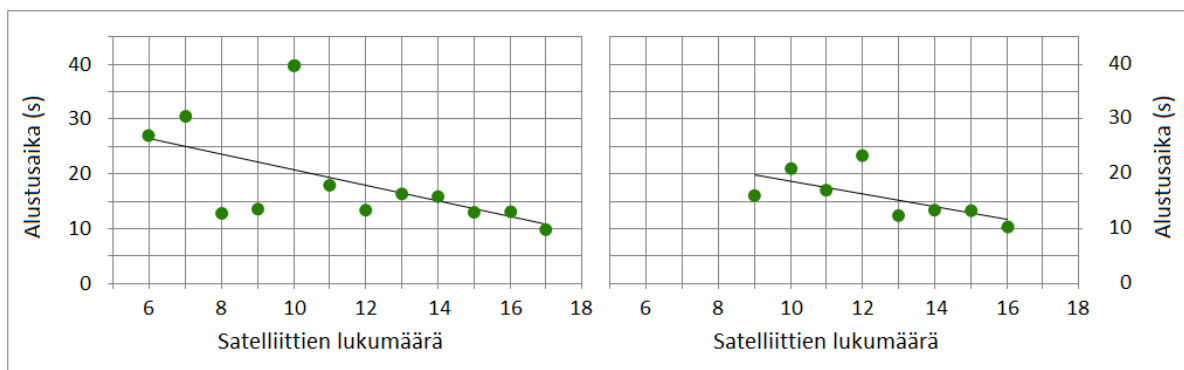
Vastaanottimelle näkyvien satelliittien määrää on mahdollista hieman nostaa laskemalla käytettävää katkaisukulmaa. Kun satelliitteja on vastaanottimen näkyvissä runsaasti, ei korkeuskulman laskemiselle ole yleensä perusteita ja lisäksi matalalta tulevan satelliittisignaalin laatu voi olla huonoa ja signaali katkonaista. Kuitenkin korkeuskulman valinnassa tulee käyttää harkintaa, ja valinta riippuu kulloisestakin mittaustilanteesta. [2, s. 47.] Nykyään satelliittien määrä on kuitenkin enää harvoin rajoittavana tekijänä mittauksissa, jolloin normaalitilanteessa matalimmalta tulevat satelliittisignaalit voidaan eliminoida korkeuskulman valinnalla.

Tutkimusmittausten ajan käytettiin katkaisukulmana 15 astetta, jotta ympäristön esteet ja monitieheijastukset vaikuttivat mahdollisimman vähän mittaustuloksiin. Kuvassa 30 on esitetty satelliittien lukumäärän vaikutus taso- ja korkeustarkkuuteen. Kuvassa jokaisen satelliittilukumäärän kohdalle on laskettu keskihajonnat (RMS) sekä taso- että korkeustarkkuudelle. Satelliittien lukumäärään on laskettu yhteen sekä GPS- että GLONASS-satelliitit. Taulukossa ei ole esitetty alle yhdeksällä satelliitilla tehtyjä havaintoja, koska tätä pienemmällä satelliittien määrällä tehtyjen havaintojen otannat olivat liian pieniä, jotta niistä olisi voitu luotettavasti laskea keskihajonnat. Kuvasta 30 voidaan havaita, että satelliittien lukumäärän kasvaessa myös mittaustarkkuus hieman paranee sekä taso- että korkeuskoordinaattien osalta. Tuloksista on huomioitava havaintojen suuri hajonta varsinkin korkeuden osalta.



Kuva 30. Satelliittien lukumäärän vaikutus tarkkuuteen SmartNet-verkossa. Keskihajonnat (RMS) on laskettu molempien laitteiden havaintoaineistot yhdistämällä.

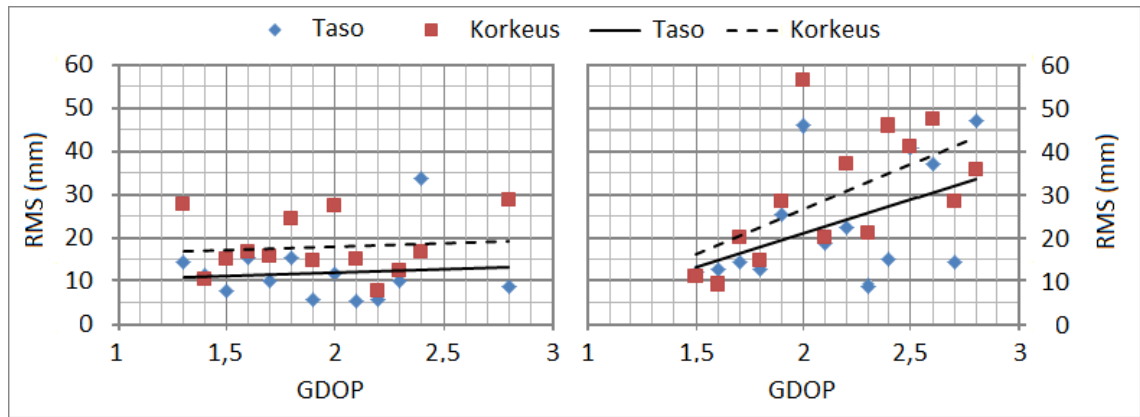
Kuvassa 31 on esitetty satelliittien lukumäärän vaikutus alustusaikoihin. Jokaisen satelliittilukumäärän kohdalle on laskettu alustusajan keskiarvo. Satelliittien lukumäärässä ovat mukana sekä GPS- että GLONASS-satelliitit, kuten aikaisemmin myös tarkkuustarkastelussa. Kuvassa esitetyt arvot ovat laitekohtaisia, sillä käytetyn vastaanottimen vaikutus saavutettuun alustusaikaan on huomattava. Molempien laitteiden trendiviivoista käy kuitenkin selväksi, että satelliittien lukumäärän kasvu nopeuttaa laitteiden alkutuntemattomien ratkaisemista.



Kuva 31. Satelliittien lukumäärän vaikutus saavutettuun alustusaikaan. Jokaisen satelliittilukumäärän kohdalle on laskettu alustusaikojen keskiarvo. Leican vastaanottimelle mitatut keskimääräiset alustusajat ja niistä piirretty kuvaaja on esitetty vasemmalla ja Topconin oikealla.

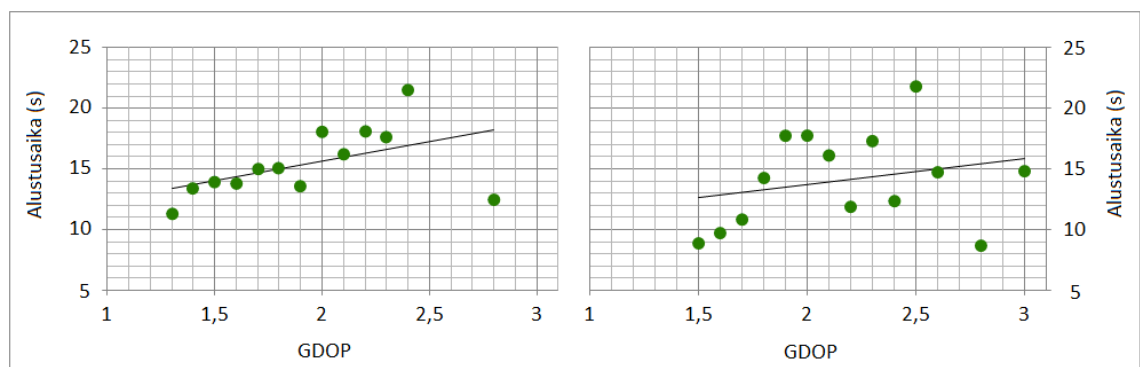
Satelliittien lukumäärän lisäksi myös satelliittigeometria vaikuttaa mittaustarkkuuteen. Mittausten aikana satelliittigeometriaa tarkkailtiin ahkerasti ja havaintolomakkeisiin kirjattiin jokaisen mittauksen aikana vallinneet GDOP- ja PDOP-arvot, jotka myöhemmin tarkistettiin myös havaintodatasta. Kuitenkaan arvot eivät kohonneet todella korkeiksi yhdenkään mittauksen aika, vaan pysyivät keskimäärin hyvin maltillisina. Korkein mitausten aikana tilastoitu GDOP-arvo oli 5,4.

Kuvasta 32 on nähtävissä, että satelliittigeometria vaikuttaa mittaustarkkuuteen. Jokaisen esitetyn GDOP-arvon kohdalle on laskettu keskihajonnat (RMS) sekä taso- että korkeustarkkuuden osalta. Kuvasta on poistettu kaikki ne havaitut GDOP-arvot, joissa otanta oli liian pieni keskihajonnan laskemiseen. Kuvasta käy kuitenkin hyvin selvästi ilmi, että paremman satelliittigeometrian vallitessa voidaan odottaa saatavan myös tarkempia mittaustuloksia. Ero on kuitenkin Topconin vastaanottimella selvästi Leicaa suurempi. Mittaustuloksia on tarkasteltu laitekohtaisesti, koska havaitut tulokset ovat hyvin selvästi laitekohtaisia ja näin niitä ei tule tarkastella yhdistetyssä havaintoaineistossa.



Kuva 32. Satelliittigeometrian vaikutus mittaustarkkuuteen eri RTK-satelliittivastaanottimilla. Leican tarkkuudet ja trendiviivat ovat kuvassa vasemmalla, Topconin tulokset oikealla.

Satelliittigeometria vaikuttaa myös saavutettuun alustusaikaan. Kuvassa 33 on esitetty satelliittigeometrian GDOP-arvojen vaikutusta saavutettuihin alustusnopeuksiin Smart-Net-tukiasemaverkossa laitekohtaisesti. Jokaisen esitetyn GDOP-arvon kohdalle on kuvassa laskettu keskimääräinen alustusaika. Alustusnopeuden tarkastelu on tehty laitekohtaisesti, sillä käytetyllä vastaanottimella on huomattava vaikutus alustusajan pituuteen. Kuvasta on nähtävissä alustusnopeuden hidastuminen satelliittigeometrian heiketessä. Alustusajan trendiviivat kasvavat kuitenkin vielä näin matalilla GDOP-arvoilla hyvin loivasti. Kuvasta tulee kuitenkin huomioida alustusaikojen suuri hajonta varsinkin Topconin vastaanottimella suoritettujen havaintojen osalta. Leicalla hajonta on selvästi maltillisempaa. Kuvan trendiviivojen sovitukselta on poistettu ne GDOP-arvot, joiden kohdalla otanta oli liian pieni keskiarvon luotettavaan laskemiseen. Tämän lisäksi yksi 180 sekuntia kestänyt alustus kirjattiin tulosten käsittelyn yhteydessä epäonnistuneeksi.



Kuva 33. Satelliittigeometrian vaikutus saavutettuun alustusaikaan. Vasemmalla Leica, oikealla Topcon.

## 5.8 Peitteisyyden vaikutus mittauksiin

Peitteisyyden vaikutusta mittauksiin on käsitelty tämän insinööriyön luvussa 4.1.5 *Peitteisyys* teorian osalta. Luvussa on käsitelty muun muassa tässä insinööriyössä käytetty pisteiden luokittelu sekä kerrottu seikkaperäisesti, millä perusteella pisteet valittiin tiettyihin luokkiin. Tämän lisäksi taulukkoon 2 on taulukoitu, mihin luokkaan mikäkin piste kuuluu, eikä luokittelua siksi tässä enää esitetä. Satelliittimittauksissa mittauspai- kalla on tärkeä merkitys mittausten onnistumisen kannalta. Mittaustarkkuuteen vaikut- tavat tekijät on selostettu tämän insinööriyön luvussa 3 *Mittaustarkkuus ja siihen vai- kuttavat tekijät*.

Peitteisyydellä on usein merkittävä vaikutus mittausten onnistumiseen. Liian peitteisis- sä ympäristöissä alkutuntemattomat jäävät ratkaisematta, ja vaikka laite onnistuisi muodostamaan halutun FIX-ratkaisun, mittaaminen ei välttämättä onnistu katkeilevan satelliittisignaalin vuoksi. Usein olosuhteiden huonontuessa mittaamisesta tuleekin enemmän sattuman kauppa; joskus kaikki sujuu täysin ongelmitta, mutta toisinaan mikään ei tunnu onnistuvan. Luonnollisesti mittauspaikan lisäksi myös mittaushetki vaikuttaa mittausten onnistumiseen, ja samassa paikassa eri aikoina suoritetut mit- taukset voivat onnistua täysin eri tavoin. Ainoa keino varmistua mittausten onnistumi- sesta on pyrkiä mittaamaan sellaisissa ympäristöissä, joihin satelliittimittaukset parhai- ten soveltuvat. [2, s. 48.]

Taulukossa 6 on esitetty mitattujen pohjois- (N), itä- (E) ja korkeuskoordinaattien (U) poikkeamat referenssikoordinaattien arvoista. Tulokset on esitetty pisteen peitteisyyden suhteen molempien testattujen vastaanottimien osalta. Aineistossa ovat mukana kaikki tässä tutkimuksessa tilastoidut mittaushavainnot, lukuun ottamatta aineistosta poistet- tuja havainnoita. Tämä tarkoittaa, että molemmilla vastaanottimille mitattiin yhteensä noin 400 riippumatonta havaintoa. Havainnoista on laskettu poikkeamien keskihajonnat (RMS), jotka on esitetty sekä taso- että korkeuskoordinaattien suhteen. Taulukoidut arvot on esitetty laitekohtaisesti, koska erot valmistajien välillä ovat suuria, jolloin tulok- sia olisi turha yleistää koko SmartNet-verkon ja tutkimuksessa käytetyn MAX- korjauksen tarkkuuksiksi. Tuloksia on käsitelty kuin ne olisivat normaalijakautuneita. RMS:n lisäksi tarkkuuksille on laskettu arvot, joita parempia tuloksia on lupa odottaa 95 prosentissa havainnoista.

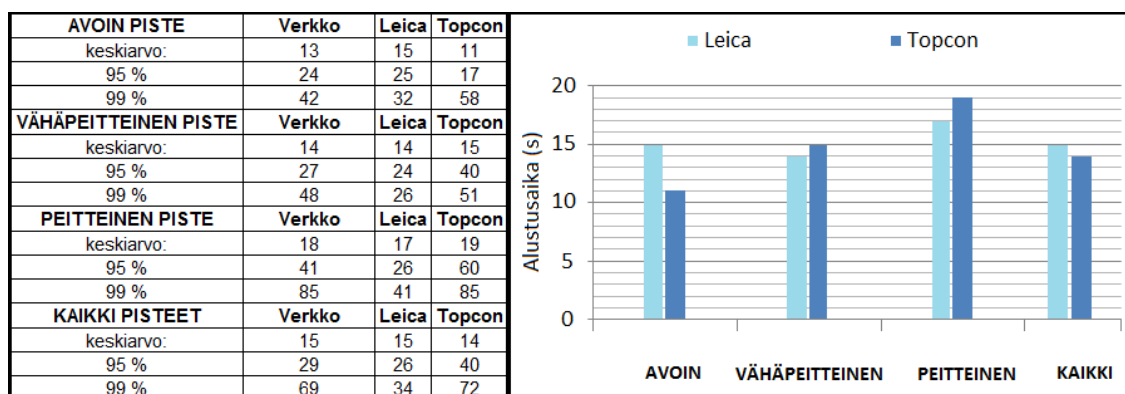
Taulukosta on helppo havaita, että saavutetut tarkkuudet huononevat peitteisyyden kasvaessa. Kuitenkin Leican osalta havaitut tarkkuudet jopa hieman paranevat siirryttäessä avoimista pisteistä vähäpeitteisiin. Tämä kuitenkin johtunee vähäpeitteisten pisteiden otannan pienuudesta ja siitä, että vähäpeitteisten ja avoimien pisteiden välillä ei ollut peitteisyydessä selvästikään niin merkittävää eroa, että se olisi selvästi huonontanut tuloksia. Kuitenkin Topconin osalta taulukko on tältä osin loogisempi ja peitteisyyden kasvaessa myös saavutettu tarkkuus heikkenee. Erityisesti peitteisillä pisteillä Topconin korkeustarkkuus heikkenee selvästi, joten hyvin peitteisissä ympäristöissä vastaanottimen käyttöä tulee tarkkaan harkita ja mitattuihin tuloksiin suhtautua kriittisesti.

Taulukko 6. Peitteisyyden vaikutus saavutettuun pohjois-, itä- ja korkeustarkkuuteen. Tulokset on ilmoitettu poikkeamina (mm) referenssikoodinaateista.

<b>AVOIN PISTE</b>						
	<b>Leica</b>			<b>Topcon</b>		
	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)
RMS	23	16	24	18	19	41
95 %	45	32	47	35	37	81
<b>VÄHÄPEITTEINEN</b>						
	<b>Leica</b>			<b>Topcon</b>		
	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)
RMS	14	11	20	42	20	49
95 %	28	21	39	83	40	96
<b>PEITTEINEN</b>						
	<b>Leica</b>			<b>Topcon</b>		
	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)
RMS	21	19	35	30	23	65
95 %	41	37	68	59	46	128

Sen lisäksi, että mittauspaikan peitteisyys vaikuttaa saavutettuun mittaustarkkuuteen, vaikuttaa se myös saavutettuihin alustusaikoihin. Kuvassa 34 on esitetty alustusaikojen keskiarvot pisteen peitteisyyden suhteen. Tämän lisäksi on esitetty arvot, joita nopeampiin alustuksiin todennäköisesti päästään 95 ja 99 prosentissa havainnoista. Alustusten kestot ovat varsin maltillisia jopa peitteisiksi luokiteltujen pisteiden osalta. Kuitenkin peitteisyyden lisääntyessä myös alustuksen tekemiseen käytetty aika luonnollisesti kasvaa ja myös epäonnistuneita alustuksia tulee enemmän. Taulukon arvoista on poistettu kaikki epäonnistuneiksi kirjatut alustukset (14 kappaletta).

Tuloksista tulee huomioida, että keskimääräiset alustusajat kasvavat siirryttäessä peitteettömistä pisteistä peitteisiin. Kuitenkin Leican osalta huomio kiinnittyy siihen, että siirryttäessä avoimelta pisteeltä vähäpeitteiseen, alustusajat hieman jopa lyhenevät. Ilmiö selittynee kuitenkin vähäpeitteisten pisteiden otannan pienuudella ja sillä, että erot avoimen ja vähäpeitteisen pisteen välillä olivat käytännössä niin pieniä, että niillä ei ollut merkittävää vaikutusta mittaus tulokseen. Sama huomio tehtiin aikaisemmin myös tarkkuuden osalta, joten tulokset ovat siten samansuuntaisia. Topconin osalta tulokset ovat kuitenkin alustusaikojen suhteen loogisempia, ja peitteisyyden lisääntyessä myös keskimääräiset alustusajat kasvavat. Kuitenkin tuloksista tulee huomioida, että peitteisyyden vaikutus alustusaikoihin on selvästi suurempi Topconin osalta. Leica suoriutui tasaisen hyvin kaikissa olosuhteissa ja sen keskimääräiset alustusajat kasvavat vain hieman avoimen ja peitteisen pisteen välillä.



Kuva 34. Kuvassa on esitetty koko SmartNet-verkon keskimääräiset alustusajat pisteen peitteisyyden suhteen luokiteltuina. Tämän lisäksi laitekohtaiset arvot on esitetty. Kaikille arvoille on lisäksi esitetty arviot, mitä nopeampia alustuksia 95 ja 99 prosenttia havainnoista keskimäärin tuottavat. Oikealla pylväät havainnollistavat laskettuja keskiarvoja.

## 5.9 Kalustovertilu

RTK-kalustovertilu pyrittiin toteuttamaan niin, että olosuhteet olisivat mahdollisimman tasapuoliset molemmille laitteille. Laitetestissä olivat mukana kaikki mitatut pisteet. Alkuperäisen suunnitelman mukaan laitetestauksessa olisi haluttu käyttää myös Trimblen satelliittivastaanotinta, mutta valitettavasti sitä ei vertailuun saatu. Laitetestauksessa mukana olleet Leican ja Topconin satelliittivastaanottimet on esitelty tämän insinööri-työn luvussa 4.2 *Mittauskalusto*.



Molempien laitteiden asetukset pyrittiin kaluston testauksen ja käyttökoulutuksen yhteydessä määrittelemään mahdollisimman yhdenmukaisiksi tärkeiden asetusten osalta. Laitteisiin määriteltiin muun muassa sama katkaisukulma (15 astetta), tallennusaika (15 s) sekä tallennusvälin pituus (1 s). Topconin vastaanottimen luotettavuustasoksi määriteltiin keskitason luotettavuus, joka vastaa alustuksen 99 %:n luotettavuutta. Leican laitteella ei luotettavuustasoa onnistuttu määrittelemään ja mittausten ajan käytössä olivat laitteen tehdasasetukset (99,9 %). Luotettavuustaso selvisi laitteen teknisistä tiedoista vasta mittausten jälkeen, minkä vuoksi laitteissa käytettiin mittausten ajan eri luotettavuustasoja (ks. myös luku 5.3 *Karkeat virheet*).

Alustuksen luotettavuudella voi olla merkitystä alustusaikoihin, joten niiden tulisi olla vertailtaessa laitteita mahdollisimman yhtenevät. Luotettavuustasoa laskettaessa alustusaikoja pyritään saamaan lyhyemmiksi, mutta samalla myös väriin ratkaisujen todennäköisyys kasvaa. [2, s. 51.]

Testimittauksissa on käytetty havaintoaineistona samoja mittaushavaintoja kuin koko SmartNet-verkon tarkkuutta arvioitaessa. Tulokset on esitetty sekä normaaleissa RTK-mittausten ympäristöissä (avoimet ja vähäpeitteiset pisteet) että kaikkien mitattujen pisteiden osalta. Taulukkoon 7 on koottu tulokset pohjois- (N), itä- (E) ja korkeustarkkuuksille (U). Tuloksista voidaan huomata, että Leican laitteella saavutetut tarkkuudet ovat normaaleissa ympäristöissä (avoin ja vähäpeitteinen) tason ja korkeuden osalta hieman parempia kuin Topconilla. Laitteiden keskinäinen ero kasvaa vielä selkeämmäksi, kun vertailussa ovat mukana kaikki pisteet. Laitteiden alustusaikoja voi tarkastella kuvasta 34, jossa alustusajat on esitetty molempien laitteiden osalta eri ympäristöissä.

Kalustovertailussa ei arvioitu laitteiden käytettävyyttä, koska sitä olisi ollut vaikeaa mitata ja tulokset olisivat subjektiivisia. Kuitenkin mittajaan kannalta laitteen valinta perustuu luonnollisesti moneen seikkaan, ei yksin saavutettuihin tarkkuuksiin, joista kokonaisuus rakentuu. Ratkaisevia tekijöitä laitteen valinnassa voivat olla muun muassa laitteen ulkonäkö, paino, käytettävä ohjelmisto/käyttöjärjestelmä sekä tietenkin laitteen hinta. Myös toimivat huolto- ja tukipalvelut voivat vaikuttaa laitteen valintaan. Valinnan tekee kuitenkin lopulta mittaja itse, ja omaa tarvetta vastaava laite löytyy vain testamalla.

Taulukko 7. Laitetestin tuloksia. Tuloksissa on esitetty pohjois-, itä- ja korkeustarkkuus millimetreinä. Tarkkuuksille on laskettu RMS sekä arvot, joita parempia tuloksia 95 ja 99 prosenttia havainnoista voidaan odottaa antavan.

<b>AVOIN JA VÄHÄPEITTEINEN</b>			
<b>Leica</b>			
Tarkkuus (mm)	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)
RMS	21	15	24
95 %	42	29	48
99 %	55	38	63
<b>Topcon</b>			
Tarkkuus (mm)	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)
RMS	29	18	38
95 %	57	35	74
99 %	75	46	97
<b>KAIKKI YMPÄRISTÖT</b>			
<b>Leica</b>			
Tarkkuus (mm)	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)
RMS	21	16	29
95 %	41	32	58
99 %	54	42	76
<b>Topcon</b>			
Tarkkuus (mm)	Pohjoinen (N)	Itä (E)	Korkeus (U)
RMS	30	20	50
95 %	58	39	98
99 %	76	51	129

## 6 Ongelmat

Satelliittimittausten ongelmat johtuvat usein huonosta mittauspaikasta tai ajankohdasta. Erityisesti verkko-RTK-mittauksissa olosuhteet vaikuttavat merkittävästi ja mittausten onnistuminen riippuu usein enemmän olosuhteesta kuin itse mittaajasta. Tämä kuitenkin edellyttää, että mittauksia suorittaa mittauksiin perehtynyt ja ne hallitseva henkilö. Peitteisissä ympäristöissä ongelmat yleensä lisääntyvät signaalin katkeillessa tai esteiden peittäessä satelliittisignaalin tulon satelliitista kokonaan. Myös satelliittikonstellaatiot aiheuttavat hieman ongelmia mitatessa pohjoisilla leveysasteilla, mistä syystä otolliset mittaushetket kannattaa valita tarkkaan, varsinkin jos mitataan vähänkin tavanomaisia mittausympäristöjä peitteisemmässä paikassa. Mittaukset tulisikin suunnitella, jos mahdollista, käyttäen apuna satelliittialmanakkaa, josta mittaukset ja mahdolliset tauot voidaan määrittää ennen niiden suorittamista. Pahimmat paikat kannattaa myös

pyrkiä mittaamaan hyvän satelliittigeometrian aikana ja näin välttyä turhalta odottelulta ja mahdollisilta virheiltä.

Jos mittausten valmistelu on suoritettu huolella ja mittauksia suoritetaan ympäristöissä, joihin satelliittimittaukset parhaiten soveltuvat, ei suuria ongelmia yleensä ilmene. Suurimmat ongelmat, joita tämän insinööriyön mittauksissa kohdattiin, olivat lähinnä operaattorista johtuvia katkoja 3G-yhteydessä. Kuitenkin näistäkin tilanteista yleensä selviää, kun vaihtaa vastaanottimen käyttämään hitaampaa datayhteyttä tai yhdistää sen verkkoon uudelleen. Myös laitteen uudelleenkäynnistäminen tai mittausohjelman sulkeminen saattaa auttaa yhteyksien uudelleenhakemisessa.

Hyvin peitteisissä ympäristöissä mitatessa laitteen alustus kannattaa myös suorittaa hieman mittauspaikkaa avoimemmassa ympäristössä ja pyrkiä sen jälkeen siirtymään mittauspaikalle saavutettua alustusta menettämättä. Usein myös alustuksen pelkkä resetointi auttaa, eikä laitetta tarvitse siirtää pois mittauspaikalta uuden alustuksen toivossa. Kuitenkin jos ongelmia ilmenee mittausten aikana useita, tämä tarkoittaa usein myös väärrien ratkaisujen todennäköisyyden kasvua. Alustusvaikeuksien tai signaalin katkeilun yhteydessä olisikin hyvä miettiä, voitaisiinko mittaukset suorittaa myöhemmin paremman satelliittigeometrian vallitessa, jolloin samaan työhön käytetty aika olisi lyhyempi ja karkeiden virheiden mahdollisuus ainakin teoriassa pienempi.

## **7 Kohdatut haasteet**

Insinööriyön tekoprosessin aikana kohdattiin paljon haasteita. Kuitenkin haasteista opittiin paljon ja lopulta niistä muodostui enemmänkin mahdollisuuksia kuin ongelmia. Prosessin alussa haasteita tuotti yritysten aikataulujen yhteensovittaminen ja jokaisen tahon hieman erilaiset toiveet työn suorittamista kohtaan. Suurimmat insinööriyön teon aikana kohdatut haasteet olivat kuitenkin aikataulullisia.

SmartNet-tukiasemaverkon valmistuminen ja käyttöönotto viivästyivät paljon, mikä vaikeutti insinööriyön mittausten toteuttamista. Verkko valmistui vasta kolme kuukautta insinööriyön aloittamisen jälkeen, ja laaditut aikataulut jouduttiin suunnittelemaan näin monta kertaa uudelleen, koska ei ollut täyttä varmuutta siitä, koska lopulta päästäisiin mittaamaan.

Kuitenkin, kun SmartNet-tukiasemaverkko valmistui, kohdattiin lisää haasteita. Geotrim Oy päätti yllättäen vetäytyä pois projektista sille suunnitellun aikataulun puitteissa. Vetäytymiseen vaikutti ennen kaikkea mittausten suorittamisen viivästyminen ja heidän oman VRSnet.fi-palvelunsa uudistukset vuodelle 2013. Tämän lisäksi insinööriyön tutkimusmittausten suorittamisen vaatimuksena oli ollut, että Trimblen vastaanottimella ehdittäisiin tekemään tarvittavat testimittaukset SmartNet-verkossa ennen tutkimusmittausten aloittamista. Kuitenkin vaadittuja testimittauksia ei ollut ehditty tehdä.

Mittaukset suunnitellussa muodossaan ja laajuudessaan olisivat olleet näin mahdollisia vasta alkukesästä 2013. Tämä ei kuitenkaan ollut insinööriyön ja suunnitellun valmistusaikataulun mukaisesti mahdollista ja tehtyjä suunnitelmia oli muutettava. Insinööriyön mittausten suorittamisesta Geotrim Oy:n VRS-verkossa jouduttiin näin luopumaan ja samalla Trimblen vastaanotinta ei voitu testimittauksiin enää ottaa.

Uuden suunnitelman mukaisesti mittaukset päädyttiin suorittamaan vain SmartNet-tukiasemaverkossa Leican ja Topconin vastaanottimilla, käyttäen MAX-korjauksia. Suunnitelman muutos oli hyvin harmillinen, sillä kaikki valmistelut oli tehty laajempaa tutkimusta ajatellen. Kuitenkin mittausten perusajatus säilyi suunnitelman muutoksen jälkeenkin samana, eikä insinööriyön teoriaan tarvinnut tehdä suuria korjauksia.

Mittausten ajankohta tuotti myös omat haasteensa. Mittaukset oli alun perin tarkoitus suorittaa syksyisissä olosuhteissa, jolloin lumipeitettä ei olisi vielä ollut maassa. Kuitenkin pitkittyneen aikataulun takia insinööriyön mittaukset jouduttiin suorittamaan täysin talvisissa olosuhteissa, jolloin lunta oli maassa lähes puoli metriä. Talviset olosuhteet vaikuttivat myös pisteiden valintaan, sillä mitattavat pisteet jouduttiin valitsemaan erityisen tarkasti, jotta niille pääsy oli mahdollista myös talvisissa olosuhteissa. Kuitenkin syksyllä tehty pohjatyö ja pisteiden etsintä maastokatselmuksessa ennen varsinaisia mittauksia mahdollistivat sen, että varsinaiset mittaukset pystyttiin suorittamaan jopa hieman suunniteltua aikataulua nopeammin, eikä suuria ongelmia ilmennyt.

Insinööriyön teossa haasteita aiheutti myös se lähtökohta, että vastaavasta aiheesta ei ollut tehty aikaisempaa tutkimusta Suomessa.

## 8 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä pyrittiin esittelemään reaaliaikaisten mittausten teoriaa ja satelliittimittauksiin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi tutkittiin SmartNet-tukiasemaverkon MAX-palvelua mittaamalla verkossa kahden eri valmistajan GNSS-RTK-vastaanottimilla. SmartNet-verkko toimi mittausten ajan ilman ongelmia ja mittaaminen verkossa oli sujuvaa molemmilla laitteilla.

MAX-menetelmää käyttäen päästään SmartNet-verkossa todennäköisesti 11 cm parempiin tuloksiin mitattaessa RTK-mittauksille otollisissa olosuhteissa. Tämän lisäksi keskimääräiset alustusajat ovat hyvin lyhyitä, eli alle viisitoista sekuntia avoimissa tai vähäpeitteisissä ympäristöissä. Tämän insinööriyön mittauksissa Leican vastaanotin osoittautui hieman Topconin vastaanotinta etevämmäksi sekä tarkkuutensa että keskimääräisen alustusnopeutensa perusteella. Kuitenkin on muistettava, että SmartNet-palvelu otettiin käyttöön vasta viime vuoden joulukuussa ja Topconin vastaanottimella ei ollut ennen tätä tutkimusta tehty kuin joitakin harvoja testimittauksia. Tästä syystä kalustovertailuun kannattaa suhtautua tietyllä varauksella ja pitää sen tuloksia enemmänkin suuntaa antavina, erityisesti Topconin vastaanottimen osalta.

Tukiasemaverkossa mitattaessa myös Master-tukiaseman etäisyydestä riippuva virhetekijä todettiin sekä tarkkuuden että alustusaikojen suhteen varsin pieneksi. Kuitenkin näiltä osin tutkimuksessa saavutetut tulokset ovat pääosin vain suuntaa antavia. Lopulliset johtopäätökset tuleekin tehdä laajemmasta havaintoaineistosta.

Tutkimuksessa olisi haluttu vertailla Leican SmartNet-tukiasemaverkkoa Geotrim Oy:n VRSnet.fi-tukiasemaverkkoon ja pyrkiä etsimään eroja eri tavalla toteutettujen verkko-RTK-palveluiden välille. Suunniteltua vertailua ei kuitenkaan valitettavasti toteutettu. Tällaisenaan tutkimus antaa vain yksipuolisen kuvan SmartNet-verkosta ja sen MAX-palvelusta. Tutkimuksen tulokset kuitenkin osoittavat, että saadut tulokset ovat hyvin samansuuntaisia, kuin on saavutettu VRSNet.fi-palvelun laatua aikaisemmin tutkittaessa. Luonnollisesti tämän hetken tilanne olisi voinut olla hieman erilainen, mutta se jää seuraavien aihetta käsittelevien tutkimusten ratkaistavaksi.

SmartNet-tukiasemaverkkoa ja MAX-menetelmää käytettäessä on kuitenkin huomioitava samat seikat kuin muissakin satelliittimittauksissa. Menetelmällä ei myöskään pois-

teta mittaajasta aiheutuvia virheitä, joten vasta mittausten huolellinen suunnittelu ja oikea tilanteeseen parhaiten sopiva mittaustapa tuovat halutun lopputuloksen.

## **9 Kiitokset**

Halusimme toteuttaa tutkimuksemme riippumattomana tutkimuksena. Kuitenkin mittausten suunnittelussa isona apuna olivat laitteensa tutkimuksen käyttöön antaneet yritykset ja heidän edustajansa, joilta saatiin hyviä vinkkejä mittausten toteuttamiseen. Suuret kiitokset Leica Geosystems Oy:lle SmartNet-verkon käyttölisenssien ja kaluston antamisesta tutkimuskäyttöön. Suuret kiitokset myös Topgeo Oy:lle laitteiston luovuttamisesta tutkimuksen tarpeisiin.

Haluamme kiittää myös erityisesti Leica Geosystems Oy:n Esa Wikmania ja Janne Hulkkoa, joiden ansiosta tutkimus saatiin lopulta vietyä läpi halutussa muodossaan. Erityiskiitokset myös Topgeo Oy:n Markku Similälle.

## Lähteet

- 1 Laurila, Pasi. 2008. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D 3.
- 2 Häkli, Pasi, Koivula, Hannu. 2004. Virtuaali-RTK (VRS™) tutkimus. Helsinki: Edita Prima Oy.
- 3 Satelliittimittaus eli GPS-mittaus. 2012. Verkkodokumentti. Maanmittauslaitos. <<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus.>>. Luettu 6.11.2012.
- 4 Miettinen, Samuli. 2006. GPS käsikirja. Porvoo: WS Bookwell Oy.
- 5 Edut ja hinnat. 2012. Verkkodokumentti. SmartNetFinland. <[http://fi.smartnet-eu.com/edut-ja-hinnat\\_480.htm](http://fi.smartnet-eu.com/edut-ja-hinnat_480.htm)>. Luettu 8.11.2012.
- 6 Wanninger, Lambert. 2008. Introduction to Network RTK. Verkkodokumentti. <<http://www.wasoft.de/e/iagwg451/intro/introduction.html>>. Luettu 9.11.2012.
- 7 Geotrim: VRSnet.fi. Ei päivätty. Verkkodokumentti. Geotrim Oy. <[http://www.geotrim.fi/wp-content/uploads/2011/12/VRSnet\\_esite.pdf](http://www.geotrim.fi/wp-content/uploads/2011/12/VRSnet_esite.pdf)>. Luettu 13.11.2012.
- 8 VRS-järjestelmä. Rakenne ja toiminta. 2012. Verkkodokumentti. Tampereen kaupunki. <<http://www.tampere.fi/kaavatjakiinteistot/kiinteistopalvelut/maastojageotekniikka/vrsjarjestelma.html>>. Luettu 13.11.2012.
- 9 Ajankohtaista Suomessa: Leica SmartNet-tukiasemaverkko on valmistumassa. 2012. Verkkodokumentti. Leica Geosystems Oy. <[http://www.leica-geosystems.fi/fi/Ajankohtaista\\_91541.htm](http://www.leica-geosystems.fi/fi/Ajankohtaista_91541.htm)>. Luettu 13.11.2012.
- 10 Wikman, Esa. 2012. SmartNet Kiertue 2012. Powerpoint-esitys. <Smartnet Esitys\_Kiertue\_2012.ppt>. Luettu 23.4.2012.
- 11 Leica SmartNet: Suomen nykyaikaisin RTK-tukiasemaverkko. 2012. Verkkodokumentti. Leica Geosystems Oy. <[http://www.leica-geosystems.fi/images/new/common/fi\\_SmartNet\\_Bro.pdf](http://www.leica-geosystems.fi/images/new/common/fi_SmartNet_Bro.pdf)>. Luettu 13.11.2012.
- 12 SmartNet Europe. 2012. Verkkodokumentti. Leica Geosystems Oy. <<http://www.smartnet-eu.com/>>. Luettu 29.11.2012
- 13 Space Segment: Satellite Orbits. Verkkodokumentti. National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. <<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Luettu 2.11.2012.

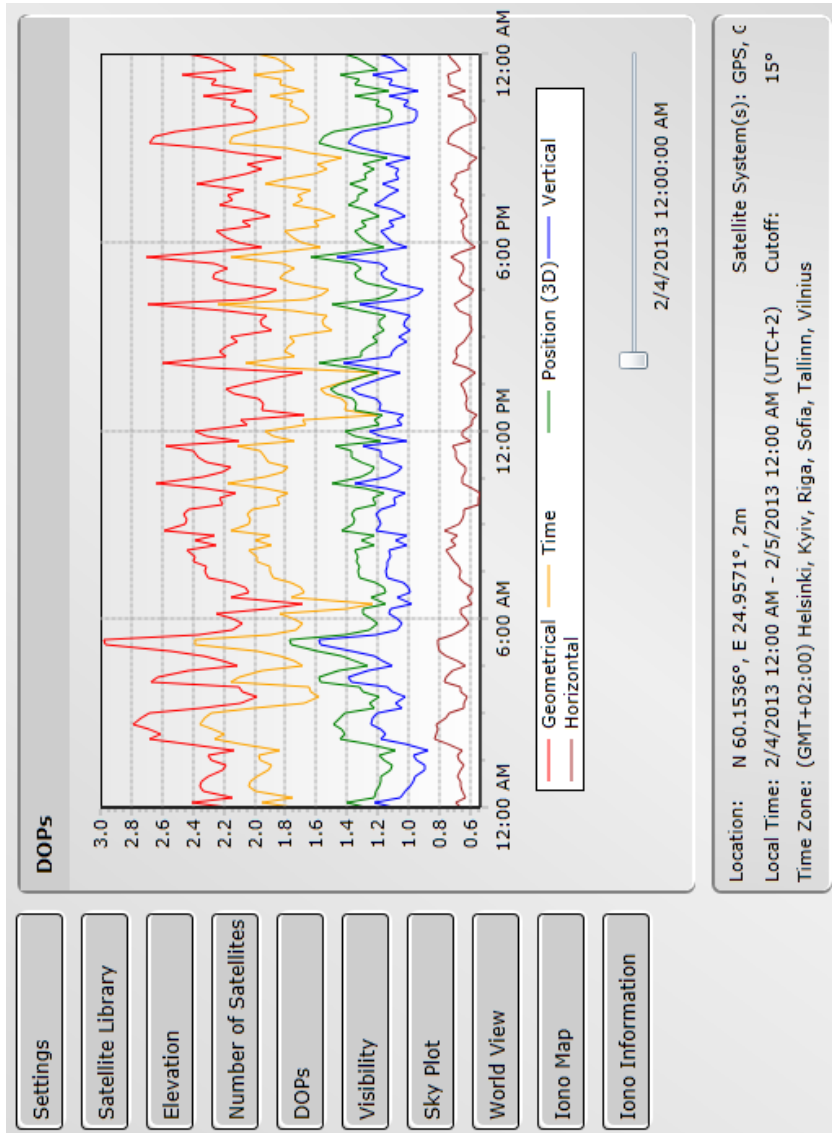
- 14 GLONASS constellation status 13.11.2012. 2012. Verkkodokumentti. Information-analytical centre, Korolyov, Russia. <<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/en/GLONASS/>>. Luettu 13.11.2012.
- 15 In-orbit validation. 2012. Verkkodokumentti. European Space Agency. <[http://www.esa.int/esaNA/SEM1MURMD6E\\_galileo\\_0.html](http://www.esa.int/esaNA/SEM1MURMD6E_galileo_0.html)>. Luettu 13.11.2012.
- 16 Kråknäs, Pasi. 2012. Satelliittimittaukset. Kurssimateriaali. Maanmittaustekniikka, Metropolia Ammattikorkeakoulu. Luettu 13.12.2012.
- 17 Jacobson, Len. 2007. GNSS Markets and Applications. Norwood: Artech House, INC.
- 18 European Commission Report Shines Harsh Light on Galileo. 2012. Verkkodokumentti. SpaceNews, Inc. <<http://www.spacenews.com/article/galileo-assessment-pulls-no-punches#.UJfWYdePt8E>>. Luettu 14.11.2012.
- 19 What is Galileo?. 2012. Verkkodokumentti. European Space Agency. <<http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>>. Luettu 10.1.2013.
- 20 China GPS rival Beidou starts offering navigation data. 2011. Verkkodokumentti. British Broadcasting Corporation. <<http://www.bbc.co.uk/news/technology-16337648>>. Luettu 30.11.2012.
- 21 China launches 10<sup>th</sup> satellite for independent navigation system. 2012. Verkkodokumentti. Xinhua News Agency. <[http://news.xinhuanet.com/english2010/sci/2011-12/02/c\\_131283096.htm](http://news.xinhuanet.com/english2010/sci/2011-12/02/c_131283096.htm)>. Luettu 14.11.2012.
- 22 China's Beidou GPS-Substitute opens to public in Asia. 2012. Verkkodokumentti. British Broadcasting Corporation. <<http://www.bbc.co.uk/news/technology-20852150>>. Luettu 10.1.2013.
- 23 Karttunen, Hannu, Ursa ja Tuorlan observatorio. 2011. Troposfääri. Verkkodokumentti. <<http://www.astro.utu.fi/zubi/atmosph/tropo.htm>>. Luettu 14.11.2012.
- 24 Ionosfääri. 2012. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/ionosfaari>>. Luettu 8.11.2012.
- 25 Vermeer, Martin. 2012. Moderni geodesia. Verkkodokumentti. <<http://users.tkk.fi/mvermeer/mod.pdf>>. Luettu 8.11.2012.
- 26 Poutanen, Markku. 1999. GPS-paikanmäärittäminen. Hämeenlinna: Karisto Oy:n kirjapaino.



- 27 Auringon aktiivisuuden kasvu hidasta. 2011. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/125717>>. Luettu 8.11.2012.
- 28 Langley, Richard B. Dilution of Precision.1999. Verkkodokumentti. University of New Brunswick. <<http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/gpsworld.may99.pdf>>. Luettu 5.11.2012.
- 29 GNSS Planning Online. 2012. Online-suunnitteluohjelma. Spectra Precision. <<http://www.spectraprecision.com/support/gnss-planning/>>. Luettu 18.12.2012.
- 30 User Guide:Trimble R8 GNSS Receiver. R8-satelliittivastaanottimen -käyttöohje. <[http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-449956/R8-R6-5800Receivers\\_4A\\_UG\\_7440.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-449956/R8-R6-5800Receivers_4A_UG_7440.pdf)>. Luettu 14.11.2012.
- 31 Kuuluvuus. 2012. Verkkodokumentti. Elisa Oyj. < <http://www.elisa.fi/kuuluvuus/>>. Luettu 19.12.2012.
- 32 Kuuluvuuskartta. 2012. Verkkodokumentti. TeliaSonera Finland Oyj. <<http://www.sonera.fi/asiakastuki/verkkokartat/kuuluvuuskartta/>>. Luettu 19.12.2012.
- 33 Lautiainen, Lare. 2011. Insinööriyö. Satelliittimittausten käyttö rajaamistoimituksissa: Mikkelin ammattikorkeakoulu. <[http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/28134/lautiainen\\_lare.pdf?sequence=1](http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/28134/lautiainen_lare.pdf?sequence=1)>. Luettu 14.11.2012.
- 34 Piirainen, Tero. 2009. Keravan kaupungin runkopisteverkon saneeraus. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. <<http://theseus17-kk.lib.helsinki.fi/bitstream/handle/10024/6478/Keravank.pdf?sequence=1>>. Luettu 14.11.2012.
- 35 Leica AT504 (GG) Choke Ring Antenna. 2012. Verkkodokumentti. Leica Geosystems AG < [http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-AT504-GG-Choke-Ring-Antenna\\_4601.htm](http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-AT504-GG-Choke-Ring-Antenna_4601.htm)>. Luettu 19.12.2012.
- 36 Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös: Sähkölaitteiden ja -laitteistojen sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta. 1993. Verkkodokumentti. Edita Publishing Oy <<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1993/19931696>>. Luettu 14.11.2012.
- 37 Department of Defence World Geodetic System 1984. 2000. Its Definitions and Relationships with Local Geodetic Systems. Verkkójulkaisu. National Imagery and Mapping Agency (NIMA). <<http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/wgs84fin.pdf>>. Luettu 22.3.2013.
- 38 PaITuli - paikkatietoja tutkimukseen ja opetukseen. 2012. Online-tietokanta. CSC - Tieteen tietotekniikan keskus <<https://sui.csc.fi/applications/paituli/PaITuli/>>. Luettu 19.12.2012.

- 39 Vermeer, Martin. 2013. Johdanto geodesiaan. Verkkojulkaisu. <[users.tkk.fi/mvermeer/johd.pdf](http://users.tkk.fi/mvermeer/johd.pdf)>. Luettu 11.3.2013.

### Liite 1. Ashtech Web Mission Planning (suunnitteluohjelmisto)



## **Liite 2. Mittaussuunnitelma 24.10.2012. (muokattu 20.3.2013)**

*Mittaussuunnitelmasta on muokkauksen yhteydessä poistettu kansilehti ja sisällysluettelo sekä lisäksi joitakin tietoja on päivitetty.*

### **1 Johdanto**

Mittaussuunnitelman tarkoituksena on esitellä insinööriyöme verkko-RTK-mittaukset. Mittausten suunnittelussa tulee huomioida useita eri asioita pisteiden valinnasta mittausten toteutustapaan ja tutkimusmenetelmiin.

### **2 Tausta**

Insinööriyön aihe kiinnostaa suuresti molempia sitä suorittavia opiskelijoita. Idea eri verkkoratkaisujen tutkimiseen on lähtöisin opiskelijoiden omasta halusta ja kiinnostuksesta tutkia asiaa. Aihe on myös erittäin ajankohtainen, sillä Geotrimin Suomessa ylläpitämän VRSNet.fi palvelun rinnalle julkaistaan tänä syksynä myös Leican SmartNet -palvelu, joka tulee tuomaan uuden vaihtoehdon verkko-RTK mittausten suorittamiseen. Vaikka Geotrimin VRSNet.fi -palvelua on tutkittu maassamme jo laajasti, ei sitä ole ollut mahdollista verrata muihin verkkoratkaisuihin maassamme, koska niitä ei ole ollut. Tästä syystä tutkimuksemme on ensimmäinen tai ainakin ensimmäisiä laatujaan ja tuo riippumattoman näkökulman asiasta.

### **3 Tutkimuksen tavoitteet**

Verkko-RTK -tutkimuksen tavoitteena on selvittää eri verkkoratkaisujen toimintaa ja tarkkuutta koejärjestelyin. Tämän lisäksi tarkoituksena on tutkia, vaikuttaako käytetty vastaanotin saatuihin tuloksiin. Tutkimusmittaukset suoritetaan kahden viikon aikana maastomittauksilla. Maastomittauksissa käytetään vakioitua mittaustapaa, jolla pyritään poistamaan mahdollisimman suuri osa mittauksiin vaikuttavista epävarmuuksista niin, että saatu tulos vastaa mahdollisimman hyvin laitteiden ja verkkojen todellista tarkkuutta ja toimintaa. Tutkimus pyritään pitämään kuitenkin käytännönläheisenä, niin että se tarjoaa objektiivista tietoa laitteiden tarkkuudesta ja käytöstä perehtymättä liian tarkasti teknisiin yksityiskohtiin.

Mittausten jälkeen laaditaan mittausraportti työn tuloksista, joka on samalla myös insinööriyö. Insinööriyössä noudatetaan Metropolia Ammattikorkeakoulun insinööriyölle asettamia ohjeituksia.

### 3.1 Opiskelijälähtöiset tavoitteet

Suorittaa insinööri työ hyvin tai kiitettävän arvosanoin.

### 3.2 Työkohtaiset tavoitteet

Tutkimusraportin on tarkoitus esitellä erilaisia ratkaisuja verkko-RTK -mittauksiin ja pyrkiä avaamaan myös niiden teknisiä eroavaisuuksia pintapuolisesti. Lisäksi raportissa tullaan esittelemään satelliittimittauksiin liittyviä lainalaisuuksia ja RTK -mittauksissa erityisesti huomioitavia seikkoja.

### 3.3 Tutkimuskohtaiset tehtävät

- Laitesopimukset
- Mittausten suunnittelu
- Pisteiden karkea valinta
- Pisteiden etsintä (maastokatselmus)
- Pisteiden valinta ja ajoreitit
- Mittausten lopulliset järjestelyt/tutkimusmenetelmät
- Tulosten analysointi ja raportointi

## 4 Pisteiden karkea valinta

Alun perin valitsimme yhteensä 56 ensimmäisen luokan kolmiopistettä (ETRS89), joiden etäisyydet molempien käytettyjen RTK -verkkojen tukiasemiin olivat likimäärin yhtä pitkät. Periaatteessa tukiaseman etäisyydellä ei pitäisi olla vaikutusta mittaustarkkuuteen, mutta halusimme silti mahdollistaa tasapuolisen asetelman molempia (VRSNet.fi, SmartNet) verkkoja ajatellen valitsemalla etäisyydet likimain yhteneviksi. Pisteiden alkuperäisessä, ns. raakakarsinnassa pyrittiin myös ottamaan huomioon pisteiden stabiiliuden vaatimukset, jolloin ne tuli olla rakennettu liikkumattomiin rakenteisiin, kuten maakiiviin tai kallioon. Käytännössä ensimmäisen luokan kolmiopisteet on kuitenkin kaikki rakennettu liikkumattomiin rakenteisiin ja yhtään pistettä ei tarvinnut pudottaa pois sen takia, että se olisi rakennettu vääränlaiseen alustaan.

Koordinaattijärjestelmän valinnassa haluttiin luonnollisesti käyttää sellaista järjestelmää, jossa muunnokset eivät vaikuttaisi saatuihin tuloksiin ja pisteiden koordinaatit olisivat mahdollisimman luotettavat. Tämän lisäksi halusimme käyttää koordinaattijärjestelmää, johon RTK -tukiasemaverkkojen tukiasemat olisivat myös sidotut. Tästä syystä päädyimme käyttämään

tasokoordinaateissa ETRS89 -koordinaatteja ja korkeudessa ellipsoidisia korkeuksia. Ellipsoidiset korkeudet valittiin, koska ne eivät sisällä geoidimallia, jonka tarkkuus voisi vaikuttaa tuloksiin.

## 5 Pisteiden etsintä

Pisteiden etsintä suoritettiin viikolla 41. Viikon aikana suoritetuissa maastokatselmuksissa löysimme yhteensä 46 pistettä, jotka kaikki valokuvattiin ja piirsimme lisäksi niistä estepiirrokset. Löydetyistä pisteistä valitsimme mittauksiimme sopivimmat 25 kappaletta. Tavoitteenamme pisteiden valinnassa oli niiden hyvä ja helppo saavutettavuus normaalilla henkilöautolla, sekä hyvät ja turvalliset mittausolosuhteet (ei liukkaita kallioita, ei alttiutta monitieheijastuksille tms.). Lisäksi halusimme pisteiden olevan mahdollisimman monipuolisia (käytännössä mittauksia suoritetaan hyvin monipuolisissa ympäristöissä), jolloin valitsimme sekä avoimia että metsäisiä pisteitä. Luokittelimmekin pisteet kolmeen eri kategoriaan; avoin, vähäpeitteinen ja peitteinen. Kaikista kategorioista pyrittiin valitsemaan yhtä paljon pisteitä, jos se oli mahdollista.

## 6 Mitattavat pisteet

Mittauksissa käytettävät pisteet löytyvät mitattavat\_pisteet.doc -tiedostosta. Pisteistä on esitetty sekä valokuva pisteestä että estepiirros. Estepiirrokset on piirretty pisteen päältä havainnoiden noin 160 cm:n korkeudelta. Mittauksissa käytetty jalustan korkeus pyritään pitämään 160 cm:n korkeudessa +-5 cm, jos mahdollista, jolloin estepiirrokset vastaavat mahdollisimman hyvin todellista mittaustilannetta.

## 7 Mittaustapa

Mittaustapa on pyritty tekemään sellaiseksi, että se on mahdollisimman käytännöllinen toteuttaa ja poistaa useita muuttujia, jotka voisivat vaikuttaa mittausten tarkkuuteen. Mittaustavasta on myös pyritty tekemään mahdollisimman vakioitu, jotta kaikilla pisteillä ja mittausolosuhteissa käytännöt olisivat samat ja näin mittaustapa vaikuttaisi mahdollisimman vähän mittausten tarkkuuteen. Mittaustapa on suunniteltu yhteistyössä laitteiden maahantuojayritysten edustajien kanssa, jolloin se on kaikkien tämän projektin osapuolten hyväksymä.

Käytetty mittaustapa on esitetty tämän mittaussuunnitelman liitteissä sekä tekstin että havaintokuvan osalta.

## 7.1 Mittaajat

Mittaajina toimivat insinööriyön tekijät Tuomas Toivonen ja Juho Ylikoski. Tämän lisäksi mittauksissa on mahdollista tarvittaessa käyttää myös Leican ja Geotrimin edustajia, jos se katsotaan tarpeelliseksi tai heidän puoleltaan halutaan niihin osallistua. Molemmat mittaajat saavat laitevalmistajilta koulutuksen laitteiden käyttöön ennen kuin maahantuojat luovuttavat ne projektin käyttöön.

## 7.2 Laitteet

Laitteiden maahantuojat toimittavat mittauksissa käytettävät GNSS -satelliittivastaanottimet ja muut mittauksissa tarvittavat varusteen mittausten käyttöön. Yhteensä käytössä on siis 3 verkko RTK -vastaanotinta (Leica, Trimble ja Topcon). Kaikki laitteet ovat GNSS -vastaanottimia, joten ne tukevat sekä GPS- että GLONASS-satelliittijärjestelmiä.

Varsinaisesti mittausten käyttöön saatavia laitteita ei ole vielä ilmoitettu maahantuojien puolelta. Käytetyt laitteet ovat kuitenkin seuraavat, tai vastaavat:

Geotrim Oy: Trimble R8 GNSS

Leica Geosystems Oy: Leica Viva GS12

Topgeo Oy: Topcon GR-5

## 7.3 Operaattori

Mittauksissa valittiin käytettäväksi Soneran -liittymiä kaikissa laitteissa. Tämän lisäksi myös varavaihtoehtona on Elisa, jos Soneran -yhteydessä ilmenee käyttökatkoja. Kaikkiin vastaanottimiin varataan siis kahden eri operaattorin sim -kortit. Mittaustilanteessa jokaisella vastaanottimella on käytössä aina sama operaattori samaan aikaan, jotta operaattorin valinta ei vaikuta saatuun tulokseen.

## 8 Raportointi

Työn tuloksista raportoidaan kaikille projektin osapuolille.

## 9 Projektin/mittausten ohjaus

Metropolia Ammattikorkeakoulun puolelta projektin ohjaavana opettajana toimii Vesa Rope. Maahantuojat tarjoavat oman asiantuntijansa mittausten käyttöön.

maahantuoijien edustajat:

Leica Geosystems Oy: Esa Wikman, Janne Hulkko

Topgeo Oy: Markku Similä

Geotrim Oy:n vastuuhenkilöt poistettu (muokattu 20.3.2012).

## **10 Aikataulu**

Mittausten suunnittelu aloitettiin keväällä 2012. Kuitenkin tällöin aikataulu tuli vastaan ja mittaus-ten suorittamisen ajankohta jouduttiin siirtämään syksyyn 2012. Syyskuussa 2012 mittaus-ten suunnittelu aloitettiin uudelleen, jolloin yritysten edustajat tavattiin ja sovittiin projektin jatkosta. Lokakuussa 2012 suoritettiin ensimmäinen maastokatselmusviikko, jolloin etsittiin mittauksissa käytettävät pisteet ja suoritettiin mitattavien pisteiden valinta.

Varsinaiset maastomittaukset on tarkoitus suorittaa marraskuussa 2012 kahden viikon aikana, jonka jälkeen saadut tulokset kootaan, analysoidaan ja raportoidaan. Insinööriyön suunniteltu valmistuminen on joulutammikuussa

## **11 Laadunvalvonta ja tarkastus**

Laadunvalvonnasta vastaavat insinööriyöntekijät Tuomas Toivonen ja Juho Ylikoski. Mittaus-ten suunnittelussa on pyritty huomioimaan maahantuoijien ja asiantuntijoiden ajatukset niiden suorit-tamisesta ja heidän vaatimuksensa niiden toteuttamisesta. Laadukkaisiin tuloksiin päästään hyvällä suunnittelulla ja vakioiduilla menetelmillä.

## **12 Mittaustapa ja kaluston tarkastus**

Mittauksissa käytetään jalustaa ja pakkokeskistä, jotka takaavat tukevamman alustan vastaan-ottimelle, kuin mitä kartoitussauva ja statiivi. Lisäksi kaikissa käytetyissä pisteissä keskusmerkki on selvästi havaittava, jolloin keskistyksestä ei tule virhettä mittauksiin.

Mittauksissa käytettävä kalusto tarkastetaan luovuttavan maahantuoijayrityksen toimesta. He vastaavat siitä, että laitteet toimivat vaaditulla tavalla ja niiden asetukset ovat oikeat. Tämän lisäksi mittaajat huolehtivat laitteiden asiallisesta käytöstä mittauksissa. Jokaisen mittauspäivän jälkeen kerätty data puretaan ja tarkistetaan. Tähän osallistuvat mahdollisesti myös laiteiden edustajat ensimmäisinä mittauspäivinä.



### **13 Toiminta poikkeustilanteissa**

Mittausten suorittamiseen ei tulla varaamaan varalaitteita. Kuitenkin ensimmäisen mittauspäivän mittaukset tapahtuvat pääkaupunkiseudulla, joten väärin toimiva laite voidaan nopeasti vaihtaa uuteen. Lisäksi mittaajat ovat yhteydessä laitteiden edustajiin tarvittaessa ongelmatilanteissa.

### **14 Muuta**

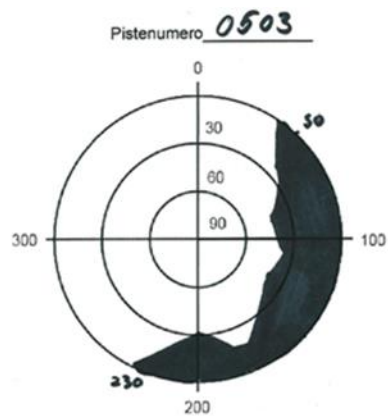
Varaudutaan suunnitelmanmuutoksiin.

### **15 Tiedotus**

Hankkeen mittauksista ei tarvitse tiedottaa, sillä ne eivät aiheuta haittaa kenellekään

### Liite 3. Mitattava piste

31.	
Kiintopisteen numero:	88M2532/0503
Kiintopisteen nimi:	<u>Tuomaila</u>
Kunta:	Asikkala
Tasotarkkuusluokka:	1. luokan kolmiopiste
N (ETRS-TM35FIN):	6791077.841
E (ETRS-TM35FIN):	414083.127
<u>Lat</u> (ETRS89):	61° 14' 40.33102"
<u>Lon</u> (ETRS89):	25° 23' 56.53974"
Korkeus ellipsoidista (GRS80):	113.121
<u>GPS-sopivuus</u> :	Erinomainen
Keskusmerkin tyyppi ja alusta:	pultti ja kolmio kalliossa



*Piste sijaitsee varsin lähellä asfalttietä. Signalointi purettava Torx-avaimella.*

## Liite 4. Mittaustapa (muokattu 20.3.2013)

*Muokkauksessa Trimblen vastaanotin on poistettu*

laite 1: Leica Viva GS14 GNSS

Laite 2: Topcon HiPer Sr

Vaiheet:

1. Pystytetään kolmijalka pisteelle:
  - pystytys
  - keskistys
  - tasaus
2. Asetetaan laite 1 paikalleen ja lukitaan se jalustaan.
3. Mitataan antennikorkeus (esim. Leica GZS4 Korkeusmittarilla)
4. Käynnistetään vastaanotin ja maastotietokone. Yhdistetään palveluun.
5. Peitetään vastaanotin ja maastotietokone foliolla. Kun satelliitit kadonneet, otetaan foliot pois. Alustukseen kuluva aika aloitetaan tästä.
6. Mitataan alustukseen käytetty aika sekuntikellolla. Jos alustusaika ylittää peitteettömällä pisteellä 2 min tai peitteisellä 3 min, kirjataan havaintolomakkeeseen ”ei alusta”.
7. Aloitetaan mittaus.
8. Lopetetaan mittaus ja tallennetaan havainto.
9. Suoritetaan ensimmäiset 10 mittausta samalla laitteella (toistetaan kohdat 5–8).
10. Vaihdetään laite 2 ja mitataan sillä 10 havaintoa kuten laitteella 1 edellä.
11. Vaihdetään takaisin laitteeseen 1 ja tehdään sillä loput 5 mittausta. Vaihdetään sen jälkeen takaisin laitteeseen 2 ja tehdään viimeiset 5 mittausta.
12. Lopuksi mitataan antennikorkeus. Tarkistetaan data pintapuolisesti.
13. Pakataan laitteet takaisin laatikoihin.

\*Mittausten ensimmäinen laite vaihtuu aina jokaisella pisteellä.

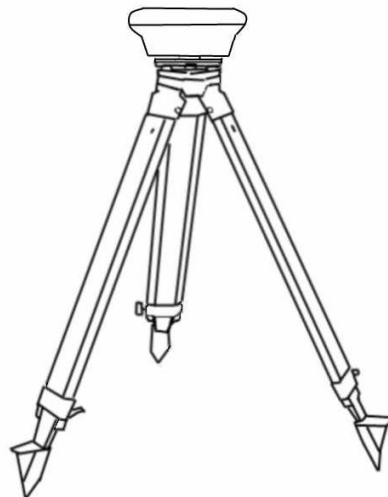
\*Asetukset säädetään ennen mittausta, ei mittauksen aikana.

\*Jokaisen mittauksen tiedot kirjataan havaintolomakkeeseen.

Mittaukset suoritetaan kolmessa sarjassa:3\*5 (yhteensä 15 mittausta/piste/laite).

Havaintoaika 15 s

Havainto 1/s



## Liite 5. Esimerkki havaintojen taulukoinnista (pisteillä G602 ja 0102 tehdyt havainnot)

Pistenumero	Kunta	Elaisyys lukusemaan(km)	Lat	Havaintosarja	Havainto no.	Mittau N	Mittau E	U	N	E	IGRS80 U	Taso (NE)	Korkeus(U)	N	E	U	Satelliittigeometria	Satelliittien km.	GPS (GLONASS)	Aiustusajat(s)	Kellonaika	Piteisyys
G602	Helsinki					Mittau N	Mittau E	U	N	E	IGRS80 U	Taso (NE)	Korkeus(U)	N	E	U	GDOP	7	23		11:30	
1		12,1	Leica	1	6670280,527	386572,397	24,161	6670280,494	386572,351	24,157	0,067	-0,004	-0,033	-0,046	-0,004	1,8	6	7	23	11:30		
2		12,1		2	6670280,535	386572,395	24,163	6670280,494	386572,351	24,157	0,060	-0,006	-0,041	-0,044	-0,006	1,8	6	7	23			
3		12,1		3	6670280,536	386572,401	24,179	6670280,494	386572,351	24,157	0,065	-0,022	-0,042	-0,050	-0,022	1,8	6	7	16			
4		12,1		4	6670280,532	386572,397	24,196	6670280,494	386572,351	24,157	0,060	-0,038	-0,038	-0,046	-0,039	1,8	6	7	17			
5		12,1		5	6670280,521	386572,397	24,173	6670280,494	386572,351	24,157	0,063	-0,016	-0,027	-0,046	-0,016	1,6	7	7	14			
6		12,1		6	6670280,514	386572,392	24,141	6670280,494	386572,351	24,157	0,046	0,016	-0,020	-0,041	0,016	1,6	7	7	16			11:45
7		12,1		7	6670280,505	386572,386	24,139	6670280,494	386572,351	24,157	0,040	0,019	-0,011	-0,038	0,018	1,8	7	7	16			
8		12,1		8	6670280,532	386572,386	24,131	6670280,494	386572,351	24,157	0,052	0,029	-0,038	-0,005	0,026	1,8	7	7	16			
9		12,1		9	6670280,524	386572,386	24,127	6670280,494	386572,351	24,157	0,046	0,030	-0,030	-0,035	0,030	1,8	7	7	15			15
10		12,1		10	6670280,512	386572,381	24,122	6670280,494	386572,351	24,157	0,035	0,035	-0,018	-0,030	0,035	1,8	7	7	28			12:40
11		12,1		11	6670280,533	386572,391	24,157	6670280,494	386572,351	24,157	0,056	0,000	-0,039	-0,040	0,000	1,6	7	8	16			
12		12,1		12	6670280,520	386572,391	24,156	6670280,494	386572,351	24,157	0,056	0,000	-0,039	-0,040	0,000	1,6	7	8	16			
13		12,1		13	6670280,520	386572,397	24,166	6670280,494	386572,351	24,157	0,058	0,007	-0,035	-0,046	0,007	1,6	7	8	15			
14		12,1		14	6670280,530	386572,393	24,179	6670280,494	386572,351	24,157	0,065	-0,022	-0,036	-0,042	-0,022	1,6	7	8	19			
15		12,1		15	6670280,528	386572,380	24,184	6670280,494	386572,351	24,157	0,062	-0,027	-0,034	-0,038	-0,027	1,6	7	8	23			
1		12,1	Topcon	1	6670280,524	386572,381	24,138	6670280,495	386572,352	24,157	0,041	0,019	-0,029	-0,029	0,019	1,8	8	8	10			12:00
2		12,1		2	6670280,534	386572,378	24,147	6670280,496	386572,353	24,157	0,045	0,010	-0,038	-0,025	0,010	1,7	7	8	17			
3		12,1		3	6670280,520	386572,388	24,143	6670280,497	386572,354	24,157	0,041	0,014	-0,023	-0,034	0,014	1,5	8	8	14			
4		12,1		4	6670280,539	386572,395	24,143	6670280,498	386572,354	24,157	0,057	0,014	-0,041	-0,040	0,014	1,6	8	8	13			
5		12,1		5	6670280,531	386572,389	24,172	6670280,499	386572,356	24,157	0,046	-0,015	-0,032	-0,033	-0,015	1,9	8	7	14			
6		12,1		6	6670280,528	386572,374	24,144	6670280,500	386572,357	24,157	0,033	0,013	-0,028	-0,017	0,013	1,6	8	8	13			12:15
7		12,1		7	6670280,513	386572,381	24,155	6670280,501	386572,358	24,157	0,026	0,002	-0,012	-0,023	0,002	1,6	8	8	11			
8		12,1		8	6670280,511	386572,378	24,141	6670280,502	386572,359	24,157	0,021	0,016	-0,009	-0,019	0,016	1,6	8	8	9			
9		12,1		9	6670280,528	386572,380	24,151	6670280,503	386572,360	24,157	0,025	0,006	-0,025	-0,000	0,006	1,6	8	8	7			
10		12,1		10	6670280,532	386572,359	24,124	6670280,504	386572,361	24,157	0,028	0,033	-0,028	-0,033	0,033	1,8	8	8	7			
11		12,1		11	6670280,497	386572,367	24,171	6670280,505	386572,362	24,157	0,069	-0,014	-0,008	-0,005	-0,014	1,7	8	8	11			13:00
12		12,1		12	6670280,540	386572,359	24,157	6670280,506	386572,363	24,157	0,034	0,000	-0,034	-0,034	0,000	1,6	8	8	12			
13		12,1		13	6670280,527	386572,367	24,143	6670280,507	386572,364	24,157	0,034	0,000	-0,034	-0,034	0,000	1,6	8	8	12			
14		12,1		14	6670280,527	386572,367	24,166	6670280,508	386572,364	24,157	0,019	0,009	-0,019	-0,023	0,006	1,7	7	8	12			
15		12,1		15	6670280,563	386572,371	24,134	6670280,509	386572,366	24,157	0,044	0,023	-0,044	-0,005	0,023	1,6	7	8	8			
1		12,1	Leica	1	667337,520	388104,695	28,500	667337,508	388104,665	28,494	0,032	-0,006	-0,012	-0,030	-0,006	1,6	9	7	17			14:30
2		12,1		2	667337,515	388104,694	28,494	667337,508	388104,665	28,494	0,030	0,000	-0,007	-0,029	0,000	1,6	9	7	15			
3		12,1		3	667337,516	388104,698	28,498	667337,508	388104,665	28,494	0,034	0,006	-0,008	-0,033	0,006	1,6	9	7	14			
4		12,1		4	667337,520	388104,698	28,490	667337,508	388104,665	28,494	0,035	0,004	-0,012	-0,033	0,004	1,6	9	7	13			
5		12,1		5	667337,527	388104,697	28,494	667337,508	388104,665	28,494	0,037	0,000	-0,019	-0,032	0,000	1,5	9	7	9			
6		12,1		6	667337,536	388104,694	28,499	667337,508	388104,665	28,494	0,040	-0,005	-0,028	-0,029	-0,005	1,6	9	6	13			14:45
7		12,1		7	667337,534	388104,694	28,496	667337,508	388104,665	28,494	0,039	-0,002	-0,026	-0,029	-0,002	1,6	9	6	13			
8		12,1		8	667337,527	388104,698	28,494	667337,508	388104,665	28,494	0,038	0,010	-0,019	-0,033	0,010	1,6	9	6	16			
9		12,1		9	667337,518	388104,702	28,479	667337,508	388104,665	28,494	0,041	0,015	-0,017	-0,037	0,015	1,3	9	7	8			
10		12,1		10	667337,518	388104,695	28,473	667337,508	388104,665	28,494	0,032	0,021	-0,010	-0,030	0,021	1,5	8	7	15			
11		12,1		11	667337,535	388104,697	28,475	667337,508	388104,665	28,494	0,042	0,019	-0,027	-0,032	0,019	1,4	9	7	23			15:20
12		12,1		12	667337,529	388104,694	28,469	667337,508	388104,665	28,494	0,036	0,025	-0,021	-0,029	0,025	1,5	9	6	23			
13		12,1		13	667337,537	388104,692	28,471	667337,508	388104,665	28,494	0,040	0,023	-0,029	-0,027	0,023	1,4	9	7	14			
14		12,1		14	667337,534	388104,692	28,470	667337,508	388104,665	28,494	0,037	0,024	-0,028	-0,024	0,024	1,4	9	7	15			
15		12,1		15	667337,536	388104,693	28,472	667337,508	388104,665	28,494	0,040	0,022	-0,028	-0,026	0,022	1,4	9	7	13			
1		12,1	Topcon	1	667337,508	388104,665	28,494	667337,508	388104,665	28,494	0,021	0,051	0,004	-0,021	0,051	2,1	9	5	7			15:00
2		12,1		2	667337,524	388104,686	28,443	667337,508	388104,665	28,494	0,020	0,000	-0,014	-0,014	0,000	1,5	9	5	11			
3		12,1		3	667337,517	388104,676	28,472	667337,508	388104,665	28,494	0,014	0,022	-0,009	-0,011	0,022	1,7	9	5	7			
4		12,1		4	667337,526	388104,689	28,464	667337,508	388104,665	28,494	0,030	0,030	-0,018	-0,024	0,030	1,5	9	6	9			
5		12,1		5	667337,524	388104,678	28,481	667337,508	388104,665	28,494	0,021	0,013	-0,016	-0,013	0,013	1,5	9	5	9			
6		12,1		6	667337,535	388104,681	28,456	667337,508	388104,665	28,494	0,031	0,038	-0,027	-0,01								

**Liite 6. Havaintolomake**

Päivämäärä ja kellonaika: \_\_\_\_\_ Laite: Leica, Topcon

Pistenumero: \_\_\_\_\_ Kunta: \_\_\_\_\_

Havaitsija: \_\_\_\_\_

Antennikorkeus: a) alussa: \_\_\_\_\_ b) lopussa \_\_\_\_\_

Havaintosarja: a) 1 b) 2 c) 3

Peitteisyys:

a) Avoin b) Vähäpeitteinen c) Peitteinen

Etäisyys lähimpään tukiasemaan (km): \_\_\_\_\_

Mittaus 1: Alustus: \_\_\_\_\_ Sat. lkm \_\_\_\_\_

PDOP \_\_\_\_\_ GDOP \_\_\_\_\_ Ilm. mittaus tarkkuus: \_\_\_\_\_

Mittaus 2: Alustus: \_\_\_\_\_ Sat. lkm \_\_\_\_\_

PDOP \_\_\_\_\_ GDOP \_\_\_\_\_ Ilm. mit. tarkkuus: \_\_\_\_\_

Mittaus 3: Alustus: \_\_\_\_\_ Sat. lkm \_\_\_\_\_

PDOP \_\_\_\_\_ GDOP \_\_\_\_\_ Ilm. mit. tarkkuus: \_\_\_\_\_

Mittaus 4: Alustus: \_\_\_\_\_ Sat. lkm \_\_\_\_\_

PDOP \_\_\_\_\_ GDOP \_\_\_\_\_ Ilm. mittaus tarkkuus: \_\_\_\_\_

Mittaus 5: Alustus: \_\_\_\_\_ Sat. lkm \_\_\_\_\_

PDOP \_\_\_\_\_ GDOP \_\_\_\_\_ Ilm. mittaus tarkkuus: \_\_\_\_\_

Lisätietoja: \_\_\_\_\_

Liite 7. Karkeat virheet

Mitattu N	Mitattu E	U	Lähtöpisteiden koordinaatit (ETRS-TM35FIN)			Eroitus (referenssi-mittattu)		Satelliitti-geometria			Satelliittien lkm.		Kellonaika (n.)		Peitteisyys	
			N	E	U	Taso (NE)	Korkeus(U)	N	E	U	GDOP	GPS	GLONASS	Alustusajaka(s)		
6733994,747	415331,165	114,462	6733994,933	415330,689	113,840	0,511	-0,622	-0,186	0,476	0,622	3,4	6	5	8	11:40	Peitteinen
6723914,690	353927,008	153,443	6723914,491	353927,001	153,037	0,199	-0,406	0,199	0,007	0,406	2,6	6	6	7	8:40	Peitteinen
6706410,663	472068,549	50,342	6706410,717	472068,458	50,679	0,106	0,337	-0,054	0,091	-0,337	2,2	8	7	7	17:20	Avoin
6749392,611	513214,890	90,165	6749393,444	513213,709	92,298	1,445	2,133	-0,833	1,181	-2,133	2,2	9	5	67	13:10	Avoin
6749391,952	513213,894	92,948	6749393,444	513213,709	92,298	1,503	-0,650	-1,492	0,185	0,650	2,2	8	7	7	13:15	Avoin
6735943,015	308835,673	124,668	6735942,980	308835,549	124,989	0,129	0,321	0,035	0,124	-0,321	3,0	6	5	8	17:00	Vähäpeitteinen
6711610,806	280559,034	67,974	6711610,770	280558,969	68,340	0,074	0,366	0,036	0,065	-0,366	ei tietoa	9	7	7	15:15	Avoin
6825922,643	350017,428	127,254	6825922,741	350019,570	124,909	2,144	-2,345	-0,098	-2,142	2,345	2,9	7	6	19	11:50	Peitteinen
6825922,819	350020,722	125,100	6825922,741	350019,570	124,909	1,155	-0,191	0,078	1,152	0,191	2,0	8	6	10	11:55	Peitteinen
6825922,654	350017,497	127,234	6825922,741	350019,570	124,909	2,075	-2,325	-0,087	-2,073	2,325	2,2	7	7	19	11:55	Peitteinen

Liite 8. Tuloksista poistetut korkeushavainnot (pisteet G36, 0202 ja 0203)

Pistemäärä	Kunta	Etäisyys tukemaan(km)	Laite	Havaintosija	Havainto nro.	Miattu E	U	N	E	lähitipsteen koordinaatit (ETRS-TM3561)	Edoos (referenssimatua)	U	E	N	E	(GRS80) U	Laato (NE)	Korkeus(U)	N	E	U	Satelliittigeometria	Satelliittien lkm	GLONASS	Autustaika(s)	Pvm	Kellonaika	Pöytäsiisys		
G36	Luvia	19,8	Leica	1	6684812 374	442444,925	51,282	6684812 357	442444,920	51,343	0,061	-0,017	-0,005	0,061	0,061	0,017	0,061	-0,017	-0,005	0,061	0,061	1,4	8	8	10	7.2.2013	20.35	avoin		
					2	6684812 379	442444,924	51,278	6684812 357	442444,920	51,343	0,028	0,065	-0,022	-0,004	0,065	0,065	0,028	0,065	-0,022	-0,004	0,065	0,065	1,4	8	8	6	7.2.2013		
					3	6684812 378	442444,923	51,274	6684812 357	442444,920	51,343	0,021	0,069	-0,021	-0,003	0,069	0,069	0,021	0,069	-0,021	-0,003	0,069	0,069	1,6	7	7	16	7.2.2013		
					4	6684812 387	442444,925	51,270	6684812 357	442444,920	51,343	0,030	0,073	-0,030	-0,005	0,073	0,073	0,030	0,073	-0,030	-0,005	0,073	0,073	1,6	8	7	17	7.2.2013		
					5	6684812 377	442444,925	51,273	6684812 357	442444,920	51,343	0,021	0,070	-0,020	-0,005	0,070	0,070	0,021	0,070	-0,020	-0,005	0,070	0,070	1,8	6	6	8	7.2.2013		
					6	6684812 375	442444,923	51,280	6684812 357	442444,920	51,343	0,018	0,063	-0,018	-0,003	0,063	0,063	0,018	0,063	-0,018	-0,003	0,063	0,063	1,8	6	6	16	7.2.2013	20.40	
					7	6684812 382	442444,920	51,263	6684812 357	442444,920	51,343	0,028	0,060	-0,025	0,000	0,060	0,060	0,028	0,060	-0,025	0,000	0,060	0,060	1,8	6	6	13	7.2.2013		
					8	6684812 383	442444,920	51,275	6684812 357	442444,920	51,343	0,028	0,066	-0,026	0,000	0,066	0,066	0,028	0,066	-0,026	0,000	0,066	0,066	1,8	6	6	17	7.2.2013		
					9	6684812 376	442444,924	51,275	6684812 357	442444,920	51,343	0,020	0,068	-0,020	-0,000	0,068	0,068	0,020	0,068	-0,020	-0,000	0,068	0,068	1,8	6	6	11	7.2.2013		
					10	6684812 377	442444,923	51,275	6684812 357	442444,920	51,343	0,020	0,068	-0,020	-0,000	0,068	0,068	0,020	0,068	-0,020	-0,000	0,068	0,068	1,8	6	6	11	7.2.2013		
					11	6684812 378	442444,926	51,282	6684812 357	442444,920	51,343	0,022	0,061	-0,021	-0,003	0,061	0,061	0,022	0,061	-0,021	-0,003	0,061	0,061	1,8	6	6	15	7.2.2013	20.50	
					12	6684812 382	442444,923	51,287	6684812 357	442444,920	51,343	0,025	0,059	-0,025	-0,003	0,059	0,059	0,025	0,059	-0,025	-0,003	0,059	0,059	1,8	6	6	16	7.2.2013		
					13	6684812 379	442444,928	51,275	6684812 357	442444,920	51,343	0,023	0,068	-0,022	-0,008	0,068	0,068	0,023	0,068	-0,022	-0,008	0,068	0,068	1,8	6	6	16	7.2.2013		
					14	6684812 373	442444,920	51,282	6684812 357	442444,920	51,343	0,016	0,061	-0,016	0,000	0,061	0,061	0,016	0,061	-0,016	0,000	0,061	0,061	1,9	8	6	15	7.2.2013		
					15	6684812 378	442444,920	51,281	6684812 357	442444,920	51,343	0,021	0,062	-0,021	0,000	0,062	0,062	0,021	0,062	-0,021	0,000	0,062	0,062	1,8	8	6	22	7.2.2013		
0202	Topcon	19,8	1	6684812 387	442444,937	51,278	6684812 357	442444,920	51,343	0,034	0,065	-0,030	-0,017	0,065	0,065	0,034	0,065	-0,030	-0,017	0,065	0,065	1,6	7	7	10	7.2.2013	20.25			
				2	6684812 388	442444,933	51,288	6684812 357	442444,920	51,343	0,034	0,055	-0,031	-0,013	0,055	0,055	0,034	0,055	-0,031	-0,013	0,055	0,055	1,7	7	7	21	7.2.2013			
				3	6684812 383	442444,927	51,245	6684812 357	442444,920	51,343	0,027	0,096	-0,026	-0,007	0,096	0,096	0,027	0,096	-0,026	-0,007	0,096	0,096	1,6	8	7	11	7.2.2013			
				4	6684812 384	442444,929	51,280	6684812 357	442444,920	51,343	0,026	0,078	-0,026	-0,007	0,078	0,078	0,026	0,078	-0,026	-0,007	0,078	0,078	1,6	8	7	17	7.2.2013			
				5	6684812 389	442444,929	51,290	6684812 357	442444,920	51,343	0,026	0,063	-0,027	-0,011	0,063	0,063	0,026	0,063	-0,027	-0,011	0,063	0,063	1,5	8	7	7	7.2.2013			
				6	6684812 374	442444,920	51,295	6684812 357	442444,920	51,343	0,017	0,048	-0,017	-0,000	0,048	0,048	0,017	0,048	-0,017	-0,000	0,048	0,048	1,5	8	7	9	7.2.2013	20.30		
				7	6684812 390	442444,930	51,265	6684812 357	442444,920	51,343	0,034	0,078	-0,033	-0,010	0,078	0,078	0,034	0,078	-0,033	-0,010	0,078	0,078	1,5	8	7	9	7.2.2013			
				8	6684812 403	442444,927	51,283	6684812 357	442444,920	51,343	0,047	0,060	-0,046	-0,007	0,060	0,060	0,047	0,060	-0,046	-0,007	0,060	0,060	1,5	8	7	13	7.2.2013			
				9	6684812 398	442444,926	51,292	6684812 357	442444,920	51,343	0,041	0,051	-0,041	-0,006	0,051	0,051	0,041	0,051	-0,041	-0,006	0,051	0,051	1,5	8	7	6	7.2.2013			
				10	6684812 401	442444,927	51,278	6684812 357	442444,920	51,343	0,045	0,065	-0,044	-0,007	0,065	0,065	0,045	0,065	-0,044	-0,007	0,065	0,065	1,5	8	7	8	7.2.2013			
				11	6684812 387	442444,925	51,249	6684812 357	442444,920	51,343	0,030	0,064	-0,030	-0,005	0,064	0,064	0,030	0,064	-0,030	-0,005	0,064	0,064	2,0	8	5	7	7.2.2013	20.45		
				12	6684812 382	442444,919	51,258	6684812 357	442444,920	51,343	0,025	0,065	-0,025	-0,001	0,065	0,065	0,025	0,065	-0,025	-0,001	0,065	0,065	2,0	8	4	4	7.2.2013			
				13	6684812 381	442444,916	51,274	6684812 357	442444,920	51,343	0,024	0,069	-0,024	0,004	0,069	0,069	0,024	0,069	-0,024	0,004	0,069	0,069	2,0	8	4	23	7.2.2013			
				14	6684812 384	442444,920	51,276	6684812 357	442444,920	51,343	0,027	0,067	-0,027	0,000	0,067	0,067	0,027	0,067	-0,027	0,000	0,067	0,067	2,0	8	4	7	7.2.2013			
				15	6684812 378	442444,919	51,280	6684812 357	442444,920	51,343	0,021	0,063	-0,021	0,000	0,063	0,063	0,021	0,063	-0,021	0,000	0,063	0,063	2,0	8	4	13	7.2.2013			
0203	Perovo	9,7	Leica	1	6689263 163	435702,659	27,827	6689263 155	435702,664	27,884	0,009	0,057	-0,008	0,057	0,057	0,009	0,057	-0,008	0,057	0,057	1,6	8	8	13	7.2.2013	18.40	avoin			
					2	6689263 162	435702,658	27,825	6689263 155	435702,664	27,884	0,006	0,059	-0,007	0,006	0,059	0,059	0,006	0,059	-0,007	0,006	0,059	0,059	1,6	8	8	6	7.2.2013		
					3	6689263 158	435702,659	27,822	6689263 155	435702,664	27,884	0,006	0,062	-0,003	0,005	0,062	0,062	0,006	0,062	-0,003	0,005	0,062	0,062	1,6	8	8	13	7.2.2013		
					4	6689263 153	435702,658	27,819	6689263 155	435702,664	27,884	0,006	0,065	-0,002	0,006	0,065	0,065	0,006	0,065	-0,002	0,006	0,065	0,065	1,6	8	8	7	7.2.2013		
					5	6689263 149	435702,658	27,817	6689263 155	435702,664	27,884	0,008	0,067	-0,006	0,005	0,067	0,067	0,008	0,067	-0,006	0,005	0,067	0,067	1,6	8	8	8	7.2.2013		
					6	6689263 147	435702,658	27,816	6689263 155	435702,664	27,884	0,010	0,068	-0,008	0,008	0,068	0,068	0,010	0,068	-0,008	0,008	0,068	0,068	1,6	8	8	7	7.2.2013	18.45	
					7	6689263 150	435702,659	27,816	6689263 155	435702,664	27,884	0,007	0,068	-0,008	0,005	0,068	0,068	0,007	0,068	-0,008	0,005	0,068	0,068	1,6	8	8	13	7.2.2013		
					8	6689263 154	435702,657	27,817	6689263 155	435702,664	27,884	0,007	0,067	-0,007	0,007	0,067	0,067	0,007	0,067	-0,007	0,007	0,067	0,067	1,6	8	8	10	7.2.2013		
					9	6689263 156	435702,654	27,828	6689263 155	435702,664	27,884	0,012	0,056	-0,005	0,010	0,056	0,056	0,012	0,056	-0,005	0,010	0,056	0,056	1,6	8	8	13	7.2.2013		
					10	6689263 160	435702,653	27,830	6689263 155	435702,664	27,884	0,012	0,054	-0,005	0,011	0,054	0,054	0,012	0,054	-0,005	0,011	0,054	0,054	1,7	8	7	14	7.2.2013		
					11	6689263 144	435702,671	27,817	6689263 155	435702,664	27,884	0,013	0,067																	

Pistenumero	Kunta	Etäisyys tukiasemaan(km)	Laitte	Havaintosarja	Havaintosarja	Havainto mro.	Mitattu N	Mitattu E	U	N	E	Laitteen koordinaatit (ETRS-TM3569)		Erasus (referenssimittaus)	U	E	Satelliittigeometria	Satelliittien lkm.	GLOMSS	Alustusaika(s)	Pvm.	Kellon aika	Pletessyys
												(GRS80,U)	(Taso (NE))										
0203	Askola	15,7	Leica	1	6706560,801	414514,802	64,746	6706560,586	414514,892	64,793	0,262	0,148	-0,215	-0,149	0,048	2,7	1	16	6.2.2013	8.50	avoin		
		15,7		2	6706560,800	414514,802	64,746	6706560,586	414514,892	64,793	0,017	0,047	0,014	-0,010	0,047	1,6	9	7	13	6.2.2013			
		15,7		3	6706560,588	414514,804	64,739	6706560,586	414514,892	64,793	0,017	0,054	0,012	-0,012	0,054	1,6	9	7	16	6.2.2013			
		15,7		4	6706560,588	414514,807	64,737	6706560,586	414514,892	64,793	0,019	0,056	0,012	-0,015	0,056	1,6	9	7	21	6.2.2013			
		15,7		5	6706560,602	414514,806	64,742	6706560,586	414514,892	64,793	0,021	0,051	0,016	-0,014	0,051	1,6	9	7	14	6.2.2013			
		15,7		6	6706560,602	414514,898	64,722	6706560,586	414514,892	64,793	0,017	0,061	0,016	-0,006	0,061	1,6	9	7	9	6.2.2013		9,00	
		15,7		7	6706560,586	414514,807	64,737	6706560,586	414514,892	64,793	0,019	0,055	0,016	-0,003	0,055	1,6	9	7	12	6.2.2013			
		15,7		8	6706560,595	414514,800	64,733	6706560,586	414514,892	64,793	0,015	0,055	0,009	-0,003	0,061	1,6	9	7	11	6.2.2013			
		15,7		9	6706560,595	414514,802	64,738	6706560,586	414514,892	64,793	0,013	0,055	0,009	-0,010	0,055	1,6	9	7	16	6.2.2013			
		15,7		10	6706560,589	414514,888	64,724	6706560,586	414514,892	64,793	0,014	0,059	0,013	-0,006	0,059	1,6	9	7	15	6.2.2013			
		15,7		11	6706560,591	414514,912	64,789	6706560,586	414514,892	64,793	0,021	0,004	0,005	-0,020	0,004	1,7	9	7	15	6.2.2013		9,20	
		15,7		12	6706560,588	414514,909	64,803	6706560,586	414514,892	64,793	0,017	-0,010	0,002	-0,017	-0,010	1,6	8	7	14	6.2.2013			
		15,7		13	6706560,594	414514,813	64,786	6706560,586	414514,892	64,793	0,022	0,007	-0,008	-0,021	0,007	1,6	8	7	6	6.2.2013			
		15,7		14	6706560,593	414514,807	64,790	6706560,586	414514,892	64,793	0,017	0,003	0,007	-0,015	0,003	1,4	9	7	35	6.2.2013			
		15,7		15	6706560,594	414514,811	64,786	6706560,586	414514,892	64,793	0,021	0,007	0,008	-0,019	0,007	1,4	9	7	14	6.2.2013			
		15,7	Topcon	1	6706560,595	414514,805	64,723	6706560,586	414514,892	64,793	0,016	0,070	0,009	-0,013	0,070	1,6	9	6	6	6.2.2013		8,30	
		15,7		2	6706560,597	414514,815	64,757	6706560,586	414514,892	64,793	0,025	0,056	0,011	-0,023	0,056	1,6	9	7	8	6.2.2013			
		15,7		3	6706560,597	414514,815	64,757	6706560,586	414514,892	64,793	0,025	0,056	0,011	-0,023	0,056	1,6	9	7	7	6.2.2013			
		15,7		4	6706560,590	414514,811	64,723	6706560,586	414514,892	64,793	0,019	0,070	0,004	-0,019	0,070	1,8	7	7	10	6.2.2013			
		15,7		5	6706560,590	414514,909	64,739	6706560,586	414514,892	64,793	0,020	0,054	0,010	-0,017	0,054	1,7	7	7	7	6.2.2013			
		15,7		6	6706560,595	414514,909	64,731	6706560,586	414514,892	64,793	0,019	0,052	0,009	-0,017	0,052	2,5	7	7	9	6.2.2013		8,40	
		15,7		7	6706560,609	414514,811	64,737	6706560,586	414514,892	64,793	0,030	0,056	0,023	-0,019	0,056	2,4	7	7	8	6.2.2013			
		15,7		8	6706560,599	414514,811	64,737	6706560,586	414514,892	64,793	0,023	0,056	0,013	-0,019	0,056	2,2	7	7	8	6.2.2013			
		15,7		9	6706560,592	414514,806	64,722	6706560,586	414514,892	64,793	0,015	0,069	0,006	-0,014	0,069	2,1	7	7	9	6.2.2013			
		15,7		10	6706560,586	414514,801	64,722	6706560,586	414514,892	64,793	0,013	0,071	0,010	-0,009	0,071	1,8	7	7	8	6.2.2013			
		15,7		11	6706560,590	414514,852	64,811	6706560,586	414514,892	64,793	0,085	-0,018	0,026	-0,060	-0,018	2,0	9	7	7	6.2.2013		9,10	
		15,7		12	6706560,586	414514,894	64,781	6706560,586	414514,892	64,793	0,010	0,012	0,010	-0,002	0,012	1,6	9	7	7	6.2.2013			
		15,7		13	6706560,585	414514,899	64,783	6706560,586	414514,892	64,793	0,027	0,039	0,024	-0,027	0,039	1,7	9	7	9	6.2.2013			
		15,7		14	6706560,595	414514,802	64,783	6706560,586	414514,892	64,793	0,032	0,039	0,024	-0,027	0,039	1,7	9	7	7	6.2.2013			
		15,7		15	6706560,586	414514,807	64,781	6706560,586	414514,892	64,793	0,013	0,012	-0,012	-0,005	0,012	1,7	9	7	12	6.2.2013			