

Yhdeksän RTK GNSS- laitteen vertailu

Dimense Oy / Ari Kilpelä (TkT, TJ) / elokuu-syyskuu 2024 / Oulu

Vertailun tavoite ja taustatiedot

Tämän vertailun tarkoitus on ollut selvittää, millaisia eroja eri merkkisillä ja -tyyppisillä RTK GNSS-satelliittipaikantimilla samoista mittapisteistä mitattujen tulosten välillä on. Satelliittipaikannuksessa oli v. 2022 käytössä maailmanlaajuisesti yli 140 satelliittia ja 7 eri satelliittijärjestelmää (konstellaatiota), joista merkityksellisimmät ovat USAn GPS, Venäjän GLONASS, EU:n GALILEO ja Kiinan BEIDOU, jotka ovat käytettävissä esim. Pohjois-Suomessa, tämän testauksen alueella. Näiden lisäksi esim. Japanilla ja Intialla on omat järjestelmänsä, mutta niiden satelliitit eivät kulje sellaisia ratoja, että niistä olisi Suomessa hyötyä. Tyyppillisesti yhden järjestelmän satelliitit käyttävät 5-6 eri taajuutta ja ne voivat olla osittain samoja eri järjestelmissä. Näin ollen taajuuksia on selvästi vähemmän kuin satelliitteja¹. Satelliittivastaanotin käyttää vähintään yhtä taajuutta, mutta nykyään yleensä kahta tai useampaa. Monitaajuus- ja monikonstellaatiojärjestelmien käytön paremmuus yhden taajuuden ja yhden konstellaation käyttöön on osoitettu mittauksin². Satelliittivastaanottimen virhelähteitä on useita, kuten ionosfäärin ja troposfäärin viiveet signaalin kulkuun, paikalliset signaalin heijastukset, ajoitus(kellon)virheet satelliiteissa, auringon aktiivisuus jne.³ RTK (Real Time Kinematic) GNSS-järjestelmä perustuu siihen, että yksi tai useampia tukiasemia (base) lähettää joko internetin kautta tai suoraan radiolla korjaustietoa mittaavalle laitteelle (rover) ja näin mittaava laite pystyy mittaamaan välittömästi tarkan paikan⁴. Järjestelmässä siis mitataan koko ajan itse asiassa etäisyyttä paikallaan pysyviin tukiasemiin. Järjestelmän horisontaalinen (N-E) tarkkuus on tyyppillisesti ollut NRTK-ympäristössä (Network RTK eli usean tukiaseman järjestelmät) 2 cm luokkaa⁵. Vuonna 2022 Pekingissä tehdyssä mittauksessa saavutettiin alle 2 cm RMS_virhe kaupungin keskustan ulkopuolella ja 4 - 5 cm keskustassa, kun käytössä oli monitaajuinen vastaanotin, joka käytti kaikkia saatavilla olevia satelliittijärjestelmiä⁶. Koska järjestelmän tarkkuuteen vaikuttaa niin moni asia, yleensä laitteiden tarkkuutta ei määritellä laitteiden datalehdillä vaan suorituskykyä kuvataan sanalla ”precision” eli mittausepävarmuus. Se kuvaa mittauksen hajontaa eli usein Gaussin (eli satunnaisen) jakauman sigma-arvoa, jota puolestaan kutsutaan myös (Gaussin jakauman) RMS-arvoksi⁷. Mittaus tapahtuu maailmanlaajuisessa Yhdysvaltain puolustusministeriön ylläpitämässä WGS-84-tasokoordinaatistossa⁸ ja laitteiden ohjelmistot muuttavat mittaustulokset haluttuun paikalliseen koordinaatistoon, joita ovat Suomessa esim. koko Suomen laajuinen ETRS-TM35FIN ja paikalliset GK-koordinaatistot. Tällaisia ovat Oulussa käytetyt GK25- ja GK26-koordinaatistot. Mittaustulos ilmaistaan latitudi-longitudi- tai pohjoiskoordinaatti-itäkoordinaattimuodossa. Pohjoiskoordinaatti (northing) tarkoittaa mittauspisteen etäisyyttä päiväntasaajalta ja itäkoordinaatti etäisyyttä länsi-itäsuunnassa keskimeridiaanista, joka on esim. ETRS-TM35FIN- koordinaatistossa Greenwichin meridiaani. Suomalaisissa GK (Gauss-Kruger) koordinaatistoissa keskimeridiaani on ao. asteluvun meridiaani eli esim. GK26-koordinaatistossa 26 asteen meridiaani, jonka kohdalla ao. luku on 500 000 m, jotta vältetään negatiiviset itäkoordinaatit. Luvut ovat aina metrejä. Koordinaatiston lisäksi tarvitaan geodeettinen datumi. Se kertoo, miten koordinaatisto kiinnitetään Maahan. Datumi määrittelee koordinaatiston origon eli nollapisteen, mittakaavan sekä orientaation eli koordinaattiakselien suunnat.⁹ Tasokoordinaatiston lisäksi paikan määrittelemiseen tarvitaan ns. geoidimalli. Geoidi tarkoittaa maan tai taivaankappaleen muotoa kuvaavaa mallia. Geoidi on se

painovoimakentän potentiaalin tasa-arvopinta, joka parhaiten yhtyy levossa olevaan meren keskivedenpintaan joko globaalisti tai paikallisesti¹⁰, minkä vuoksi geoidi ei ole tasainen maanpinnalla, koska maan vetovoima ei ole täysin vakio kaikkialla. Geoidimalli on geoidin numeerinen mallinnus. Esim. Suomessa on käytössä FIN2005N000 ja FIN2023N00¹¹- geoidimallit.

Mittauspaikka ja mitatut laitteet

Laitteiden suorituskyvyn selvittämiseksi tehtiin Oulussa Tokantie 34:n piha-alueella ja sen ympäristön puistoalueella 6 mittapistettä, joista mittapiste 1 on satelliittinäkyvyydeltään paras, rakennetulle ympäristölle tyypillinen, osin puustosta avoin piste. Kaikki muut pisteet ovat satelliittien näkyvyyden suhteen joko osittain tai hyvin paljon rajoittuneita, joko rakennusten tai puuston vuoksi. Varsinkin pisteet 5 ja 6 ovat tällaisia. Mittauspisteet kuvineen on esitetty kunkin mittauspisteen tulosten kohdalla. Mittauspisteet on merkitty maahan upotetulla 25 x 25 mm x 300 mm puupaalulla, jonka päähän on porattu mittasauvan kärkeä varten puolipallon muotoinen kuppi, halkaisijaltaan 10 mm. Mittapaikkoja ei pyritty tekemään maan tasoon vaan ne on tehty vain vertailua varten eli ne ovat vaihtelevalla korkeudella maan pinnasta ja ne on merkitty kirkkkaalla maalilla.

Mittauksissa käytettiin kaikille laitteille Kareran¹² VRS (Virtual Reference Station)-palvelua, jossa käytetään Maanmittauslaitoksen tukiasemia. Järjestelmässä korjaussignaali lasketaan usean tukiaseman signaaleista ja järjestelmä muodostaa ns. virtuaalisen eli näennäisen tukiaseman käyttäjän lähelle. Testin aikana sen havaittiin muodostuvan noin 100 m - 5000 m etäisyyksille mittajaasta. Kaikilla laitteilla käytettiin saatavilla olevia satelliittijärjestelmiä ja laitteiden asetusarvot olivat tehdasasetuksilla. Mittauksissa käytetyt ohjelmat olivat laitevalmistajien omia ohjelmia.

Mittaukset tehtiin elo-syyskuussa 2024 kahdeksalla eri tyyppisellä laitteella, jotka edustavat viittä eri merkkiä. Laitteet olivat 1) Emlid RX, 2) Emlid RS3, 3) Emlid RS2, 4) SingularXYZ Sfaira One Plus, 5) Alpha 4i, 6) South G4, 7) South G5 ja 8) FJDynamics V10i. Näistä Emlid RS2 ei ole enää tuotannossa. Näiden lisäksi testattiin yhdeksäntenä toista tuotannosta poistunutta laitetta, Emlid RS+, mutta sillä ei saatu mitattua kuin 2/6 mittauspistettä, jonka vuoksi se ei ole vertailukelpoinen muihin ja sitä ei ole sisällytetty loppuarvosteluihin. Sen mittaus tulokset on kuitenkin esitetty ao. kohdissa. Kuva 1 esittää testattuja mittalaitteita seuraavassa järjestyksessä: yläriivi vasemmalta Emlid RX, Emlid RS2, Emlid RS+, Emlid RS3 ja SingularXYZ Sfaira One Plus ja alarivi vasemmalta: Alpha 4i, South G4, South G5 ja FJDynamics V10i. Testatuista laitteista Emlid RX ja Sfaira One Plus eroavat antennin muodoltaan muista sauvamaisella, pienemmällä, antennillaan kun muissa on integroituna lieriömäinen antenni. Alpha 4i on lieriömäisistä antenneista selvästi kevein ja pienin, sen halkaisija on alle 10 cm.

Laitteissa on suuria eroja kanavamäärän suhteen (Taulukko 1). Yksitaajuuslaite Emlid RS+:ssa on vain 72 kanavaa ja eniten kanavia on South G5:ssä, 1760 kappaletta. Mielenkiintoinen yksityiskohta on, että kolmessa laitteessa, SingularXYZ Sfaira One Plus, Alpha 4i ja FJDynamics V10i, on kaikissa sama määrä kanavia eli 1408 kappaletta. Voidaan arvailla, ovatko näissä käytetyt vastaanotinpiirit peräisin alkujaan samasta tehtaasta. Kuten tuloksista jäljempänä voidaan havaita, laitteiden välillä oli selviä eroja suorituskyvyssä. Kaikissa testatuissa laitteissa, paitsi Emlid RS+:ssa, RX:ssä ja RS2:ssa, on kallistuskorjaus (IMU = Inertial Monitoring Unit), joka oli mittauksen aikana käytössä. Taulukko 1 esittää laitteiden välisiä koko- ja painoeroja. Emlid RX on selvästi kevein, vain 250 grammaa. Seuraavassa luokassa ovat Alpha 4i ja SingularXYZ Sfaira One Plus, joiden paino on noin 400 gramman luokkaa, vaikka laitteen muoto on selvästi erilainen. Emlid RS2, RS3, ja FJD V10i ja South G4 ovat painoltaan ja kooltaan lähellä toisiaan. South G5 on selvästi painavin. G5 ja FJDV10i ovat ainoina varustettu omalla näytöllä, joka South G5:n tapauksessa on myös kosketusnäyttö. FJD:ssä on myös 2 kameraa etämittauksia varten, mutta niitä ei käytetty tässä testissä. Niitä laitteita, joissa on UHF-modeemi tai Lora-modeemi, voidaan käyttää toisen laitteen tukiasemana joko suoralla radioyhteydellä tai jonkun palvelun, kuten Emlidin palvelu tai rtk2go.com-palvelun avulla. Nämä palvelut ovat ilmaisia. Emlidin

laitteet erovat muista sikäli, että niissä käytetään ainoana Lora-taajuutta (868 MHz) suorana radioyhteytenä ja muissa käytetään 450 MHz radioita, jotka ovat toistensa kanssa yhteneviä eli eri merkisiä laitteita voidaan käyttää keskenään base-rover- radioyhteydessä, kunhan taajuus ja protokolla säädetään samoiksi. Yleisiä protokollia ovat esim. Trintalk- ja Satel-protokollat. Emlid RS3:ssa on myös 450 MHz radio ja se on yhteensopiva vastaanottamaan paikallista tukiasemasignaalia tällä taajuusalueella.



Kuva 1. Testatut mittalaitteet, ylhäältä vasemmalta Emlid RX, Emlid RS2, Emlid RS+, Emlid RS3 ja SingularXYZ Sfaira One Plus. Alarivissä Alpha 4i, South G4, South G5 ja FJDynamics V10i.

Laitte	Koko	Paino	Kommu- nikaatio	IMU	Kanavia [kpl]	Sis. muisti	Kontrolleri saatavana
Emlid RS+	145 x 145 x 85mm	690 gr.	BT 4.0, Lora, Wifi, RS-232, micro- USB	Ei	72	8 Gb.	Ei
Emlid RX	172x51x51 mm	250 gr.	BT 4.2, USB-C	Ei	184	-	Ei
Emlid RS3	126x126x142mm	950gr.	BT4.0, UHF, Lora, 4G, Wifi, RS-232, USB-C	On	184	16 Gb	Ei
Emlid RS2	126x126x142 mm	950gr	BT 4.0, Lora, 3.5G, Wifi, RS- 232, USB-C	Ei	184	16 Gb	Ei
SingularXYZ Sfaira One Plus	Φ 50 mm x 149 mm	409 gr.	BT 2.0, USB-C	On	1408	-	On
Alpha 4i	Φ 98mm*53mm	380 gr.	BT5.0, UHF, USB- C	On	1408	-	On
South G4	135mm×135mm× 85 mm	890 gr,	BT4.1, Wifi, NFC, 4G, UHF, RS-232, USB-C	On	1698	4 Gb- 128 Gb.+ ulk. USB	On
South G5	165mm(φ) × 108mm(H)	1.35 kg	BT4.1, Wifi, NFC, 4G, UHF, RS-232, USB-C	On	1760	16 -64Gb. + ulk. USB	On
FJDynamics V10i	Φ 130 × 83 mm	950 gr.	BT4.2&BLE, Wifi, NFC, 4G, UHF, USB-C	On	1408	32 Gb	On

Taulukko 1. Mitattujen laitteiden ominaisuudet

Mittaukset tehtiin maanmittaukselle tyypillisellä mittasauvalla, jota mittaaja piti käsivaralta suorassa eli periaatteessa kallistuskorjauksella ei ollut juurikaan korjattavaa. Jokaista pistettä mitattiin 10 kertaa, joista jokainen mittaus sisälsi 3-5 yksittäismittausta. Lopullinen ao. pisteen tulos on mittauksen keskiarvo. Mittaukset pyrittiin toistamaan joko samalla tai jos mahdollista, myös eri laiteyksilöllä. Mittauksia tehtiin eri päivinä pitkäköön ajan kuluessa, jotta saadaan kompensoitua satelliittien lukumäärän ja position ja auringon aktiivisuuden vaihtelu. Mitattujen laiteyksiköiden ja mittauskertojen lukumäärät on esitetty kohdassa Taulukko 2. Jokainen mittaus siis sisälsi yhdestä pisteestä mitattuna $10 \times 3-5 = 30-50$ yksittäismittausta ja näitä mittauksia tehtiin 1-4 kertaa. Muissa paitsi Alphan tapauksessa mittasauvan pituus on 180 cm (sama sauva kaikille, mitattu 180 cm), Alphalla 160 cm (mitattu 159,5 cm ilman kärjen kumisuoja). Auringon aktiivisuus vaikuttaa mittauksen luotettavuuteen, varsinkin tämän tutkimuksen aikana, koska auringon aktiivisuuden odotetaan olevan huipussaan vuonna 2024. Käytännössä auringon aktiivisuus näkyy siten, että ns. RTK FIX -tilaa on vaikeampi saavuttaa ja laite on pitemmän aikaa FLOAT-tilassa (¹³). Auringon aktiivisuus Suomessa voidaan tarkistaa esim. Avaruussäätökeskuksen (RWC Finland) sivuilta¹⁴. Valitettavasti RWC:n sivut eivät näytä ihan reaaliaikaista tilannetta ja mittauspaikkaa lähin asema on Oulujärvi, jonka etäisyys Oulusta on 100 km luokkaa. Yksi aktiivisuutta kuvaava parametri on geomagneettinen aktiivisuus (yksikkö nT) ja toinen elektronien tiheys ionosfäärissä (Kuva 2). Ionosfäärin elektronit hidastavat ja sirottavat satelliiteista vastaanottimille tulevaa sähkömagneettista signaalia¹⁵. Koska mittauksia tehtiin useita, samallakin laitteella, ja eri päivinä, huomattiin, että joskus sama laite todellakin pysyi FLOAT-tilassa pitkäköön ajan (voi olla minuuttien luokkaa tai pidempikin aika), kun seuraavana päivänä samalla laitteella pystyi aloittamaan mittauksen hyvin nopeasti (alle minuutissa käynnistyksestä). Mittauksissa huomattiin, että laitteen käyttäjän kannattaa opiskella laitteen käyttäytyminen tilanteessa, jossa auringon aktiivisuus häiritsee selvästi mittauksen onnistumista. Jos laite ei pääse FIX-tilaan riittävän nopeasti tai putoaa siitä pois mittauksen aikana, vaikka mittauspaikka ei ole erityisen vaativa, kannattaa suhtautua varauksella tulosten tarkkuuteen, vaikka laite välillä kävisikin FIX-tilassa. Tässä julkaisussa ei kuitenkaan ole dokumentoitu laitteiden välisiä eroja, jotka mahdollisesti johtuvat auringon aktiivisuudesta, koska ihan reaaliaikaista tietoa ei ollut ja kaikkia laitteita ei voitu mitata samanaikaisesti. Mittaus aloitettiin aina ”helpoimmasta” paikasta eli paikasta, jossa on paras taivasnäkyvyys (paikka 1), joten jos joku laite ei päässyt helpoimmassa paikassa laitteelle ominaisessa käynnistysajassa RTK FIX- tilaan, on mahdollista, että se johtui auringon aktiivisuudesta, mutta reaaliaikaisen auringon aktiivisuustilanteen puuttuessa sitä ei dokumentoitu vaan se kompensoitiin aloittamalla mittaus jollain toisella ajanhetkellä. Toinen mahdollinen laajan alueen häirintälähde olisi ollut tahallinen GPS-häirintä (Kuva 3). Häirintää voidaan seurata esim. lähteestä ¹⁶. jossa käyttäjä voi valita häirinnän havainnoinnin aikajakson. Taulukko 1 kuvaa mittauskertojen ja testattujen laiteyksilöiden määriä eri laitetyypeillä. Luonnollisesti useammat mittauskerrat useilla mittausyksilöillä antavat luotettavamman tuloksen. Kaikissa mittauksissa käytettiin koordinaatistoa ETRS-TM35FIN ja geoidimallia FIN2005N00.

Activity forecast, 1 hour

Issued at 20241019 13:16:03 UT

Solar wind parameters of the latest hour by NOAA			
parameter	min	max	mean
IMF Bz [nT]	-6.5	0.3	-4.2
velocity [km/s]	400.4	454.7	434.5
density [cm ⁻³]	0.6	4.3	2.7

Geomagnetic activity (RX [nT])			
site	latest hour	next hour (RXmin, RXmax)	
Kevo (KEV)	85	14	192
Maasi (MAS)	92	13	165
Kilpisjärvi (KIL)	100	13	168
Ivalo (IVA)	75	11	177
Muonio (MUO)	86	12	160
Sodankylä (SOD)	64	11	156
Pello (PEL)	72	10	127
Oulujärvi (OUJ)	52	9	104
Mekrijärvi (MEK)	32	8	50
Hankasalmi (HAN)	-	7	68
Nurmijärvi (NUR)	26	7	60
Tartu (TAR)	16	6	45

Geomagnetic activity forecast based on solar wind data. The two values for the next hour give an interval, where RX will be at a 90 % probability. RX is the range of the North component of the geomagnetic field. The colours indicate the level of activity:

low – increased – moderate – high – very high.

Ionospheric TEC

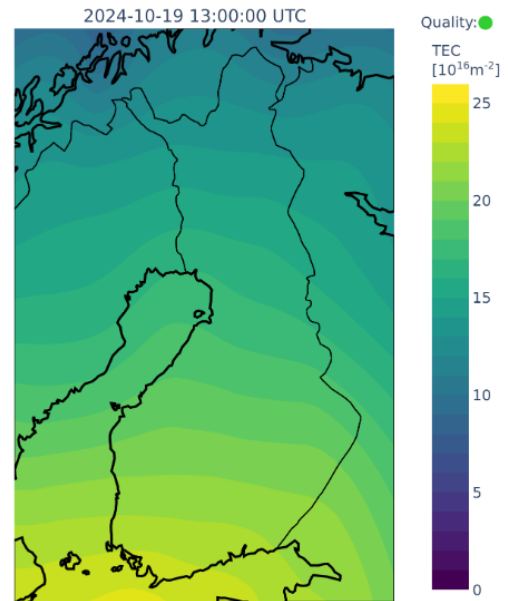
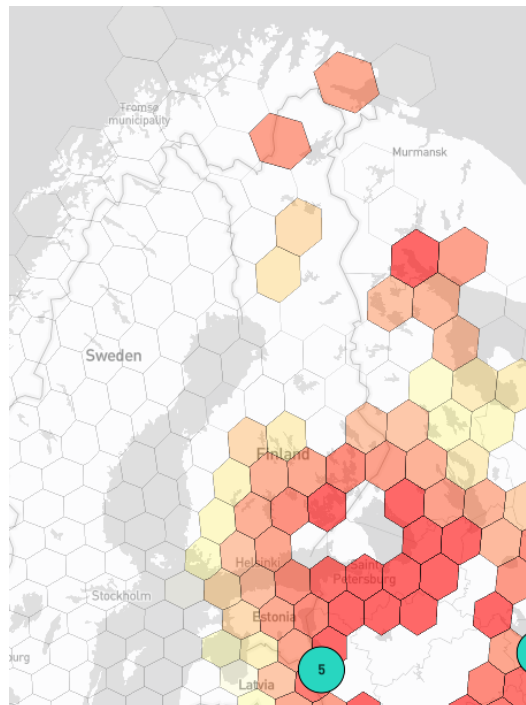


Image courtesy of Tomoscan project.

Kuva 2. Auringon aktiivisuutta kuvaavia parametreja Avaruussääkeskuksen (RWC) sivuilta.



Kuva 3. Suomen karttakuva, jossa näkyy viimeisten 24 tunnin aikana havaittu GPS-härinä.

Laite	Mittalaitteyksilöitä, kpl	Mittauskertoja, kpl
Emlid RS+	1	1
Emlid RX	1	2
Emlid RS3	2	4
Emlid RS2	1	2
SingularXYZ Sfaira One Plus	1	1
Alpha 4i	1	4
South G4	2	3
South G5	2	4
FJDynamics V10i	2	4

Taulukko 2. Mitattujen laitteiden ja mittauskertojen lukumäärät

Laitteilla mitattuja tuloksia voi suoraan verrata keskenään eli erot tuloksissa ovat absoluuttisia. Laitteiden tarkkuudesta puhuttaessa pitäisi pystyä erottamaan toisistaan laiteriippumattomat tekijät, kuten tukiasemasignaalista aiheutuvat virheet ja mittausajankohdasta riippuvat muuttuvat virhelähteet kuten käytettävissä olevien satelliittien vaihtelu. Satelliittimittauksen tahallista häirintää ei mittausalueella, Oulussa, tiettävästi ole mittausajankohtina havaittu. Laiteriippumattomien tekijöiden vuoksi mittaus tulokset on pyritty varmistamaan mittamalla usealla laitteella useana päivänä. Mittauspisteiden referenssikoordinaatit eli ”oikeat” paikat on määritelty niin, että paikat 1 ja 4 on mitattu kaikilla laitteilla ja niiden kaikkien mittauksen koordinaattien keskiarvot on määritelty referenssipisteiksi eli ”oikeiksi” arvoiksi. Muiden paikkojen referenssikoordinaatit on mitattu Alpha Ti- takymetrillä siten, että referenssipisteisiin 1 ja 4 n. 70 cm korkeudella maassa olevan mittapaalun päästä on sijoitettu Leica GMP104- prismaa vastaavat prismat. Takymetrin oma paikka, joka oli täsmälleen mittauspisteiden 3 kohdalla, ja orientaatio saatiin mitattua näiden referenssikoordinaattien avulla. Takymetrimittausjärjestelmän ja prismavakioiden tarkkuus tarkistettiin mittamalla alueella olevan 9 metriä pitkän parakin kattolinjan pituutta, jossa referenssimittaus tehtiin metallisella mittanauhalla. Tämän jälkeen muiden paikkojen koordinaatit mitattiin pyrkien käyttämään mahdollisimman lyhyttä mittasauvaa, jonka päähän sijoitettiin samanlainen prisma, sauva asetettuna pystyasentoon. Takymetri ja referenssipaikkojen mittauksessa käytetty mittasauva ja prisma on esitetty kuvassa ”Kuva 4”.



Kuva 4. Alpha Ti- takymetri ja referenssipisteiden mittaus prismalla.

RTK GNSS- järjestelmän virhelähteet

Virhelähteitä on käsitelty lähteessä ¹⁷, josta seuraavat ovat lainauksia hieman lyhennettyinä.

Tukiaseman koordinaattitarkkuus

Tukiaseman koordinaatit on tiedettävä 10 metrin tarkkuudella WGS-84-datumissa järjestelmän optimaalista toimintaa varten. Virheelliset tai epätarkat tukiaseman koordinaatit heikentävät mittalaitteen tarkkuutta. On arvioitu, että jokainen 10 metrin virhe tukiaseman paikkakoordinaateissa aiheuttaa yhden miljoonasosan virheen tukiaseman (tai tukiasemien) ja mittaavaan laitteen väliseen perusviivavektoriin.

Näkyvien satelliittien määrä

Satelliittigeometria vaikuttaa suoraan vastaanottimen arvioiman sijaintiratkaisun laatuun. Global Positioning System (GPS) on suunniteltu siten, että vähintään 5 satelliittia on aina paikallisen horisontin yläpuolella. Useita kertoja päivän aikana horisontin yläpuolella saattaa olla jopa 8 satelliittia tai enemmän. Koska satelliitit kiertävät, satelliittien geometria muuttuu päivän aikana, mutta toistuu päivästä toiseen. Mitä enemmän satelliitteja käytetään, sitä parempi on ratkaisun laatu ja eheys.

PDOP (Position Dilution Of Precision) mittaa vallitsevaa satelliittigeometriaa. Matalat PDOP-arvot, jotka ovat alueella 4 tai vähemmän, osoittavat ”hyvää” satelliittigeometriaa, kun taas PDOP-arvo, joka on suurempi kuin 7, osoittaa, että satelliitin geometria on heikko. Parhaimmillaan PDOP voi mennä alle yhden, jolloin se on ”ideaalinen”¹⁸. Mittauksissa PDOP oli huonoimmillaan alle 2.5 eli kaikki havaitut PDOP-lukemat olivat joko hyvässä tai jopa erinomaisessa luokassa, vaikka hankalimmissa paikoissa laitteilla kesti jonkun aikaa päästä RTK FIX- tilaan ja kävi jopa niin, että FIX-tilaa jouduttiin odottamaan tunteja (joka tosin saattoi johtua auringon aktiivisuudesta).

Vaikka kolmiulotteisen sijainnin määrittämiseen tarvitaan vain 4 satelliittia, RTK:n alustus edellyttää, että vähintään 5 yhteistä satelliittia on seurannassa base- ja rover-paikoilla. Lisäksi L1- ja L2-kantoaallon (GPS-järjestelmässä) vaihetietoja on seurattava viidellä yhteisellä satelliitilla onnistuneen

RTK-alustuksen varmistamiseksi. Kun alustus on saatu, vähintään 4 jatkuvasti seurattavaa satelliittia on ylläpidettävä RTK-ratkaisun tuottamiseksi.

Kun muita satelliittijärjestelmiä, kuten GLONASS, seurataan, yhtä satelliiteista käytetään ratkaisemaan ajoitus siirtymät kyseisen tähdistön ja GPS-konstellation välillä. Lisäsatelliittien seuranta auttaa RTK-ratkaisussa.

Korkeusmaski

Korkeusmaski estää vastaanotinta käyttämästä satelliitteja, jotka ovat matalalla horisontissa. Ilmakehän virheet ja signaalin monitie-etenemisen aiheuttamat virheet ovat suurimmat matalan korkeuden satelliiteilla. Sen sijaan, että vastaanotin yrittäisi käyttää kaikkia näkyvissä olevia satelliitteja, se voi käyttää esim. oletusarvoista 10 asteen korkeusmaskia. Alemman korkeusmaskin käyttö voi heikentää järjestelmän suorituskykyä. Korkeusmaskit vaihtelevat 5-15 asteen välillä oletusarvoisesti. Esim. Alphalla on käytössä oletusarvona 5 astetta, Southilla 10 astetta ja Emlidillä 15 astetta. Käyttäjä voi muuttaa korkeusmaskin lukemaa.

Ympäristötekijät

GPS-mittausten laatuun vaikuttavia ympäristötekijöitä ovat mm. *ionosfäärin aktiivisuus, troposfäärin toiminta, signaalin esteet, monitie-eteneminen ja radiohäiriöt*. Korkea ionosfääriaktiivisuus voi aiheuttaa nopeita muutoksia GPS-signaalin viiveessä jopa muutaman kilometrin päässä toisistaan olevien vastaanottimien välillä. Ionosfäärin aktiivisuus voi vaikuttaa maan päiväntasaajan ja napa-alueisiin. Korkean auringon aktiivisuuden jaksoilla voi olla merkittävä vaikutus RTK FIX:n alustusaikoihin ja RTK FIX:n saatavuuteen.

Troposfääri eli 50 km pituinen alue ilmakehässä aiheuttaa GPS-signaaleissa viiveen, joka vaihtelee merenpinnan yläpuolella, vallitsevien sääolosuhteiden ja satelliitin korkeuskulman mukaan. Vastaanotin sisältää troposfäärimallin, joka yrittää vähentää troposfäärivirheen vaikutusta. Jos mahdollista, yritä sijoittaa tukiasema suunnilleen samalle korkeudelle kuin mittaava laite (rover).

Signaaliesteet rajoittavat näkyvien satelliittien määrää ja voivat myös aiheuttaa signaalin monitie-etenemistä. Antennin lähellä sijaitsevat litteät metalliesineet voivat aiheuttaa signaalin heijastuksen ennen vastaanottoa GPS-antennissa. Vaihennittauksissa ja RTK-paikannuksessa monitievirheet ovat noin 1-5 cm luokkaa. Jos mahdollista, sijoita tukiasema selkeään ympäristöön, josta on avoin näkymä taivaalle. Jos mahdollista, käytä antennia maan tasolla minimoidaksesi monitie-eteneminen.

GPS-antenniin suunnattu *radio- tai tutkalähetys* voi kuitenkin aiheuttaa vakavan signaalin laadun heikkenemisen tai signaalin seurannan täydellisen menetyksen. Älä sijoita tukiasemaa alueelle, jossa radiolähetysten häiriöt voivat muodostua ongelmaksi.

Toiminta-alue

Toiminta-alue viittaa base:n ja rover-laitteiden väliseen enimmäisetäisyyteen. Usein tiedonsiirtoyhteyden ominaisuudet määräävät RTK:n toiminta-alueen. RTK:n toiminnalle ei ole enimmäisrajaa vastaanottimen etäisyydelle tukiasemasta, mutta tarkkuus heikkenee ja alustusaika kasvaa etäisyyden kasvaessa. Vastaanottimille annetut tekniset tiedot määrittävät etäisyyden, jolla nämä tekniset tiedot ovat voimassa, eikä teknisiä tietoja anneta tämän alueen ulkopuolella.

Mittauspaikan kuvaus

Mittauspaikka sijaitsi Oulussa Tokantien pään ja Sahantien rajaamalla alueella, jossa osa mittausalueesta oli Tokantie 34:n pihalla ja osa tonttien välisellä puistoalueella, jossa oli vanhoja mäntyjä ja seassa myös nuoria kuusia ja sekametsää. Mäntyjen rungon halkaisija 1 m korkeudella

vaihteli 30-50 cm välillä. Korkeimpien puiden latvakorkeus oli n. 22 metriä. Mittaus tehtiin laserskannaamalla alue FJDynamics (FJD) P1-skannerilla. Piste 1 oli keskellä pihaa ja helpoin piste mittalaitteille. Se oli lähes avoin etelä-länsisuuntaan. Pisteessä 2 ja osin pisteessä 3 olivat haasteena heijastuneet signaalit seinistä. Pisteessä 3 oli itse asiassa ympärillä 3 rakennusta, joista yksi vanha rakennus sijaitsi puistoalueella. Piste 4 oli keskellä kohtuullisen isoa tyhjää osaa puistoalueesta, mutta se oli kuitenkin suurten puiden ympäröimä lähes joka suunnalta. Pisteiden 5 ja 6 ympärillä ja päällä oli suuria puita ja oksia. Piste 5 oli vaikein, koska siinä oli suoraan mittapaikan yläpuolella männyn oksisto. Myös paikan 6 vieressä oli kuusia, joiden oksat olivat suoraan mittasauvassa kiinni. Mittaustulosten yhteydessä on esitetty lisää kuvia.



Kuva 5. kaikki mittauspäikat (paikat 4, 5 ja 6 ovat puiden takana).

Mittaustulokset

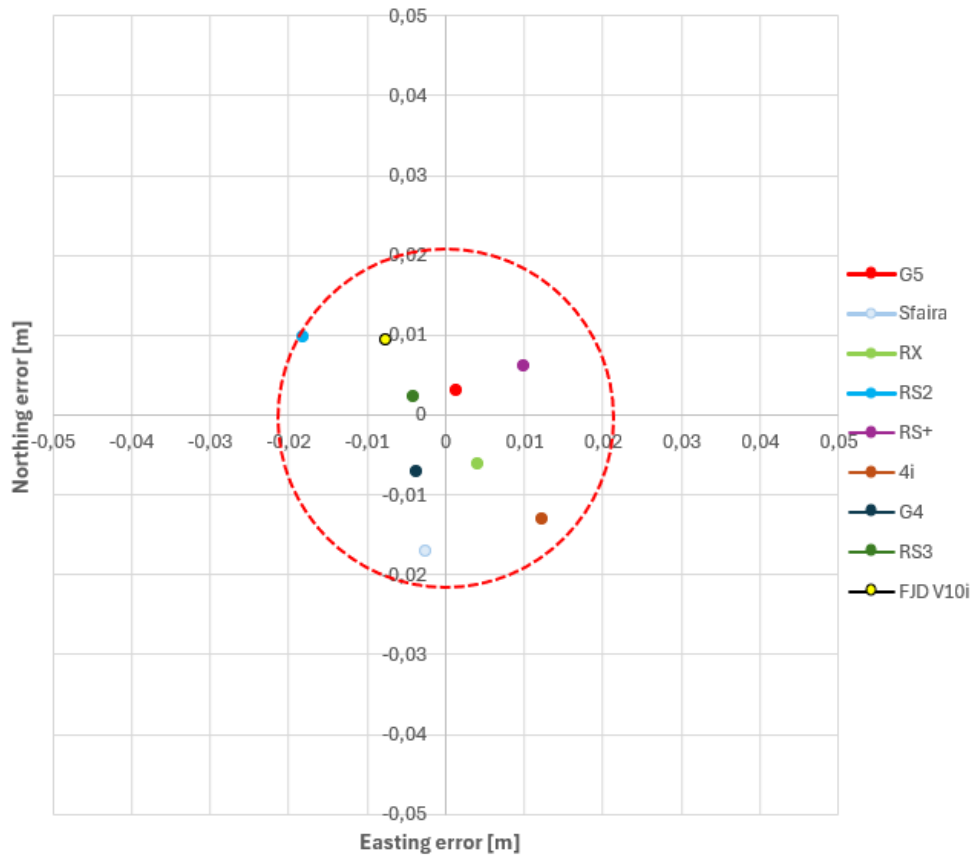
Mittauspaikka 1



Kuva 6. Mittauspaikat 1, 2 ja 3 dronella kuvattuna.

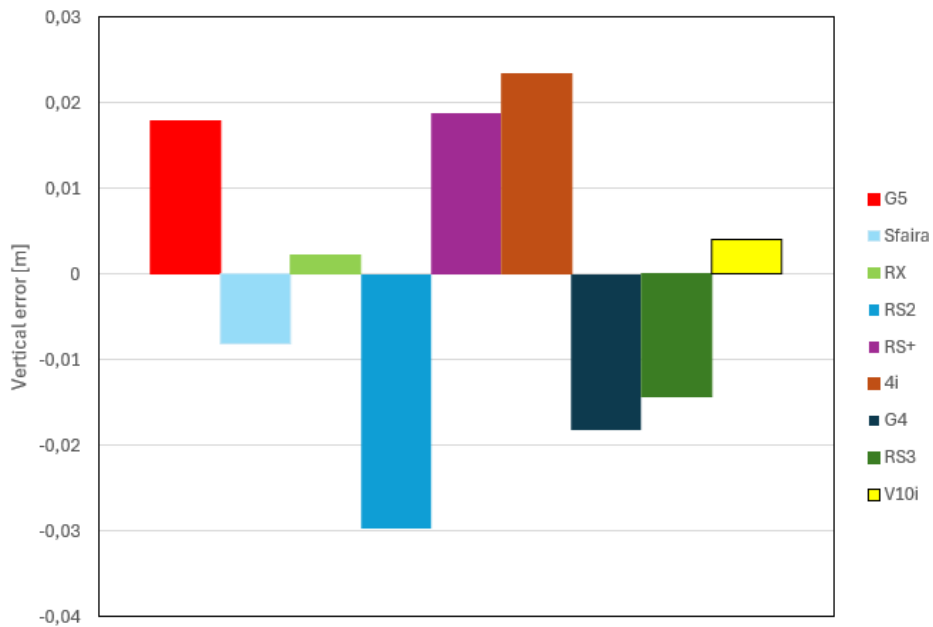
Mittauspaikka 1 oli omakotitalon pihalla ja satelliittinäkyvyydeltään paras kaikista pisteistä (Kuva 6). Kaikkien laitteiden keskiarvojen välinen keskihajonta oli 6.1 mm (etäisyys oikeasta tuloksesta eli Kuva 7:n esittämästä origosta). Mittauspaikassa 1 kuvan origo tarkoittaa kaikkien laitteiden mittausten keskiarvoa. RS+, RS2 ja Sfaira ovat kauimpana origosta (Kuva 7). Lähimpänä origoa olivat South G5 ja Emlid RS3. Kaikkien mittausten keskiarvot mahtuvat ympyrään, jonka säde on n. 22 mm eli tämän mittauksen perusteella voidaan sanoa, että laitteesta riippumatta tällaisissa oloissa mitatun tuloksen tarkkuus on RTK GNSS-laitteille tyypillistä 2 cm luokkaa. Korkeus suunnassa virheet kaikilla laitteilla jäivät 2-3 cm luokkaan (Kuva 8). Emlid RS2:lla oli muista hieman suurempi virhe. Rakenteeltaan muista poikkeavilla pienen antennin vastaanottimilla (Emlid RX ja Sfaira One Plus) virheet olivat korkeus suunnassa alle 1 cm. Myös yhden taajuuden laite Emlid RS+ antoi tässä pisteessä sekä horisontaali- että korkeus suunnassa hyvät tulokset.

Place 1, error compared to average of all results



Kuva 7. Mittauspaikan 1 tulokset verrattuna kaikkien laitteiden keskiarvoon, itäkoordinaatti vaaka-asteikolla ja pohjoiskoordinaatti pystyasteikolla

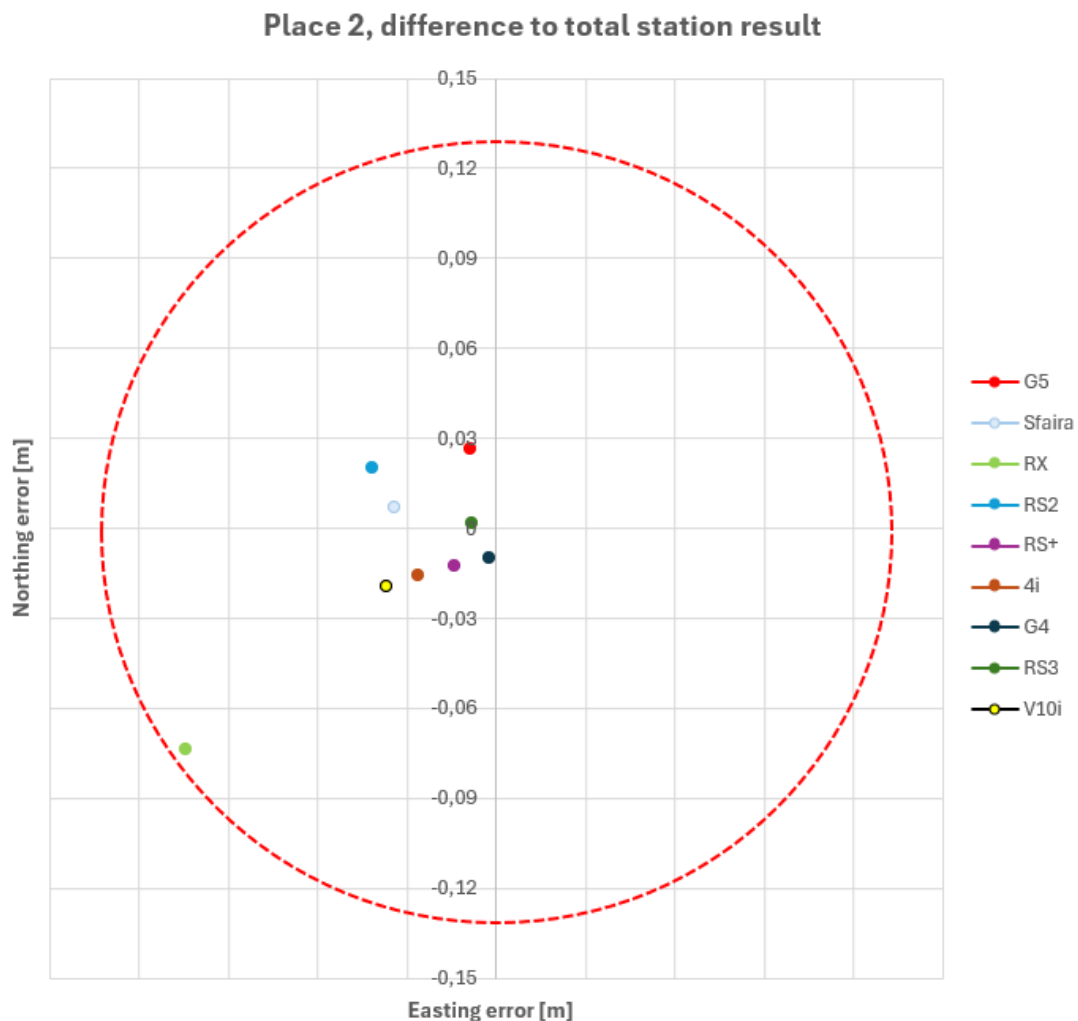
Place 1, vertical deviations from the total average result



Kuva 8. Virheet korkeussuunnassa mittauspaikalla 1, verrattuna kaikkien laitteiden keskiarvoon.

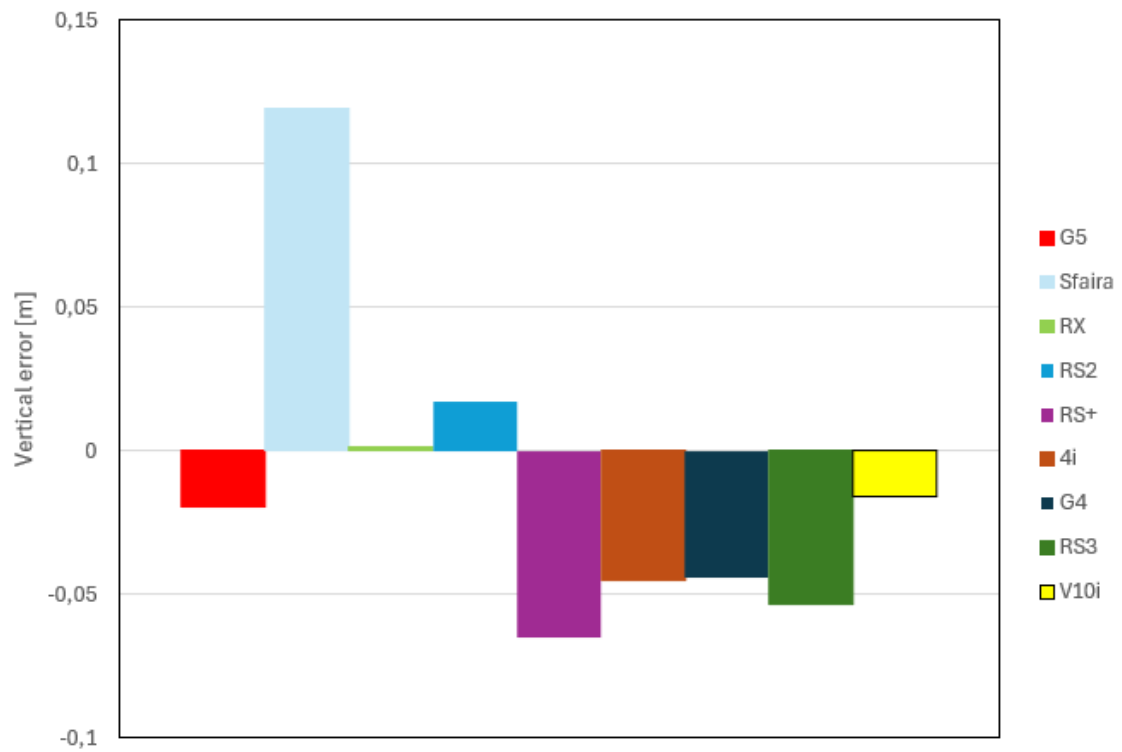
Mittauspaikka 2

Mittauspaikka 2 (Kuva 6) oli piharakennuksen autokatoksen vieressä, josta signaalin heijastuminen seinästä oli mahdollista. Se oli kaakon, etelän ja lounaan suuntaan myös suurten puiden ympäröimä, joten paikka ei ollut helppo, mikä näkyy tuloksista. Keskiarvojen keskihajonta oli 35.9 mm eli suurin kaikista paikoista, mutta se johtui pääasiassa Emlid RX:n poikkeavasta tuloksesta. Kaikkien mittausten keskiarvot mahtuvat ympyrään, jonka säde on n. 130 mm (Kuva 9). Varsinkin Emlid RX näytti selvästi muista poikkeavaa arvoa tässä pisteessä. Emlid RX:ää lukuunottamatta muiden laitteiden mittaustulokset mahtuivat ympyrään, jonka säde on n. 41 mm. Saattaa olla, että sauvamaisen antennin suuntakuviot on sellainen, että se sai seinästä enemmän hajaheijastusta kuin muut laitteet. Jostain syystä saman mallinen laite Sfaira One Plus antoi tässä pisteessä selvästi paremman tuloksen vaikka sen antenni on silmämääräisesti arvioiden samantyyppinen kuin Emlid RX:n antenni. Emlid RS2 oli toiseksi huonoin. Emlid RS3 ja South G4 ja yllättäen myös Emlid RS+ olivat tässä lähimpänä origoa. Korkeusmittaustuloksissa (Kuva 10) oli myös suurta hajontaa. Emlid RX antoi N-E-mittaukselle ristiriitaisesti tarkinta tulosta ja Sfaira One Plus puolestaan epätarkinta tulosta. Voidaan spekuloida, että näkykö sauvamaisten antennien suuntakuviot ja heijastavan seinän läheisyys paikassa 2 eri tavoin Emlid RX:ssä ja Sfaira One Plus:ssa. Korkeussuuntaiset virheet (Kuva 10) olivat kaikkiaan selvästi suurempia kuin paikassa 1. Useilla laitteilla virhe oli 4-5 cm luokassa.



Kuva 9. Mittauspaikan 2 tulokset, itäkoordinaatti vaaka-asteikolla ja pohjoiskoordinaatti pystyasteikolla, verrattuna takymetrillä saatuun tulokseen.

Place 2, vertical deviations from the total station meas. result



Kuva 10. Virheet korkeussuunnassa mittauspaikalla 2, verrattuna takymetrin antamaan lukemaan.

Mittauspaikka 3

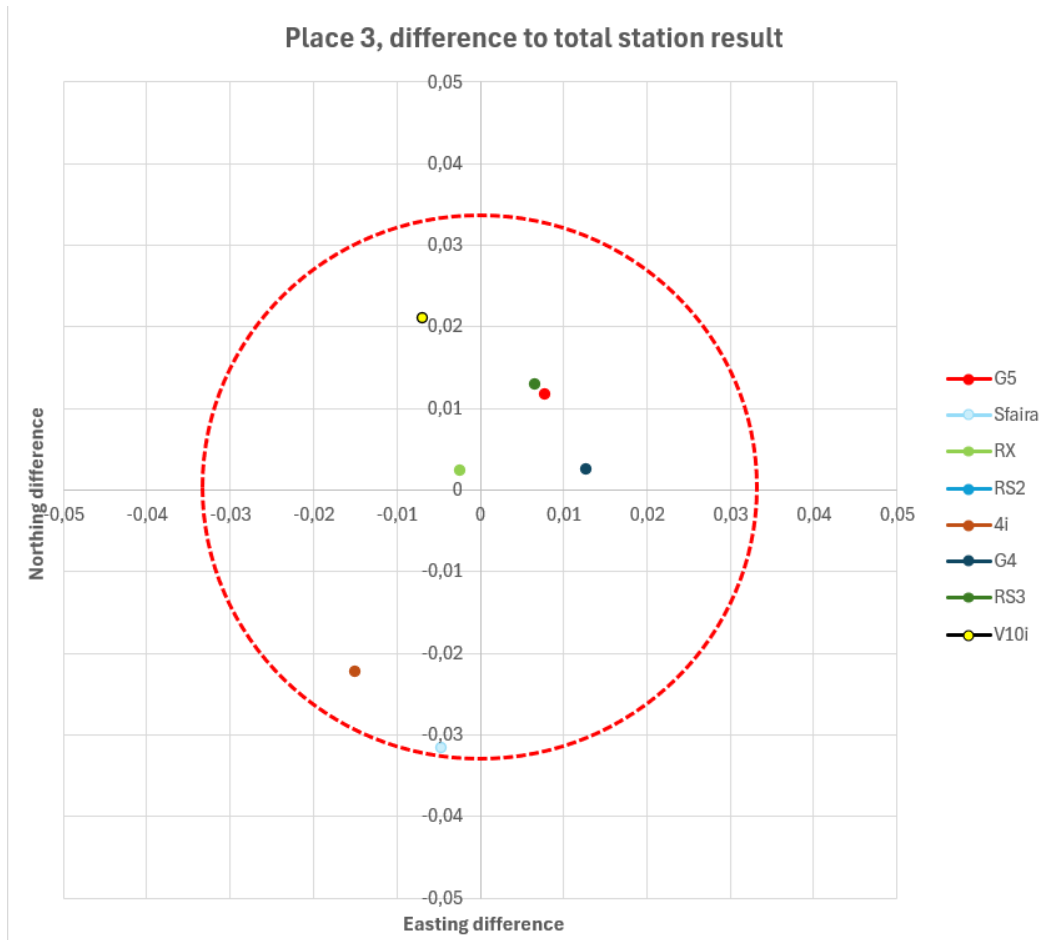
Mittauspaikka 3 (Kuva 11, Kuva 12) oli kahden rakennuksen välissä ja itseasiassa kolmaskin rakennus, 3.5 metriä korkea varastoparakki oli suhteellisen lähellä mittauspistettä. Kaikkien mittausten (Kuva 13) keskihajonta oli 18.8 mm eli selvästi suurempi kuin paikassa 1, mutta siitä huolimatta kaikki mittaukset mahtuvat ympyrään, jonka säde on n. 33 mm (Kuva 13). Tässä pisteessä Emlid RX oli yllättäen paras ja seuraavina Emlid RS3, South G4 ja G5 hyvin tasaisilla tuloksilla. Huonoimman tulokset antoivat Sfaira One Plus ja Alpha 4i, mutta niidenkään virheet eivät olleet erityisen suuria. Emlid RS+ ei antanut mitään tulosta tässä paikassa kuten ei myöskään paikoissa 4-6. Korkeussuunnassa (Kuva 14) hajontaa oli laitteiden välillä suhteellisen paljon. Alpha 4i ja varsinkin Emlid RS2 antoivat suurimmat virheet, mutta muiden virheet jäivät n. 2 cm luokkaan. Paikka 3 ei ollut liian vaativa sikäli, että kaikilla saatiin kohtuullinen tulos Emlid RS2- ja RS+-laitteita lukuunottamatta.



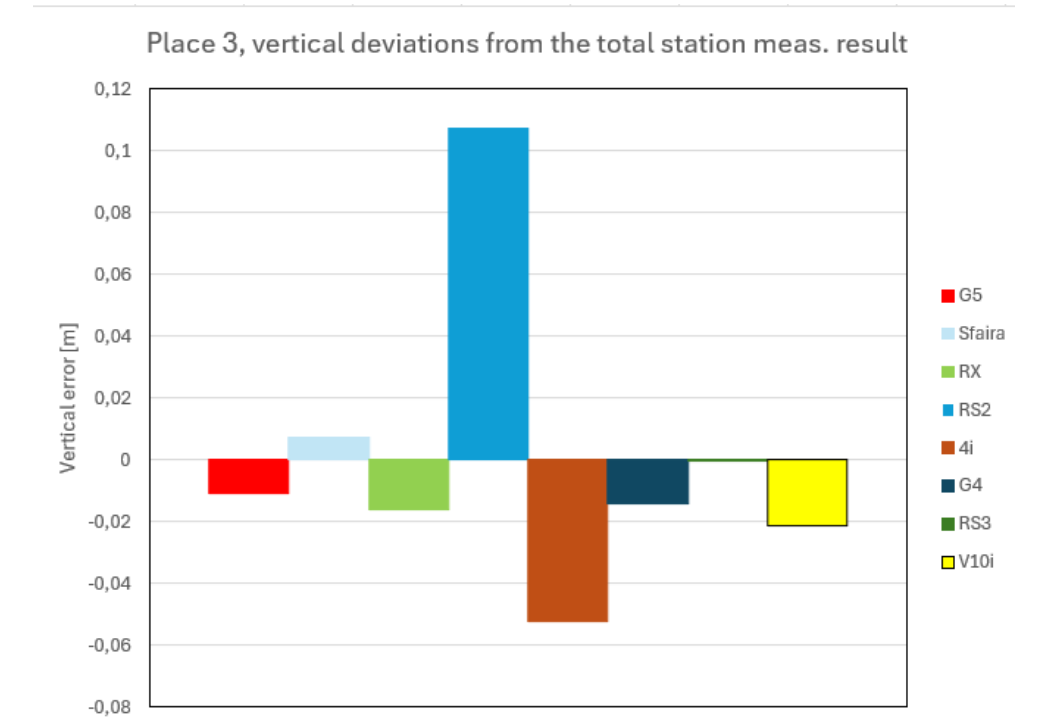
Kuva 11. Mittauspaikka 3 maan tasalta kuvattuna.



Kuva 12. Mittauspaikka 3 ilmasta dronella kuvattuna.



Kuva 13. Mittauspaikan 3 tulokset. Mittauspaikan origo oli mitattu takymetrillä.



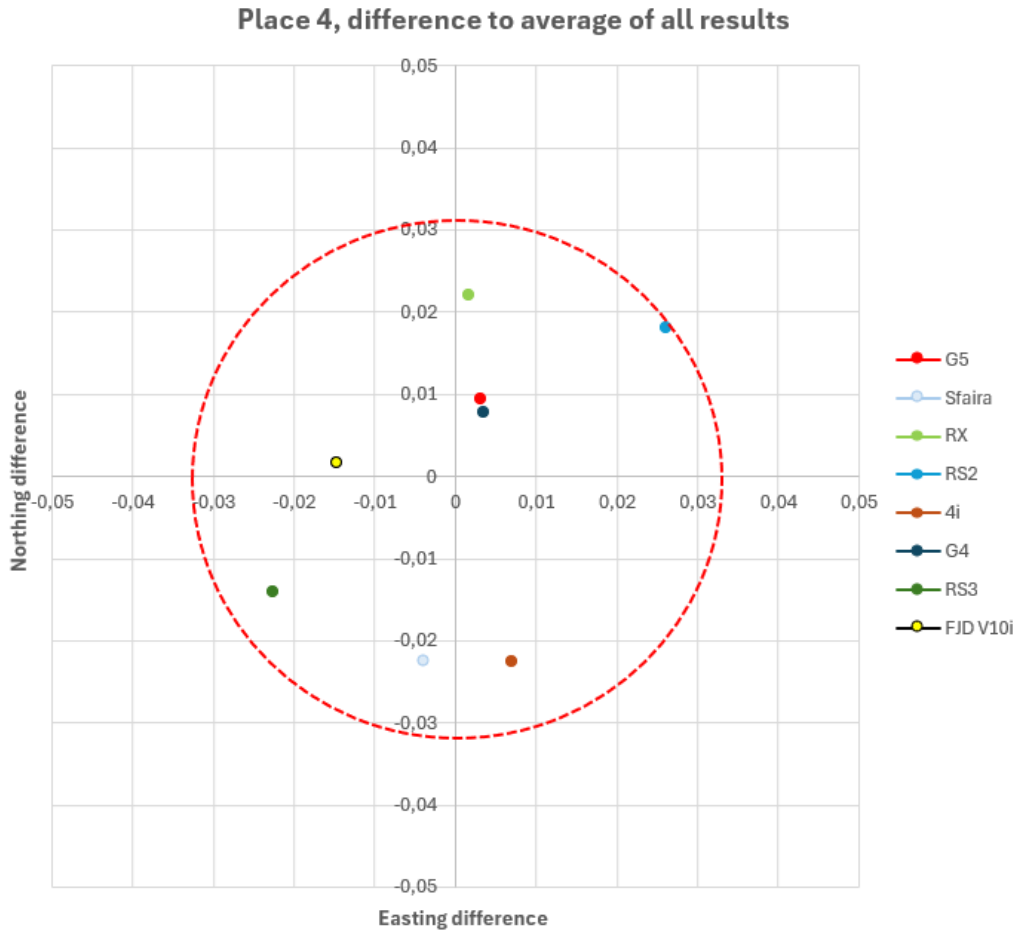
Kuva 14. Virheet korkeussuunnassa mittauspaikalla 3, verrattuna takymetrin antamaan lukemaan.

Mittauspaikka 4

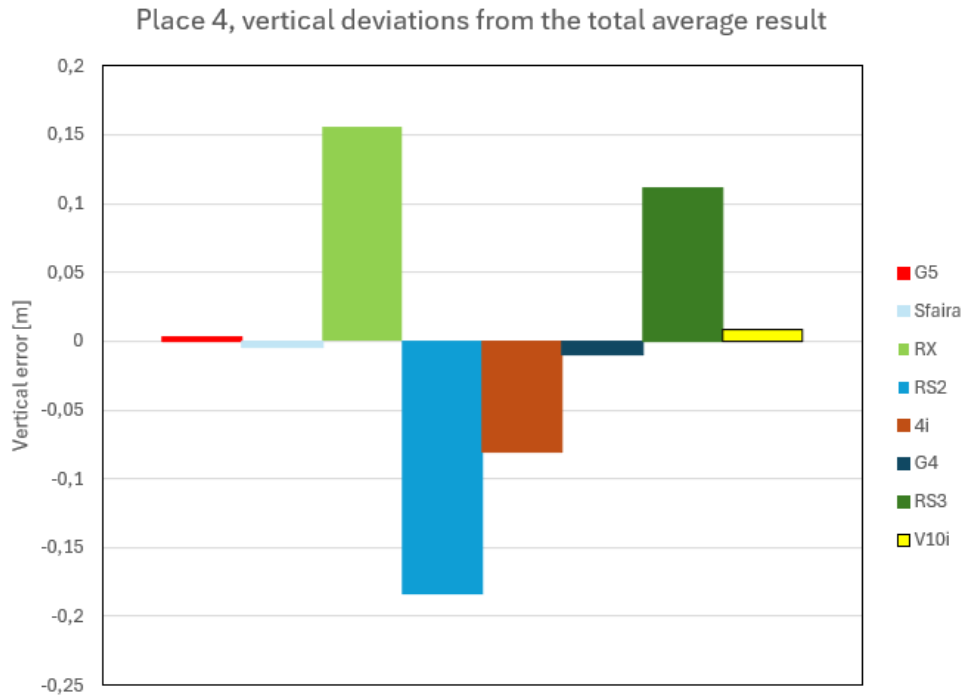
Mittauspaikka 4 oli tyhjällä puistoalueella, kuitenkin lähes joka suunnalta puiden ympäröimä (Kuva 15). Paikasta oli kuitenkin kahteen kapeahkoon suuntaan suhteellisen avointa taivasta. Alueella oli myös yksi vanha tyhjä varastorakennus. Se oli toinen paikoista, joita käytettiin ns. referenssipaikkoina eli niissä mittauksen ”oikea” tulos on kaikkien mittausten keskiarvo ja paikkojen 2,3,5 ja 6 koordinaatit mitattiin käyttäen paikkoja 1 ja 4 referensseinä ja takymetrin paikka mitattiin niiden avulla. Kaikkien mittausten keskiarvojen välinen keskihajonta paikalla 4 oli 8.1 mm (suora etäisyys origosta) eli hieman huonommin kuin paikalla 1, mutta kuitenkin verrattuna muihin paikkoihin se antoi viitteen, että paikat 1 ja 4 oli valittu oikein referenssipaikoiksi. Kauimpana origosta olivat RS2 ja RS3. Lähimpänä nollapistettä olivat South G4 ja G5. kaukana ei ollut myöskään FJD V10i ja kaikkiaan erot eivät olleet suuria. Kaikkien mittausten keskiarvot mahtuvat ympyrään, jonka säde on 32 mm (Kuva 16) eli sen perusteella mittauspaikka 4 ja mittauspaikka 3 ovat yhtä ”vaikeita”, mutta keskihajonnan perusteella mittauspaikka 4 oli parempi valinta referenssipisteeksi kuin mittauspaikka 3. Kuitenkin Emlid RS+ ei antanut tässä paikassa tulosta ollenkaan. Korkeussuuntaisessa virheessä (Kuva 17) oli laitteiden välillä hyvin suurta vaihtelua ja suuria virheitä. Kaikissa Emlidin laitteissa oli suurehko tai jopa suuri virhe (15-20 cm), kun puolestaan Southin laitteissa, Sfairassa ja V10i:ssä virhe oli vain 1-2 cm luokkaa. Voidaan spekuloida, että olisiko paikka 3 ollut parempi referenssipaiikka kuin paikka 4, koska siinä korkeusmittausten virheiden hajonta oli pienempää. Silmämääräisesti paikoilla ei ollut juuri eroa satelliittinäkyvyyden suhteen.



Kuva 15. Mittauspaikka 4 ylhäältä kuvattuna.



Kuva 16. Mittauspaikan 4 tulokset. Mittauspaikan origo on kaikkien mittausten keskiarvo.



Kuva 17. Virheet korkeussuunnassa mittauspaikalla 4, verrattuna laitteiden mittauksien keskiarvoon.

Mittauspaikka 5

Mittauspaikassa 5 (Kuva 18 ja Kuva 19) keskihajonta oli 18.0 mm, mikä oli yllättäen vähän pienempi kuin paikassa 3 siitä huolimatta, että paikalla 5 oli puita paljon lähempänä ja se oli vaikein paikka saada laitteita RTK FIX-tilaan. Usein laite piti viedä ensin muutaman metrin päähän ao. paikasta ja sitten kun mittauspaikkaa 5 lähestyttiin hitaasti, laite pysyi RTK FIX-tilassa ja mittaus voitiin tehdä paikalla 5. Southin laitteiden välillä tässä oli eroa siten, että G4 saavutti fixin nopeammin kuin G5, mutta jälkimmäinen kyllä pysyi hyvin fixissä sen saavutettuaan. Emlid RS3:lle tämä paikka oli vaikein saavuttaa FIX-tila ja mahdollisesti se heijastuu myös korkeusmittaustulokseen. South G4 ja FJD V10i olivat ainoita laitteita, jotka pääsivät tässä mittauspaikassa 2 cm tarkkuusluokkaan (Kuva 20). RS2:n ja varsinkin Sfairan virhe oli selvästi suurempaa (n. 5 cm ja 7 cm, vastaavasti). Mittaukset mahtuvat ympyrään, jonka säde on noin 70 mm.

Mittauspaikan 5 korkeustuloksissa (Kuva 21) voidaan spekuloida sitä, kärsikö Alpha 4i mittauksissa käytetystä lyhyemmästä sauvasta, jonka seurauksena mittalaite tuli oksien lähellä 20 cm matalammalle kuin muilla laitteilla. Virheet olivat odotetusti suurehkoja. Ehkä yllätys oli South G4:n ja FJD V10i:n pieni virhe.

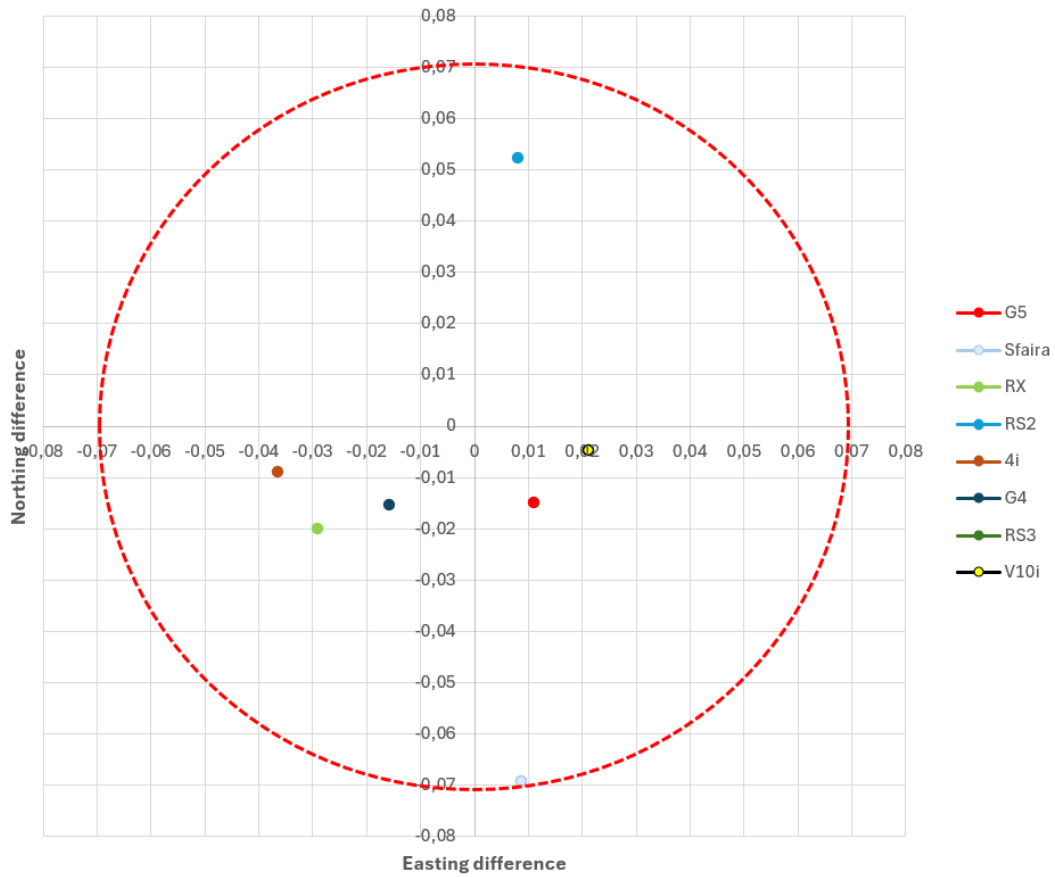


Kuva 18. Mittauspaikat 3,4,5 ja 6 ilmasta dronella kuvattuina.



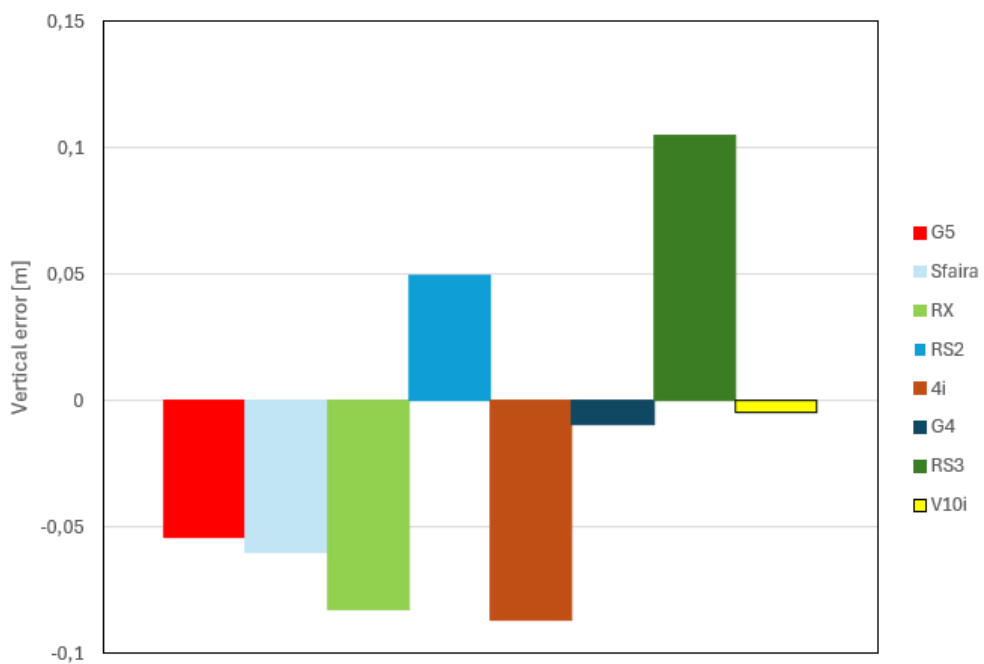
Kuva 19. Mittauspaikka 5 maan päältä kuvattuna.

Place 5, difference to total station result



Kuva 20. Mittauspaikan 5 tulokset. Mittauksen origo on mitattu takymetrillä.

Place 5, vertical deviations from the total station meas. result



Kuva 21. Virheet korkeussuunnassa mittauspaikalla 5, verrattuna takymetrin antamaan lukemaan.

Mittauspaikka 6

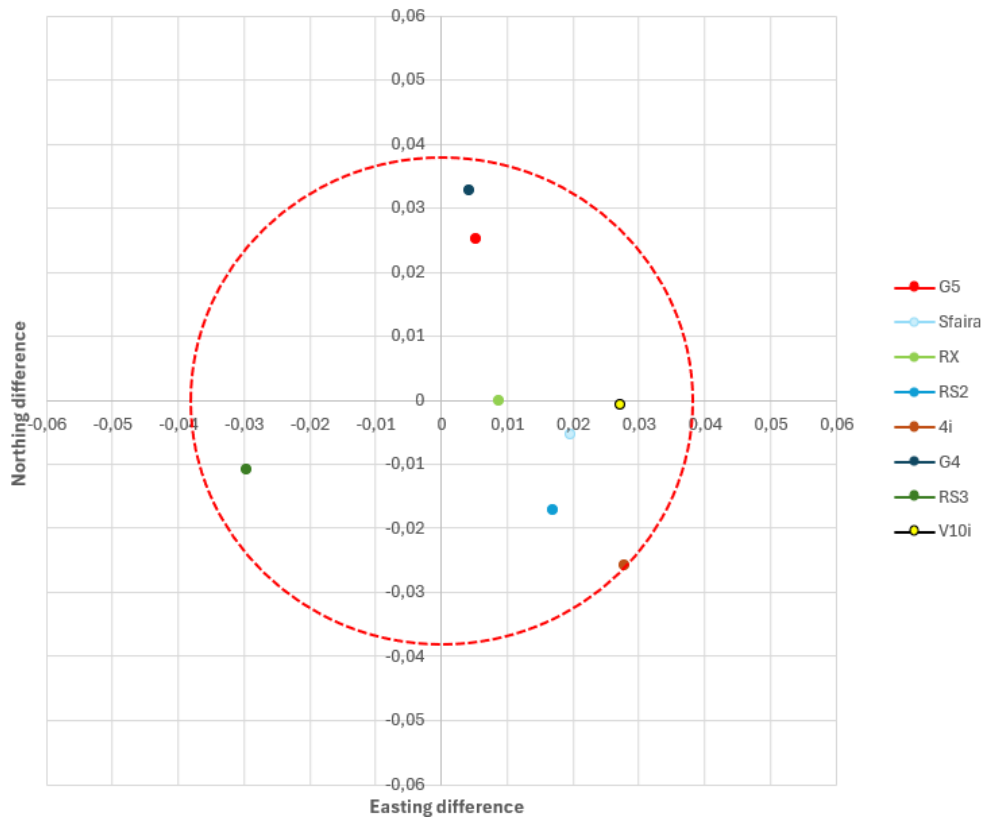
Mittauspaikka 6 (Kuva 22) oli silmämääräisesti toiseksi vaikein ja siinä oli myös toiseksi vaikeinta saavuttaa laitteilla RTK FIX- tila. Viereisen kuusen oksat tulivat mittasauvaan suoraan kiinni. Tämä huomioon ottaen tulokset (Kuva 23) olivat hyvin yllättäviä: keskihajonta oli 8.9 mm ja kaikki tulokset mahtuivat ympyrään, jonka halkaisija on 38 mm. Ja yllätykset jatkuivat sikäli, että parhaan tuloksen antoi Emlid RX ja toiseksi parhaan Sfaira One Plus eli molemmat sauvamallisella antennilla varustetut laitteet antoivat tässä hyvän tuloksen. Huonoimmat tulokset antoivat Alpha 4i ja South G4, mutta niidenkin virheet olivat 3-4 cm luokassa, mikä on hyväksyttävää huomioon ottaen paikan laadun (kuusen oksat hyvin lähellä mittasauvaa). Paikasta oli kuitenkin yhteen suuntaan avointa taivasta, joka voi selittää sitä, että kaikilla laitteilla saavutettiin vähintään kohtuullinen tulos.

Korkeussuuntainen mittaus (Kuva 24) antoi vaihtelevia tuloksia. Useilla laitteilla (Southin laitteet, RX, RX ja V10i) virhe oli korkeintaan 2-3 cm luokkaa, mutta kahdella laitteella (4i ja RS3) virhe oli selvästi suurempaa, 10 cm molemmin puolin.



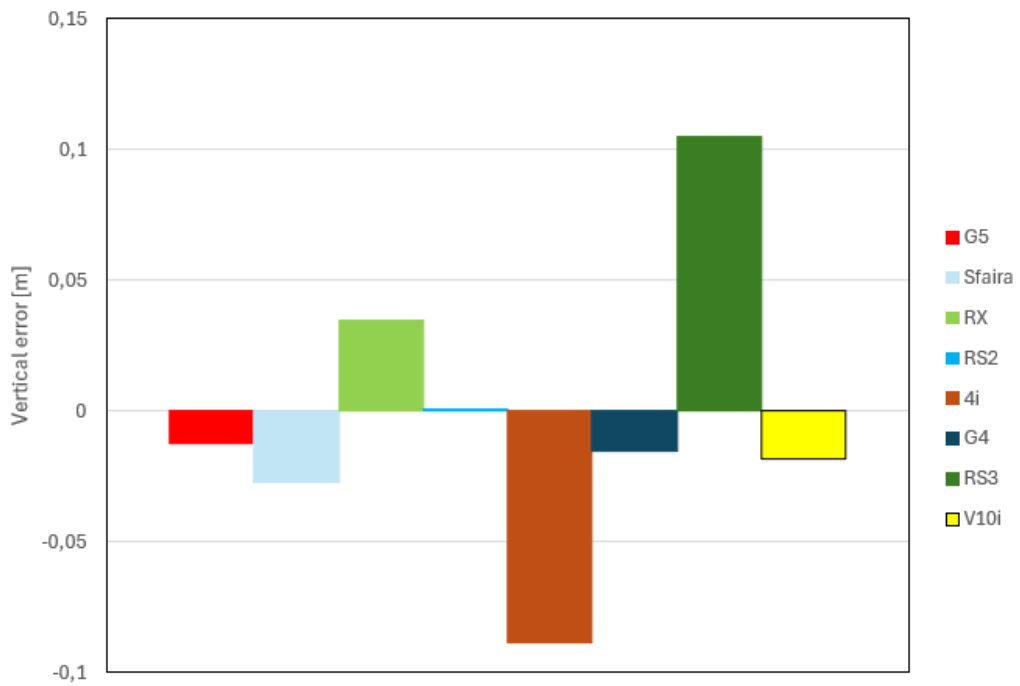
Kuva 22. Mittauspaikka 6 maan pinnalta kuvattuna.

Place 6, difference to total station result



Kuva 23. Mittauspaikan 6 tulokset. Mittauksen origo on mitattu takymetrillä.

Place 6, vertical deviations from the total station meas. result



Kuva 24. Virheet korkeussuunnassa mittauspaikalla 6, verrattuna takymetrin antamaan lukemaan.

Lopputulokset

Lopputulokset voidaan jakaa kahteen osaan: horisontaaliseen N-E- suuntien tarkkuuteen ja korkeussuunnan tarkkuuteen. N-E-mittaustulosten taulukko (Taulukko 3) esittää mitatun pisteen suoraa etäisyyttä xy (N-E)-suunnassa mittauspaiikkojen nollapisteistä, kaikkien pisteiden keskiarvona ja arvo on senttimetrejä poikkeamana oikeasta arvosta. Taulukko on järjestetty paremmuusjärjestyksessä keskimääräisen virheen mukaan. N-E – tarkkuudessa Southin laitteet G4 ja G5 ja Emlid RS3 olivat tasaisen hyviä eikä FJD V10i jäänyt niistä kauas. Voidaan sanoa, että kaikki neljä ensimmäistä laitetta pääsevät N-E- mittauksissa noin 2 cm tarkkuusluokkaan. Koska RS+ pystyi mittaamaan vain kaksi paikkaa kuudesta, sitä ei otettu mukaan loppuarvosteluihin. N-E-keskihajonta on laskettu keskiarvojen keskihajontana. Sitä tarkasteltaessa kärki on tasainen, South G5:n ollessa niukasti mutta kuitenkin selkeästi parempi kuin muut kärkilaitteet. Yllätyksinä voidaan pitää Alpha4i:n hyvää tulosta koko testin pienimmällä N-E keskihajonnalla ja Emlid RX:n yllättävän huonoa tulosta, mikä johtuu pääasiassa mittauspaiikka 2:n suuresta virheestä (seinän lähellä). Keskihajonnan suuruus antaa osviittaa siitä, onko ko. laitteella odotettavissa jossakin paikassa selkeästi väärää tulosta eli pienempi arvo on parempi. Voidaan myös spekuloida sillä, kärsivätkö RX, Sfaira ja RS2 siitä, että ne mitattiin vain yhdellä yksilöllä ja Sfaira silläkin vain kerran.

	Device	N-E average error [cm]	N-E standard deviation [cm]
1.	South G4	1,58	1,13
2.	South G5	1,65	0,93
3.	Emlid RS3	1,71	1,05
4.	FJD V10i	2,33	1,05
5.	Alpha 4i	2,91	0,79
6.	Sfaira One Plus	3,09	1,93
7.	Emlid RX	3,41	4,74
8.	Emlid RS2	4,01	1,74

Taulukko 3. Lopputulokset N-E-mittaustulosten keskiarvona ja N-E mittaustulosten keskihajontana, yksikkö senttimetrejä.

Korkeussuunnan tarkkuudessa (Taulukko 4) hajontaa oli keskiarvoissa selvästi enemmän. Mittaustaulukko esittää eroa korkeuksien nollapisteestä, virheen itseisarvojen keskiarvona (koska lukemissa on sekä positiivisia että negatiivisia lukuja), mukana on kaikki mittauspisteet ja arvo on senttimetrejä poikkeamana oikeasta arvosta. Suurimmat yllätykset olivat, että Emlid RS3 oli korkeussuunnassa mittauksissa selvästi huonompi kuin N-E- mittauksissa ja FJD V10i puolestaan selvästi parempi. Mittauksissa oli 2 paikkaa (4 ja 6), joissa RS3:n korkeusvirhe oli suuri. Parhaiden eli FJD V10i:n, South G4:n ja South G5:n tulokset olivat yllättävän hyviä ottaen huomioon, että mittaustarkkuus korkeussuunnassa pitäisi olla selkeästi huonompi kuin horisontaalisuunnassa.

Korkeussuunnan keskihajonnassa kolmen parhaan kärki on selkeä, FJD:n omatessa selkeästi pienimmän keskihajonnan. Erot ovat suuria, kuten korkeuden keskiarvossakin. Kaikilla Emlidin laitteilla on yllättävän suuri korkeusmittauksen keskihajonta ja niiden kanssa samalla tasolla on Sfaira, jonka tulokseen voidaan arvailla antennin pienen koon vaikuttaneen. Alpha 4i:llä on puolestaan pienehkö korkeuden keskihajonta eli Alpha4i:n voidaan arvioida mittaavan sekä horisontaali- että vertikaalisuunnassa tasaista tulosta, ei tarkinta, mutta ilman pahoja virheitä. Emlidin laitteilla puolestaan suuret keskihajonnat johtuvat muutaman paikan suurista virheistä. Varsinkin RS3:n osalta

tämä on yllätys, koska se on niin tarkka N-E-mittauksissa. Kuitenkin RS3 mitattiin kahdella yksilöllä, kaikkiaan 4 kertaa ja kun N-E-tulokset olivat samoissa mittauksissa niin hyviä, korkeusmittaustulokset olivat sen osalta odotettua huonompia.

	Device	Height average error [cm]	Height standard deviation [cm]
1.	FJD V10i	1,21	0,73
2.	South G4	1,86	1,30
3.	South G5	1,96	1,80
4.	Sfaira One Plus	3,76	4,51
5.	Emlid RX	4,88	6,04
6.	Emlid RS3	5,08	4,78
7.	Alpha 4i	6,28	2,66
8.	Emlid RS2	6,47	6,90

Taulukko 4. Lopputulokset korkeusmittausvirheiden itseisarvojen keskiarvona, yksikkö senttimetrejä.

Lopputulokset on esitetty taulukossa (Taulukko 5) keskiarvona siten, että horisontaali (N-E)- tulos on otettu tuloksissa kahteen kertaan, koska siinä on 2 arvoa, pohjoiskoordinaatti ja itäkoordinaatti, ja korkeus vain kerran. Emlid RS3 putosi N-E- mittaustulosten kolmannelta sijalta neljänneksi tässä taulukossa suhteellisesti huonomman korkeusmittaustarkkuuden vuoksi. FJD V10i puolestaan parantaa asemiaan selvästi tasoihin South G5:n kanssa erittäin hyvällä korkeusmittaustuloksellaan. Loppuarviona voidaan sanoa, että 3 parasta, South G4 ja G5 ja FJD V10i, antoivat tasaisen hyvää tulosta ja ne ovat ansaitusti kärkisijoilla. Keskiryhmä Emlid RS3, Sfaira One Plus ja varsinkin Emlid RX ovat sellaisia, jotka voivat antaa hyvinkin tarkan tuloksen, mutta toisessa paikassa tulos poikkeaa oikeasta enemmän. Eli niillä on vähän enemmän hajontaa tuloksissa mittaustaikojen laadun mukaan. Emlid RS3 eroaa näistä selvällä horisontaali- ja vertikaalisuuntien tarkkuuden välisellä erolla. Kahden pisteen korkeusmittauksen virhe esti sen pääsyn mitalisijoille. Ajoittain RS3 oli myös haasteellista saada FIX-tilaan joissakin pisteissä. Mielenkiintoista on huomioida 1408 kanavan laitteiden (FJD, Alpha ja Sfaira) sijoitukset, jossa ne ovat N-E- suunnan tuloksissa suhteellisen lähellä toisiaan, mutta korkeustuloksissa hajontaa on huomattavasti enemmän. Voidaan spekuloida, että jos vastaanottimet tai ainakin vastaanotinpiirit ovat peräisin samalta valmistajalta, johtuvatko suorituskyvyn erot antennista ja IMUn eli kallistuskompensoinnin tarkkuudesta. Näillä laitteilla oli testissä eroja myös mittauskertojen lukumäärässä. Sfairaa mitattiin vain kerran yhdellä laitteella, Alphaa 4 kertaa yhdellä laitteella ja FJD:tä 4 kertaa kahdella laitteella. Keskiarvomäärän kasvattamisen pitäisi periaatteessa pienentää ainakin satunnaisista virhelähteistä aiheutuvia virheitä eli ottaen se huomioon Sfairan sijoitus oli hyvä. Kaikkiaan 4 ensimmäistä sijaa lopputuloksissa menivät laitteille, joita mitattiin 4 kertaa ja kahdella eri laiteyksilöllä kutakin.

Kun myös 3D keskihajonnat otetaan huomioon, kolmen kärki erottuu (Taulukko 5). South G4 on sijoitettu kärkeen pienimmän mitatun 3D-virheen keskiarvon vuoksi, mutta erilaisella painotuksella järjestys voisi olla toinenkin. Sfaira One Plus pääsee yllättävän lähelle Emlid RS3:a sekä 3D-virheen keskiarvossa että keskihajonnassa. Alpha4i erottuu joukosta huomattavan pienellä 3D-keskihajonnalla ja siitä syystä se voitaisiin nostaa taulukossa pari pykälää ylemmäksikin, koska se antaa niin tasaista

tulosta. RS2 on vanha laite eikä ole enää relevantti vertailukohta. Voidaan arvailla, kuinka paljon Emlid RX:n tuloksessa näkyy antennin pieni koko, koska se erottaa sen Emlid RS3:sta.

	Device	3D average error [cm]	3D error standard deviation [cm]
1.	South G4	1,67	1,19
2.	South G5	1,75	1,22
3.	FJD V10i	1,96	0,94
4.	Emlid RS3	2,83	2,29
5.	Sfaira One Plus	3,31	2,79
6.	Emlid RX	3,90	5,17
7.	Alpha 4i	4,03	1,41
8.	Emlid RS2	4,83	3,46

Taulukko 5. Lopputulokset keskiarvoina, joissa on otettu huomioon N-E-mittausrvirhe painotettuna kertoimella 2 ja korkeusmittausvirhe painotettuna kertoimella 1, yksikkö senttimetrejä. Oikean puoleisin sarake esittää 3D-keskiarvojen keskihajontaa senttimetreissä.

VIITTEET

- ¹ Novatel Ltd., Homepage / Support/ Known Solutions/ GNSS Frequencies and Signals
<https://novatel.com/support/known-solutions/gnss-frequencies-and-signals>
- ² Improving the precision and accuracy of wildlife monitoring with multi-constellation, multi-frequency GNSS collars: María S. Garrido-Carretero | Concepción Azorit | María C. de Lacy-Pérez de los Cobos | José Manuel Valderrama-Zafrá | Rafael Carrasco | Antonio J. Gil-ruz, The Journal of Wildlife Management, 29. December 2022, <https://wildlife.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/jwmg.22378>
- ³ Ragne Emardson, Per Jarlemark, Jan Johansson, and Tobias Nilsson: Error sources in RTK-surveying and possibilities to increase the accuracy in the SWEPOS Network-RTK-service, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, <https://www.gps.gov/cgsic/international/2009/stockholm/emardsson.pdf>
- ⁴ u-blox homepage -> Network RTK vs PPP-RTK: an insight into real-world performance, <https://www.u-blox.com/en/blogs/tech/network-rtk-vs-ppp-rtk>
- ⁵ Guillem Boquet , Xavi Vilajosana , Senior Member, IEEE, and Borja Martinez , Senior Member, IEEE: Feasibility of Providing High-Precision GNSS Correction Data Through Non-Terrestrial Networks, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 73, 2024 5503915, <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10663454>
- ⁶ Xingxing Li, Bo Wang, Xin Li, Jiabin Huang, Hongbo Lyu & Xinjuan Han : Principle and performance of multi-frequency and multi-GNSS PPP-RTK, Satellite Navigation volume 3, Article number: 7 (2022), <https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-022-00068-0>
- ⁷ Wikipedia: Normal distribution, https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution
- ⁸ Wikipedia: World Geodetic System 1984, https://fi.wikipedia.org/wiki/World_Geodetic_System_1984
- ⁹ Maanmittauslaitos kotisivu -> Kartat ja paikkatieto -> Koordinaatit ja paikannus -> Koordinaattijärjestelmät, <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/koordinaatit-ja-paikannus/koordinaattijarjestelmat>
- ¹⁰ Wikipedia: Geoidi, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Geoidi>
- ¹¹ Maanmittauslaitos, kotisivu -> Kartat ja paikkatieto -> Koordinaatit ja paikannus -> Koordinaattimuunnokset -> FIN2023N2000 geoidimalli, <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/koordinaatit-ja-paikannus/koordinaattimuunnokset/fin2023n2000-geoidimalli>
- ¹² Karera Oy: Verkko-RTK -paikannuspalvelu tarkimpiin reaaliaikaisiin mittaussovelluksiin, <https://karera.fi/palvelut/>
- ¹³ Marxact Ltd, homepage, Article: Solar Activity & (RTK)GNSS Impact, <https://support.marxact.com/article/188-solar-activity-rtk-gnss-impact>
- ¹⁴ Avaruussääkeskus / RWC Finland: Space weather in Finland, <https://rwc-finland.fmi.fi/index.php/space-weather-in-finland/>
- ¹⁵ Hexagongeosystems Ltd. Homepage -> Blog > The High Definition Surveyor > Solar cycles and sketchy signals: How ionospheric activity impacts GNSS and what you can do about it, <https://blog.hexagongeosystems.com/solar-cycles-and-sketchy-signals-how-ionospheric-activity-impacts-gnss-and-what-you-can-do-about-it/>
- ¹⁶ Skai Data Services: Live GPS Spoofing and Jamming Tracker Map, <https://spoofing.skai-data-services.com/>
- ¹⁷ Romanian Position Determination System: ROMPOS Services > ROMPOS F.A.Q. > What are the critical factors affecting RTK accuracy?, <https://rompos.ro/index.php/en/f-a-q/rompos-f-a-q/what-are-the-critical-factors-affecting-rtk-accuracy>
- ¹⁸ Wikipedia: Dilution of precision (navigation), [https://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_\(navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_(navigation))