



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Jonas Kuusisto

FINPOS-paikannuspalvelun testimit- taustulosten analyysi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinööriytyö

28.3.2021

Tekijä Otsikko	Jonas Kuusisto FINPOS-paikannuspalvelun testimittauksien analyysi
Sivumäärä Aika	40 sivua + 2 liitettä 28.3.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	lehtori Ilkka Partonen järjestelmäasiantuntija Topi Rikkinen johtava asiantuntija Marko Ollikainen
<p>Tämän insinööryön aiheena oli analysoida Maanmittauslaitoksen (MML) FINPOS-paikannuspalvelun tarkkuutta, luotettavuutta ja tehokkuutta MML:n suorittamien testimittauksien perusteella. Analyysin tavoitteena oli selvittää, onko FINPOS-palvelu riittävän hyvällä tasolla, jotta se voitaisiin ottaa käyttöön MML:n toimitusmittauksissa. Työssä esiteltiin FINPOS-paikannuspalvelun osa-alueita ja laskentaohjelmistoa, sekä avattiin MML:n tekemien testimittauksien menetelmiä, testisijainteja ja käytettyjä mittauslaitteita.</p> <p>Testimittauksien tulokset jaoteltiin mittausympäristön mukaan peitteisen tai aukean ympäristön mittauksiin. Analyysissä käytettiin ainoastaan Topcon Hiper HR-vastaanottimien mittaushavaintoja, ja mittaushavainnoille laskettiin analyysissä tarkkuutta, luotettavuutta ja tehokkuutta kuvaavia tunnuslukuja (mm. RMS, alustusaika ja karkeat virheet). Tarkkuutta ja luotettavuutta arvioitiin myös analysoimalla paikannuspalveluiden tukiasemaetäisyyksien, satelliittimäärien ja satelliittigeometrian vaikutuksia mittaushavaintojen tasotarkkuuksiin ja alustusaikoihin.</p> <p>Analyysissä laskettuja tuloksia verrattiin toimitusmittauksien RTK-mittauksen tasotarkkuuden ohjearvoon ($RMS \leq 0,1$ m) sekä MML:n nykyisin käyttämän Trimnet-paikannuspalvelun vastaaviin tuloksiin. Analyysissä FINPOS-palvelun tasotarkkuuden RMS-arvoiksi saatiin peitteisessä ympäristössä 0,073 m ja aukeassa ympäristössä 0,043 m. FINPOS-paikannuspalvelun tasotarkkuuden arvot olivat Trimnet-paikannuspalveluun verrattuna 10 mm suurempia. Keskimääräinen alustusaika oli FINPOS-paikannuspalvelulla 75 sekuntia, joka oli Trimnet-paikannuspalvelua sekunnin hitaampi.</p> <p>Analyysitulokset osoittivat, että FINPOS-paikannuspalvelu täyttää MML:n toimitustuotannon tarkkuusvaatimukset ja on riittävän luotettava ja tehokas MML:n toimitustuotannon käyttöön. Analyysistä saatiin myös hyvä yleiskuva FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden eroista, tarkkuuden, luotettavuuden ja tehokkuuden osalta.</p>	
Avainsanat	GNSS, verkko-RTK, analyysi, FINPOS, paikannuspalvelu

Author Title Number of Pages Date	Jonas Kuusisto Analysis of Test Measurement Results of FINPOS Positioning Service 40 pages + 2 appendices 28 March 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land surveying
Instructors	Ilkka Partonen, Senior Lecturer Topi Rikkinen, Systems Specialist Marko Ollikainen, Chief Specialist
<p>The subject of this final year project was to analyse the accuracy, reliability and efficiency of the National Land Survey's (NLS) FINPOS positioning service. The analysis material was derived from test measurements done by the NLS. The purpose was to establish if FINPOS was up to a sufficient standard to be used in cadastral surveys performed by the NLS.</p> <p>The bachelor's thesis presented the test measurement methods, locations and measuring devices used by the NLS. The various services and control centre software of FINPOS were also described. To ascertain the required accuracy, reliability and efficiency standards, test measurement observations were calculated into statistical values and compared to existing NLS NRTK accuracy guidelines ($\text{RMS} \leq 0,1 \text{ m}$) and Trimnet positioning service currently used by the NLS in cadastral surveys.</p> <p>The results show that FINPOS provides a horizontal precision RMS of 0,073 m in forest-clad environments and 0,043 m in open-sky environments with an average time to fix ambiguities of 75 seconds. Compared to Trimnet, this was only about 10 mm less accurate and took a second longer. The results show that compared to Trimnet, the FINPOS positioning service meets the given NLS cadastral surveying accuracy guidelines, is sufficiently reliable, and efficient.</p>	
Keywords	GNSS, NRTK, analysis, FINPOS, positioning service

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Satelliittipaikannus	2
2.1	Toimintaperiaate	2
2.2	Paikannustarkkuuteen vaikuttavat tekijät	4
2.3	RTK-mittaus	6
2.4	Verkko-RTK ja VRS	6
3	FINPOS-paikannuspalvelu	9
3.1	FinnRef-verkko	9
3.2	Paikannuspalvelun toteuttaminen	10
3.3	GNSMART	11
4	FINPOS-paikannuspalvelun testimittaukset	12
4.1	Testaustarve	12
4.2	Mittauskalusto	12
4.3	Testimittauspaikan valinta	14
4.4	Testausmenetelmät	17
4.4.1	Kesän testimittaukset	17
4.4.2	Syksyn testimittaukset	18
5	Testitulosten analyysi	20
5.1	Käytetyt kaavat	22
5.2	Mittaustarkkuus	23
5.2.1	Sisäinen tarkkuus	24
5.2.2	Ulkoinen tarkkuus	26
5.3	Alustus aika	28
5.4	Tukiasemaetäisyyksien vaikutukset	29
5.5	Tuloksista poistetut havainnot	32
5.6	Satelliittien ja DOP-arvojen vaikutus	33
6	Yhteenveto	37

Liitteet

Liite 1. 2020 analyysissä käytetyt testimittaukset

Liite 2. Poikkeamat pohjois-, itä- ja korkeuskoordinaatissa.

Lyhenteet

C/A-koodi	Coarse/Acquisition. GPS-satelliittien julkinen kantoaaltoihin moduloitu koodi.
DOP	Dilution of Precision. Lukuarvo, joka kuvaa satelliittigeometrian mittaustarkkuuden vaikutuksen
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System. Differentiaalinen GNSS-paikannusmenetelmä, jossa paikannuksen korjaukset saadaan tunnetuilta tukiasemilta.
ETRS-TM35FIN	European Terrestrial Reference System-Transverse Mercator-Finland. Suomalainen tasokoordinaattijärjestelmä, jossa käytetään Transverse Mercator -projektion kaistaa 35.
EUREF-FIN	European Reference Frame-Finland. Suomen kansallinen ETRS89-järjestelmän realisaatio.
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema. Venäläinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
GNSMART	GNSS State Monitoring And Representation Technique. Saksalaisen Geo++ yrityksen kehittämä paikannuspalveluohjelmisto.
GNSS	Global Navigation Satellite System. Maailmanlaajuinen satelliitteihin perustuva paikannusjärjestelmä.
GPS	Global Positioning System. Yhdysvaltalainen satelliittipaikannusjärjestelmä.
NMEA	National Marine Electronics Association. Kauppayhdistys, joka vastaa merenkäynnin elektronisten laitteiden kommunikaation standardoinnista.

NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol. Protokolla GNSS-korjausdatan siirtoon käyttäjälle RTCM-formaatissa.
P-koodi	Precision code. GPS-satelliiteissa sotilaskäyttöön tarkoitettu koodi.
ppm	parts per million. Miljoonasosa.
RINEX	Receiver Independent Exchange Format. Yleinen GNSS-havaintodatan tiedostomuoto
RMS	Root mean Square. Havaintojen neliösummien keskiarvo.
RSK	Rajamerkin Sijainnin Pistekeskivirhe. Kertoo rajamerkin sijaintitarkkuuden metreinä.
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services. Tiedostoformaatti, jota voidaan käyttää mm. RTK- ja/tai DGNSS-korjausdatan siirtoon.
RTK	Real Time Kinematic. Reaaliaikainen satelliittipaikannusmenetelmä.
VRS	Virtual Reference Station. Virtuaalinen tukiasema.

1 Johdanto

Maanmittauslaitos (MML) on valtion virasto, joka vastaa Suomessa tehdystä kiinteistötoimituksista, tuottaa kartta-aineistoja, ylläpitää kiinteistötietoja, rekisteröi kiinteistön omistuksenvaihdot ja tekee paikkatiedon tutkimuksia. Maanmittauslaitos tekee kiinteistötoimituksia ympäri Suomea, kaikissa maasto-olosuhteissa. Toimitusmittaukset suoritetaan suurilta osin RTK- (Real Time Kinematic) tai verkko-RTK-mittausmenetelmällä. Verkko-RTK-mittauksissa MML käyttää Geotrim Oy:n Trimnet VRS-paikannuspalvelua. MML aikoo korvata Trimnet-palvelun omalla FINPOS-paikannuspalvelullaan, joka on tarkoitus ottaa toimitustuotannossa käyttöön vuoden 2021 alussa [1].

FINPOS on MML:n ylläpitämä maksuton satelliittipaikannuspalvelu, joka perustuu eri puolella Suomea sijaitsevien FinnRef-tukiasemien verkkoon. FinnRef-tukiasemat lähettävät paikannuspalvelulle havaintodataa, jonka avulla palvelu mallintaa satelliittipaikannukseen vaikuttavien virhelähteiden suuruutta. Mallinnuksen avulla muodostetut korjaustiedot lähetetään eteenpäin käyttäjälle. [2]

Tämän insinööriyön tarkoitus on analysoida kesän ja syksyn 2020 aikana tehtyjen testimittauksien tuloksia. Analyysissa verrataan FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalvelun tarkkuutta, luotettavuutta ja tehokkuutta. Tavoitteena on saada vastaus, onko FINPOS-palvelu riittävän hyvällä tasolla, jotta se voitaisiin ottaa käyttöön MML:n toimitusmittauksissa. Insinööriyö tehtiin MML:n FINPOS-palveluryhmälle, joka käyttää työn tuloksia omassa raportoinnissaan. FINPOS-palveluryhmä vastaa FINPOS-paikannuspalvelun kehittämisestä, testaamisesta, valvomisesta ja ylläpidosta. Lisäksi FINPOS-palveluryhmä valvoo, ylläpitää ja huoltaa FinnRef-verkon asemia.

Insinööriyön alussa käsitellään satelliittipaikannuksen teoriaa, toimintaperiaatteita, perusmittaustapoja ja mittaustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Tämän jälkeen työssä käsitellään reaaliaikaisia kinemaattisia mittauksia (RTK) ja esitellään lyhyesti FINPOS-paikannuspalvelun historiaa sekä sen toimintaperiaatteita. Työn lopussa käsitellään tehtyjä testimittauksia ja analysoidaan saatuja tuloksia. Työn yhteenveto käsittelee ja pohtii tuloksia, analyysitavoitteita ja ehdottaa mahdollisia jatkotoimeenpiteitä.

2 Satelliittipaikannus

Satelliittipaikannuksella tarkoitetaan kohteen sijainnin selvittämisen satelliittisignaaleja hyödyntävän vastaanottimen avulla [3]. GNSS (Global Navigation Satellite System) on maailmanlaajuinen satelliitteihin perustuva paikannusjärjestelmä, jossa satelliitit lähettävät signaaliensa mukana sijainti- ja kellotiedot vastaanottimelle. Vastaanotin laskee tietojen perusteella sijaintinsa. Esimerkkejä GNSS-järjestelmistä ovat yhdysvaltalainen GPS (Global Positioning System), venäläinen GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), eurooppalainen Galileo ja kiinalainen BeiDou. GNSS-järjestelmä koostuu kolmesta lohkoista, jotka ovat: satelliittilohko, valvontalohko ja käyttäjälohko. [4; 5, s. 285.]

Satelliittilohko koostuu GNSS-järjestelmästä riippuen noin 20–30 satelliitista, jotka kiertävät maata noin 20 000 kilometrin korkeudella [6]. Jokaisessa satelliitissa on useita tarkkoja atomikelloja, sillä satelliittien aikaleimojen avulla lasketaan etäisyysmittaukset. Valvontalohko koostuu valvonta-aseamista, jotka sijaitsevat päiväntasaajan molemmin puolin. Valvonta-asemien tehtävä on satelliittien ratojen ja kellovirheiden ennustaminen, määrittäminen ja järjestelmän tilan valvonta. Käyttäjälohko koostuu GNSS-järjestelmien käyttäjistä, jotka vastaanottavat satelliittien lähettämiä signaaleja. [5, s. 282–285.]

2.1 Toimintaperiaate

Satelliittipaikannus perustuu paikannussatelliittien signaalien havaitsemiseen. Havaitseva vastaanotin selvittää paikannussatelliitin signaalien avulla satelliittien etäisyyden vastaanottimeen. Paikannussatelliitit lähettävät myös sijaintinsa (ratatiedot) signaaliensa mukana. Vastaanotin yhdistää kolmen paikannussatelliitin etäisyshavainnot ja sijaintitiedot ja ratkaisee näin oman sijaintinsa. Vastaanottimen kellovirheen ratkaisemiseksi mittauksissa tarvitaan myös neljäs satelliitti, johtuen vastaanottimen suhteellisen huonosta kellon tarkkuudesta verrattuna satelliittien atomikelloihin [5, s. 297]. Satelliittipaikannuksessa tarkkuus paranee mittauksissa käytössä olevan satelliittimäärän kasvaessa. [5, s. 291; 7, s. 10.]

Etäisyyksien mittaaminen perustuu joko satelliittien koodi- tai vaihehavaintojen hyödyntämiseen. Koodihavainnoissa etäisyys saadaan paikannuskoodin avulla, joka on moduloitu

kantoaaltoihin. Paikannuskoodi perustuu kahden numeron tilan vaihteluun, yleensä numerot -1 tai +1. Paikannuskoodin vaihtelu ja signaalin kulku aika muodostaa numeroidun mitta-asteikon [8]. Kantoaaltoon moduloitujen paikannuskoodien määrä voi vaihdella riippuen GNSS-järjestelmästä. GPS-satelliittien kantoaalloissa koodeja on kaksi: siviilikäyttöön tarkoitettu C/A-koodi (Coarse Acquisition) ja P-koodi (Precise), joka on tarkoitettu sotilaskäyttöön.

Jokaisella GNSS-järjestelmällä on 2–5 eri kantoaaltotaajuutta, esimerkiksi GPS GNSS -järjestelmässä taajuuksia on kolme: L1, L2 ja L5. Galileo GNSS -järjestelmässä kantoaaltotaajuuksia on viisi: E1, E5a, E5b, E5 ja E6. Koodihavaintoja parempaan tarkkuuteen päästään vaihehavaintojen avulla, jossa etäisyysmittaus perustuu satelliittien kantoaallon vaiheen havaitsemiseen. Tämä signaalin havaitsemistapa on kuitenkin teknisesti monimutkaisempi. [5, s. 287–292; 9, s. 17–19.]

Satelliittipaikannuksessa on kolme perusmittaustapaa: absoluuttinen paikannus, differentiaalinen paikannus ja suhteellinen paikannus. Absoluuttinen paikannus on yleisin käytetty mittaustapa, jota käyttävät esimerkiksi kännyköiden ja autojen navigointisovellukset. Tämä perustuu yhden havaintolaitteen käyttöön, jossa laite laskee etäisyyden satelliitteihin, paikannuskoodihavaintojen avulla. Havaintolaitteen kellovirhe arvioidaan ylimääräisen neljännen satelliitin avulla. Paikannustarkkuus on yleensä alle 10 m. [5, s. 293.]

Differentiaalisessa paikannuksessa etäisyydet satelliitteihin mitataan absoluuttisen paikannuksen tavoin koodihavaintojen avulla. Yhden paikantavan vastaanottimen lisäksi mittaukseen otetaan mukaan tunnetulla pisteellä oleva tukiasema, joka määrittää satelliitin ja paikantavan vastaanottimen mitatun etäisyyden virheet, ja välttää virhekorjaukset paikantavalle vastaanottimelle. Paikantava vastaanotin korjaa virhekorjauksien avulla mitaamansa etäisyydet tarkemmiksi, ja näin lisää paikannustarkkuuden yleensä alle kahteen metriin. [5, s. 299–301; 7, s. 13.]

Suhteellisessa paikannuksessa etäisyyden mittaus perustuu kantoaallon vaiheen havaitsemiseen. Mittauksissa mukana on tunnetulle pisteelle pystytetty vertailuvastaanotin, jonka suhteen paikantavan vastaanottimen sijainti määritetään. Kantoaaltoja seurataan ja selvitetään satelliittien ja vastaanottimien välisten kokonaisten aallonpituuksien

määrä. Havaintosuureina käytetään erotushavainnoja, jotka muodostetaan yhdistämällä kahden ajankohdan havainnot. Havainnot voivat olla satelliitin tai vastaanottimen. Erotushavainnojen avulla määritetään paikantavan vastaanottimen ja tukiaseman paikkavektori, joka on koordinaattiero vertailuvastaanottimen suhteen. Suhteellisen paikannuksen paikannustarkkuus on parhaimmillaan muutamia senttimetrejä. Suhteellisia paikannusmenetelmiä ovat mm. RTK, verkko-RTK ja staattinen mittaus. [5, s. 301–305.]

2.2 Paikannustarkkuuteen vaikuttavat tekijät

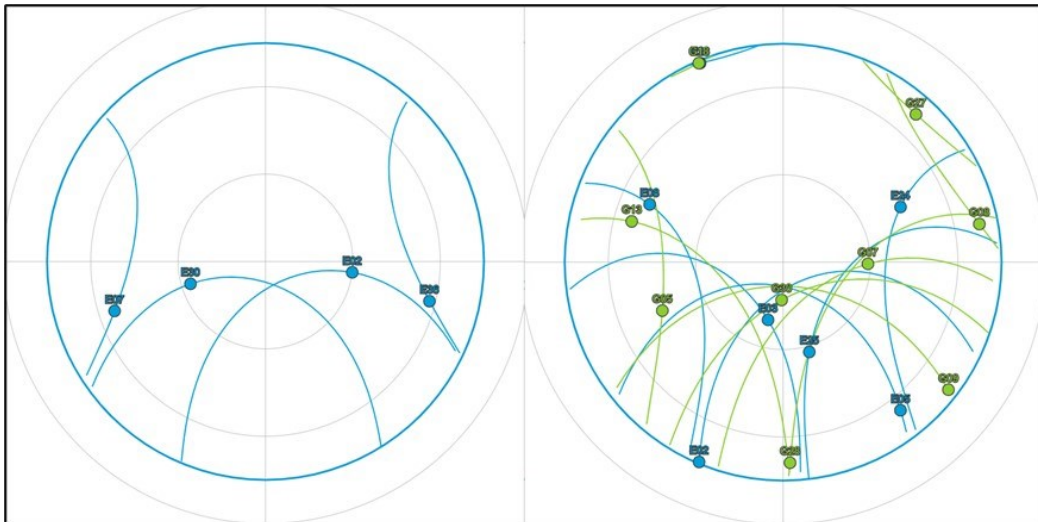
Satelliittipaikannuksen tarkkuuteen vaikuttavia virhelähteitä on monia. Tarkkuuteen vaikuttavat ilmakehäolosuhteet, mittausympäristö, GNSS-järjestelmät, havaittujen satelliittien määrät sekä satelliittigeometria.

Paikannussatelliittien signaalit liikkuvat avaruudesta maapallon ilmakehäkerroksien (ionosfääri ja troposfääri) läpi vastaanottimeen. Ionosfäärissä vapaiden elektronien määrä, vaikuttavat satelliittisignaalin kulkuun. Ionosfäärillä on suurempi vaikutus koodihavainnoja hyödyntäviin mittaustapoihin, joissa ionosfäärivirhe voi olla noin 1–50 metriä. Vaihehavainnoissa ionosfäärin aiheuttama virhe voidaan poistaa käyttämällä kahta signaalitaajuutta. Mittausvirhettä tulee myös troposfääristä, jossa sääilmiöt, ilmanpaine, lämpötila ja vesihöyry heikentävät mittausten tarkkuutta. Troposfäärin vaikutusta joudutaan usein estimoimaan troposfäärimalleilla. [3; 7, s. 28.]

Satelliittipaikannuksen käyttö ympäristössä, jossa tapahtuu monitieheijastuksia lisää sijainnin epätarkkuutta. Monitieheijastuksissa satelliittisignaali kulkee ylimääräisen etäisyyden tämän heijastuessa ympäröivistä pinnoista ja kohteista vastaanottimeen. Tällaisia kohteita ovat mm. rakennukset, vesistöt, puut ja autot. Monitieheijastuksen vaikutus mittausvirheeseen on koodihavainnoissa noin 10–20 m. Vaihehavainnoissa virhe on parhaimmillaan noin 5 cm. GNSS-järjestelmien satelliittien sijainnin laskenta perustuu tarkkaan ajan mittaukseen ja satelliittien lähettämiin ratatietoihin. Ratatietojen tarkkuus voi kuitenkin vaihdella senttimetreistä muutamaan metriin, ja pienikin kellovirhe satelliitissa tai vastaanottimessa voi vaikuttaa tarkkuuteen. Suurin osa virheistä pystytään kuitenkin kumoamaan suhteellisissa mittauksissa erotushavainnoilla. [7, s. 24–25.]

Satelliittipaikannuksen onnistumiseen tarvitaan vähintään 4 satelliittia, ja RTK-mittauksien suorittamiseen tarve nousee 5 satelliittiin. RTK-mittauksissa satelliittien täytyy näkyä sekä tukiasemalle että paikantavalle vastaanottimelle samanaikaisesti, jotta alkutuntemattomien ratkaisu, eli ns. FIX-ratkaisu onnistuisi. Ylimääräiset satelliitit usein parantavat satelliittigeometriaa, luotettavuutta, tarkkuutta ja lyhentävät alustusaika. Satelliittigeometria kuvaa, kuinka hyvin satelliitit ovat jakautuneet taivaalla havaitsevan vastaanottimen nähden.

Hyvä satelliittigeometria vaatii, että satelliitit ovat jakautuneet tasaisesti taivaalle (kuva 1). On kuitenkin suositeltavaa, että matalalla olevat satelliitit ovat yli 10 astetta horisontin yläpuolella. Satelliittigeometrian vaikutusta mittaustarkkuuteen kuvataan DOP-luvuilla (Dilution Of Precision). Tärkeimmät mittaustarkkuutta kuvaavat DOP-luvut ovat: HDOP (Horizontal DOP), VDOP (Vertical DOP) ja PDOP (Position DOP). HDOP kuvaa satelliittigeometrian vaikutusta tasotarkkuuteen, VDOP kuvaa satelliittigeometrian vaikutusta korkeustarkkuuteen ja PDOP kuvaa satelliittigeometrian vaikutusta taso- ja korkeustarkkuuteen. Yleinen sääntö on, että mitä pienempi DOP-luku, sitä parempi satelliittigeometria ja näin mittaustarkkuus. Ehdottomia raja-arvoja DOP-luvuille ei ole, mutta jos DOP-luku on < 5 , mittaustilanne on hyvä. Tämä ei kuitenkaan aina pidä paikkaansa ja on olemassa mittaustilanteita, jossa pienilläkin DOP-arvoilla satelliittigeometria on liian huono tarkkoihin mittauksiin. [5, s. 309; 7, s. 27.]



Kuva 1. Esimerkki hyvästä ja huonosta satelliittigeometriasta. Vasemmalla huonon satelliittigeometrian aikana satelliitit ovat jakautuneet jonoon. Oikealla hyvän satelliittigeometrian valitessa satelliitit ovat jakautuneet eri puolille taivasta. [10]

2.3 RTK-mittaus

Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus (RTK) on yleinen kartoituksissa ja mittauksissa käytetty satelliittipaikannusmenetelmä. RTK-mittauksissa käytetään kahta vastaanotinta: paikantava vastaanotin ja tunnetulla pisteellä sijaitseva vertailuvastaanotin eli tukiasema. Tukiasemavastaanotin mittaa vaihehavainnot ja lähettää nämä paikantavalle vastaanottimelle, radiolinkin tai internet-yhteyden avulla. Paikantava vastaanotin yhdistää omat havaintonsa saatuihin tukiasemahavaintoihin, muodostaen erotushavainnot. Erotushavainnot ja tukiaseman sijaintia hyväksikäyttäen paikantava vastaanotin ratkaisee reaaliajassa alkutuntemattomat. Erotushavaintojen avulla pystytään vähentämään useiden virhelähteiden aiheuttamia virheitä.

RTK-mittaukseen vaaditaan molemmille vastaanottimille vähintään 5 yhteistä satelliittia, mutta käytännössä vasta 6–7 satelliitin jälkeen mittaustarkkuus on hyväksyttävällä tasolla. Ilmakehän aiheuttamien virheiden takia, RTK-mittauksessa paikantavan vastaanottimen etäisyys tukiasemasta rajoittuu yleensä 10–20 kilometriin, sillä suuremmilla tukiasemaetäisyyksillä ionosfäärin aiheuttamat virheet kasvavat samaan suurusluokkaan kuin kantoaallon pituus. Myös metsien ja kaupunkien näkemäesteet ja monitieheijastukset vaikuttavat RTK-mittausten toimintasäteeseen ja tarkkuuteen. [5, s. 319–320.]

2.4 Verkko-RTK ja VRS

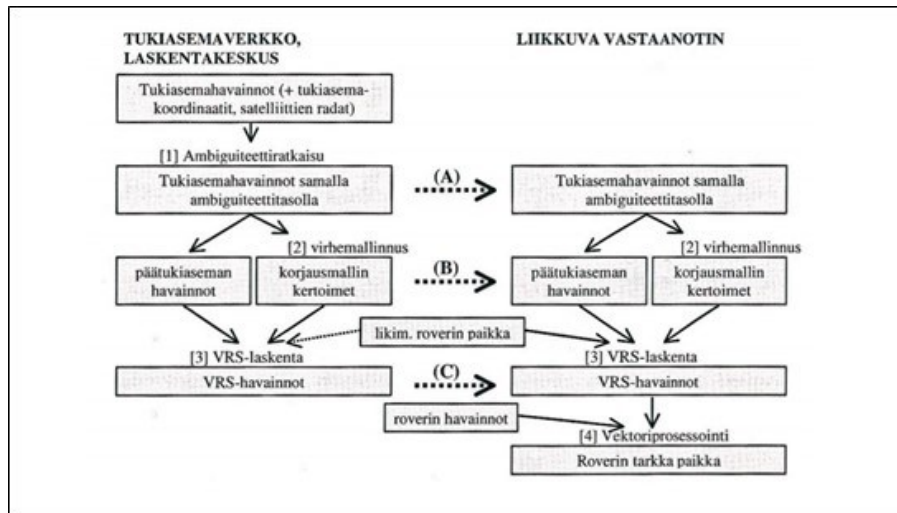
RTK-mittauksen rajallisen toimintasäteen ja ylimääräisen tukiasemavastaanottimen kalteuden takia, maanmittauksessa käytetään nykyään pääsääntöisesti verkko-RTK-menetelmää. Yhden tukiaseman sijasta verkko-RTK-mittauksessa käytetään tukiasemaverkostoa, jolloin ionosfäärin ja troposfäärin aiheuttamat virheet voidaan paremmin mallintaa verkon alueelta. Mittaajan ei näin tarvitse huolehtia tukiasemaetäisyydestä. Useat yritykset tarjoavat kaupallisia verkko-RTK-palveluja, joihin pystyy ostamaan käyttölisenssit. Näin säästyy liikkuvan tukiasemavastaanottimen osto, sillä sen hinta voi olla lisenssimaksua paljon korkeampi. [5, s. 320–321.]

Verkko-RTK-menetelmään kuuluu kolme vaihetta:

- verkkoratkaisu tukiasemaverkolle
- korjausmallikertoimien määrittäminen ja
- korjausdatan käyttö.

Verkkoratkaisu-vaiheessa ratkaistaan tukiasemaverkon alkutunteuttomat (FIX-ratkaisu). FIX-ratkaisussa hyväksytään ainoastaan kokonaisluvaksi ratkaistut alkutunteuttomat. Korjausmallikertoimen määrittämisessä mallinnetaan verkkoratkaisun perusteella satelliittipaikannuksen eri virheentekijät alueittain. Virhetekijät jaetaan dispersiivisiin ja ei-dispersiivisiin virheisiin. Dispersiivisiin virheisiin kuuluu ionosfäärivirheet ja ei-dispersiivisiin troposfääri- ja ratavirheet. Dispersiivien virheiden vaikutus voidaan poistaa vertaamalla kahta eri taajuushavaintoja toisiinsa, kun taas ei-dispersiiviset virheet ei voida. Viimeisessä vaiheessa muodostetaan virtuaalidataa käyttäen mallinnettuja korjauskertoimia, lähimmän tukiaseman havaintoja ja paikantavan vastaanottimen likimääräistä sijaintia. Virtuaalidatan avulla paikantava vastaanotin ratkaisee tarkan paikkansa. [7, s. 12.]

VRS (Virtual Reference Station) on yksi verkko-RTK-menetelmä. Verkko-RTK:n kaaviokuvassa (kuva 2) esitetään VRS-menetelmän pääperiaatteet. VRS koostuu useasta eri osasta: pysyvät GNSS-tukiasemat, laskentakeskus, tietoliikenneyhteydet ja paikantava vastaanotin.



Kuva 2. Verkko-RTK-menetelmän vaiheet. Paikantavalle vastaanottimelle voidaan lähettää dataa eri tavoin (kohdat A, B ja C). Kohta C on VRS-menetelmän käyttämä ratkaisu, jossa laskentakeskus luo virtuaalidatan käyttäjälle ja käyttäjä suorittaa ainoastaan alustuksen. [7, s. 12.]

Pysyvät GNSS-tukiasemat vastaanottavat satelliittihavaintodataa ja lähettävät tämän käyttäen modeemi-, frame relay-, internet- tai muulla tiedonsiirtotavalla laskentakeskukseen. Mittaajan oma paikantava vastaanotin lähettää likimääräisen sijaintinsa laskentakeskukseen NMEA-viestinä (National Marine Electronics Association). Laskentakeskuksessa laskentaohjelmisto prosessoi tukiasematiedot ja muodostaa (likimääräisen sijainnin avulla) virtuaalisen tukiaseman mittaajan lähelle. Paikantava vastaanotin vastaanottaa laskentakeskuksesta korjausdataa esimerkiksi RTCM-formaatissa (Radio Technical Commission for Maritime services), ja korjausdata simuloi paikallisen tukiaseman lähettämää dataa. [5, s. 321; 7, s. 14.]

3 FINPOS-paikannuspalvelu

3.1 FinnRef-verkko

FinnRef-verkko on Maanmittauslaitoksen (MML) ylläpitämä valtakunnallinen GNSS-tuki-
asemaverkko, jonka päätehtävä on toimia EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmän ja
MML:n FINPOS-paikannuspalvelun runkona [2; 11]. FinnRef-verkon rakentaminen aloi-
tettiin 1990-luvun alussa, ja verkon alkuperäiset 12 asemaa valmistuivat vuoden 1996
lopussa [12, s. 1]. FinnRef-verkkoa on aikojen saatossa tihennetty, aluksi vuosina 2012–
2014 20 aseman laajuiseksi ja vuosina 2017–2018 47 aseman laajuiseksi [11]. FINPOS-
palvelun monitorointia varten on viisi MML:n monitorointiasemaa.



Kuva 3. FinnRef-asema VAA2:n antennimasto, antenni ja laitetilä [13].

FinnRef-asema koostuu yleensä peruskallioon kiinnitetystä kolmemetrisestä anten-
nimastosta ja laitetilasta. Antennimaston päässä on suojakupolin alla oleva geodeettisen

tason JAVRINGANT_DM -choke ring -antenni (kuva 3). Laitetilassa sijaitsee aseman vastaanotin, varavirtalähde, ylijännitesuoja, etähallintalaite ja reititin. Asemat käyttävät Javad Delta TRE-3 -vastaanottimia, jotka tukevat kaikkia GNSS-järjestelmiä. FinnRef-asetat lähettävät havaintodataa reaaliajassa MML:n laskentakeskukseen, jossa GNSMART-ohjelmisto (GNSS State Monitoring And Representation Technique) tekee virhemallinnukset ja tietojen jakelun. [1; 14, s. 4.]

3.2 Paikannuspalvelun toteuttaminen

FINPOS-paikannuspalvelu koostuu kolmesta eri palvelusta: DGNSS-palvelu (Differential GNSS), RINEX-palvelu (Receiver Independent Exchange Format) ja RTK-palvelu. ”FINPOS-paikannuspalvelu” -termi käsittää kaikki edellä mainitut palvelut, mutta selvyiden vuoksi insinööriyössä käytetty termi viittaa ainoastaan RTK-palveluosiioon. Kaikki palvelut käyttävät FinnRef-tukiasemia toiminnoissaan, mutta RTK-palvelu käyttää tukiasemaverkossaan FinnRef-asemien lisäksi myös osaa MML:n monitorointiasemista, RTK-palvelun käyttöön varta vasten rakennettuja FINPOS-tukiasemia ja yhteensä 16 asemaa naapurimaista (Ruotsi, Viro ja Norja). [15]

DGNSS-palvelu tarjoaa differentiaalikorjausta käyttäen FinnRef-tukiasemia. Korjaukset voidaan tarjota yksittäisiltä FinnRef-asemilta tai käyttäjän lähelle lasketulta virtuaaliaseimalta. Korjaustiedot lähetetään käyttäjälle NTRIP-protokollan (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) avulla ja vastaanottimen likimääräinen sijainti lähetetään DGNSS-palvelulle NMEA-viestinä. Palvelulla voidaan saavuttaa noin 0,5 m:n tarkkuus. [16]

RINEX-palvelu on web-pohjainen palvelu FinnRef-asemien havaintodatan lataamiseen. Palvelu lähettää havaintodatan RINEX-tiedonsiirtoformaattissa käyttäjälle. Palvelua voidaan käyttää mm. GNSS-datan jälkilaskennassa. Jälkilaskennassa saavutettu tarkkuus on noin senttimetriluokkaa. [17]

RTK-palvelu on VRS-verkko-RTK-satelliittipaikannusmenetelmää käyttävä paikannuspalvelu. Palvelussa tukiasemat lähettävät satelliittihavaintodataa 3G/4G- tai valokuituyhteyksien avulla MML:n laskentakeskukseen, jossa GNSMART-ohjelmisto tekee luvussa 2.4. *Verkko-RTK ja VRS* kuvatut toimenpiteet. [14, s. 4.]

3.3 GNSMART

GNSMART-ohjelmistoa tuottaa saksalainen Geo++ ja ohjelmisto on ollut vuonna 2014 FINPOS-paikannuspalvelun julkaisusta asti käytössä [18, s. 15]. Ohjelmistoa on vuosien varrella päivitetty ja nykyään laskentakeskuksessa on käytössä GNSMART 2.5. Laskentakeskuksessa GNSMART tekee seuraavat tehtävät:

- satelliittihavaintodatan vastaanotto ja laadunvarmistus
- RINEX-tallennukset
- antennin vaihekeskipisteen korjaukset
- systemaattisten virheiden ennustaminen ja mallinnukset
- VRS-aseman vaadittujen tietojen luonti
- RTCM-tietovirran luonti VRS-asemalle tai muuhun korjausmenetelmään
- RTCM-korjauksien lähetys käyttäjälle.

GNSMART-ohjelmisto myös analysoi koko ajan tukiasemaverkon lähettämiä koodi- ja vaihehavaintoja, ja laskee niistä korjauksia ionosfääriin, troposfääriin, satelliittiratojen ja monitieheijastuksien aiheuttamiin virheisiin. [1; 19, s. 139.]

4 FINPOS-paikannuspalvelun testimittaukset

4.1 Testaustarve

Maanmittauslaitos käyttää toimitustuotannossa Geotrim Oy:n Trimnet-paikannuspalvelua, ja FINPOS-paikannuspalvelun on tarkoitus korvata tämän vuoden 2021 alussa. FINPOS-paikannuspalvelun tarkkuuden, luotettavuuden ja tehokkuuden on kuitenkin oltava riittävällä tasolla, jotta se voitaisiin ottaa käyttöön MML:n toimitusmittauksissa. Tämän takia vuoden 2020 kesän ja syksyn aikana MML suoritti paikannuspalveluilla testimittauksia ympäri Suomea eri maasto-olosuhteissa. Testimittauksen pääpainona oli FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden testaaminen ja tulosten toisiinsa vertaaminen. Kesän testimittauksissa mukana oli myös FINPOS-paikannuspalvelun eri tukiasemaverkkoratkaisuja, ohjelmistoja ja ohjelmistoversioita (taulukko 1).

Taulukko 1. Testimittauksissa käytetyt paikannuspalvelut ja -ohjelmistot.

Paikannuspalvelut/ohjelmistot	Ohjelmisto	Tukiasemaverkko	Tukiasemien määrä	Testausajanjakso
FINPOS	GNSMART 2.4 ja 2.5	FINPOS	61	kesä ja syksy
FINNREF	GNSMART 2.4	FinnRef	47	kesä
FINPOS-tihennetty	GNSMART 2.4	FINPOS+Geotrim (5 kpl)	61+5	kesä
Trimnet	Trimble Pivot	Geotrim	100+	kesä ja syksy
TopNet	TopNet	FINPOS	61	kesä

4.2 Mittauskalusto

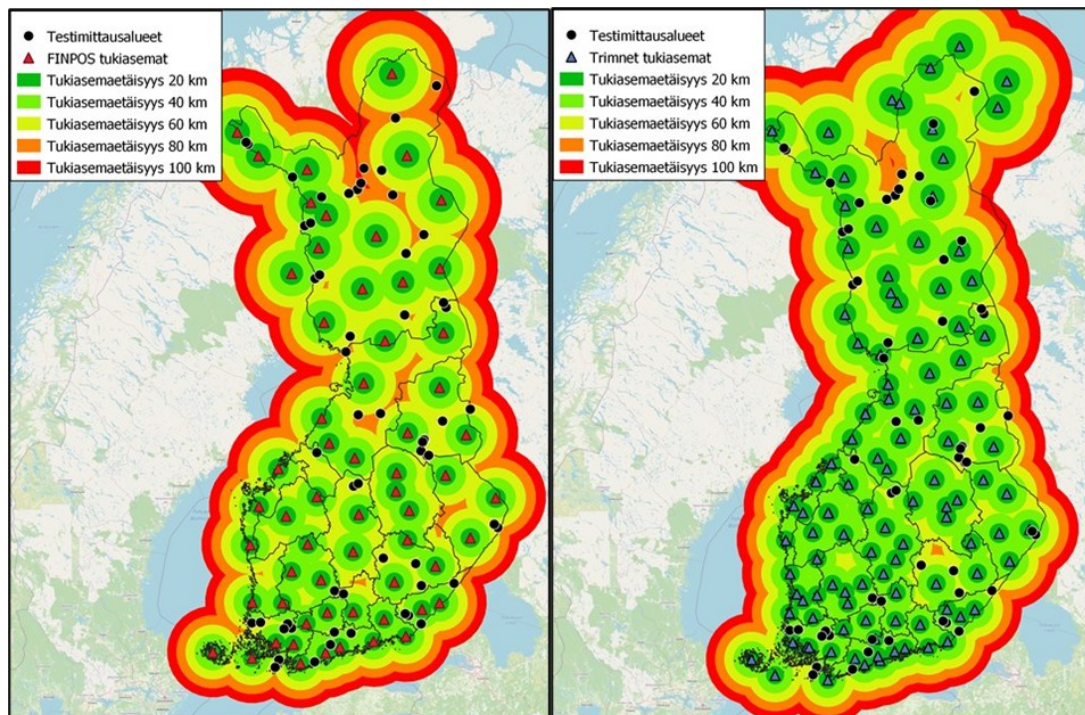
Kesän verkko-RTK-testimittaukset mitattiin MML:n tuotannossa käyttämällä Topcon Hiper HR -vastaanottimilla ja Topcon FC-5000 -maastotietokoneilla. Syksyllä testimittauksia mitattiin Topcon Hiper HR -vastaanottimien lisäksi myös seuraavilla vastaanotinmallilla: Topcon Hiper VR ja Leica GS18 I GNSS RTK.



Kuva 4. Topcon Hiper HR -vastaanottimet ja signaalinjakaja.

Kesän testimittauksissa vastaanottimet oli yhdistetty signaalinjakajan avulla yhteiseen ulkoiseen NovAtel VEXXIS GNSS-850 -antenniin (kuvat 4 ja 9). Syksyn mittauksissa käytettiin vastaanottimien omia antenneja. Kesän mittauksissa antennin pystytykseen käytettiin kolmijalkaa ja syksyn mittauksissa vastaanottimet pystytettiin käyttäen kartoitussauvaa ja sen tukijalkoja.

4.3 Testimittauspaikan valinta



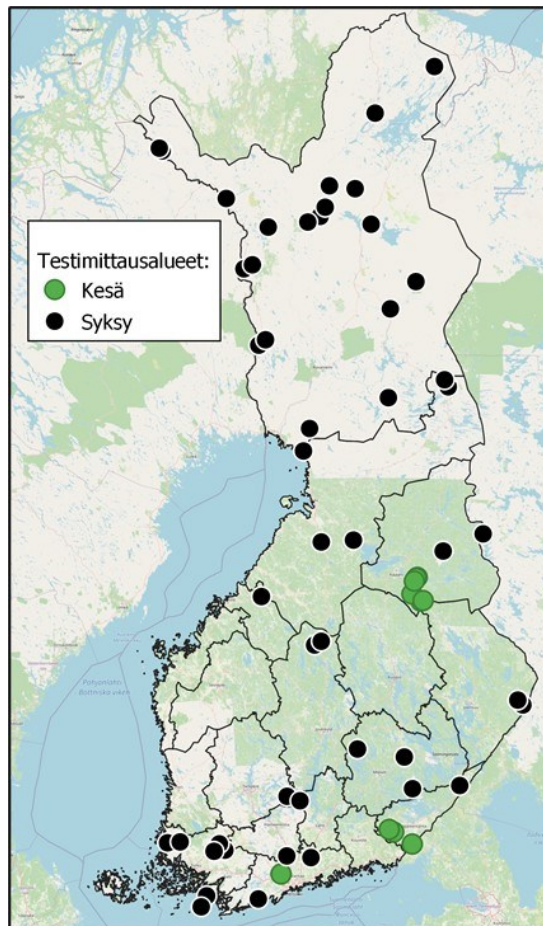
Kuva 5. FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden hyödyntämät tukiasemat, tukiasemaetäisyydet ja testimittausalueet. Vasemmalla FINPOS ja oikealla Trimnet.

Kesän ja syksyn testimittausalueet pyrittiin valitsemaan siten, että testialueiden mittauspaikkojen etäisyys paikannuspalveluiden käyttämiin tukiasemiin olisivat mahdollisimman pitkät (kuva 5). Näin pystyttiin testaamaan paikannuspalveluiden toimivuus harvassa tukiasemaverkossa. MML:n toiminta-alue on koko Suomi, joten MML:n mittaajat joutuvat verkko-RTK-menetelmällä mittamaan kaikissa maasto-olosuhteissa. Täten paikannuspalvelun toimivuus peitteisessä maastossa on tärkeää, ja testipisteiden tarkka paikka valittiin siten, että piste olisi maasto-olosuhteiltaan peitteisellä paikalla (kuva 6).



Kuva 6. Esimerkkitaivaskuva peitteisestä mittaustaikasta.

Kesän testimittaukset sijoituivat pääasiassa Etelä- ja Kaakkois-Suomeen (kuva 7). Muutamissa tapauksissa testimittauksissa hyödynnettiin Geotrim Oy:n GNSS-testimittauskentän pisteitä. Suurin osa kesän testimittauksista suoritettiin kuitenkin ilman tunnettua referenssipistettä, ja laitteet pysytettiin maastoon. Kesän tunnettujen pisteiden koordinaatteja ei myöskään hyödynnetty analyysissa vähäisten mittauskertojen takia.



Kuva 7. Kesän ja syksyn testimittausalueet.

Syksyllä testimittauksia suoritettiin Lounais-, Keski- ja Pohjois-Suomessa (kuva 7). Joh-tuen mittausmenetelmien muutoksesta syksyn mittauksissa mitattiin myös aukealla pai-kalla olevalla kiintopisteellä peitteisten testipisteiden lisäksi. Näiden aukeiden paikkojen mittauksen tarkoituksena oli testata, toimivatko paikannuspalvelut ylipäätään testausalu-eella. Syksyllä testialueiden määrittämisen jälkeen peitteiset testipisteet valittiin mittaus-alueelta ilmakuvien avulla ja aukealla olevat kiintopisteet MML:n Kiinteistötietopalvelusta haetuista kiintopisteistä.

Kesän testimittaukset suoritettiin ajanjaksolla 25.5.–20.8.2020 ja syksyn testimittaukset ajanjaksolla 15.9.–23.10.2020. Päivän testimittausajat olivat yleensä kello 8.00–17.00. Testimittauksia tehtiin yhteensä 105 eri paikassa ja 16 mittausta tehtiin samassa pai-kassa (liite 1).

4.4 Testausmenetelmät

Kesän ja syksyn testimittausten menetelmät eroavat hieman toisistaan. Kesän testimittauksien aikana käytettiin ainoastaan samoja vastaanotinmalleja (Topcon Hiper HR), jotka oli yhdistetty ulkoiseen antenniin. Syksyn testimittauksissa mukana oli myös muita vastaanotinmalleja ja vastaanottimet käyttivät omia antennejä. Kaikissa testimittauksissa mittaukset suoritettiin ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa, katkaisukulma oli 10 astetta lukuun ottamatta muutamaa kesän mittausta. Topcon Hiper HR -vastaanottimien luotavuustaso, joka kuvaa vastaanottimella tehdyn oikean alustuksen tilastollista todennäköisyyttä, asetettiin mahdollisemman korkealle, 99,9 prosenttiin [20, s. 47].

4.4.1 Kesän testimittaukset

Kesän verkko-RTK-testimittauksissa mitattiin käyttäen viittä samaan ulkoiseen antenniin kytkettyä vastaanotinta. Näin jokaisella vastaanottimella oli käytössä samat satelliitit ja maasto-olosuhteet. Ulkoinen antenni pystytettiin maastoon kolmijalan avulla (kuva 8). Vastaanottimet yhdistettiin eri paikannuspalveluihin tai ohjelmistoversioihin. Mittauksissa vastaanottimien havaintojen epookkimäärä asetettiin kymmeneen, jotta mittausaika olisi sama jokaisella vastaanottimella. Muutamassa kesän testimittauksessa katkaisukulma nostettiin väliaikaisesti 15–20 asteeseen.



Kuva 8. Kesällä Geotrimin testipisteradalla suoritettu testimittaus Topcon Hiper HR VR -vastaanotin. ja NovAtel VEXXIS GNSS-850 -antennilla.

Mittauksissa alustukset ja mittaushavaintojen tallennukset tehtiin käsin. Mittauksissa käytettiin MML:n maastomittaajien mittausmenetelmää, jossa jokaisen yksittäisen mittauksen jälkeen suoritetaan uusi alustus. Uudella alustuksella tapahtuu uusi alkutunteuttomien ratkaisu ja näin mahdollinen virheellinen alustus vaikuttaa vain yhteen mittaukseen. Viiden pistehavainnon tallennuksen jälkeen vastaanottimen yhteys paikannuspalveluun katkaistiin ja yhdistettiin uudestaan. Kesällä testimittaus mitattiin samalla paikalla työpäivän loppuun, yleensä noin 3–6 tuntia.

4.4.2 Syksyn testimittaukset

Syksyn verkko-RTK-testimittauksissa käytettiin vähintään kahta RTK-vastaanotinta, joista ensimmäinen yhdistettiin FINPOS-palveluun ja toinen Trimnet-palveluun. Jos mittaushenkilöillä oli muita vastaanotinmalleja käytettävissään, kyseiset vastaanottimet yhdistettiin FINPOS-palveluun. Muita paikannuspalveluita ei käytetty syksyllä. Syksyn testimittauksissa mitattiin saman päivän aikana kahdessa tai kolmessa eri paikassa. Kullakin testialueella mitattiin aluksi aukealla tunnetulla kiintopisteellä ja tämän jälkeen peitteisellä, maasto-olosuhteiltaan haastavalla paikalla. Aukeat ja peitteiset mittauspaikat eivät välttämättä olleet aivan vierekkään ja etäisyys paikkojen välillä saattoi vaihdella noin 1–5 km.



Kuva 9. Juvan alueella suoritettu testimittaus peitteisessä maastossa. Vastaanottimet vasemmalta oikealle: Topcon Hiper HR, Topcon Hiper VR, Leica GS18 I GNSS RTK ja Topcon Hiper HR.

Toisin kuin kesän mittauksissa, kolmijalkojen sijaan vastaanottimien pystytyksessä käytettiin syksyllä kartoitussauva ja tukijalkayhdistelmää. Syksyn peitteisten paikkojen mittauksissa vastaanottimia ei pystytetty tunnetun pisteen päälle, jokainen vastaanotin pystytettiin vierekkäin omalle kartoitussauvalleen (kuva 9). Laitteilla mitattiin samanaikaisesti, mutta toisin kuin kesän mittauksissa, vastaanottimet käyttivät omia antenniaan. Havaintojen epookkimäärä vaihdettiin kesän kymmenestä epookista viiteen epookkiin. Tämä tehtiin, jotta jokainen vastaanotinmalli käyttäisi samaa epookkimäärää, ja näin mitausajat olisivat samat. Muut varsinaiset mittausmenetelmät eivät muuttuneet kesän mittauksista.

Syksyn peitteisillä paikoilla mitattiin noin kaksi tuntia, jonka jälkeen siirryttiin toiselle mitauspaikalle. Aukeilla olevien kiintopisteiden mittauksissa vastaanottimella mitattiin kolme-neljä mittaushavaintoa kiintopisteen päällä, jonka jälkeen vastaanotin vaihdettiin (kuva 10). Aukeassa suoritettujen testimittausten tarkoitus oli varmentaa paikannuspalveluiden ja vastaanottimien toimivuus mittausalueella ennen peitteiselle testipaikalle siirtymistä.



Kuva 10. Aukealla kiintopisteellä 88M8816B suoritettu testimittaus. Kuvassa Topcon Hiper VR -vastaanotin.

5 Testitulosten analyysi

Analyysissä tarkasteltiin FINPOS-paikannuspalvelun tarkkuutta, luotettavuutta ja tehokkuutta, joiden täytyi täyttää MML:n toimitusmittauksen vaatimukset. Toimitusmittauksissa korkeutta ei huomioida, jonka takia analyysissä korkeustarkkuutta ei käsitellä muuten kuin luvussa 5.2. Toimitustuotannossa rajamerkin sijainnin tasotarkkuus ilmaistaan RSK-luvulla (Rajamerkin Sijainnin pisteKeskivirhe). RSK-luku ilmaisee rajamerkin sijainnin keskihajonnan. MML:n dokumentti ”Määräys mittausten tarkkuudesta ja rajamerkeistä kiinteistötoimituksista” määrittää RSK-luvulle laskukaavan, jonka laskemisessa RTK-mittausten tarkkuudelle on annettu ohjearvoksi 0,05–0,1 m. [21, s. 9.]

Luotettavuuden ja tehokkuuden arvioinnissa tarkastellaan FINPOS-palvelun alustusai-koja, karkeiden virheiden määrä, satelliittigeometriaa ja satelliittimääriä. Kyseisiä arvoja verrattiin toimitustuotannossa käytössä olevaan Trimnet-palveluun. Jokaisesta käytetystä testivastaanottimesta kerättiin testimittauskerran jälkeen tekstitiedosto, jossa näkyy mm. mittaushavaintojen koordinaatit, DOP-luvut, käytetyt satelliittimäärät, kellonaika ja

päiväys (kuva 11). Käytetyt koordinaatit olivat ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja N2000-korkeusjärjestelmässä. Aineistosta poistettiin kaikki havainnot, joiden tarkkuus ylitti tietyn toleranssiarvon (ks. luku 5.5). Seulotut aineistot koottiin Excel-tiedostoihin analysointia varten ja luokiteltiin paikannuspalveluiden mukaan. Analyysissä käytettiin vain Topcon Hiper HR -vastaanottimilla tallennettuja mittaushavaintoja, johtuen insinöörityön rajauksesta.

Point Number	Code	Date	Time	Solution	Physical Station ID	Virtual Station ID	Northing	Easting	Ell Ht	Elev	Ant Ht	HRMS	VRMS	HDOP	VDOP	PDOP	GDOP	TDOP	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU	SBAS	QZSS	
100	,2.10.2020	9:43:06	FIXED	122	4095	7414723.194	375263.065	156.702	134.636	1.800	0.022	0.049	1.273	3.053	2.775	3.647	,9,5,3,2,0,0								
101	,2.10.2020	9:44:23	FIXED	122	4095	7414723.105	375263.091	156.421	134.355	1.800	0.021	0.050	1.387	3.376	3.078	4.045	,9,4,3,0,0,0								
102	,2.10.2020	9:48:56	FIXED	122	4095	7414723.153	375263.049	156.631	134.565	1.800	0.021	0.049	1.583	3.686	3.329	4.372	,8,4,3,3,0,0								
103	,2.10.2020	10:01:02	FIXED	122	4095	7414723.130	375263.035	156.701	134.635	1.800	0.023	0.046	1.556	3.156	2.746	3.841	,7,5,3,5,0,0								
104	,2.10.2020	10:01:57	FIXED	122	4095	7414723.111	375262.998	156.830	134.764	1.800	0.023	0.049	1.259	3.021	2.746	3.721	,6,6,3,5,0,0								
105	,2.10.2020	10:02:47	FIXED	122	4095	7414723.152	375263.042	156.787	134.720	1.800	0.020	0.050	1.577	4.580	4.300	5.625	,8,4,3,6,0,0								
106	,2.10.2020	10:03:25	FIXED	122	4095	7414723.162	375263.020	156.698	134.631	1.800	0.018	0.049	1.638	5.761	5.523	7.227	,7,7,2,6,0,0								
107	,2.10.2020	10:03:53	FIXED	122	4095	7414723.146	375263.030	156.581	134.515	1.800	0.021	0.042	0.917	2.162	1.958	2.719	,6,6,2,7,0,0								
108	,2.10.2020	10:04:41	FIXED	122	4095	7414723.074	375263.001	156.227	134.160	1.800	0.020	0.046	1.664	4.946	4.658	6.227	,6,5,2,7,0,0								
109	,2.10.2020	10:05:22	FIXED	122	4095	7414723.015	375262.976	156.604	134.537	1.800	0.023	0.037	0.900	1.999	1.785	2.514	,6,6,3,6,0,0								
110	,2.10.2020	10:06:14	FIXED	122	4095	7414722.966	375262.986	156.475	134.408	1.800	0.026	0.042	0.911	2.035	1.820	2.556	,5,6,4,5,0,0								
111	,2.10.2020	10:07:03	FIXED	122	4095	7414723.019	375263.020	156.578	134.512	1.800	0.028	0.049	0.804	1.781	1.589	2.179	,7,7,4,5,0,0								
112	,2.10.2020	10:15:09	FIXED	122	4095	7414723.159	375263.088	156.591	134.524	1.800	0.028	0.050	0.830	1.853	1.657	2.260	,7,6,2,6,0,0								
113	,2.10.2020	10:15:48	FIXED	122	4095	7414723.128	375263.081	156.483	134.416	1.800	0.026	0.047	0.831	1.855	1.659	2.262	,7,6,2,6,0,0								
114	,2.10.2020	10:16:20	FIXED	122	4095	7414723.110	375263.062	156.563	134.497	1.800	0.027	0.050	0.831	1.857	1.660	2.263	,8,6,3,7,0,0								
115	,2.10.2020	10:16:46	FIXED	122	4095	7414723.234	375263.045	156.889	134.823	1.800	0.023	0.044	0.862	2.035	1.843	2.482	,8,7,3,7,0,0								
116	,2.10.2020	10:17:18	FIXED	122	4095	7414723.295	375263.016	157.077	135.010	1.800	0.026	0.049	0.760	1.827	1.662	2.238	,8,7,3,7,0,0								

Kuva 11. Esimerkki testimittaustiedostosta.

Analyysissä esitettävät tarkkuudet, alustusajat, etäisyydet, DOP-luvut ja satelliittimäärät kuvaavat peitteisillä paikoilla saatuja tuloksia. Syksyn aukeiden kiintopisteiden mittaus-tuloksista tallennettiin ainoastaan pohjois-, itä, ja korkeuskoordinaatit, ja täten näiden tuloksia pystytään analysoimaan vain ulkoisen tarkkuuden (luku 5.2.2) ja tukiasemaetäisyyksien osalta (luku 5.4). Analyysissä keskityttiin myös enemmän peitteisillä paikoilla tehtyihin mittauksiin, johtuen MML:n tarpeesta mitata kaikissa maasto-olosuhteissa.

Mittaushavaintoja saatiin tallennettua analyysia varten yhteensä 19 918 kpl eri paikannuspalveluilla, ohjelmistoversioilla ja tukiasemamäärillä. Korkean mittaushavaintojen määrän takia, analyysissä laskettuja tunnuslukuja pitää tilastollisesti luotettavina, lukuun ottamatta aukeassa maastossa mitattuja mittaushavaintoja, joita oli yhteensä 567 kpl.

5.1 Käytetyt kaavat

Insinööriyössä mittausten tarkkuutta analysoitiin laskemalla mittaushavaintojen keskihajonta, engl. root mean square (RMS). RMS laskettiin joko tunnetun pisteen referenssikoordinaattien suhteen, tai jos mittauskerta ei suoritettu tunnetulla pisteellä, testimitauskerran koordinaattien mediaanin suhteen. RMS:a referenssikoordinaattien suhteen kutsutaan ulkoiseksi tarkkuudeksi (engl. accuracy), ja RMS:a koordinaattien mediaanin suhteen kutsutaan sisäiseksi tarkkuudeksi (engl. precision) Ulkoinen tarkkuus kuvaa tarkkuutta verrattuna tunnettuihin koordinaatteihin ja sisäinen tarkkuus kuvaa tarkkuutta verrattuna toisiin mittaushavaintoihin. [22, s. 2.]

Normaalijakautuneessa aineistossa RMS vastaa 68 %:n varmuutta, että arvo osuu RMS-arvon sisälle. RMS lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}{n}}, \text{ jossa}$$

x on havainnon poikkeama referenssikoordinaateista tai mittaushavaintojen mediaanista, ja n on mittaushavaintojen lukumäärä. [1; 7, s. 47.]

Tasokoordinaattien poikkeaman laskennassa käytettiin Pythagoraan lausetta:

$$\sqrt{x^2 + y^2}, \text{ jossa}$$

x on pohjoiskoordinaatin poikkeama referenssikoordinaateista tai mittaushavaintojen mediaanista, ja y on eteläkoordinaatin poikkeama referenssikoordinaateista tai mittaushavaintojen mediaanista.

Alustusaikojen, satelliittimäärän, satelliittigeometrian ja tukiasemaetäisyyksien vaikutusten arvioinnissa käytettiin keskiarvoja koskien RMS- ja HDOP-lukuja sekä alustusaikoja. Normaalijakautuneessa havaintoaineistossa voidaan käyttää laajennuskertoimia, joiden avulla voidaan selvittää aineistolle laajemmat todennäköisyydet (95 %, 99 %), kertomalla keskihajonta ja laajennuskerroin. Insinööriyden analyysiaineisto ei kuitenkaan ole täysin normaalijakautunut ja mittaushavaintojen reunoilla löytyy poikkeamia normaalijakautuneesta aineistosta. Poikkeamaa ei ole todennäköisyyksien laskennassa kuitenkaan huomioitu ja aineistoa on käsitelty kuin se olisi normaalijakautunut. Insinööriydessä käytettiin laajennuskerrointa 2,0 95 %:n todennäköisyysarvion laskennassa.

5.2 Mittaustarkkuus

Mittaustarkkuuden analyysissä on käytetty vain karkeiden virheiden suodatuksen läpäisseet havainnot, joita käsitellään tarkemmin luvussa 5.5. Analyysissä esitettävät tarkkuudet kuvaavat peitteisillä ja avoimilla paikoilla saatuja tuloksia. Peitteisessä maastossa mittaustarkkuus on yleensä huonompi kuin avoimessa maastossa, ja pahimmassa tapauksessa mittaaminen ei onnistu lainkaan. Johtuen testimittauksissa käytetyistä mittausten menetelmistä suurimmalle osalle mittaushavainnoista ei ollut käytettävissä tarkkoja referenssikoordinaatteja, ja analyysissä ilmaistu tarkkuus (RMS) on yleensä ainoastaan sisäinen tarkkuus. Ulkoisen tarkkuuden RMS:a käsitellään ainoastaan luvuissa 5.2.2 ja 5.4. Mittaustarkkuuden analyysissä on käytetty vain karkeiden virheiden suodatuksen läpäisseet havainnot, joita käsitellään tarkemmin luvussa 5.5.

Liitteen 2 kuvat 1, 2 ja 3 esittävät peitteisten mittaushavaintojen pohjois- (N), itä- (E) ja korkeuskoordinaattien (U) poikkeamat mittaushavaintojen mediaanista. Tämä kertoo paikannuspalveluita käytettäessä saavutettavan sisäisen virheen, jotka ovat molemmissa paikannuspalveluissa varsin hyvin normaalijakautuneet. Trimnet-palvelun havainnot ovat kuitenkin kasautuneet lähemmäksi nollakohtaa, kuin FINPOS-palvelun havainnot. Tämä tarkoittaa, että Trimnet on sisäisesti tarkempi kuin FINPOS.

Kuvassa 3 (liite 2) on esitetty, että korkeushavaintojen hajonta FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluilla selvästi suurempi kuin pohjois- ja itäkoordinaatit. Jakaumien reunoilla ei näy havainnoista poistetut karkeat virheet, joita oli kaikissa mittauksissa yhteensä 850 kpl.

5.2.1 Sisäinen tarkkuus

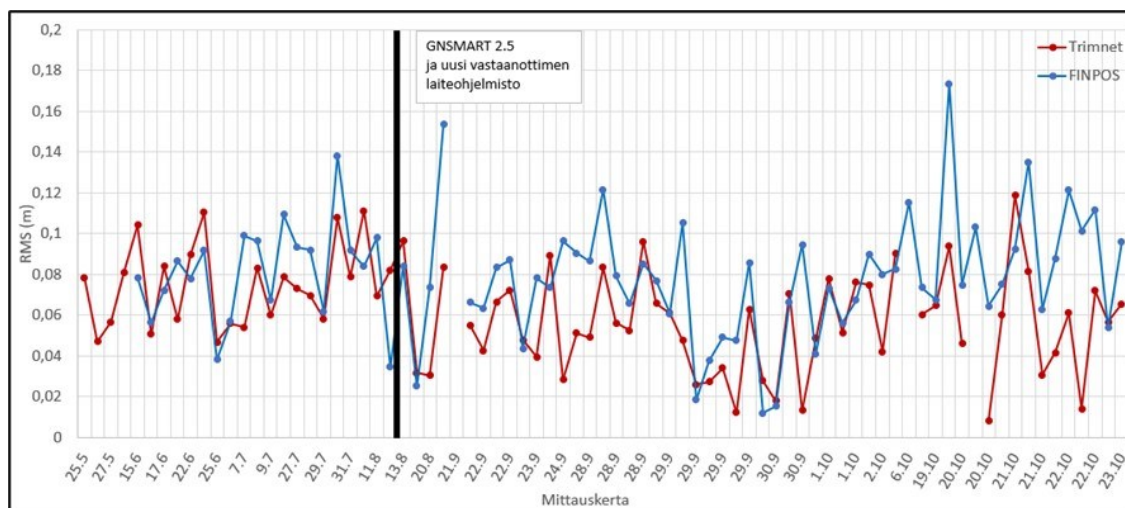
Tässä luvussa tarkkuudet (RMS ja 95 %:n tarkkuusarvio) on esitetty sisäisenä tarkkuutena. Taulukossa 2 on peitteisten mittauspaikkojen taso- ja korkeuskoordinaattihavainnoista lasketut keskihajonnat ja 95 %:n tarkkuusarviot metreinä. 95 %:n tarkkuusarvio ei ole tarkkuuden todellinen arvo, sillä tämä laskettiin normaalijakautuneen havaintoaineiston laajennuskertoimella. Taulukossa tarkkuudet on eroteltu FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluittain. FINPOS-palvelussa mitattujen koordinaattihavaintojen tasotarkkuudeksi (RMS) saatiin 0,075 m ja Trimnet-palvelussa 0,063 m. Korkeuskoordinaattien RMS on FINPOS-palvelulla 0,152 m ja Trimnet-palvelussa 0,096 m.

Erot paikannuspalveluiden tasotarkkuuden osalta on 12 millimetriä ja 56 millimetriä korkeustarkkuuden osalta. Tulosten perusteella huomataan, että Trimnet-palvelulla mitataan käytetyillä vastaanottimilla peitteisissä mittauspaikoissa FINPOS-palvelua tarkemmin. Tämä tarkkuusero ei kuitenkaan ole merkittävä tasotarkkuuden osalta. Korkeustarkkuudella ei ole toimitusmittausten kannalta paljon merkitystä, ja täten suhteellisen korkea korkeushajonta voidaan pitää hyväksyttävänä.

Taulukko 2. FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden mittaushavaintojen keskihajonta (RMS) ja 95 %:n tarkkuusarvio taso- ja korkeuskoordinaattien (U) osalta. Poikkeamat mittausten mediaanista ilmoitettu metreinä.

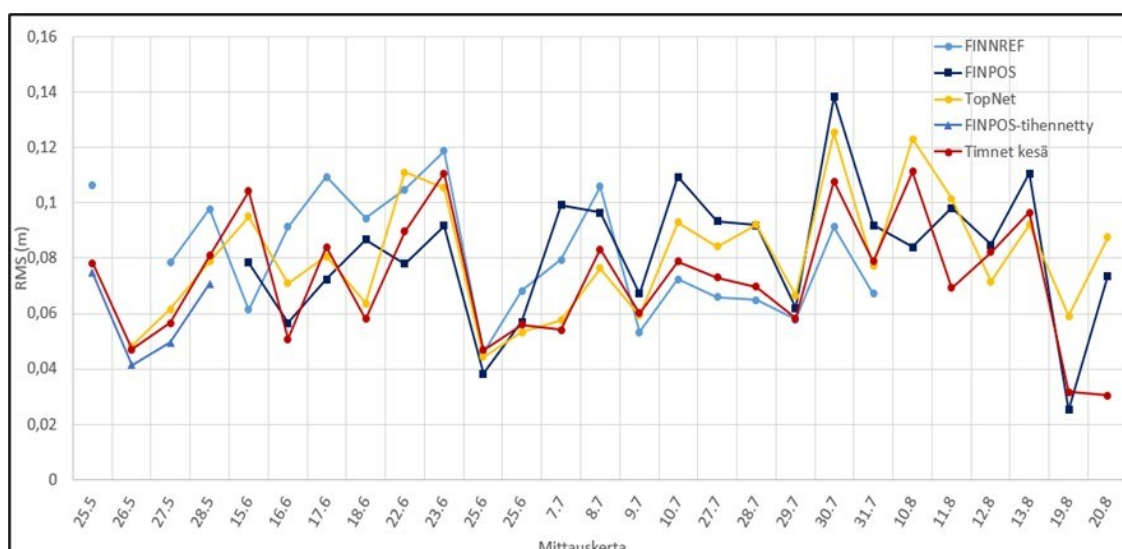
Paikannuspalvelu	RMS (m)	95 % (m)
FINPOS	0,075	0,151
Trimnet	0,063	0,126
Paikannuspalvelu	U RMS (m)	U 95 % (m)
FINPOS	0,152	0,303
Trimnet	0,096	0,193

Kuvassa 12 esitetään kaikki FINPOS- ja Trimnet-palveluiden peitteisten testimittauskertojen RMS. Kaaviosta nähdään, että useasti FINPOS- ja Trimnet-palveluiden tarkkuus on hyvin lähellä toisiaan. Kaaviosta voidaan todeta kuitenkin yksittäisiä mittauskertoja, jossa tarkkuuserot olivat huomattavia, yhdellä mittauskerralla jopa 0,08 m. FINPOS-paikannuspalvelun mittaustarkkuus parani FINPOS-ohjelmistopäivityksen (GNSMART 2.5) jälkeen hetkellisesti, mutta normalisoitui uusimpien testimittauskertojen aikana. Tämä muutos voi kuitenkin johtua maasto-olosuhteiden muutoksesta tai vain sattumasta, ja kaavion perustella ei voida tehdä suoria johtopäätöksiä päivityksen vaikutuksesta tarkkuuteen.



Kuva 12. FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden tasokoordinaattien keskihajonta (RMS) peitteisten testimittauspaikoilla. Poikkeamat mittauksen mediaanista ilmoitettu metreinä.

Kesällä testimittauksia suoritettiin FINPOS-palvelun eri tukiasemamäärillä, ohjelmistoilla ja ohjelmistoversioilla. Nämä testimittaukset lopetettiin kuitenkin kesän jälkeen, ja syksyn testauksissa käytettiin ainoastaan kahta paikannuspalvelua GNSMART-ohjelmistolla toimiva FINPOS-palvelu ja Trimnet. Syynä oli GNSMART-ohjelmistolla toimivan FINPOS-paikannuspalvelun parempi tarkkuus. Kuvan 13 kaaviossa on esitetty FINPOS-palvelun eri toteutusmuotojen mittaustuloksien RMS, ja kaaviosta voidaan huomata, että FINPOS-toteutusmuoto oli RMS hajonnaltaan pienin ja täten tarkin. Muut FINPOS-palvelun toteutusmuodot olivat RMS hajonnaltaan suurempia ja täten epätarkempia mm. Top-Netin tasotarkkuus on testimittauskerroilla aina kehnompina kuin FINPOS.



Kuva 13. Kesän testimittaukset eri paikannuspalvelulla, ohjelmistoilla ja ohjelmistoversioilla. FINPOS-palvelun eri toteutusmuodot (FINNREF, FINPOS, FINPOS-tihennetty) on kuvattu siniellä värisävyllä.

5.2.2 Ulkoinen tarkkuus

Tässä osiossa esitetään syksyn avoimella paikalla olevien kiintopisteiden testimittaushavaintojen tarkkuutta. Yhteensä mittaushavaintoja aukeilla kiintopisteillä oli 267 kpl, joiden esitetyt tulokset ovat enemmän suuntaa antavia. Tulokset voivat kuitenkin antaa rajatun arvion paikannuspalveluiden tarkkuudesta. Koska testimittaukset suoritettiin referenssipisteenä käytetyn kiintopisteen päällä, RMS ja 95 %:n tarkkuusarviot kuvaavat tässä luvussa ulkoista tarkkuutta. Taulukossa 3 näkyy taso- ja korkeuskoordinaattien poikkeamille lasketut RMS ja 95 %:n tarkkuusarviot avoimille kiintopistehavainnoille metreinä. FINPOS-palvelun tasotarkkuus (RMS) avoimilla kiintopisteillä on 0,044 m ja Trimnet-palvelun 0,034 m. RMS korkeuskoordinaattien osalta FINPOS-palvelulla on 0,129 m ja Trimnet-palvelulla 0,116 m.

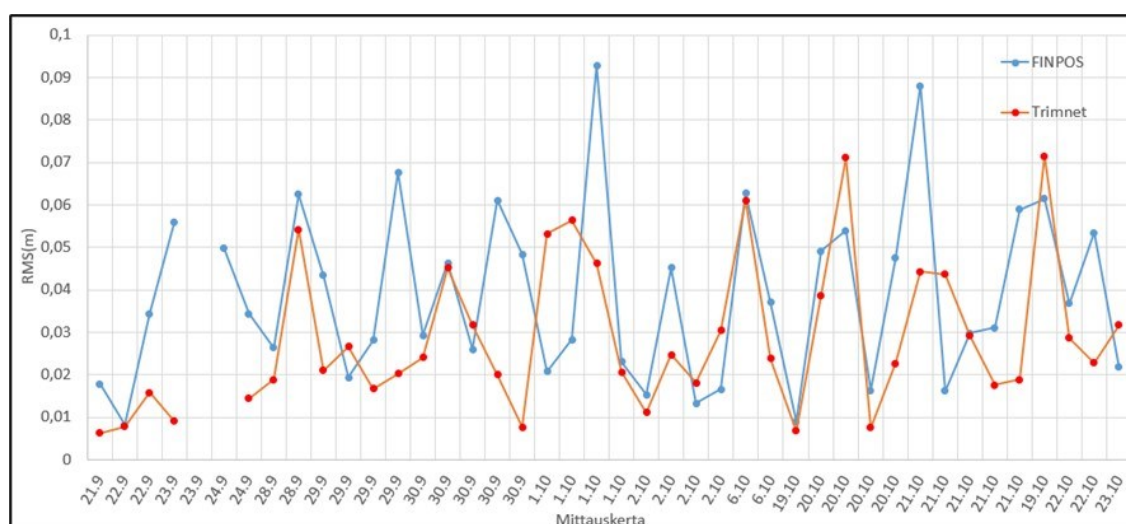
Trimnet-palvelun avulla mitatut tulokset olivat 10 mm (29 %) tarkempia tasokoordinaattien osalta. Tarkkuusero on hyvin samanlainen kuin peitteisten mittauspaiikkojen tarkkuuserot. Tämän pohjalta voidaan todeta, että FINPOS-palvelulla mitataan kaikissa olosuhteissa noin 10–15 mm Trimnet-palvelua epätarkemmin.

Paikannuspalveluiden korkeuskoordinaattien tarkkuusero on 13 mm. Osa korkeuskoordinaattien havainnoista oli tiedonsiirrossa vahingossa tallennettu eri korkeusjärjestelmään, mikä osittain selittää molempien paikannuspalveluiden suhteellisen korkean keskihajonnan. Myös käytettyjen kiintopisteiden huono korkeustarkkuus voi selittää paikannuspalveluiden korkean korkeuden keskihajonnan. Toimitustuotannossa korkeustarkkuudella ei ole suurta merkitystä, joten tarkkuutta voidaan pitää hyväksyttävänä.

Taulukko 3. FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden aukeiden kiintopisteiden mittaushavaintojen keskihajonta (RMS) ja 95 % tarkkuusarvio taso- ja korkeuskoordinaattien (U) osalta. Poikkeamat mittausten referenssikoordinaateista ilmoitettu metreinä.

Paikannuspalvelu	RMS (m)	95 % (m)
FINPOS	0,044	0,089
Trimnet	0,034	0,069
Paikannuspalvelu	U RMS (m)	U 95 % (m)
FINPOS	0,129	0,259
Trimnet	0,116	0,232

Kuvassa 14 esitetään kaikkien aukealla olevien kiintopisteiden testimittauskertojen RMS. Peitteisen ympäristön mittauskertojen lailla paikannuspalveluiden tasotarkkuus on usein yhtä tarkka. Avoimessa ympäristössä on myös yksittäisiä mittauskertoja, jossa paikannuspalveluiden tarkkuuserot ovat huomattavia. On kuitenkin huomioitava, että kaaviossa jokainen testimittauskerta käsittää vain 3–4 mittaushavaintoa ja mittauskertojen tarkkuudet vääristyvät näin helposti.



Kuva 14. FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden tasokoordinaattien keskihajonta (RMS) aukeilla mittauspisteillä. Poikkeamat mittausten referenssikoordinaateista ilmoitettu metreinä.

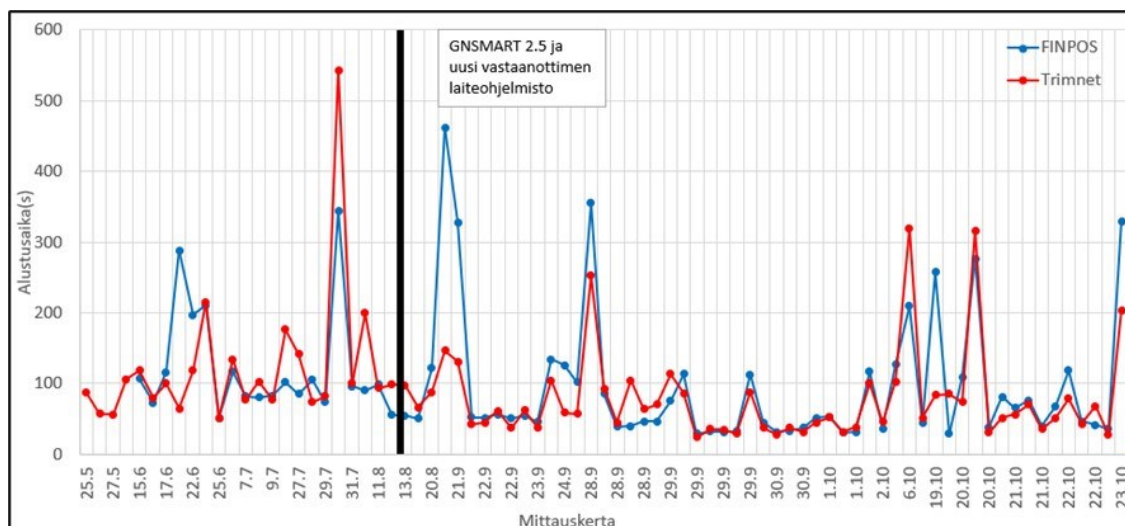
5.3 Alustusaika

Alustusajalla on merkittävä vaikutus RTK-mittausten nopeuteen, ja täten testimittausten aikana jokaiselle havainnolle tehtiin oma, itsenäinen alustus. Näin jokaisen mittaushavainnon aikaväli on paikannuspalvelun alustusaikaa. Koska havainnot ja alustukset tehtiin käsin maastotietokoneella, mittaushavaintojen väliset aikavälit antavat hieman huomman kuvan parhaista mahdollisista alustusajoista, sisältäen mm. mittaajien pitämät tauot, akkujen vaihdot ja muita hetkellisiä keskeytyksiä, jotka voivat lisätä mittausten välistä aikaväliä. Alustusaikojen analyysissä ei pystytty käyttämään aukeiden kiintopisteiden mittaushavaintoja, koska mittaushavaintojen aikoja ei ollut tallennettu mittausten tekstitiedostoihin. Analyysissä alustusaikojen laskussa mukana olivat myös karkeisiin virheisiin johtaneet havainnot.

Taulukko 4. Syksyn ja kaikkien mittaushavaintojen alustusaika keskiarvot sekunteina.

Paikannuspalvelu	Alustusajan keskiarvo (s)
FINPOS	75
Trimnet	74

Kuvan 15 kaaviossa huomataan FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden keskimääräisten alustusaikojen olevan suunnilleen samanpituisia, ja nopeammin alustavaa paikannuspalvelua on kaaviossa vaikeaa erottaa. Taulukossa 4 kuvataan kaikkien mittausten alustusaikojen keskiarvo paikannuspalveluittain. Paikannuspalveluiden keskimääräiset alustusajat eroavat vain sekunnilla, joten voidaan todeta, että alustusajat ovat käytännössä samanpituiset. Noin 75 sekunnin keskimääräistä alustusaikaa voidaan pitää peitteisessä ympäristössä kohtalaisena hyvänä, etenkin jos tällä hetkellä toimitusmitauksissa käytössä oleva Trimnet on yhtä nopea.

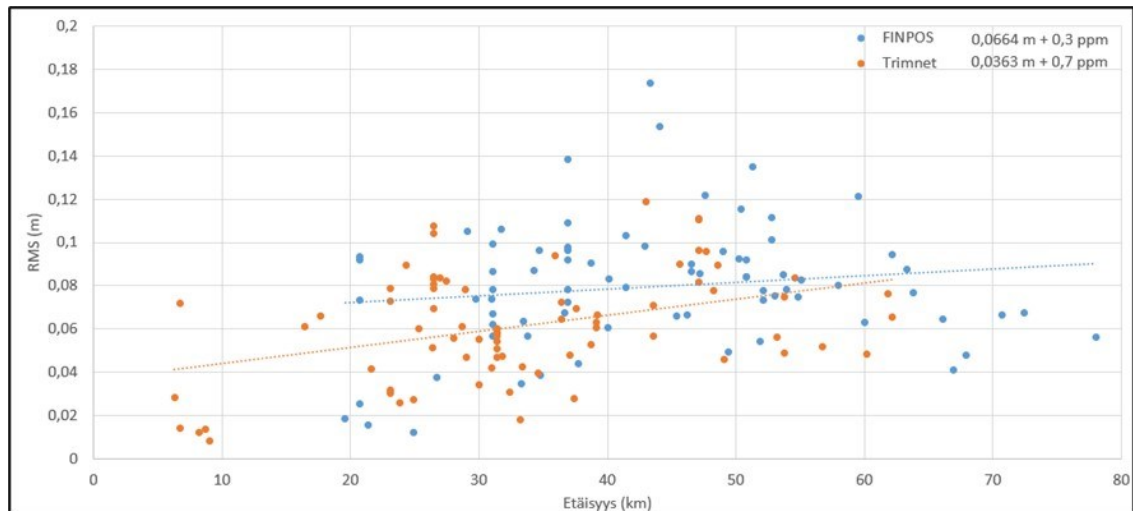


Kuva 15. FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden alustusajojen keskiarvot peitteisten testi-mittauskertojen osalta. Alustusajat on ilmoitettu sekunteina.

5.4 Tukiasemaetäisyyksien vaikutukset

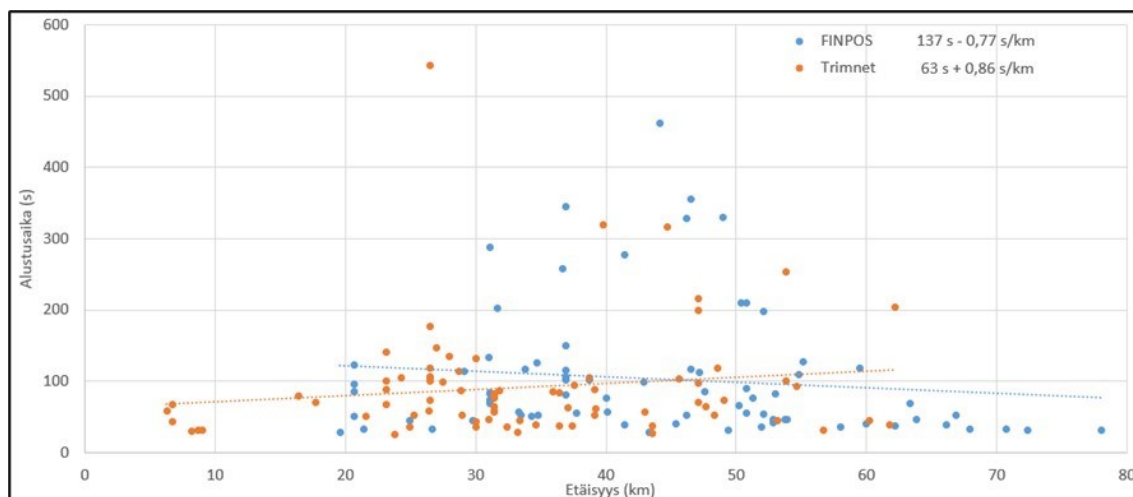
Kantavektorin (tukiaseman ja paikantavan vastaanottimen välinen etäisyys) pituuden vaikutus FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden alustusajoihin ja tasotarkkuuksiin tutkittiin peitteisten ja avoimien mittaushavaintojen osalta. Peitteisten mittauksien havaintojen tarkkuudet ovat sisäisiä tarkkuuksia ja avoimien mittausten havainnot ovat ulkoisia tarkkuuksia. Avoimien kiintopisteiden osalta tutkittiin ainoastaan tasotarkkuuksia suhteessa kantavektoriin. Verkon sisä- tai ulkopuolisia mittaushavaintoja ei jaoteltu erikseen, vain kaikki havainnot oli laitettu yhteen.

VRS-verkko-RTK-mittauksissa tulisi käytetty mittaustapa poistaa kaikki kantavektorin aiheuttamat virheet. Virhemallien ja interpoloinnin epätarkkuuksien takia, mittaustuloksiin jää kuitenkin pieni etäisyydestä johtuva virhe, jota kuvataan analyysissä trendiviivalla ja ppm-tunnusluvulla (parts per million). [7, s. 45.]



Kuva 16. Lähimmän tukiaseman etäisyyden vaikutus sisäisiin tasotarkkuuksiin (RMS) peitteisessä maastossa. Etäisyydet lähimpään tukiasemaan kilometreinä ja RMS metreinä. RMS-arvoille on muodostettu tarkkuuden trendiviiva.

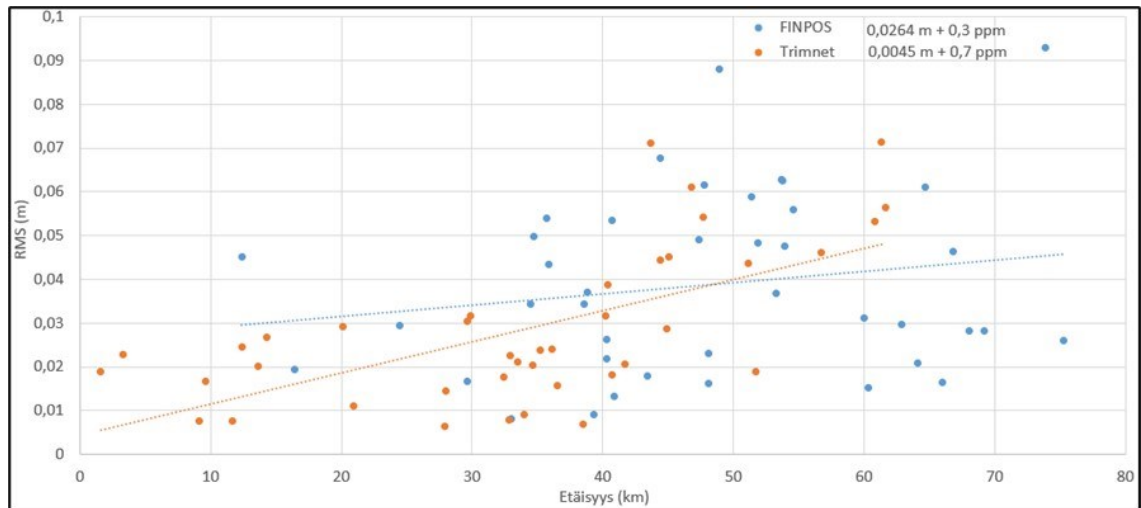
Kuvissa 16 ja 17 on esitetty paikannuspalveluittain tukiasemaetäisyyden vaikutus alustusaikoihin ja tasotarkkuuksiin (RMS) peitteisessä ympäristössä. FINPOS-palvelulla tukiasemaetäisyydet testimittauspaikoilla vaihteli 19–78 kilometrin välillä ja Trimnet-palvelulla tukiasemaetäisyys vaihteli 6–62 kilometrin välillä. Mittausalueilla keskimääräinen tukiasemaetäisyys oli 43 km FINPOS-palvelulla ja Trimnet-palvelulla 33 km. FINPOS-palvelulla tasotarkkuudelle saatiin arvoksi $0,0664 \text{ m} + 0,3 \text{ ppm}$, jossa ensimmäinen arvo kuvaa etäisyydestä riippumatonta vakiota ja toinen arvo kuvaa tasovirheen kasvua mm/kantavektorikilometri. Trimnet-palvelulla etäisyydestä riippuva tekijä on $0,0363 \text{ m} + 0,7 \text{ ppm}$.



Kuva 17. Lähimmän tukiaseman etäisyyden vaikutus alustusajoihin peitteisessä maastossa. Etäisyydet lähimpään tukiasemaan kilometreinä ja alustusajat sekunteina. Alustusajoille on muodostettu trendiviiva.

Kuvassa 17 alustusajojen trendiviivojen arvoiksi saatiin FINPOS-palvelulla $137 \text{ s} - 0,77 \text{ s/km}$ ja Trimnet-palvelulla $63 \text{ s} + 0,86 \text{ s/km}$. Erikoisena tuloksena on, että FINPOS-palvelulla alustusajat paranevat noin sekunnilla/kantavektorikilometri, tämä tulos luultavasti johtuu peitteisen maaston satunnaisuudesta. Kuvien 16 ja 17 kaavioista huomaa, että Trimnet-palvelu on vakiona tarkempi ja alustusajoiltaan nopeampi kuin FINPOS. Ero johtuu luultavasti Trimnet-palvelun suuremmasta tukiasemamäärästä ja lyhyemmästä kantavektorista. FINPOS-palvelun hyvänä puoleena nähdään, että paikannuspalvelun etäisyydestä riippuva tekijä on pienempi kuin Trimnet-paikannuspalveluilla.

Kuvassa 18 esitetään aukeissa maasto-olosuhteissa suorittujen testimittauksien tasotarkkuudet suhteessa kantavektoriin. Kaaviosta voidaan päätellä, että aukealla FINPOS-palvelun etäisyydestä riippumaton tarkkuusvakio laskee $0,0664$ metrissä $0,0264$ metriin. Trimnet-palvelulla vakion lasku on vielä radikaalimpi, noin 87 %. Paikannuspalveluiden tukiasemaetäisyyden kasvusta johtuva virhe ei muutu lainkaan.



Kuva 18. Lähimmän tukiaseman etäisyyden vaikutus ulkoisiin tasotarkkuuksiin (RMS) aukeassa maastossa. Etäisyydet lähimpään tukiasemaan kilometreinä ja RMS metreinä. RMS-arvoille on muodostettu tarkkuuden trendiviiva.

5.5 Tuloksista poistetut havainnot

Testimittaushavaintojen käsittelyssä huomattiin, että pienessä osassa havainnoista oli 0,5–2 m:n poikkeamia (karkea virhe) pohjois-, itä- ja korkeuskoordinaattien mediaanista tai referenssikoordinaateista. Havainnot olivat selvästi virheellisiä, mutta eivät osoittaneet selvää säännönmukaisuutta, joten ne jäivät mittausten aikana huomaamatta. Karkeat virheet mukaan laskien RMS olisi ollut jokaisella käytetyllä paikannuspalvelulla ja niiden eri menetelmillä noin 0,24 m. Karkean virheen suuruudeksi määritettiin insinööri­työssä yli 0,3 m:n poikkeamat pohjois- ja itäkoordinaateissa, ja korkeuskoordinaateissa yli 0,4 m:n poikkeamat. Kaikki havainnot, jotka ylittivät määritetyn virherajan, hylättiin analyysistä paitsi alustusajan määrittämisessä.

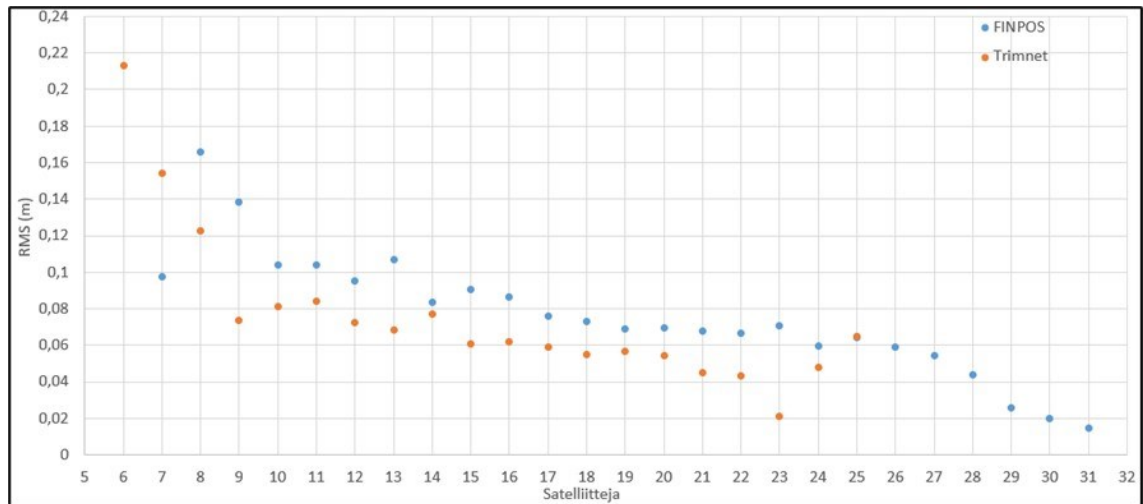
Taulukko 5. Mittauksissa ilmenneiden karkeiden virrehavaintojen määrä, mittaushavaintojen yhteismäärä ja virheprosentti.

Mittaustapa	Hylätyt mittaushavaintomäärät	Mittaushavaintoja yhteensä
FINPOS	218 kpl (3,16 %)	6 869 kpl
Trimnet	369 kpl (5,61 %)	6 575 kpl

Taulukossa 5 näkyvät FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluilla mitattujen havaintojen karkeiden virheiden määrät, virheprosentti ja mittaushavaintojen kokonaismäärät. Muita paikannuspalveluita ja toteutusmenetelmiä ei tarkemmin eroteltu. Koska kaikki analyysissä käytetyt havainnot mitattiin samoilla vastaanotinmalleilla, voidaan todeta, että karkeiden virheiden erot johtuvat käytetyistä paikannuspalveluista. Taulukosta nähdään, että FINPOS-palvelu tuottaa vähemmän karkeita virheitä verrattuna Trimnet-palveluun.

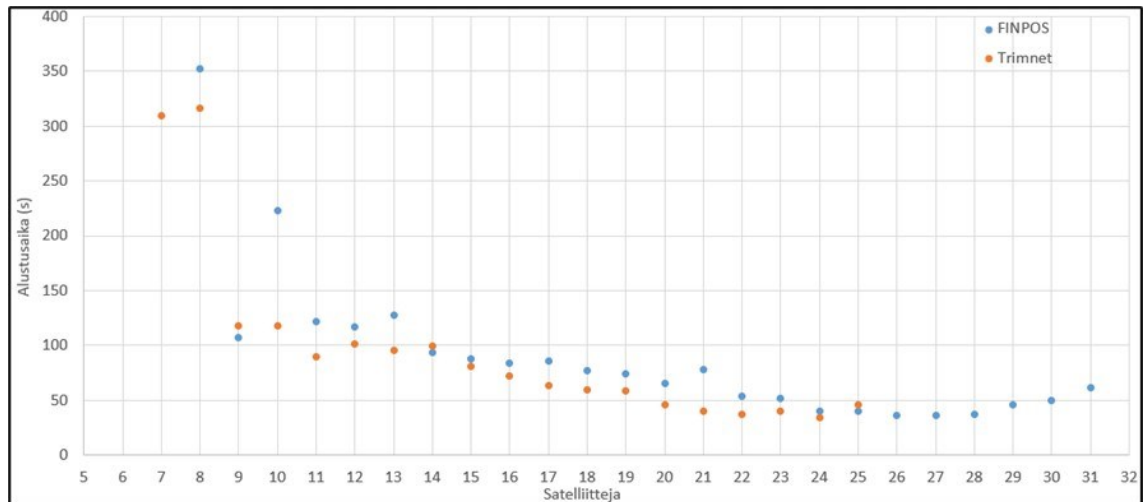
5.6 Satelliittien ja DOP-arvojen vaikutus

RTK-vastaanotin tarvitsee vähintään viisi yhteistä satelliittia tukiaseman kanssa, jotta FIX-ratkaisu onnistuu. Vastaanottimen saatuaan FIX-ratkaisun, mittaamiseen riittää neljä yhteistä satelliittia. [7, s. 47.] Testimittauksissa käytettiin neljää eri GNSS-järjestelmää, GPS, GLONASS, Galileo ja BeiDou. Muutamissa testimittauksissa Galileo- tai BeiDou-satelliitteja ei hyödynnetty.



Kuva 19. Satelliittien lukumäärän vaikutus peitteisten mittauskertojen tasotarkkuuteen (RMS) paikannuspalveluittain metreinä. Kuvan jokaiselle satelliittimäärälle on laskettu havainnoista RMS.

Kuvan 19 kaaviossa näkyy peitteisten mittaushavaintojen satelliittimäärien vaikutus tasotarkkuuteen. Kaaviossa näkyy myös mittaushavaintojen satelliittien minimi- ja maksimimäärät, jotka vaihtelivat 6 ja 31 välillä. FINPOS-palvelu on hyödyntänyt havainnoissaan yhteensä enemmän satelliitteja ja saanut täten kyseisistä havainnoista korkean tasotarkkuuden. FINPOS tarvitsee laskuissaan myös enemmän satelliitteja, jotta tarkkuus on hyväksyttävällä tasolla ($RMS \leq 0,1$ m). Kuva 20 esittää satelliittien määrän vaikutuksen peitteisten mittaushavaintojen alustusaikoihin. Molemmilla paikannuspalveluilla satelliittien lukumäärän kasvu vähentää alustusaikoja. Kuvasta näkyy myös selvästi, että paikannuspalveluiden alustusajat ovat hyvin lähekkäin toisiaan.



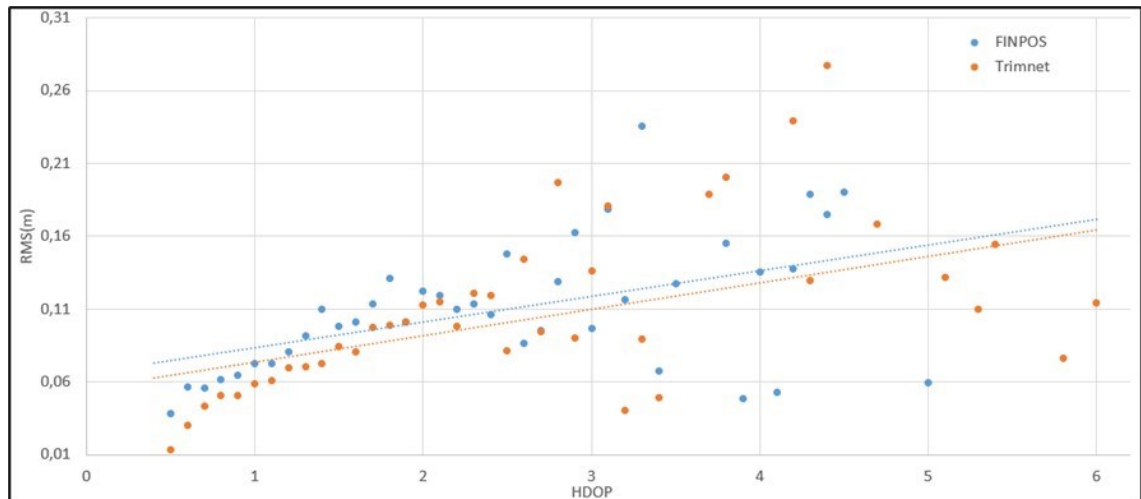
Kuva 20. Satelliittien lukumäärän vaikutus peitteisten mittauskertojen alustus aikoihin paikannuspalveluittain sekunteina. Kaaviosta on poistettu yksittäinen kuuden satelliitin mittaushavainto kaavion havainnollisuuden parantamiseksi. Jokaiselle satelliittimäärälle on laskettu keskimääräinen alustus aika.

Taulukossa 6 näkyy peitteisessä maastossa FINPOS- ja Trimnet-palveluilla mitattujen havaintojen keskimääräiset satelliittimäärät. Huomionarvoista taulukossa on, että FINPOS-palvelun havainnoissa on keskimääräisesti enemmän BeiDou-järjestelmän satelliitteja mukana. Tämä viittaa siihen, että FINPOS osaa laskennoissaan paremmin hyödyntää kyseisiä satelliitteja tai Trimnet on tietoisesti poistanut BeiDou-satelliitteja laskennoistaan. Muuten mittaushavainnoissa paikannuspalvelut hyödynsivät suunnilleen samoja määriä eri GNSS-järjestelmien satelliitteja.

Taulukko 6. Peitteisessä ympäristössä mitattujen havaintojen käyttämien satelliittimäärien keskiarvo.

Paikannus-palvelu	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	Satelliitteja yhteensä
FINPOS	6,7	4,4	3,9	4,1	18,4
Trimnet	6,2	4,5	3,7	1,7	15,5

Satelliittien lukumäärän lisäksi, satelliittigeometria vaikuttaa mittaustarkkuuteen. Satelliittigeometrian vaikutus tasotarkkuuteen kuvataan HDOP-luvulla. Mittausten aikana HDOP-luvut pysyvät matalana, lukuun ottamatta muutamia kymmeniä mittaushavainnoita, jossa HDOP-luvut olivat yli kolmen.



Kuva 21. HDOP-arvojen vaikutus peitteisessä ympäristössä mitaushavaintojen tasotarkkuuteen (RMS) metreinä. Kuvan jokaiselle HDOP-arvolle on laskettu havainnoista RMS.

Kuvan 21 kaaviossa kuvataan satelliittigeometrian vaikutus peitteisessä maastossa mitaushavaintojen tasotarkkuuteen. Kaaviosta nähdään, että molemmilla paikannuspalveluilla HDOP-arvojen pitää olla varsin matalia, jotta tasotarkkuus olisi peitteisessä maastossa hyväksyttävällä tasolla ($RMS \leq 0,1$ m). HDOP-arvojen kasvaessa yli 2,5:n tasotarkkuuden trendi häviää ja tulokset hajaantuvat.

6 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoitus oli analysoida testimittaustuloksia ja selvittää, onko FINPOS-paikannuspalvelu tarkkuudeltaan, luotettavuudeltaan ja tehokkuudeltaan valmis MML:n toimitustuotannon käyttöön. Tämä tehtiin vertaamalla paikannuspalvelulla tehtyjen testimittauksien tuloksia toimitusmittausten tarkkuuksien määräyksiin ($RMS \leq 0,1$ m). Testimittaustuloksia verrattiin myös käytössä olevaan Trimnet-paikannuspalveluun.

FINPOS- ja Trimnet-palveluilla tehtiin peitteisessä maastossa molemmilla yli 6 000 mittaushavaintoa. Mittaushavainnoista laskettuja tunnuslukuja (RMS, keskiarvot ja alustusajat) voidaan siis pitää tilastollisesti luotettavina. Aukean ympäristön mittaushavaintojen määrä rajoittui 267 havaintoon, joten esitetyt tulokset ovat enemmänkin suuntaan antavia. Kyseisten testimittauksen tarkoituksena oli enemmänkin vain varmistaa, että paikannuspalvelut ylipäättänsä toimisivat alueilla ja näiden hyödyntäminen mittauksissa onnistuisi.

FINPOS-paikannuspalvelulla tehtyjen testimittausten sisäisen tasotarkkuuden RMS:ksi saatiin peitteisessä ympäristössä 0,075 m. Aukeassa ympäristössä FINPOS-palvelun ulkoisen tasotarkkuuden RMS oli 0,043 m. Peitteisissä ja aukeissa maasto-olosuhteissa Trimnet-paikannuspalvelun RMS on noin 10 mm pienempi, mikä ei ole huomattava ero. Sisäisen tarkkuuden RMS ei ole suoraan verrannollinen annetun tasotarkkuuden ohjearvoon, mutta Trimnet-palveluun vertaamisen jälkeen voidaan todeta, että FINPOS- ja Trimnet-palveluiden sisäiset ja ulkoiset tarkkuudet ovat hyvin lähekkäin toisiaan. FINPOS-palvelu saavuttaa siis tarpeellisen tasotarkkuuden.

Paikannuspalveluiden tarkkuuseron syytä ei tässä työssä pystytty selvittämään. Analyysin tulokset viittaavat siihen, että ero johtuu FINPOS-palvelun pidemmästä kantavektorista, mutta tämä on vain valistunut arvaus. Syyn selvittämiseksi jatkotoimeenpiteinä voitaisiin suorittaa testimittauksia samoilla tukiasemaetäisyyksillä ja samalla alueella sijaitsevilla tukiasemilla. Näin saataisiin tukiasemien sijainnin ja etäisyyksien aiheuttamat virheet pois tarkkuuden arvosta.

Tehokkuuden selvittämisessä verrattiin FINPOS- ja Trimnet-palveluiden testimittausten alustusajkoja. Lisäksi tukiasemaetäisyyden vaikutus tasotarkkuuksiin ja alustusajoihin

kuului tehokkuuden arviointiin. Testimittauksien aikana tuli sellainen käsitys, että Trimnet-palvelu alustaa peitteisessä maastossa nopeammin. Testimittaushavaintojen analyysissä kuitenkin selvisi, että Trimnet-palvelua käytettäessä alustusajat olivat keskimäärin vain sekunnilla lyhyempiä. Voidaan siis todeta, että alustusnopeudeltaan FINPOS on suunnilleen Trimnetin veroinen. FINPOS-palvelulla tukiasemaetäisyydestä johtuva virhetekijä todettiin tasotarkkuuden ja alustusaikojen suhteen hyvin pieneksi. FINPOS-palvelun tukiasemaetäisyydestä johtuva virhe oli jopa Trimnet-palvelua pienempi. Vakiona Trimnet kuitenkin mittaa tarkemmin ja alustaa nopeammin, johtuen Trimnet-palvelun tiheämmästä tukiasemaverkosta tai palvelun käyttämästä laskentaohjelmasta.

Luotettavuuden arvioinnissa keskityttiin FINPOS- ja Trimnet-palveluiden karkeiden virheiden määrään (pohjois- ja itäkoordinaatit $> 0,3$ m ja korkeuskoordinaatit $> 0,4$ m). FINPOS-palvelussa mittaushavainnoissa oli karkeita virheitä noin 3 %, ja Trimnet-palvelussa noin 5 %. FINPOS-palvelun mittaushavaintojen oikeellisuus on näin Trimnet-palvelua hieman parempi. Luotettavuus käsittää myös mittaushavaintojen satelliittimäärien ja satelliittigeometrian vaikutuksen tasotarkkuuksiin ja alustusaikoihin. FINPOS-palvelu hyödyntää mittauksissaan paremmin BeiDou-satelliitteja, ja täten palvelun mittaushavaintojen satelliittimäärät ovat keskimääräisesti korkeampia kuin Trimnet-palvelun. Korkealla satelliittimäärällä FINPOS-palvelun mittaushavaintojen RMS on erittäin pieni. Samoilla satelliittimäärillä Trimnet-palvelun RMS kuitenkin pienempi ja näin tasotarkkuudeltaan tarkempi. Sama trendi näkyy alustusajoissa, mutta paikannuspalveluiden välinen ero laskee hyvin pieneksi.

Peitteisessä maastossa FINPOS- ja Trimnet-palveluilla mitattaessa satelliittigeometrian on oltava tarpeeksi hyvä (HDOP $< 2,5$) molemmilla palveluilla, jotta tasokoordinaattien RMS on hyväksyttävällä tasolla. Trimnet-palvelulla mitattaessa RMS-arvot ovat hiukan pienempiä samoilla HDOP-luvuilla kuin FINPOS. Virheellisen mittaushavaintojen eli karkeiden virheiden määrä taas oli FINPOS-palvelua käytettäessä pienempi. Voidaan todeta, että FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalvelut ovat suunnilleen yhtä luotettavia.

Yhteenvetona voidaan todeta, että FINPOS-paikannuspalvelu on riittävän tarkka MML:n tarpeisiin. Luotettavuuden ja tehokkuuden osalta FINPOS-palvelu on tällä hetkellä käytössä olevan Trimnet-palvelun veroinen, ja täten riittävän luotettava ja tehokas MML:n toimitustuotannon käyttöön.

Lähteet

- 1 Rikkinen, Topi. 2020. Järjestelmäasiantuntija, Maanmittauslaitos, FINPOS-paikannuspalveluryhmä. Keskustelu 25.10.2020.
- 2 Paikannuspalvelun periaate. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/paikannuspalvelu/paikannuspalvelun-periaate/>> Luettu 4.11.2020.
- 3 Avaruussään vaikutus satelliittipaikannukseen. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/satelliittipaikannus/>> Luettu 20.11.2020.
- 4 What is GNSS. Verkkoaineisto. Euroopan GNSS-virasto. <<https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/>> Luettu 3.11.2020.
- 5 Laurila, Pasi. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D nro 3.
- 6 Satelliittipaikannus. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietao/satelliittipaikannus/>> Luettu 3.11.2020
- 7 Häkil, Pasi & Koivula, Hannu. 2004. Virtuaali-RTK (VRS™) tutkimus. Geodeettinen laitos: tiedote 27.
- 8 The C/A Code. Verkkoaineisto. Pennsylvania State University. <<https://www.education.psu.edu/geog862/node/1742/>> Luettu 11.11.2020.
- 9 RINEX 3.04. 2018. Verkkoaineisto. International GNSS Service. <<http://acc.igs.org/misc/rinex304.pdf/>> Luettu 9.11.2020.
- 10 Sky Plot, GNSS Planning Online. Verkkoaineisto. Trimble Inc. <<https://www.gnssplanning.com/#!/skyplot/>> Luettu 9.11.2020.
- 11 FinnRef GNSS-asemat. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/tutkimustoiminta/muut-tutkimus-ja-mittausasemat/finn-ref-gnss-asemat/>> Luettu 21.11.2020.
- 12 Koivula, Hannu; Kuokkanen, Jaakko; Marila, Simo; Tenhunen, Tomi; Häkli, Pasi; Kallio, Ulla; Nyberg, Sonja & Poutanen, Markku. 2012. Finnish Permanent GNSS Network: From dual-frequency GPS to multi-satellite GNSS. Aalto University: Doctoral Dissertations 125/2019.

- 13 Station List: VAA200FIN. Verkkoaineisto. International Association of Geodesy, EUREF. <https://epncb.eu/_networkdata/siteinfo4onestation.php?station=VAA200FIN/> Luettu 20.11.2020.
- 14 Koivula, Hannu; Laaksonen, Antti; Lahtinen, Sonja; Koukkanen, Jaakko & Marila, Simo. 2017. Finnish Permanent GNSS Network, FinnRef. Verkkoaineisto. Paikkatietokeskus FGI. <https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2017/papers/ts07c/TS07C_koivula_laaksonen_et_al_8939.pdf/> Luettu 21.11.2020.
- 15 Yleistä paikannuspalveluista. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/paikannuspalvelu/>> Luettu 28.10.2020.
- 16 DGNSS-paikannuspalvelu. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/paikannuspalvelu/dgnss-palvelu/>> Luettu 21.11.2020.
- 17 RINEX-palvelu. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/paikannuspalvelu/rinex-palvelu/>> 21.11.2020.
- 18 Koivula, Hannu. 2014. Geodeettisen Laitoksen GNSS -palvelu. Verkkoaineisto. Geodesian teemapäivä. <<http://www.kolumbus.fi/eino.uikkanen/Geodesiapaiva/HannuKoivula-GeodeettisenLaitoksenGNSSpalvelu.pdf/>> Luettu 23.11.2020.
- 19 Landau, Herber; Vollath, Ulrich & Chen, Xiaming. 2002. Virtual Reference Station Systems. Journal of Global Positioning Systems (2002): Vol 1, No 2: 137-143.
- 20 TRU 2.9 Reference Manual. Verkkoaineisto. Topcon. <http://topconcare.com/files/2513/9574/5734/TRU_v29_Reference_Manual_EN_20140325.pdf>. Luettu 28.10.2020.
- 21 Määräys mittausten tarkkuudesta ja rajamerkeistä kiinteistötoimituksissa. 2011. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/old/Maarays_mittaus_rajamerkit_21_4_2011.pdf> Luettu 12.10.2020.
- 22 Cevat, Inal; Sercan, Bulbul & Burhaneddin, Bilgen. 2018. Statistical analysis of accuracy and precision of GNSS receivers used in network RTK. Arabian Journal of Geosciences (2018) 11: 227.
- 23 Root Mean Square RMS. 2019. Verkkoaineisto. Mathwords. <https://www.mathwords.com/r/root_mean_square.htm/> Luettu 2.10.2020

Liite 1. 2020 analyysissä käytetyt testimittaukset

Pilausnäyte	Pakkia	N	E	Testitulot pakkauidet tms.	Firmware	Huom. 1	Huom. 2
25.5.2020 Tavetti Puhallinmieli	6756229	55563	GNSMAART FibreNet FibreNet+HINPOS+Trim; Trimmet; GNSMAART FibreNet; GNSMAART FibreNet ei BIOS;	HR fw 5.2.2	Huom. 1		
26.5.2020 Vilma räjävytykky	6738776	563136	GNSMAART FibreNet+HINPOS+Trim; Trimmet; TopNet FibreNet+HINPOS+Trim	HR fw 5.2.2	luotettavuustestio high kaikissa	Huom. 2	
27.5.2020 Vilma räjävytykky	6738776	563136	GNSMAART FibreNet+HINPOS+Trim; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS+Trim	HR fw 5.2.4	luotettavuustestio high kaikissa		
28.5.2020 Tavetti Huopainen	6739947	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS+Trim; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS+Trim	HR fw 5.2.4			
15.6.2020 Tavetti Huopainen	6739947	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.4			
16.6.2020 Vilma räjävytykky	6738776	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.4			
17.6.2020 Tavetti Huopainen	6739947	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.4			
22.6.2020 Vilma räjävytykky	7082125	563136	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.2			
22.6.2020 Sorkkamo, Vainariella 1	7082125	563136	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.2			
25.6.2020 Sorkkamo, Vainariella 2	7113219	563136	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6			
25.6.2020 Sorkkamo, Vuodatti Uusalla	7113219	563136	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6			
25.6.2020 Sorkkamo, Vuodatti Uusalla	7113219	563136	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6			
7.7.2020 Vilma räjävytykky	6738776	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6; 6.1.2			
8.7.2020 Tavetti Huopainen	6739947	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6; 6.1.2			
9.7.2020 Vilma räjävytykky	6738776	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6; 6.1.2	VMS-FCP-KAAKKO mitannut ilman verkkokäyttöä käyttäen viid. dataa		
10.7.2020 Tavetti Huopainen	6739947	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6; 6.1.2			
22.7.2020 Vihti Geotrim	6695959	366794	GNSMAART FibreNet+HINPOS; GNSMAART FibreNet; Trimmet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6; 6.1.2			
28.7.2020 Tavetti Huopainen	6739947	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6; 6.1.2			
29.7.2020 Vilma räjävytykky	6738776	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6; 6.1.2			
30.7.2020 Tavetti Huopainen	6739947	528719	GNSMAART FibreNet+HINPOS; Trimmet; GNSMAART FibreNet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6; 6.1.2			
31.7.2020 Vihti Geotrim	6695959	366794	GNSMAART FibreNet+HINPOS; GNSMAART FibreNet; Trimmet; TopNet FibreNet+HINPOS	HR fw 5.2.6; 6.1.2	Käyttämättä erittäin huonosti		
10.8.2020 Sorkkamo	7082415	571580	GNSMAART FibreNet+HINPOS; GNSMAART FibreNet; Trimmet; TopNet FibreNet+HINPOS	HW fw 5.2.6; 6.1.2			
11.8.2020 Sorkkamo	7090807	562634	GNSMAART 2.5.0; HR beta fw; GNSMAART 2.4.0; GNSMAART 2.4.0; HR beta fw; TopNet; Trimmet	HW fw 5.2.6; yhäsiisä seuraava beta			
12.8.2020 Sorkkamo	7180053	591910	GNSMAART 2.5.0; HR beta fw; GNSMAART 2.4.0; GNSMAART 2.4.0; HR beta fw; TopNet; Trimmet	HW fw 5.2.6; yhäsiisä seuraava beta			
13.8.2020 Sorkkamo	7082415	571580	GNSMAART 2.5.0; HR beta fw; GNSMAART 2.4.0; GNSMAART 2.4.0; HR beta fw; TopNet; Trimmet	HW fw 5.2.6; yhäsiisä seuraava beta			
19.8.2020 Vihti Geotrim	6695959	366794	GNSMAART 2.5.0; HR beta fw; GNSMAART 2.5.0; HR vanha; TopNet HR vanha	HW fw 5.2.6; kahdessa seuraava beta			
20.8.2020 Vihti Geotrim	6695959	366794	GNSMAART 2.5.0; HR beta fw; GNSMAART 2.5.0; HR vanha; TopNet HR vanha	HW fw 5.2.6; kahdessa seuraava beta			
Pilausnäyte	Pakkia	N	E	Testitulot pakkauidet tms.	Huom. 1	Huom. 2	
21.9.2020 Uurikaupunki	6752629	200238	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
21.9.2020 Laitila 1	6752629	200238	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
21.9.2020 Laitila 2	6752629	200238	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
21.9.2020 Keski TL	6752629	200238	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
22.9.2020 Nyro	6752629	200238	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
22.9.2020 Ympä	6752629	200238	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
23.9.2020 Inoo	6693936	200238	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
23.9.2020 Keskiääli	6693936	200238	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
23.9.2020 Inoo	6693936	200238	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
24.9.2020 Hyytiälä	6732602	370363	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
24.9.2020 Salkkipelvi	6732602	370363	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
28.9.2020 Pello 1	7437318	374601	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
28.9.2020 Pello 2	7437318	374601	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
28.9.2020 Pello 3	7437318	374601	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			
28.9.2020 Pello 3	7437318	374601	Firmware	Testitulot pakkauidet tms.			

Kuva 1. Kesän ja syksyn peitteisen ympäristön testimittaukset.

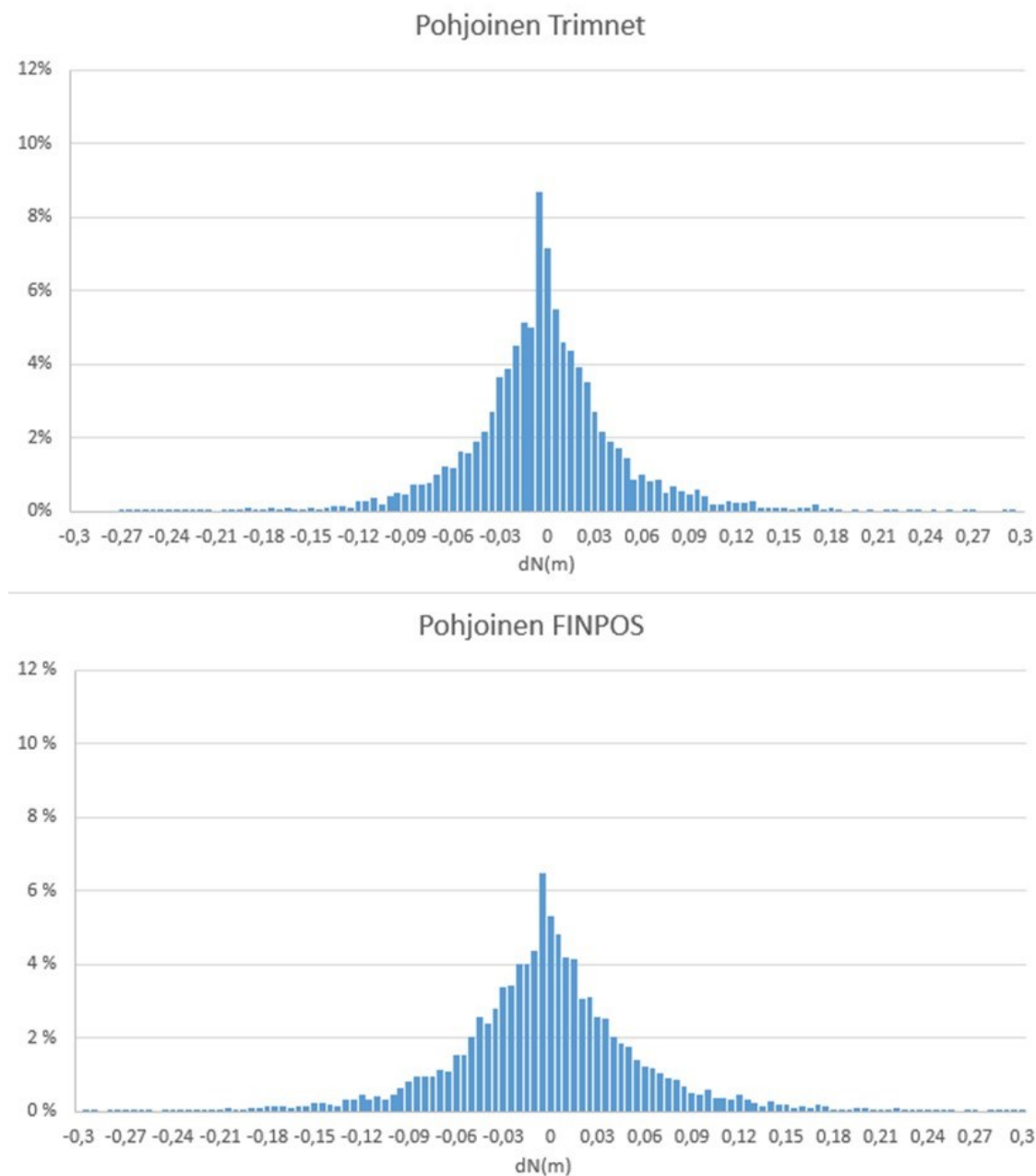
28.9.2020 Peltio 3	7408658	368898	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 4	7286644	393890	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 5	7286529	393891	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 6	7482217	364212	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 7	7482218	364213	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 8	7595420	364214	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 9	7546010	383890	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 10	7580952	383891	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 11	7448796	534379	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 12	7546071	501618	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 13	7586884	483886	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 14	7639245	271480	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 15	7642558	268278	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 16	7723102	568278	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 17	7679054	509065	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 18	7556231	441260	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 19	7559141	429617	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 20	7566451	449211	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 21	7596470	450448	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 22	7443723	372683	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 23	7441819	522921	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 24	7022313	424279	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 25	7022313	433893	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 26	7022313	353215	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 27	7022313	379279	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 28	7099271	383846	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 29	6810417	482622	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 30	6810417	482622	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 31	6879424	545957	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 32	6686351	416774	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 33	7276753	425186	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 34	7276753	425186	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 35	7304666	561254	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 36	6819919	630441	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 37	6829449	489727	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 38	7161553	478205	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 39	6945607	714461	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 40	6951933	706598	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 41	6951934	596370	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 42	7148668	647995	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet
28.9.2020 Peltio 43	7173229	647995	Trimmet HR 5.2.7; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2.7; FINPOS lehd GS-18	FINPOS GNSMAART 2.5.0; Trimmet

Kuva 2. Kesän ja syksyn peitteisen ympäristön testimittaukset.

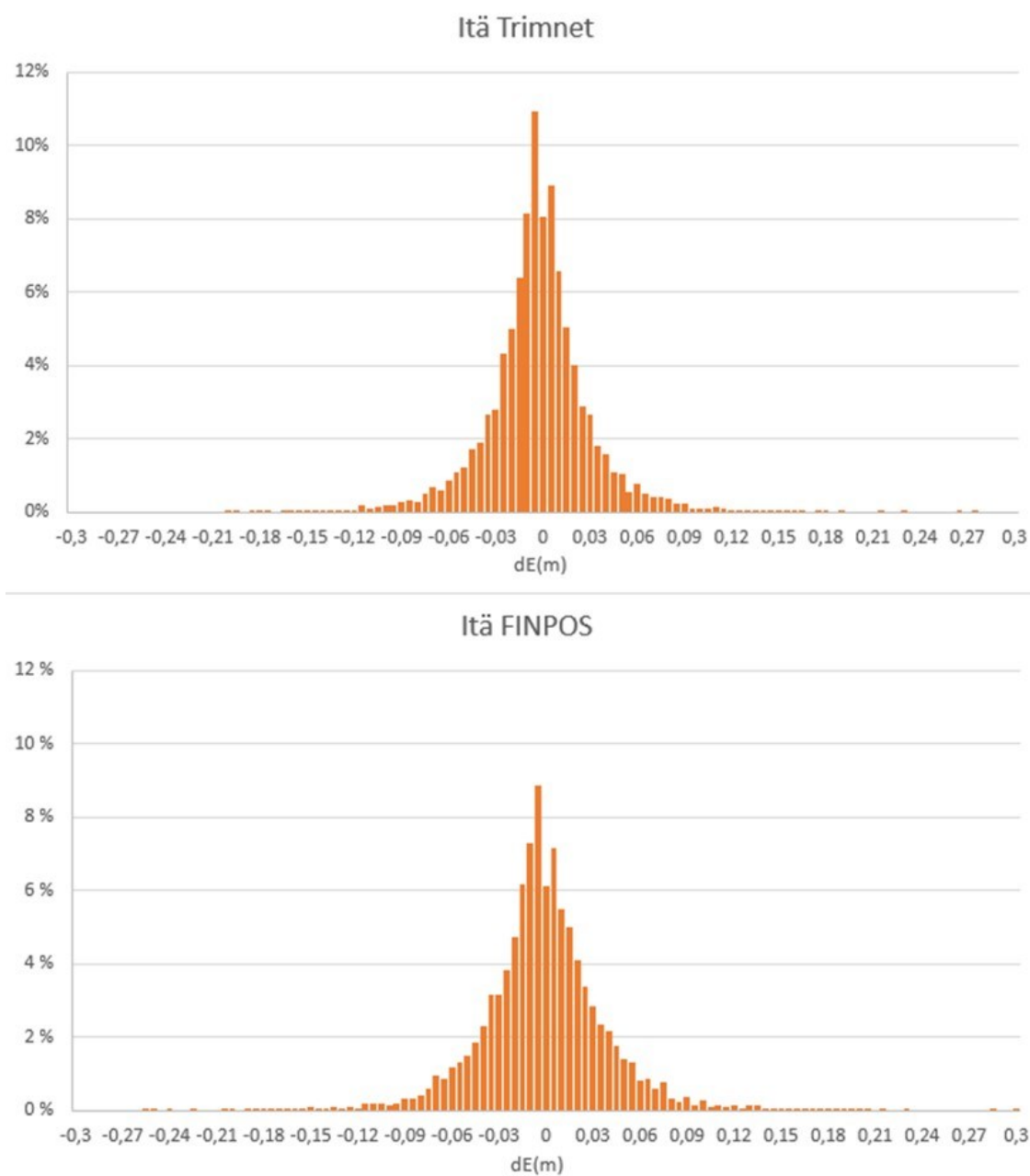
Päivämäärä	Puikku	N	E	Finnoare	Testitied. palvelut/oms.	Huom. 1	Huom. 2
21.9.2020	0509600		6753430	19952 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
22.9.2020	0509601		6736852	28425 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
22.9.2020	0306651		6736075	28819 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
23.9.2020	0506680		6692068	24379 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
24.9.2020	0505400		6621349	33362 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
24.9.2020	0505400		6720217	37384 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
26.9.2020	0305639		7407596	36594 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
26.9.2020	0505157		7265158	59121 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
29.9.2020	05069465		7504348	353819 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
29.9.2020	0302004L		7582898	349402 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
29.9.2020	00063383		7545978	499915 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
30.9.2020	05000811		7443971	522657 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
30.9.2020	03026245		7640912	271293 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
30.9.2020	03026292		7686516	541923 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
30.9.2020	03026297		7722318	572710 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
30.9.2020	03026297		7674481	508534 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
30.9.2020	05042509		7661977	516655 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
1.10.2020	05041316		7586988	461800 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
1.10.2020	00062038		7558153	443589 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
1.10.2020	05062283		7628107	448790 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
1.10.2020	01021155		7410060	533352 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
2.10.2020	02062208		7412029	518166 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
2.10.2020	01041445		7386075	506754 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
2.10.2020	01041452		7370353	515453 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
6.10.2020	000645290		7023775	424893 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
6.10.2020	05061341		7090319	344729 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
19.10.2020	05069078		6609765	382610 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
20.10.2020	0405103A_1		6671722	490675 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
20.10.2020	05063676		6667006	555545 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
20.10.2020	03026210		7273205	416863 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
20.10.2020	03026215		7306024	434898 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
21.10.2020	030808168		6621380	562375 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
21.10.2020	05063010A		6620816	632313 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
21.10.2020	10060501		7162481	479547 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
21.10.2020	04064108		6935397	701720 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
22.10.2020	020692000		7122084	646304 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
22.10.2020	03071330		7149185	595038 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
23.10.2020	03072509		7149185	551853 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
23.10.2020	01062846		7010306	537941 Trimmet HR 5.2; FINPOS VR 5.3.4; FINPOS HR 5.2; FINPOS Leida GS-18	FINPOS GNSMART 2.5.0; Trimmet		
23.10.2020	04069420E		7164656				

Kuva 3. Syksyn kiintopisteiden päällä suoritettut testimittaukset.

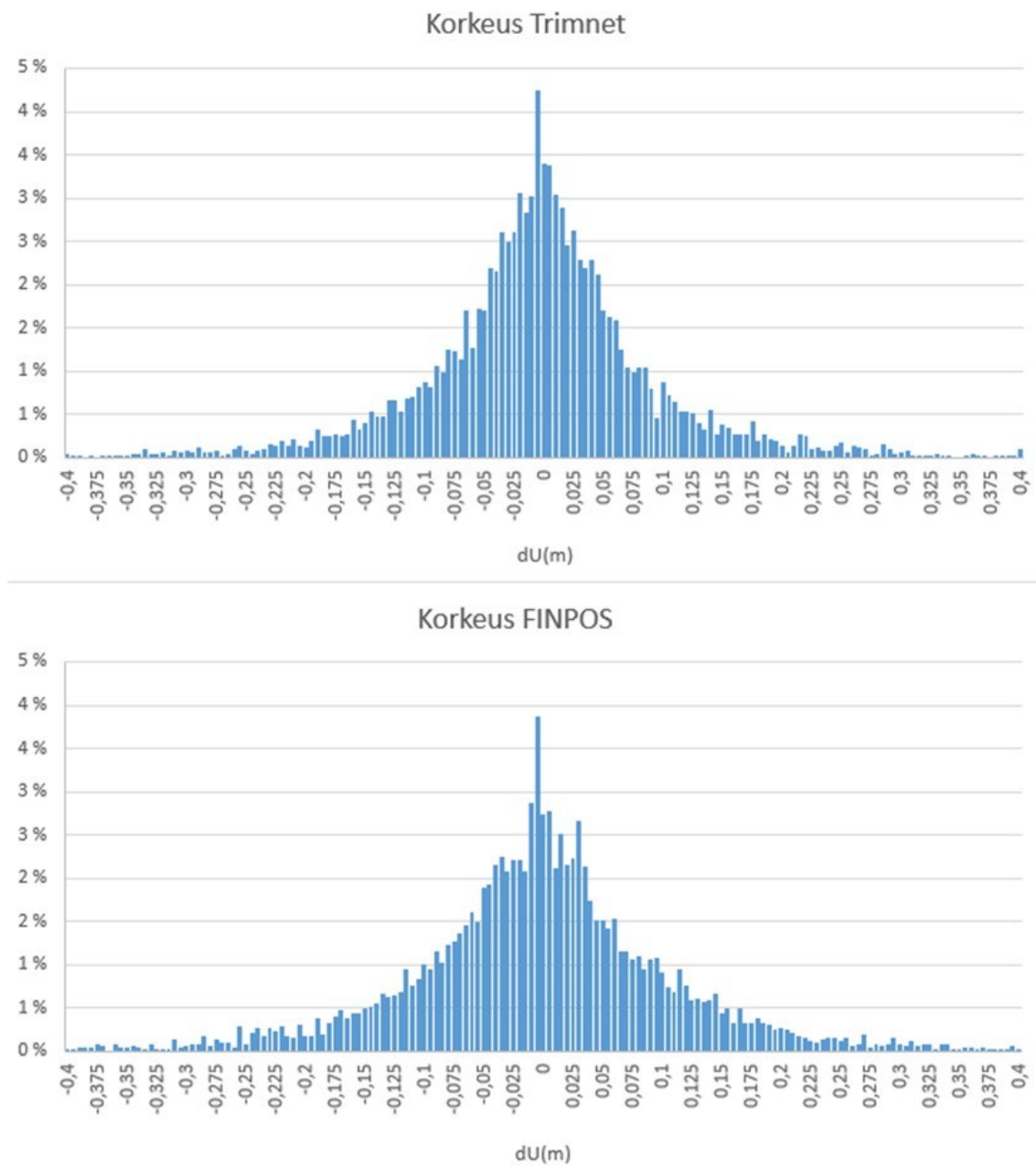
Liite 2. Poikkeamat pohjois- itä- ja korkeuskoordinaatissa



Kuva 1. FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden mittaushavaintojen pohjoiskoordinaattien poikkeamat havaintojen mediaanista. Poikkeamat (dN) esitetty metreinä.



Kuva 2. FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden mittaushavaintojen itäkoordinaattien poikkeamat havaintojen mediaanista. Poikkeamat (dE) esitetty metreinä.



Kuva 3. FINPOS- ja Trimnet-paikannuspalveluiden mittaushavaintojen korkeuskoordinaattien poikkeamat havaintojen mediaanista. Poikkeamat (dU) esitetty metreinä.