

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Metsätalouden koulutusohjelma

Niko Piironen

GNSS-LAITETESTI SUOMEN METSÄKESKUKSELLE

Opinnäytetyö
Marraskuu 2015



OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2015
Metsätalouden koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
013 260 600

Tekijä(t)

Niko Piironen

Nimeke

GNSS-laitetesti Suomen metsäkeskukselle

Toimeksiantaja

Suomen metsäkeskus

Tiivistelmä

Suomen metsäkeskus kerää ja ylläpitää metsävaratietoa Suomen metsistä. Suurin osa metsävaratiedosta kerätään kaukokartoitusmenetelmillä. Laserkeilauksella tuotetun datan tulkinta edellyttää puustotulkintaa tarkasti paikannettuilta referenssikoealoilta. Paikannamäärityksen puustotietojen keruussa tulisi olla vähintään metrin tarkkuudella todellisuudesta, jotta mitattuja arvoja voidaan verrata tarkasti laserkeilauksella saatuun dataan.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla GNSS-paikantimien horisontaalista tarkkuutta ja soveltuvuutta metsäisissä olosuhteissa laserkeilauksen referenssikoealojen puustotulkintaa varten. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin Metsäkeskuksen nykyisin käytössä olevat laitteet yltyvät vaadittuun tarkkuuteen ja onko tarvetta päivittää kalustoa tarkempiin laitteisiin. Lisäksi tarkoituksena oli tutkia antennikorkeuden vaikutusta tarkkuuteen, verrata eri jälkikorjausmenetelmiä ja arvioida laitteiden ergonomiaa, käytettävyyttä ja kestävyyttä todellisissa olosuhteissa. Laitevertailussa oli mukana kuusi Trimblen valmistamaa ja yksi Topconin valmistama laite.

Tulosten mukaan Metsäkeskuksen nykyiset laitteet olivat tarkkuudeltaan hyviä ja sen osalta tarvetta kaluston uusimiseen ei ole. Antennimallilla on kuitenkin merkittävä vaikutus tarkkuuteen, joten sitä tulisi tutkia vielä tarkemmin. Antennikorkeudella on selvä vaikutus tarkkuuteen. Tarkkojen paikannustulosten varmistamiseksi on suositeltavaa nostaa antenni ylös etenkin haasteellisissa kohteissa. Jälkikorjausmenetelmistä parhaaksi osoittautui virtuaaliseen tukiasemaan perustuva VRS-menetelmä.

Kieli
suomi

Sivuja 54

Liitteet 7

Asiasanat

GNSS, GPS, satelliittipaikannus, antennikorkeus, jälkikorjaus, Topcon, Trimble



THESIS
November 2015
Degree Programme in Forestry

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
FINLAND
013 260 600

Author(s)

Niko Piironen

Title

GNSS device test for Finnish Forest Centre

Commissioned by

The Finnish Forest Centre

Abstract

The Finnish Forest Centre collects and maintains information about Finnish forest resources. Most of the forest resources data is collected by laser scanning. Interpretation of data produced by airborne laser scanning requires forest measurement and interpretation from accurately located reference sample plots. Localisation has to be more accurate than one meter from reality for the laser scanning data and measured forest details to be comparable.

The aim of this thesis was to compare the accuracies and suitability of GNSS devices in forest conditions. The aim was to find out how well the current equipment at the Finnish Forest Centre reaches the required accuracy and to find out if there is a need to upgrade current equipment to more accurate devices. In addition, the aim was to investigate the impact of antenna height, compare different post-processing correction services and assess their ergonomics, usability and durability in forest conditions. The device test includes six devices manufactured by Trimble and one device by Topcon.

According to the results, current equipment of The Finnish Forest Centre had good accuracy level and there is no need for equipment upgrade. Antenna model has a significant impact on accuracy and it should be investigated more detail. The height of the antenna also has a significant impact on accuracy. To ensure accurate positioning it's recommended to raise the antenna up especially in challenging conditions. The best post-correcting correction method proved to be VRS-method based on virtual base station system.

Language

Finnish

Pages 54

Appendices 7

Keywords

GNSS, GPS, satellite navigation, height of the antenna, correction service, Topcon, Trimble

Sisältö

Lyhenteet.....	6
1 Johdanto.....	7
2 Satelliittipaikannus	8
2.1 GPS.....	10
2.1.1 GPS-signaali.....	11
2.1.2 GPS nyt ja tulevaisuudessa.....	12
2.2 GLONASS.....	13
2.3 Galileo	14
2.4 BeiDou.....	15
2.5 Virhelähteet satelliittipaikannuksessa	16
2.6 Perusmittaustavat.....	17
2.6.1 Absoluuttinen paikannus	18
2.6.2 Differentiaalinen paikannus.....	18
2.6.3 Suhteellinen paikannus	19
2.7 Jälkikorjaus.....	21
3 Tutkimuksen tausta ja tarkoitus.....	22
3.1 Metsävaratiedon keruu	23
3.2 Tutkimusongelmat.....	24
4 Tutkimuksen toteutus	25
4.1 Laitteet.....	26
4.2 Testikenttien rakentaminen	28
4.3 Laitevertailun toteutus	29
4.4 Jälkikorjausmenetelmien vertailun toteutus	30
4.5 Analyysien toteutus	31
5 Tulokset.....	32
5.1 Laitteiden tarkkuus	32
5.2 Antennikorkeuden vaikutus.....	36
5.3 Jälkikorjausmenetelmien vertailu.....	38
5.3.1 Korjausohjelmiston asetukset.....	39
5.3.2 Yksittäisen tukiaseman etäisyyden vaikutus.....	40
5.4 Laitteiden ergonomia ja käytettävyys.....	42
5.5 Tarkkuuksien luotettavuuden arvioiminen paikannusdatasta.....	44
6 Pohdinta.....	45
6.1 Tulosten tarkastelu	45
6.1.1 Laitteiden tarkkuus	46

6.1.2	Antennikorkeuden vaikutus	47
6.1.3	Jälkikorjausmenetelmien vertailu	49
6.1.4	Tarkkuuksien luotettavuuden arvioiminen paikannusdatasta	50
6.2	Tutkimuksen luotettavuus	51
6.3	Jatkotutkimus- ja kehittämisideat	52
Lähteet.....		54

Liitteet

Liite 1	Testikoealojen sijainnit
Liite 2	Testikoealojen puustotiedot ja kuvaukset
Liite 3	Referenssipisteiden koordinaatit
Liite 4	Laitteiden tarkkuus
Liite 5	Tasopoikkeamien virhekuvat
Liite 6	Tarkkuusestimaattien tarkkuus eri luottamusväleillä
Liite 7	Keskihajonnan vertailu todelliseen poikkeamaan

Lyhenteet

DGNSS	Differential GNSS, tukiasemakorjaukseen perustuva differentiaalinen paikannus.
DOP	Dilution of Precision, satelliittigeometriasta johtuva paikannustarkkuuden heikentyminen.
ESA	The European Space Agency, Euroopan avaruusjärjestö.
EUREF-FIN	European Reference Frame-Finland, ETRS89-koordinaattijärjestelmän kansallinen realisaatio.
GLONASS	Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema, Venäjän kehittämä maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
GNSS	Global Navigation Satellite System, eri valtioiden tai tahojen ylläpitämien satelliittipaikannusjärjestelmien maailmanlaajuinen kokonaisuus.
GPS	Global Positioning System, Yhdysvaltojen kehittämä maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
RTK	Real-Time Kinematic, vertailuvastaanottimeen ja satelliitin kantoaallon vaiheeseen perustuva reaaliaikainen kinemaattinen mittaus
VRS	Virtual Reference Station, virtuaalinen tukiasema.

1 Johdanto

Nykyinen yhteiskunta on monella tapaa riippuvainen GPS-järjestelmästä (Global Positioning System) eli maailmanlaajuisesta paikallistamisjärjestelmästä. Nykyään voidaan tosin puhua mieluummin termistä GNSS (Global Navigation Satellite System), joka on yleiskäsite kaikkien valtioiden ja tahojen ylläpitämistä satelliittipaikannusjärjestelmistä, kun GPS taas on Yhdysvaltojen oma järjestelmä. On jopa sanottu, että se on paras keksintö sitten kartan ja kompassin, vaikka se ei niitä saa täysin syrjäyttääkään. GNSS kertoo sijainnin yleensä 5–10 metrin tarkkuudella eli hyvin tarkoissa paikannuksissa ei niihinkään voi luottaa sokeasti. GNSS-paikantimia on monenlaisia, toisilla pääsee tarkempiin tuloksiin kuin toisilla.

Tämän järjestelmän avulla käyttäjä voi paikantaa sijaintinsa ja mitata nopeutensa missä ja milloin vain sääolosuhteista riippumatta. Täytyy kuitenkin muistaa, että tämä perustuu tekniikkaan ja on sanonta, että tekniikka pettää juuri silloin kun sitä eniten tarvitsisi. GNSS-vastaanotin vaatii sähköä toimiakseen. Kuitenkin GNSS on suuri apu luonnossa liikkujille: retkeilijöille, marjastajille ja myös metsästäjille, jotka voivat GNSS-tekniikan avulla nähdä, missä muu seurue ja koirat liikkuvat, mikä helpottaa ajojahtia. Monilla on autoissa tai vähintäänkin kännykässä navigaattori, joka myös hyödyntää tätä samaa teknologiaa. Maanmittauslaitos on myös yksi merkittävä GNSS-teknologian käyttäjä. Ilman satelliittipaikannusta maanmittaaminen olisi huomattavasti hankalampaa.

Suomen metsäkeskus on osa välillistä valtionhallintoa ja sen tehtävä on edistää yhteiskunnan ja kansalaisten hyvinvointia vahvistamalla metsäalan kilpailuetua ja kestävyyttä. Yksi Metsäkeskuksen tehtävistä on metsävaratiedon ylläpito ja keruu, joka nykyään toteutetaan laserkeilauksella ja maastomittauksin. Luonnonvaratiedon kerääminen kaukokartoitusmenetelmillä vaatii myös GNSS-tekniikkaa. Nykyään laserkeilaus on metsien inventoinnissa valtamenetelmä. Laserkeilain toimii lentokoneesta tai helikopterista käsin ja tuottaa metsästä pistepilven, jonka jokaisen pisteen koordinaatit mitataan satelliittipaikannuksella. Näin saadaan metsästä 3D-malli ja pystytään näin inventoimaan metsävaroja. Laserkeilausdatan tulkinta metsävaratiedoksi vaatii kohdennettua puustotulkintaa maastossa, ja jotta voidaan verrata referenssikoealoilta puustotulkintatietoja

laserkeilausdataan, täytyy paikannustarkkuuden tällöin olla hyvä. Juuri tätä tarkoitusta varten tässä opinnäytetyössä tehtävät paikannuslaitteiden tarkkuusmittaukset tehdään.

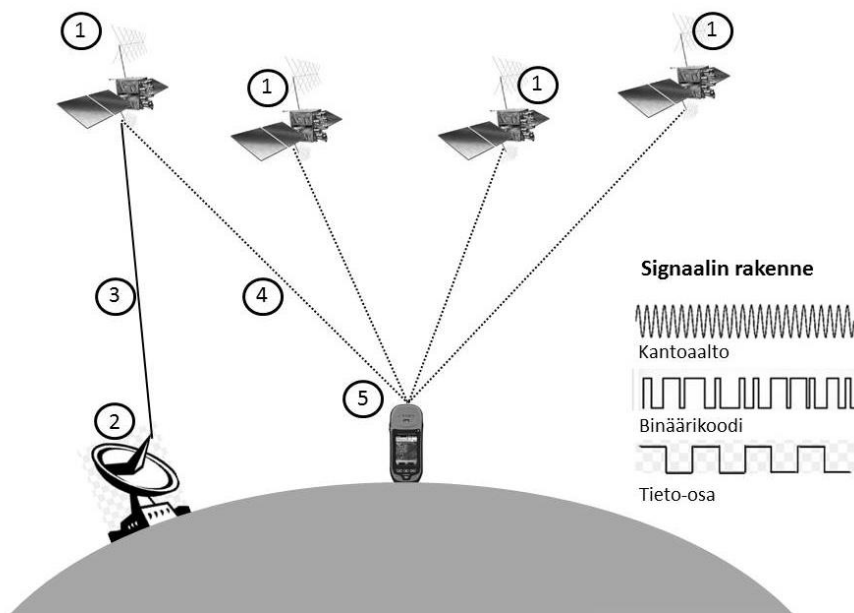
Tavoitteena on tutkia metsäkeskuksen nykyisten käytössä olevien paikannuslaitteiden tarkkuutta metsäisissä olosuhteissa referenssikoealojen puustotulkintaa varten. Tarkoitus on selvittää, onko tarvetta päivittää kalusto tarkempiin mutta kalliimpiin laitteisiin. Lisäksi tarkoituksena on testata antennin korkeuden vaikutusta tarkkuuteen, vertailla eri paikannuksen korjauspalveluita sekä analysoida laitteiden ergonomiaa, käytettävyyttä ja kestävyyttä.

2 Satelliittipaikannus

Satelliittipaikannuksella tarkoitetaan sijainnin ja nopeuden määrittämistä satelliitteihin perustuvan paikannusjärjestelmän avulla. Paikannus on mahdollista missä ja milloin vain, sääolosuhteista riippumatta. GNSS (Global Navigation Satellite System) on eri valtioiden tai tahojen ylläpitämien satelliittipaikannusjärjestelmien maailmanlaajuinen kokonaisuus. Voidaan puhua myös paikannuksen infrastruktuurista. (Laurila 2012, 289–290.)

Yleisesti satelliittipaikannuksesta käytetään lyhennettä GPS (Global Positioning System), joka viralliselta nimeltään on NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Time And Ranging Global Positioning System). GPS on Yhdysvaltojen kehittämä satelliitteihin perustuva paikannusjärjestelmä, joka näistä järjestelmistä on kehittynein. Nykyään satelliittipaikannus ei ole vain Yhdysvaltojen varassa, sillä myös Venäjällä on oma vastaava järjestelmä GLONASS (Global Navigation Satellite System), joka on nyt päässyt riittävään laajuuteen. Myös Eurooppa on kehittelemässä omaa Galileo-nimeä kantavaa satelliittipaikannusjärjestelmää, jonka ensimmäinen testisatelliitti ammuttiin avaruuteen 2005. Lisäksi myös Japani, Kiina ja Intia ovat kehittelemässä omia järjestelmiään. GNSS:n tavoitteena on toimiva kokonaisuus, jossa eri paikannusjärjestelmät täydentävät toisiaan ja niiden yhteiskäyttö paikantamisessa on mahdollista. GPS:n ja GLONASS-järjestelmän osalta tämä jo toimii. (Laurila 2012, 281–282.)

Yksinkertaistettuna satelliittipaikannus toimii, kun vastaanotin eli GNSS-paikannuslaite mittaa aikaa kuinka pitkään signaaleilta kuluu niiden siirtyessä satelliiteilta vastaanottimelle (kuva 1). Satelliittien sijainnit sekä rata- ja kellotiedot ovat tiedossa, joten näin on mahdollista määrittää sijainti kolmiomittauksen eli trilateraation avulla. Mitä useammasta satelliitista saadaan tietää signaalin aikaero, sitä tarkempi paikannus teoriassa on. Kuitenkin tarvitaan yhteys vähintään neljään satelliittiin, jotta voidaan saada kolmiulotteinen paikannus (Poutanen 1999, 11).



Kuva 1. Satelliittipaikannuksen toimintaperiaate (Kuva: Niko Piironen).

1. Paikannussatelliitti – sijainninmäärittäminen kolmiomittauksen avulla vaatii yhteyden vähintään kolmeen satelliittiin. Käytännössä tarvitaan vähintään neljä satelliittiä, jotta vastaanottimen kellovirhe saadaan eliminoitua.
2. Valvonta-asema – valvoo satelliittien toimintaa ja määrittää satelliittien ratatiedot ja kellovirheet. Näin käyttäjät saavat oikeaa informaatiota paikannukseen.
3. Data siirtyy valvonta-asemalta satelliittiin ja satelliitista valvonta-asemalle.
4. Paikannussignaali – kulkee valonnopeudella satelliitista vastaanottimelle. Signaaliin sisältyy kantaalto, binäärikoodi ja tieto-osa.
5. Vastaanotin – mittaa signaalin kulkuajan ja laskee pseudoetäisyyden havaintopaikasta satelliittiin.

Satelliittipaikannuksen tekniikan peruseriaatteet ovat samat kaikilla paikannusjärjestelmillä. Erottavia tekijöitä eri paikannusjärjestelmien välillä ovat mm. satelliittien lu-

kumäärä ja -korkeus, kiertoaika maan ympäri, ratatasojen inkliinaatiokulmat päiväntasaajan nähden sekä kantoaaltojen taajuudet ja binäärikoodit.

2.1 GPS

Kuten monet keksinnöt, niin myös tämäkin, on kehitetty alun perin ensisijaisesti sotilaskäyttöä varten, mutta siviilikäytön tarpeet huomioon ottaen. GPS:n juuret alkavat 1960-luvulta, jolloin Yhdysvaltojen laivasto ja ilmavoimat aloittivat projektit kehittääkseen satelliitteihin perustuvan navigointijärjestelmän. Ensimmäinen satelliitti *Navstar 1* laukaistiin 1978 ja vuotta myöhemmin tulivat ensimmäiset siirrettävät vastaanottimet (Poutanen 1999, 19). Riittävään laajuuteen yllettiin kuitenkin vasta 1994, kun järjestyksessään 24. satelliitti laukaistiin kiertoradalle. Tämän jälkeen on ollut aina vähintään 24 paikannussatelliittia.

Vuoteen 2000 asti Yhdysvallat käyttivät sotilaallista häirintää satelliittien siviilikäyttäjiin, ja tällöin päästiin ilman korjausta parhaimmillaankin vain 30–50 metrin tarkkuuteen ja pahimmillaan virhettä saattoi olla jopa 500 metriä (Miettinen 2006, 49). Häirinnan poiston jälkeen tarkkuus parani huomattavasti, mikä edesauttoi järjestelmän läpilyöntiä. Koska GPS on Yhdysvaltojen hallinnoima ja josta muut valtiot ovat riippuvaisia, ovat muut valtiot kehittäneet omia satelliittipaikannusjärjestelmiä.

GPS:n rakenne koostuu kolmesta eri osasta: avaruus-, valvonta- ja käyttäjälohkosta. **Avaruuslohkon** muodostavat satelliitit, jotka kiertävät maata noin 20 200 kilometrin korkeudessa merenpinnasta ja niiden kiertoaika maan ympäri on noin 11h 58min eli kaksi kertaa tähtivuorokaudessa (Laurila 2012, 282–285). Satelliittien inkliinaatiokulma päiväntasaajaan nähden on 55°. **Valvontalohkon** muodostavat päävalvonta-asema, joka sijaitsee USA:n Coloradossa, ja useat antenni- ja seuranta-asemat. Valvonta-asemien tehtävänä on määrittää satelliittien radat, kellovirheet ja yleinen toiminnallinen valvominen. **Käyttäjälohkon** taas muodostavat GPS-vastaanottimien käyttäjät, jotka määrittävät sijaintia, nopeutta tai kellonaikaa. (Laurila 2012, 282–285.)

2.1.1 GPS-signaali

GPS-satelliitit lähettävät kantoaaltoja L1 (1 575,42 MHz) ja L2 (1 227,60 MHz) sekä uusimpiin satelliitteihin on lisätty L5 (1 176,45 MHz). Nämä taajuudet lähettävät mukanaan binäärikoodeja ja tieto-osan, jotka antavat paikanmäärittämiseen välttämättömät tiedot. Siviilikäyttöön on julkinen C/A -koodi ja sotilaskäyttöön tarkoitettu tarkempaan paikannustarkkuuteen mahdollistava salattu P-koodi (uusimpien sukupolvien satelliiteissa myös M-koodi), jota siviililaitteet eivät pysty purkamaan ja jonka häiritseminen on vaikeampaa. (Poutanen 1999, 19–21.) Julkinen C/A-koodi on moduloitu L1-kantaallolle ja uusimpien satelliittien kohdalla myös L2-kantaallolle. Tämä taas lisää siviilivastaanottimen paikannushavaintoja ja siten parantaa paikannustarkkuutta. Jokaisella satelliitilla on oma yksilöity koodinsa, josta selviää kyseisen ja muiden satelliittien ratatiedot sekä kellotiedot. (Laurila 2012, 292.)

Sijainnin määrittäminen tehdään joko koodihavaintojen tai vaihehavaintojen perusteella. Koodihavainnoissa havaintosuurena ovat binäärikoodit eli C/A tai P-koodi. Etäisyys satelliittiin mitataan siis koodien perusteella. Tämä on yksinkertaisempi ja yleisimmin käytetty menetelmä. Vaihehavainnot perustuvat etäisyyden mittaukseen kantoaaltojen perusteella, joka on monimutkaisempi, mutta tarkempi menetelmä. Tarkkuus perustuu koodijakson tai kantaallon pituuteen. Paikantaminen on mahdollista mitata tarkemmin kuin 1 % tarkkuudella koodijakson pituudesta eli mitä pidempi koodijakso tai kantaalto on, sitä epätarkempi tulos on. (Laurila 2012, 292.)

Havaintosuureiden pituudet:

- P-koodijakso 29,3 m
- C/A-koodijakso 293 m
- L1-kantaalto 0,19 m
- L2-kantaalto 0,24 m

C/A-koodi sisältää 1 023 bittiä ja toistuu millisekunnin välein, ja kun paikannussignaali etenee valon nopeudella (299 792 458 m/s), on koodin pituus lähes 300 metriä (Laurila 2012, 296–297). Paikantaminen tapahtuu laskemalla signaalin kulkuajasta pseudoetäisyys eli ns. vale-etäisyys. Satelliitti ja vastaanotin tuottavat saman koodin oman kellon-

sa perusteella samaan aikaan. Pseudoetäisyys saadaan laskettua vertaamalla koodien vaihe-eroa, josta selviää signaalin kulku aika satelliitista vastaanottimeen, ja kertomalla tämä valon nopeudella. Satelliitit käyttävät erittäin tarkkoja atomikelloja, mutta vastaanottimissa on tavallisen rannekellon tasoinen ajan mittari. Todellinen etäisyys saadaan laskettua neljän yhtälön ryhmällä, jossa kellovirhe on tuntematon, ja havainnot saadaan vähintään neljästä satelliitista. (Poutanen 1999, 118–123.)

2.1.2 GPS nyt ja tulevaisuudessa

Satelliittikonstellaatio sisältää 24 satelliittia ja ylimääräiset satelliitit ovat varalla varmistamassa toimivuutta, mutta voivat myös lisätä suorituskykyä. Nykyään toiminnassa on jo 31 satelliittia. Kaikkiaan GPS-satelliitteja on laukaistu 69 toukokuuhun 2015 mennessä, joista kahden laukaisu on epäonnistunut. GPS-satelliittien toimintaiät vanhimmilla toiminnassa olevilla Block IIA:n satelliiteilla on 7,5 vuotta, uusimmilla toiminnassa olevilla Block IIF:n satelliiteilla 12 vuotta ja vielä tuotannossa olevien GPS III -satelliittien toimintaiäksi lupailaan 15 vuotta. Nykyinen satelliittikonstellaatio koostuu useasta eri satelliittisukupolvesta, joista alla olevassa taulukossa on esiteltyä niiden keskeiset ominaisuudet. (GPS 2015a.)

Taulukko 1. Nykyinen GPS-satelliittikonstellaatio ja satelliittisukupolvien ominaisuudet (GPS 2015a).

VANHA SUKUPOLVI		UUSI SUKUPOLVI		
Block IIA	Block IIR	Block IIR(M)	Block IIF	GPS III
3 toiminnassa laukaistu 1990 – 1997 toimintaikä 7,5	12 toiminnassa laukaistu 1997 – 2004 toimintaikä 7,5	7 toiminnassa laukaistu 2005 – 2009 toimintaikä 7,5	9 toiminnassa laukaistaan 2010 – toimintaikä 12	tuotannossa laukaistaan 2016 – toimintaikä 15
Taajuudet ja koodit				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ L1 – C/A, P ▪ L2 – P 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ IIA:n signaalit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ IIR:n signaalit ▪ sotilaskäyttöön uusi M-koodi ▪ uusi siviili-signaali L2C 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ IIR(M):n signaalit ▪ uusi siviili-signaali L5 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ IIF:n signaalit ▪ uusi siviili-signaali L1C

GPS:n tarkkuutta parannetaan ottamalla käyttöön uusia taajuuksia myös siviilikäyttöön. Toinen siviilisignaali L2C yhdistettynä C/A-moduloituun L1-signaaliin tarjoaa parempaa tarkkuutta ja luotettavuutta puiden latvuserroksen alla tai jopa sisätiloissa. Kolmas siviilisignaali L5 antaa entisestään tehoa ja luotettavuutta paikannuksen tarkkuuteen. Seuraavan satelliittisukupolven satelliitit tarjoavat neljännen signaalin siviilikäyttöön L1C. Taajuus on sama kuin tavallinen L1, eikä tätä pidä sekoittaa C/A-moduloituun L1-taajuuteen. Yhdysvallat on kehittänyt tätä yhdessä Euroopan Galileon kanssa ja myös muut satelliittipaikannusjärjestelmien tarjoajat ovat omaksumassa tätä tulevaisuuden standardiksi varmistamassa järjestelmien yhteensopivuutta. (GPS 2015b.)

2.2 GLONASS

GLONASS on Neuvostoliiton (nyk. Venäjä) kehittämä satelliittipaikannusjärjestelmä, joka tarjoaa maailmanlaajuisesti käyttäjilleen julkisen satelliittipohjaisen navigointijärjestelmän. Ensimmäinen satelliitti Kosmos-1413 laukaistiin kiertoradalleen vuonna 1982. Kuitenkin vasta vuonna 1993 järjestelmä otettiin operatiiviseen testiin ja vuonna 1995 satelliittikonstellaatio saavutti suunnitellun laajuutensa, kun 24. satelliitti lähetettiin kiertoradalleen. (Information-analytical centre 2015.) GLONASS-satelliitit ovat olleet huomattavasti lyhytikäisempi kuin GPS-satelliitit. Alkuaikoina toiminta-aika saattoi olla vain vuosi ja nykyäänkin puhutaan vain viidestä vuodesta. Kaikkiaan GLONASS-satelliitteja on laukaistu tai yritetty laukaista yhteensä 132 joulukuuhun 2014 mennessä.

Toimintaperiaatteeltaan GLONASS on GPS:n kaltainen satelliittipaikannusjärjestelmä. Nämä kaksi järjestelmää täydentävät toisiaan ja toimivat hyvin yhteen. Satelliitit sijaitsevat kolmessa ratatasossa noin 19 100 km korkeudella ja niiden kiertoaika maan ympäri on 11h 15 min. Inklinaatiokulma päiväntasaajan nähden on $64,8^\circ$, mikä tarkoittaa edullisempaa satelliittigeometriaa napa-alueille. GPS-satelliitit ovat joka vuorokausi saman paikan yläpuolella, kun taas GLONASS-satelliitti kulkee saman paikan yli 17 kierroksen välein. Siinä missä edellinen satelliitti on nyt, on seuraava satelliitti siinä vuorokauden päästä. GPS:llä ei ole samanlaista vaihtuvuutta, mikä tekee siitä haavoittuvaisemman häiriölle. (Poutanen 1999, 25.)

GLONASS-satelliitit lähettävät signaaleja L1 ja L2. Lisäksi jokainen satelliitti lähettää kahta erilaista koodia: SP (Standard Precision) ja HP (High Precision). SP on siviilikäyttöön tarkoitettu koodi, kun taas HP on sotilaskäyttöön tarkoitettu koodi. Molemmat käyttävät samoja signaaleja, mutta HP käyttää kymmenen kertaa suurempaa kaistanleveyttä eli kykenee tarkempiin paikannuksiin. Aluksi siviilikäytössä oli vain L1-signaali, mutta järjestelmän nykyaikaistamisen myötä myös L2 annettiin siviilikäyttöön. GPS-signaaleista poiketen jokainen GLONASS-satelliitti käyttää eri taajuutta. L1-signaalin keskitaajuus on 1 602 MHz ja taajuudet eri satelliiteille lasketaan kaavalla $1\,602\text{ MHz} + n \times 0,5625\text{ MHz}$, jossa n tarkoittaa kaavanumerointia eli lukua -7–7 välillä. L2-signaalin keskitaajuus on 1 246,0 MHz ja loput lasketaan samalla periaatteella. GLONASS on saanut kuitenkin moitetta radioastronomeilta liian suuresta taajuuskaistavalikoimasta, joka on ristiriidassa kansainvälisten taajuuskaistasopimuksien kanssa. Sittemmin GLONASS on vähentänyt taajuuksiaan siten, että eri puolilla maapalloa olevat satelliitit käyttävät samoja taajuuksia. (Poutanen 1999, 26.) Vuonna 2005 GLONASSin käyttämä taajuusalue oli välillä 1 598,0625–1 605,5 MHz.

2.3 Galileo

Galileo on kehitetty Euroopan unionin ja Euroopan avaruusjärjestö ESA:n toimesta luodakseen Euroopalle oman muista valtioista riippumattoman satelliittipaikannusjärjestelmän. Galileo on tarkoitettu siviilien operoimaksi, joka antaa EU-maille itsenäisyyden satelliittipaikannussektorilla. Galileolle on luvattu Yhdysvaltain ja Venäjän järjestelmiä parempi tarkkuus ja on myös yhteensopiva näiden järjestelmien kanssa.

Euroopan komissio ilmoitti 1999 päätöksestään perustaa EU:lle siviilikäyttöön tarkoitettu satelliittipaikannusjärjestelmä. Ohjelma sai rahoituksen 2000-luvun alkupuolella. Joulukuussa 2005 ja huhtikuussa 2008 laukaistiin testisatelliitit Giove-A ja Giove-B. Ensimmäiset operatiiviset satelliitit laukaistiin lokakuussa 2011, ja tätä nykyä Galileo käsittää yhteensä kahdeksan operatiivista satelliittia (tilanne 7/2015). (ESA2015a.)

Galileon satelliittikonstellaation on suunniteltu käsittävän 27 satelliittia ja kolme varasatelliittia, jotka kiertävät tasaisesti kolmella eri ratatasolla. Tähän laajuuteen on tarkoitus päästä vuoteen 2020 mennessä. Tämä satelliittien määrä takaisi hyvän toimivu-

den kaikkialla maailmassa ja yhdessä GPS:n ja GLONASSin kanssa satelliittien saata-
vuus paransi entisestään, mikä helpottaa paikantamista etenkin todella vaikeiden koh-
teiden kuten korkeasti rakennettujen kaupunkien kohdalla. Satelliitit kiertävät maata
23 222 kilometrin korkeudessa kiertoajan maapallon ympäri ollessa 14 tuntia. Inklinaa-
tiokulma päiväntasaajan nähden on 56 astetta. Hieman GPS-satelliitteja suurempi inkli-
naatiokulma takaa paremman toimivuuden pohjoisemmilla leveysasteilla. Satelliittien
toiminta-ajaksi on lupailtu yli 12 vuotta. Satelliittien toiminnasta ja kellojen tarkkuudes-
ta vastaa Italiassa ja Saksassa sijaitsevat kontrollikeskukset. (ESA 2015b.)

Galileo tarjoaa kymmentä signaalia, joiden taajuus on välillä 1 164–1 592 MHz. Suuri
signaalien lukumäärä mahdollistaa optimoinnin eri käyttötarkoituksia varten sekä iono-
sfääristä johtuvien virheiden minimoimiseen. Matalampi taajuus viivästyy ionosfäärissä
korkeampaa taajuutta enemmän ja siksi käyttämällä useampia eri taajuisia signaaleja
vastaanottimen on mahdollista laskea virhe pois. Jokainen signaali sisältää satelliitille
yksilöllisen koodinsa, jotta vastaanotin tietää miltä satelliitilta signaali on peräisin.
(ESA 2015c.)

2.4 BeiDou

BeiDou tai toiselta nimeltään COMPASS on Kiinan kehittämä satelliittipaikannusjärjes-
telmä, jonka tavoitteena on taata Kiinalle itsenäisyys navigaatio-alalla ja saada Aasian
alueelle optimoitu järjestelmä. BeiDou käsittää kaksi järjestelmää. Ensimmäinen järjes-
telmä BeiDou-1 kehitettiin paikalliseksi järjestelmäksi, jonka tällä hetkellä kolme toimi-
vaa satelliittia kiertävät geostationarisella radalla, mikä rajaa niiden käyttöalueen Kii-
naan ja sen lähialueille. BeiDou-2 eli COMPASS on globaali järjestelmä, jonka on tar-
koitus sisältää 35 satelliittia, joista viisi on geostationarisella radalla. Vuonna 2012
BeiDou kattoi Kiinan ja sen lähialueet täydellisesti, mutta globaalin järjestelmän suun-
niteltu toimintalaajuus saavutettaneen vuoteen 2020 mennessä. (BeiDou 2015.)

Kiina oli järjestyksessään kolmas satelliittipaikannusjärjestelmän käyttöön ottaja, kun
sen ensimmäinen satelliitti laukaistiin lokakuussa 2000. Ensimmäiset BeiDou-1 satelliitit
kattoivat vain Kiinan ja sen lähialueet. Ensimmäinen BeiDou-2 -järjestelmän globaa-
liin käyttöön tarkoitettu satelliitti laukaistiin huhtikuussa 2007.

2.5 Virhelähteet satelliittipaikannuksessa

Satelliittimittauksissa on useita eri tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ja siksi tavallisella GNSS-laitteella päästään yleensä vain 5–10 metrin tarkkuuteen ja vain satunnaisesti 2 metriä tarkempaan tulokseen (Miettinen 2006, 53). Vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa:

- Maapallo ja satelliitit liikkuvat havainnointijakson aikana
- Satelliittien sijainti tunnetaan vain muutaman metrin tarkkuudella
- Signaalin nopeus on riippuvainen ilmakehän kerrosten, erityisesti ionosfäärin ja troposfäärin, tilasta
- Satelliittigeometria eli kuinka monta satelliittia on saatavilla ja kuinka edullinen tai epäedullinen niiden sijainti on
- Vastaanotettu signaali voi heijastua ympäristöstä
- Vastaanottimen ohjelmisto toimii virheellisesti tai käyttäjä toimii virheellisesti (Laurila 2012, 305–306.)

Metsäisissä olosuhteissa ongelmia aiheuttavat maastonmuodoista johtuvat häiriöt, jotka estävät signaalien kulkeutumista satelliiteilta vastaanottimelle. Jos ympäristö on esteistä vapaa, niin silloin on aina riittävästi satelliitteja käytettävissä. Tilanne on hankalampi, kun paikannusta yritetään tiheässä metsässä tai syvässä supassa tai paikassa jossa on korkeita mäkiä ympärillä peittämässä signaaleja. Toisin kuin radiosignaali, paikannussignaali ei läpäise esteitä häiriintymättä. Paikannussignaali voi ottaa ns. kimmokkeita ympäristöstä (rakennukset, autot, vesistöt...), jotka taas lisäävät virheellisesti signaalin kulku-aikaa ja aiheuttaa merkittävänkin virhetuloksen (Laurila 2012, 306).

Satelliittigeometrian vaikutuksella tarkkuuteen tarkoitetaan satelliittien sijaintia vastaanottimeen nähden. GPS-satelliittien radat ovat hieman epäedulliset etenkin napalueilla ja aina ei ole saatavilla edullista satelliittigeometriaa. Tämän vuoksi myös kellonaika vaikuttaa epäsuorasti paikannustarkkuuteen. Jos paikannat samaa kohtaa aamulla ja illalla, paikannustarkkuus ei välttämättä pysy samana. Satelliittigeometrian vaikutusta kuvataan DOP-lukemilla (Dilution of Precision). Mitä suurempi lukema, niin sitä suurempi on satelliittigeometrian vaikutus tarkkuuteen. Olemassa on neljä erilaista lukemaa: PDOP (Position), HDOP (Horizontal), VDOP (Vertical) ja TDOP (Time). Ylei-

simmin käytetään kuitenkin vain PDOPia, joka kuvaa satelliittigeometrian vaikutusta paikannustarkkuuteen ja HDOPia, joka kertoo vaikutusta tasotarkkuuden määrittämiseen. Satelliittigeometrian voi katsoa olevan hyvä PDOPin ollessa alle 6, mutta suuremmilla lukemilla tarkkuus voi olla hyvä. (Maanmittauslaitos 2015.)

Mittauksen tarkkuus on virheiden arvioitu suuruus. Mittauksissa tavoitellaan tilannetta, jossa systemaattiset ja karkeat virheet on karsittu pois, ja jäljellä olisi vain satunnaisia virheitä. Paikannin laskee eri lähteistä saatujen sijaintitietojen keskiarvoa, ja mitä pidempään paikanninta pidetään aloillaan, sitä tarkemman tuloksen vastaanotin laskee. Täytyy toki muistaa, että kaikilla laitteilla ei ole mahdollista päästä tarkkoihin tuloksiin. (Miettinen 2006, 53.)

2.6 Perusmittaustavat

On olemassa useita eri mittaustapoja, joilla voidaan vaikuttaa tarkkuuteen. Perusmittaustapoja on kolme: absoluuttinen paikannus, differentiaalinen paikannus ja suhteellinen paikannus (Taulukko 2).

Taulukko 2. Perusmittaustavat (Laurila 2012, 295).

Mittaustapa	Havaintosuure	Paikan laskenta	Virheiden hallinta	Tarkkuus
Absoluuttinen paikannus	binäärikoodi	Satelliittien suhteen	Mallintaminen ja toisto	5-10 m
Differentiaalinen paikannus	binäärikoodi	Satelliittien suhteen	Tukiasemakorjaus, mallintaminen ja toisto	0,5-5 m
Suhteellinen paikannus	kantoaallot	Vertailuvastaanottimen suhteen	Erotushavainnot, mallintaminen ja toisto	< 0,05 m

2.6.1 Absoluuttinen paikannus

Absoluuttinen paikannus on yleisimmin käytetty satelliittipaikannuksen muoto, johon tarvitsee vain yhden vastaanottimen. Useammille harrastajille riittää 5–10 metrin reaaliaikainen tarkkuus, jolla on mahdollista navigoida ainakin näköetäisyydelle kohteesta. Tässä koodihavaintoihin perustuvassa menetelmässä vastaanotin laskee paikkansa määrittämällä koodipseudoetäisyyden eli mittaamalla paikannussignaalin kulkuajan, johon on moduloitu binäärikoodi eli GPS:n siviilikäytössä C/A-koodi (Poutanen 1999, 198).

Sijainti määritetään kolmiomittauksen eli trilateraation avulla, johon riittää yhteys kolmeen satelliittiin. Käytännössä kuitenkin tarvitaan vähintään neljäs satelliitti, jotta voidaan määrittää kellovirhe ja saada selville todellisen etäisyyden satelliitteihin ja sitä kautta todellisen sijainnin kartalla. Tämä on yksinkertaisin ja halvin tapa määrittää sijainti.

2.6.2 Differentiaalinen paikannus

Differentiaalinen paikannus eli DGPS tai DGNSS toimii samalla periaatteella kuin absoluuttinen paikannus, mutta siihen lisätynä on käytössä tukiasemakorjaus. Vastaanotin ottaa yhteyden tukiasemaan, jonka koordinaatit ovat tiedossa. Tukiasema mittaa samoja satelliitteja vastaanottimen kanssa, ja koska tukiaseman sijainti on tiedossa, niin silloin tiedetään satelliittipaikannuksen virhe. Tukiasema määrittää etäisyyden korjausviestin, jonka se lähettää reaaliaikaisesti vastaanottimelle. Vastaanotin laskee tämän perusteella korjatun etäisyyden satelliitteihin ja sitä kautta määrittää sijainnin. (Laurila 2012, 299–300.) Differentiaalisessa paikannuksessa käyttäjä tarvitsee vain yhden tietoliikennetuella varustetun vastaanottimen, sillä tukiasemia on tarjolla laajasti.

Tukiasemapalvelujen tarjoajat ylläpitävät tukiasemia, joista käytetään termiä tukiasemaverkosto. Suomessa ja maailmalla on useita tukiasemapalvelujen tarjoajia, jotka tarjoavat asiakkaille korjausdataa maksusta. Differentiaalinen paikannus on yleensä ammattimaista toimintaa, jota käyttävät mm. paikkatiedon kerääjät sekä ammattimainen auto- ja laivaliikenne. Paikannustarkkuus on tällä menetelmällä $< 0,5\text{--}5$ metriä.

2.6.3 Suhteellinen paikannus

Suhteellinen paikannus eroaa kahdella tavalla kahdesta aiemmasta mittaustavasta. Ensinnäkin se perustuu vaihehavaintoihin eli kantoaaltoihin, kun taas edelliset tavat mittaivat etäisyyden koodihavaintojen eli binäärikoodien perusteella. Toiseksi tämä vaatii paikantavan vastaanottimen lisäksi vertailuvastaanottimen, jonka suhteen sijainti mitataan satelliittien sijasta. (Laurila 2012, 301.)

Paikantava vastaanotin ja vertailuvastaanotin mittaa satelliitilta tulevan kantoaallon vaiheen ja laskee aallonpituuksien lukumäärän. Satelliitin liikkussa etäisyyden vaihtelu näkyy aallonpituuksien lukumäärässä. Useampaa satelliittia havainnoidessa voidaan laskea etäisyys satelliitin ja vastaanottimen välillä (Maanmittauslaitos 2015). Paikannamääritykseen käytetään havaintosuurena erotushavainnoita, joilla tarkoitetaan paikantavan vastaanottimen ja vertailuvastaanottimen koordinaattieroja. Tässä menetelmässä siis vertaillaan kahden vastaanottimen havainnoita. Vertailuvastaanotin voi olla tunnetussa tai tuntemattomassa pisteessä.

Suhteellinen paikannus on tarkin näistä kolmesta perusmittausmenetelmästä, ja tällä päästään alle 0,05 metrin tarkkuuteen. Tarkkuus perustuu havaintosuurena käytettävään kantoaallon vaiheeseen, jota voidaan havainnoida binäärikoodeja tarkemmin, ja kahden vastaanottimen erotushavainnoista voidaan poistaa suurin osa vastaanotinten yhteisistä virheistä. Lisäksi käyttämällä lähellä olevaa ja paikallaan pysyvää vertailuvastaanotinta mittauksen vertailukohtana kaukana vinosti liikkuvan satelliitin sijaan mahdollistetaan parempi tarkkuus (Laurila 2012, 314). Tätä menetelmää käytetään mm. suurta tarkkuutta vaativissa maanmittauksen ja kartoitustekniikan tehtävissä (Laurila 2012, 302).

Suhteellinen paikannus voidaan jakaa vielä kolmeen eri sovellukseen, jotka ovat *staattinen mittaus* sekä *RTK-* ja *verkko-RTK-*mittaus.

Staattinen GNSS-mittaus

Staattinen GNSS-mittaus on tarkin suhteellisen mittauksen sovelluksista. Tällä menetelmällä päästään parhaimmillaan 1-5 mm tarkkuuteen (Laurila 2012, 315). Staattisessa mittauksessa paikantava vastaanotin on paikoillaan määrätyn ajan ja mittaa havaintoja eli epookkeja tietyin väliajoin samasta paikasta. Lopullinen paikannustulos saadaan käsittelemällä data jälkikorjausohjelmalla, joka käyttää tukiasemapalveluiden korjausdataa. Menetelmä ei siis ole reaaliaikainen, mutta hyvinä puolina voidaan pitää sen tarkkuutta ja helppoutta. Tämä ei vaadi erillistä omaa vertailuvastaanotinta vaan ainoastaan maksullisen tai maksuttoman jälkikorjauspalvelun, eikä se näin ollen vaadi myös matkapuhelinverkkoa tiedon siirtoa varten.

RTK

Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus eli RTK (Real Time Kinematic) vaatii tunnetussa pisteessä sijaitsevan vertailuvastaanottimen, joka lähettää aallonpituuksiin perustuvat vaihehavainnot paikantavalle vastaanottimelle. Paikantava vastaanotin mittaa sijaintia reaaliaikaisesti. Luotettavaan tulokseen päästään, kun vertailuvastaanottimella ja paikantavalla vastaanottimella on vähintään 6-7 yhteistä satelliittihavaintoa.

Tunnetulla pisteellä olevalla tukiasemalla ja paikantavalla vastaanottimella tulee olla tiedonsiirtoyhteys, joka toteutetaan radiomodeemin tai matkapuhelinverkon avulla. Radiomodeemin kautta toimintasäde rajoittuu muutamaan kilometriin maastosta riippuen, kun taas matkapuhelinverkko ei aseta samanlaisia rajoitteita. Mittaustapa taas rajoittaa tukiaseman ja vastaanottimen välisen toimintasäteen noin 20 kilometriin johtuen häiriöistä ionosfääristä. (Laurila 2012, 319.) Menetelmällä on siis omat heikkoutensa ja se vaatii myös oman tukiaseman, mikä lisää kustannuksia.

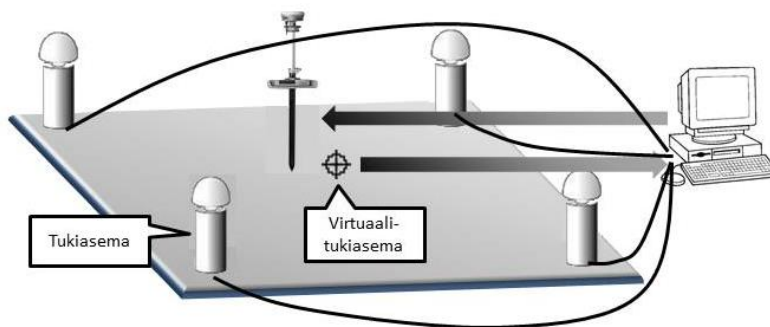
Verkko-RTK

Tukiasemaverkostoihin perustuva verkko-RTK on syrjäyttänyt perinteisen RTK-mittauksen. Tässä käyttäjä tarvitsee vain yhden vastaanottimen, joka käyttää hyväkseen

tukiasemaverkostoa. Tukiasemat sijaitsevat tunnetussa pisteessä, ja niiden avulla on mahdollista mallintaa ilmakehään liittyviä virhelähteitä paikannuksessa ja saada niihin korjausdata.

Toiminnan ydin on laskentakeskus, joka prosessoi vastaanottimen lähettämää dataa mittauspisteestä ja tukiasemien lähettämää satelliittidataa. Vastaanotin lähettää likimääräisen sijaintinsa laskentakeskukselle matkapuhelinverkossa (kuva 2, alempi nuoli) ja satelliittidataa hyödyntäen laskentakeskus luo virtuaalisen tukiaseman mittauspisteen lähelle. Virtuaalisen tukiasemapisteen suhteen laskentakeskus laskee korjausdatan, jonka se lähettää palvelunkäyttäjän vastaanottimeen.

Koska tällä menetelmällä luodaan virtuaalinen tukiasema lähelle paikannettavaa pistettä, päästään lähes kokonaan eroon tukiaseman etäisyydestä johtuvista virheistä. Tämä reaaliaikainen menetelmä vaatii kuitenkin toimiakseen matkapuhelinyhteyden, mikä ei aina ole mahdollista syrjäisillä seuduilla mitattaessa.



Kuva 2. Verkko-RTK:n toimintaperiaate (Kuva: Niko Piironen).

2.7 Jälkikorjaus

Jälkikorjaus on tulosten korjaamista jälkikäteen. Paikannusvaiheessa kerätään raakadataa, joka oikeastaan vastaa absoluuttista paikannusta. Jälkikorjaus vaatii korjausdatan paikannuksen ajankohdan ajalta. Suomessa on muutamia jälkikorjauspalveluja tarjoavia yrityksiä. Ilmaista yhden tukiaseman korjaukseen perustuvaa palvelua tarjoaa Paikkatietokeskus. Korjausdata ladataan palveluntarjoajalta ja ajetaan se jälkikorjausohjelmassa raakadatan kanssa. Korjausohjelma laskee korjausdatan perusteella uudet koordinaatit.

Jälkikorjauksen voi suorittaa yhden tukiaseman mukaan, jonka on suositeltavaa sijaita mahdollisimman lähellä korjattavaa paikannusta tai sitten käyttää virtuaaliseen tukiasemaan perustuvaa korjausta, joka minimoi tukiaseman etäisyyden vaikutuksen tarkkuuteen.

Trimble on kehittänyt virtuaaliseen tukiasemaan perustuvan VRS-järjestelmän (Virtual Reference Station System). Suomessa tätä järjestelmää ylläpitää Geotrim Oy ja sen tukiasemaverkoston noin sata tukiasemaa kattaa koko Suomen. Etuna tässä on verkko-RTK:hon nähden riippumattomuus matkapuhelinverkon saatavuudesta, sillä reaaliaikaisuuden sijaan korjaus tapahtuu jälkikorjauksena. Nykyisin Suomessa vastaavaa palvelua tarjoaa myös Leica Geosystems Oy omassa SmartNet-verkossaan. Leican tukiasemaverkosto kattaa myös koko Suomen käsittäen yli sata tukiasemaa ympäri Suomen.

3 Tutkimuksen tausta ja tarkoitus

Tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla GNSS-paikantimien horisontaalista tarkkuutta ja soveltuvuutta metsäisissä olosuhteissa Suomen metsäkeskuksen käyttöön laserkeilauksen referenssikoealojen puustotulkintaa varten. Suomen metsäkeskus inventoi vuosittain noin 1,5 miljoonaa hehtaaria yksityismetsiä inventointikierron ollessa kymmenen vuotta. Kaukokartoituksen inventointialue on noin 50 000–200 000 hehtaaria, josta mitataan noin 800 referenssikoealaa puustotulkintaa varten. Yhteensä referenssikoealoja mitataan vuosittain noin 7000–9000 kappaletta. Kaukokartoitusaineiston, ilmakuvien sekä mitattujen koealojen avulla tuotetaan kuviokohtaiset metsävaratiedot kullekin inventointialueelle. (Suomen metsäkeskus 2015.)

Metsävaratiedon laatiminen edellyttää puustotulkintaa tarkasti paikannetuilta referenssikoealoilta, joista mitataan 9 metrin säteeltä oleellimmat puustotiedot. Referenssikoealat tulisi paikantaa vähintään 1 metrin tarkkuudella, jotta kerättyjä puustotietoja voidaan verrata tarkasti laserkeilauksella saatuun dataan. Tutkimuksen tarkoituksena on testata kuinka hyvin metsäkeskuksen nykyiset laitteet tähän tarkkuuteen yltävät ja onko tarvetta päivittää kalustoa tarkempiin laitteisiin. Lisäksi tarkoituksena on tutkia antenni-

korkeuden vaikutusta tarkkuuteen, verrata eri jälkikorjausmenetelmiä ja arvioida laitteiden ergonomiaa, käytettävyyttä ja kestävyyttä todellisissa olosuhteissa.

3.1 Metsävaratiedon keruu

Laserkeilaus ei sinällään ole uusi keksintö, mutta metsävaratiedon keruuseen se on otettu tehokkaasti käyttöön vasta viime vuosina. Laserkeilaukselle on useita sovellusaloja, mainittakoon tärkeimpinä maanpinnan korkeuden mittaaminen ja korkeusmallien tuottaminen tai vaikkapa vanhojen rakennusten mallintaminen arkeologiassa. Laserkeilain toimii ilmasta lentokoneeseen tai helikopteriin asennettuna, maalla liikkuvasta ajoneuvosta tai paikallaan kolmijalalle asetettuna. Metsävarojen inventoinnissa laserkeilainta käytetään ilmasta käsin.

Laserkeilain lähettää laserpulseja, jotka esteeseen osuessaan kimpoavat takaisin. Laserpulssien pistetiheyteen vaikuttavat mm. maaston peitteisyys, topografia sekä kohteen heijastusominaisuudet. Pistetiheys on tyypillisesti 0,5–20/m². Laserkeilaus tuottaa pistepilven eli pisteet ovat niitä paikkoja, joista pulssit ovat kimmonneet takaisin. Alimmat pisteet ovat maanpinta ja ylemmät pisteet kuvaavat esimerkiksi puustoa. Näin saadaan kolmiulotteinen piirros, jonka avulla on mahdollista inventoida metsävaroja. (Holopainen, Hyyppä & Vastaranta 2013, 20–21.)

Laserkeilain sisältää tarkan GNSS-paikantimen, joka laskee sen kulloisetkin koordinaatit. Laserkeilain laskee asentonsa inertiamittausjärjestelmällä (IMU) eli siten tiedetään missä kulmassa keilain lähettää pulseja. Keilain laskee pulssien kulkeman ajan, jota kautta saadaan selville kuinka kaukana piste eli kimpoamiskohta on keilaimesta. Kun tiedetään 1. laserkeilaimen koordinaatit GNSS-menetelmällä 2. keilaimen kaltevuus inertiamittausjärjestelmällä ja 3. laserpulssin pituus, saadaan selville pistepilven kulloisenkin pisteen koordinaatit. (Holopainen ym. 2013, 11–13.)

Nykyään Metsäkeskuksen metsävaratiedon keruu perustuu pääosin kaukokartoitukseen, niin että maastossa tarkastetaan vain osia alueesta. Täysin ongelmaton laserkeilaukseen perustuva kaukokartoitus ei kuitenkaan ole, etenkin puulajien tulkinnan osalta. Siksi metsävaratiedon keruussa käytetään myös ilmakuvia, joista näkee havu- ja lehtipuiden

sävyerot. Lehtipuita on kuitenkin vielä mahdotonta erottaa toisistaan kaukokartoituksen perusteella.

Laserkeilauksen ja referenssikoealojen mittauksen jälkeen laaditaan maastomalli ja lasketaan pistekohtaisesti laserkeilauksen korkeushavainnot. Kaukokartoitusdata liitetään 16 m x 16 m hilaruudukkoon, lasketaan tietyt hakumuuttujat ja yleistetään puustotunnukset inventoitaluekohtaisen mallin mukaisesti jokaiselle hilaruudulle. Lopuksi toimenpidekuvion tiedot yleistetään ruuduttaisista tiedoista pinta-alalla painottamalla. Valmis metsävaratieto on nähtävillä metsänomistajille ja metsäalan toimijoille ensisijaisesti tarkoitettussa Metsään.fi-palvelussa. (Suomen metsäkeskus 2015.)

3.2 Tutkimusongelmat

Tutkimuksen pääasiallinen tavoite oli selvittää Suomen metsäkeskuksen nykyisin käytössä olevien laitteiden tarkkuudet ja täyttävätkö ne alle metrin tarkkuusvaatimukset metsäisissä olosuhteissa. Tarkkuuden tutkimus rajattiin tasotarkkuuteen, sillä korkeusuuntaisen tarkkuuden testaus oli tarkoituksen kannalta toisarvoista. Lisäksi tarkoituksena oli ottaa käyttöön luokkaa tarkempia paikannuslaitteita, joita vertailtiin nykyisten laitteiden kanssa. Tavoitteena oli selvittää, tuovatko tarkemmat ja kalliimmat laitteet merkittävää lisäarvoa ja hyötyä ajatellen tarpeita.

Toinen tässä yhteydessä tutkittava asia oli antennikorkeuden vaikutus mittaustarkkuuteen. Myös muita mahdollisesti tarkkuuteen tai mittauskustannuksiin vaikuttavia tekijöitä tutkittiin. Suomen metsäkeskus on siirtymässä koealamittauksissa parimittauksista yksinmittaukseen, joten laitteen paino, koko ja ergonomia ovat hyvin merkityksellisiä tekijöitä mittaajan kannalta ajatellen.

Nykyisin Metsäkeskuksen ohjeena on nostaa sauvalla antenni 4,5 metrin korkeuteen. Tutkimuksen yksi tavoite oli selvittää vaikutus tarkkuuteen, jos antenni jätetään vain noin 1,5 metrin korkeuteen. Tällöin mittaajan varustesetti kevenisi ja helpottaisi yksinmittaajan tehtävää. Tutkimuksen yhteydessä arvioitiin myös laitteiden ergonomia, käytettävyys ja kestävyys metsäisissä olosuhteissa.

Kolmas tutkimusaihe oli jälkikorjauspalveluiden ja menetelmien vertailu. Käytettävissä oli Geotrimin tukiasemaverkoston korjausdata sekä Topconin laitteen osalta Paikkatie-tokeskuksen tukiasemien ilmainen korjausdata. Tutkimuksessa vertailtiin Geotrimin verkon eri korjaustapoja, joita olivat virtuaaliseen tukiasemaan perustuva VRS sekä yksittäisiin tukiasemien korjausdataan perustuvat korjaukset. Tutkimuksessa käytettiin useampien eri tukiasemien korjausdatoja simuloidakseen tukiaseman etäisyyden vaikutusta tarkkuuteen.

Neljäntenä tutkimusaiheena oli tutkia, kuinka luotettavasti paikannustarkkuuksia voidaan arvioida pelkän korjausdatan perusteella. Jälkikorjausohjelma antaa paikannukselle tarkkuusestimaatin ja havaintojen välille keskihajonnan. Testissä saatuja poikkeamia vertaamalla estimaattiin sekä keskihajontaan, saadaan käsitystä mitä nämä arvot kertovat todellisesta tarkkuudesta ja voiko niihin luottaa.

4 Tutkimuksen toteutus

Tutkimuksessa vertailtiin seitsemää laitetta. Luotettavaa vertailudataa varten täytyi jokaiseen mittauspisteeseen luoda seitsemän eri referenssipistettä, jotta oli mahdollista testata laitteita samanaikaisesti taaten kaikille samanlaiset satelliittigeometriset olosuhteet, joilla voi olla huomattavakin merkitys paikannustarkkuuteen. Testirata kierrettiin useampaan kertaan riittävän vertailuaineiston saamiseksi. Menetelmillä pyrittiin takaamaan tulosten luotettavuus ja saamaan mahdollisimman paljon tutkimuksellista dataa tutkimusaiheisiin liittyen.

Tutkimusta varten rakennettiin 11 testikoealaa, joihin jokaiseen mitattiin lähekkäin seitsemän referenssipistettä eli jokaiselle laitteelle oma piste. Nämä alle 10 cm tarkkuuteen ETRS-TM35FIN-koordinaatistoon määritetyt pisteet toimivat referenssipisteinä varsinaiseen laitevertailuun. Laittevertailussa jokaisella laitteella mitattiin samanaikaisesti 30 minuutin staattinen paikannus, joka myöhemmin jälkikorjattiin. Tuloksissa saatiin laitteiden jälkikorjatut koordinaatit referenssipisteiltä. Tuloksista analysoitiin poikkeamia referenssipisteisiin nähden ja laitteiden tarkkuuseroja eri vaikeustason kohteilla.

Tutkimuksen toteutuksessa mukana oli Metsäkeskuksen edustaja sekä metsätalouden opiskelija Mikkelin ammattikorkeakoulusta ja maanmittausopiskelija Lapin ammattikorkeakoulusta, jotka myös tekivät aineistosta itsenäisesti omat analyysit ja opinnäytetyöt. Lisäksi laitevertailussa seitsemällä laitteella oli mukana Metsäkeskuksen omaa väkeä, jotta jokaisella laitteella oli oma käyttäjänsä.

4.1 Laitteet

Kaikki laitteet olivat vähintään ammattikäyttöön suunnattuja kaksitaajuuksilaitteita (L1/L2). Lisäksi testiin otettiin kaksi tarkemman tason paikannuslaitetta, jotta saatiin vertailukohtaa luokkaa tarkempiin laitteisiin. Testattavat laitteet olivat: *Trimble Pro 6H*, *Trimble ProXRT*, *Trimble Geo 7x* ja tarkemman luokan laitteina *Trimble R10* ja *Topcon Hiper SR* (taulukko 3). Topcon oli lainassa Luonnonvarakeskukselta, jossa sitä käytetään VMI-mittauksiin. Metsäkeskus tekee Luken kanssa yhteistyötä, jossa VMI-mittausten tuloksia voidaan käyttää laserkeilauksen puustotulkinnassa tai muissa laserkeilaushankkeissa. Laite oli mukana testissä, jotta myös sen tarkkuus voitiin varmistaa.

Taulukko 3. GNSS-laitetestiin valitut laitteet ja valmistajan ilmoittamat tarkkuudet.

Trimble Pro 6H	Trimble Pro XRT	Trimble Geo7x	Trimble R10	Topcon Hiper SR
				
Tarkkuus				
Reaaliaikainen ja jälkilaskettu H-Star 10 cm + 1 ppm	Reaaliaikainen ja jälkilaskettu H-Star 10 cm + 1 ppm	Reaaliaikainen ja jälkilaskettu H-Star 10 cm + 1 ppm	RTK-mittaus 8 mm + 1 ppm Staattinen mittaus 3 mm + 0,5 ppm	RTK-mittaus 10 mm + 1 ppm Staattinen mittaus 3 mm + 0,5 ppm

Taulukko 4. Luettelo käytetyistä laitteista, pääsääntöisestä antennikorkeudesta sekä kul-
lakin laitteella käytössä olleista antennista, tallentimista ja ohjelmistoista.

Laite	Antenni ja korkeus	Tallennin	Ohjelmisto
Trimble ProXRT 1.1	Zephyr Model 2 1,4	Panasonic CF-U1	GPS Pathfinder Field Toolkit 1.41
Trimble ProXRT 1.2	Zephyr Model 2 4,5	Panasonic CF-U1	GPS Pathfinder Field Toolkit 1.41
Trimble ProXRT 2.0	Tornado 4,5	Trimble Juno 5	TerraSync Professional 5.70
Trimble Pro 6H	sisäänrakennettu 4,5	Trimble Juno 5	TerraSync Professional 5.70
Trimble Geo7x	Zephyr Model 2 2,8	sisäänrakennettu	TerraSync Professional 5.70
Trimble R10	sisäänrakennettu 4,78	Trimble Tablet	Trimble Access
Topcon Hiper SR	sisäänrakennettu 2,5	Topcon FC-336	-

Taulukossa 4 on luettelo käytetyistä laitteista, niiden antennikorkeudesta sekä käytetystä antennista ja tallentimesta ohjelmistoinen. Kolme käytössä ollutta ProXRT-vastaanotinta on numeroitu yksilöllisesti. ProXRT 1.1 ja 1.2 -laitteet ovat Metsäkeskuk-
sen nykyisin käytössä olevia laitteita, ja alanumerot viittaavat antennikorkeuteen, siten että 1.1 tarkoittaa matalalla olevaa ja 1.2 korkeammalla olevaa antennia. Näillä laitteilla oli käytössä sama antenni ja tallennin. Lisäksi käytössä oli ProXRT:n uudempi malli model 2, joka on tässä nimetty nimellä ProXRT 2.0. Erotuksena muihin ProXRT-vastaanottimiin, tässä oli käytössä edullisempi antennimalli sekä eri tallennin. ProXRT-vastaanottimiin oli ladattu uusin mahdollinen firmware-versio eli laiteohjelmisto, joka määrittää laitteen toiminnot. Vanhemmissa oli käytössä versio 4.44 ja uudemmassa versio 4.71. Uusin firmware-versio oli tarkoitettu vain uudemmalle model 2 version ProXRT:lle.

Antenni nostettiin pääsääntöisesti 4,5 metriin, mutta osalla laitteista se ei onnistunut. Geo 7x:n antennikaapeli ylsi vain 2,8 metriin ja Topconin kartoitussauvasta loppui mitta 2,5 metriin. Trimble R10 nostettiin poikkeuksena 4,78 metriin. Osassa avonaisemmista mittauskohteista jätettiin antenni tuulen vuoksi matalammalle, sillä peitteettömällä paikalla antennikorkeudella ei oletuksena ole niin paljon väliä, mutta vastaavasti tuuli voi taas huojuttaa laitetta häiritsevästi tai jopa kaataa sen.

Laitteiden antennina toimivat laitteissa, joissa se ei ole sisäänrakennettuna, Zephyr Model 2 sekä ProXRT 2.0:n osalla edullisempi ja näin ollen huonompi Tornado-mallin

antenni. Käytetty tallennin ei sinänsä vaikuta paikannustarkkuuteen, sillä se vain tallentaa vastaanottimen keräämää dataa.

Tallentimeen asennetut paikannusohjelmistot vaihtelivat myös laitteittain. Metsäkeskuksen omilla laitteilla eli vanhemmilla ProXRT-laitteilla ohjelmistona toimi Trimblen SDK-ohjelmisto, joka on upotettu yrityksen omaan AarniPDA 3.2.32 -sovellukseen, joka mahdollistaa paikannuksiin ja koealamittauksiin liittyvät työt yhden sovelluksen sisällä. Trimble R10 ohjelmistona toimi nykyaikainen Trimble Access ja loput Trimblen laitteista käyttivät TerraSync Pro 5.70 -ohjelmistoa.

4.2 Testikenttien rakentaminen

Testikoealat perustettiin valtion omistamille maille Kuopion läheisyyteen. Neljä koealaa perustettiin Siilinjärven Haapamäelle ja loput seitsemät Kuopioon Suuri-Majoisen ympäristöön (liite 1). Tutkimusta varten perustettiin yhteensä 11 vaikeusasteeltaan erilaista koealaa metsäiseen ympäristöön, joista jokaiseen mitattiin seitsemän referenssipistettä noin 1,5 metrin etäisyydelle toisistaan koko ryppään halkaisijan ollessa noin 4 metrin luokkaa. Testikoealoiksi pyrittiin löytämään vaikeusasteeltaan erilaisia kohteita aina aukeilta paikoilta mahdollisimman tiheisiin ja korkeisiin kuusikoihin. Testikenttien metsät olivat sen verran sirpaloituneita, että äärimmäisen haastavia paikkoja ei löydetty, mutta näilläkin paikoilla laitteiden erot näkyivät tuloksissa. Liitteessä 2 on esitettyä testikoealojen puustotiedot ja mallikuvat ja liitteessä 3 on listattu referenssipisteiden koordinaatit. Analysoinnissa kohteet jaettiin helppoihin, keskivaikeisiin ja vaikeisiin kohteisiin.

Testikentän rakentamiseen käytettiin Trimble R10 -vastaanottimen verkko-RTK-toimintoa ja Trimble M3 -takymetriä sekä maastotietokonetta, jolla sai yhteyden molempiin laitteisiin ja josta dataa sai analysoidua reaaliaikaisesti. Takymetri itsessään ei ole paikannuslaite vaan se täytyy orientoida tunnetulle pisteelle ja etäisyyksiä ja kulmia mittaamalla voidaan siirtää koordinaatit seuraaville pisteille, jotka sijaitsevat liian haastavilla paikoilla mitattavaksi tarkasti pelkällä satelliittipaikantimella. Lähtöpiste täytyy siis sijaita aukolla tai matalassa taimikossa, jossa on laaja näkyvyys taivaalle. Lähtöpiste mitattiin paikannuslaitteella verkko-RTK-menetelmällä, jolla laitevalmistajan tietojen

mukaan pitäisi päästä alle sentin tarkkuuteen. Lisäksi paikannettiin aukiolta vähintään kaksi muuta pistettä, niin että mielellään kaikki kolme pistettä yhdessä muodostavat kolmion. Takymetri asetetaan mitatulle lähtöpisteelle ja otetaan havainnot muille asemointipisteille pitäen prismaa liittoshavaintopisteessä. Näin takymetri orientoidaan koordinaatistoon (ETRS-TM35FIN) ja sillä on mahdollista mitata uusia asemapistettä metsikköön, kunhan se saa vain näköhavainnon asemapisteellä sijaitsevaan prismaan.

Takymetrimittaukset suoritettiin suljettuna jonomittauksena eli siirrettiin kojetta seuraavalle pisteelle ja otettiin havainnot edelliseen ja seuraavaan pisteeseen. Referenssipisteiden lähelle mitattiin takymetrillä kaksi asemapistettä, joista molemmista otettiin havainnot kaikkiin seitsemään referenssipisteisiin eli saatiin kullekin pisteelle tuplahavainnot. Yhdellä referenssikoealalla käytettiin kolmea asemapistettä, josta jokaisesta otimme havainnot referenssipisteille. Lopuksi mittausjono suljettiin GNSS-laitteella mitatulle asemapisteelle. Näin saadaan tietoon eri havaintojen erotus ja mikäli se on lähellä nollaa, niin takymetrimittaus on silloin onnistunut. Ottamalla useita havaintoja kuhunkin pisteeseen, saadaan vertailuaineistoja ja havaitaan mahdolliset karkeat virheet. Referenssipisteet, jotka perustettiin aukealle tai matalaan taimikkoon (kohteet 6 ja 7), riitti mittaukseen pelkkä Trimble R10 -satelliittipaikannin, jolla mitattiin yksitellen kunkin referenssipiste erikseen.

Referenssipisteiden tarkkuusvaatimus oli 10 senttiä ja havaintojaksojen erotusten mukaan kyseiseen tarkkuuteen yllettiin. Maanmittauksessa on mahdollista yltyä jopa millimetritarkkuuteen, mutta se vaatii tarkan kiintopisteen lähtötiedoksi ja moninkertaisen määrän takymetria havaintoja asemapistettä kohden. Tämän tutkimuksen resurssit ja aikataulu eivät mahdollistaneet tarkempia mittauksia, eikä tutkimuksen luonnekaan vaatinut absoluuttisen tarkkoja tuloksia.

4.3 Laittevertailun toteutus

Testattavat paikannuslaitteet sijoitettiin referenssikoealan sisällä jokainen omalle referenssipisteelleen ja laitteet laitettiin tallentamaan sijaintia samaan aikaan ja tallennus lopetettiin samaan aikaan, joten näin saatiin luotua samanlaiset satelliittiolosuhteet kullekin laitteelle. Mittausmenetelmä oli staattinen mittaus eli metsästä kerättiin raakada-

taa, joka käsiteltiin myöhemmin jälkikorjausohjelmalla. Tallennusaika oli jokaisella mittausjaksolla puoli tuntia ja vastaanottimet oli ohjelmoitu ottamaan havainnot sekunnin välein. Mittauspisteet kierrettiin viiteen kertaan lukuun ottamatta aukealla paikalla sijainnutta helpointa kohdetta (kohde 6), joten näin saatiin useampia mittausjaksoja samasta paikasta ja laitteet myös sijoitettiin aina eri referenssipisteille eri mittausjaksojen kesken.

Varsinaiset tarkkuustestin tulokset ovat jälkikorjattu käyttäen parasta mahdollista käytettävissä olevaa korjausmenetelmää. Topconia lukuun ottamatta korjauksessa käytettiin Geotrimin VRS-palvelua, jolla saatiin parhaimmat keskiarvolukemat jokaisen laitteen osalta. Topconin osalta ainut ja näin ollen myös paras käytettävissä ollut korjauspalvelu oli Paikkatietokeskuksen palvelu, josta korjausdata ladattiin Kivetyn tukiaseman suhteen, joka sijaitsi noin 120 kilometrin päässä mittauspisteistä.

Antennikorkeuden vaikutusta testattiin kahdella Metsäkeskuksen nykyisin käyttämällä Trimble ProXRT -paikantimella, joissa toisen antenni oli nykyisen ohjeen mukaisessa korkeudessa eli 4,5 metrissä ja toisen laitteen antenni jätettiin n. 1,5 metriin. Näitä laitteita testattiin samanaikaisesti muiden laitteiden kanssa ja samoilla periaatteilla. Molemmilla laitteilla oli käytössä samanlainen kokoonpano: antennina Zephyr Model 2 sekä tallentimena Panasonic CF-U1. Kahden erillisen vastaanottimen välisiä mahdollisia laitekohtaisia eroja häivyttääkseen laitteita vaihdettiin päikseen siten, että laitteella jolla aluksi mitattiin antenni alhaalla, mitattiin lopuksi antenni ylhäällä, ja toisinpäin.

Laitteiden ergonomiaa ja käytettävyyttä metsäisissä olosuhteissa arvioitiin käyttökokeusten perusteella viikon ajalta. Arvioinnissa huomioitiin laitteen paino tarvittavine lisävarusteineen, kannettavuus, akun kesto sekä yleensäkin käytettävyys.

4.4 Jälkikorjausmenetelmien vertailun toteutus

Jälkikorjauspalveluiden laadun tutkimuksessa käytettiin tarkkuustesteissä saatuja aineistoja. Tarkoituksena oli verrata kuinka erilaisilla korjausmenetelmillä on vaikutusta tarkkuuteen. Vertailuun otettiin Geotrimin korjauspalvelusta VRS-korjaus automaattisella älykkäillä asetuksilla sekä manuaalisilla tiukasti rajatuilla asetuksilla (Max PDOP 2,

SNR 43, korkeusmaski 15°). SNR tarkoittaa signaali-kohinasuhdetta ja korkeusmaskilla tarkoitetaan astekulmaa taivaalle paikantimen sijaintiin nähden. VRS-korjauksessa luotiin manuaalisesti kaksi virtuaalista tukiasemaa, jotka sijaitsivat Suuri-Majoisella ja Haapamäellä. Lisäksi vertailtiin yksittäisen tukiaseman korjausdataan perustuvaa jälkikorjausta. Vertailuun otettiin Kuopion, Joensuun ja Rovaniemen tukiasemien korjausdataan perustuvat korjaukset. Tässä tarkoituksena oli simuloida tukiaseman etäisyyden vaikutusta tarkkuuteen.

Jälkikorjausdata ladattiin Geotrimin verkosta ja korjaukset suoritettiin Trimble Pathfinder Office 5.70 -ohjelmassa muilla laitteilla paitsi R10:llä, jolla korjaukset toteutettiin Trimblen Business Centerillä sekä Topconin laitteella, jonka jälkikorjauksesta huolehti laitetta käyttöömmme lainannut Luonnonvarakeskus.

4.5 Analyysien toteutus

Jokaisesta yksittäisestä mittauksesta kertynyt data koottiin yhteen Excel-tiedostoon analysointia varten. Taulukkoon koottiin mittausten yleiset tiedot (laite, mittauspisteen id, antennikorkeus, alkamis- ja loppumisajankohdat yms.) sekä mittausdata korjaamattomana ja jälkikorjattuna kaikilla käytetyillä menetelmillä. Dataa analysoitiin käyttämällä pivot-taulukointia sekä yksittäisiä mittauksia tarkkailemalla. Tärkein yksittäinen informaatio olivat koordinaatit, joista laskettiin tasopoikkeama referenssipisteiden mukaan. Tasopoikkeama lasketaan käyttämällä Pythagoraan lausetta, joka tähän tarkoitukseen muotoiltuna on seuraavanlainen:

$$tasopoikkeama = \sqrt{\{(Ir - Im)^2\} + \{(Pr - Pm)^2\}}$$

I = itäkoordinaatti

P = pohjoiskoordinaatti

r = referenssipiste

m = mitattu piste

Kaikki käytetyt koordinaatit ovat ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Muita keskeisiä käsitteitä ovat keskihajonta, havainnot sekä DOPit. Keskihajonnalla tarkoitetaan havaintojen keskimääräistä poikkeamaa suhteessa todennäköisimpään oikeaan tulokseen. Trimble R10:llä käytetty korjausohjelmisto käytti muotoa RMS (root

mean square) eli neliöllistä keskiarvoa, joka poikkeaa hieman keskihajonnasta. DOPit (dilution of precision) taas ovat lukemia, joilla kuvataan satelliittigeometrian vaikutusta tarkkuuteen. Mitä suuremmat lukemat ovat, sitä huonommat olosuhteet.

5 Tulokset

Paikannusten yhteislukumääräksi tuli seitsemällä laitteella 344 ja maksimaalinen jaksosten määrä yhdelle laitteelle oli 52, johon ylettiin kahdella laitteella. Kahdella paikannuksista jälkikorjaus ei toiminut, mikä käytännössä pudottaa mittausten määrän 342:een.

Tulokset olivat kohtuullisen hyvin oletusten mukaisia ja enimmäkseen johdonmukaisia. Kaksi laitetta yllätti kuitenkin negatiivisesti epätarkoilla ja osittain epäjohdonmukaisilla tuloksilla suhteessa muihin laitteisiin. Pohdinnoissa on käsitelty tuloksia selittäviä tekijöitä.

5.1 Laitteiden tarkkuus

Laitteiden tarkkuuden vertailussa oletuksena oli, että tarkemman luokan laitteet Trimble R10 ja Topcon Hiper SR erottuisivat tarkkuudessa tarkimmiksi laitteiksi. Topconin tarkkuuksia heikensi erilainen jälkikorjausmenetelmä, joten ne eivät ole täysin vertailukelpoisia. Trimble ProXRT-vastaanottimet olivat tarkimmat edullisimman tason laitteista. Trimble Pro 6H jäi laitetestin viimeiseksi.

Helpoilla paikoilla laitteiden välillä ei ollut isompia eroja, mutta vaikeimmilla paikoilla laitteiden väliset erot korostuivat (taulukko 5). Liitteessä 4 on taulukoitu laitteiden keskipoikkeamat testikoealoittain sekä vertailtu viivadiagrammeilla yksittäisiä havaintoja. Yksittäiset havainnot on koottu virhekuviin vaikeaksi määritellyiltä testikoealoilta (liite 5), mikä antaa kuvaa kuinka paikannukset osuivat ns. ”tikkatauluun”. Keskipoikkeaman lisäksi merkityksellistä on myös tavoitetarkkuuden ylittävien tulosten määrä (taulukko 6). Niiden tulosten mukaan ainoastaan Trimble R10 ja Topcon Hiper SR oli-

vat ainoat laitteet, joilla yllettiin jokaisella paikannuksella tavoitetarkkuuteen eli alle metrin poikkeamaan.

Taulukko 5. Laitteiden tarkkuus (m) paremmuusjärjestyksessä eri vaikeustason mittauskohteilla. Tulokset ovat jälkikorjattuja parhaalla käytettävissä olevalla menetelmällä.

Laite	Vaikeusaste			Yhteensä, m
	Helppo	Keskivaikea	Vaikea	
Trimble R10	0,074	0,064	0,169	0,105
Trimble ProXRT 1.2	0,055	0,091	0,233	0,137
Trimble ProXRT 1.1	0,057	0,069	0,439	0,207
Trimble ProXRT 2.0	0,074	0,077	0,485	0,248
Topcon Hiper SR	0,054	0,198	0,407	0,250
Trimble Geo 7x	0,076	0,125	0,493	0,255
Trimble Pro 6H	0,092	0,099	0,658	0,321
Keskiarvo	0,069	0,104	0,411	0,216

Trimble R10 oli odotetusti tarkin laite, jolla päästiin keskiarvillisesti 10,5 cm tarkkuuteen. Helpoilla paikoilla R10 antoi kuitenkin suhteessa muihin huonompia tuloksia ja oli siitä poikkeuksellinen laite, että keskivaikeilla kohteilla tulokset olivat parempia kuin helpoilla pisteillä. Tähän mahdollinen selitys on virhe elektronisen ”vaaituskuplan” kalibroimisessa lisätynä tarpeettoman suureen antennikorkeuteen, mikä voi aiheuttaa merkittävänkin poikkeaman kartoitussauvan kaltevuuden takia. Joka tapauksessa noin kymmenen senttimetrin tarkkuus on hyvä suhteessa tavoitetarkkuuteen, mutta uskon laitteella pystyvän parempiinkin tarkkuuksiin metsäisissä olosuhteissa. Tasaisuudesta kertoo kuitenkin, että kaikki mittaukset täyttivät keveästi metrin laatuvaatimukset suurimman poikkeaman ollessa vain 0,347 metriä.

Trimble ProXRT -vastaanottimet olivat tarkkuudessa seuraavina. Antennikorkeuden vaikutusta käsitellään seuraavassa luvussa, mutta tässä merkille pantavaa on ProXRT 2.0:n huono tarkkuus suhteessa kahteen muuhun vastaavaan laitteeseen, joissa toisessa antennikorkeus oli matala. Etenkin vaikeilla mittauskohteilla ProXRT 2.0 oli vaikeuksissa. Kun tarkastellaan yksittäisiä mittauksia, niistä erottuu kaksi todella huonoa tulosta, jotka pudottavat keskiarvoa huomattavasti. Huonoimmat tulokset olivat 1,416 m ja 2,252 metriä, ja ilman niitä keskiarvo nousisi 0,160 metriin, mikä olisi lähempänä odotusarvoja. Peräti neljä mittausta ylitti metrin raja-arvon. Merkille pantavaa on kuitenkin,

että esimerkiksi Kuopion tukiaseman korjausdataa käyttäen näiden kahden huonoimman tarkkuudet paranisivat huomattavasti lukemiin 0,956 m ja 1,335 m.

Topcon Hiper SR antoi muille laitteille tasoitusta jälkikorjausmenetelmässä. Siksi nämä tulokset olisivat verrattavissa pikemminkin Geotrimin Joensuun tukiasemaan perustuvaan korjaukseen. Joensuun tukiaseman korjausdatan suhteen tehdyt korjaukset antavat R10:n tarkkuudeksi 0,256 m ja ProXRT 1.2:n tarkkuudeksi 0,243 metriä (taulukko 15). Näihin nähden tämä Topconin tulos 0,250 m on erittäin vertailukelpoinen. Täytyy myös huomioida, että Topconin antennikorkeus pidettiin 2,5 metrissä, josta uskoisin olleen apua helpoilla ja vielä keskivaikeilla paikoilla mitattaessa, mutta vaikeimmilla paikoilla vaikutus voi olla negatiivinen. Korjausmenetelmästä ja antennikorkeudesta huolimatta Topcon oli R10:n ohella ainut laite, jolla kaikki tulokset täyttivät metrin vähimmäisvaatimukset.

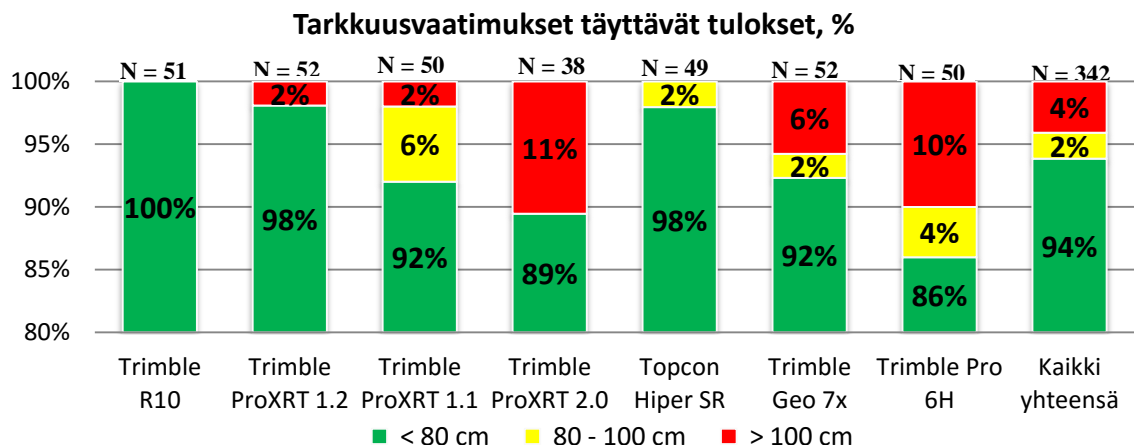
Trimble Geo 7x ja Pro 6H ovat laitevalmistajan mukaan tarkkuudeltaan saman tason laitteita kuin ProXRT-mallisto, mutta jäivät silti tarkkuudessa ja tasaisuudessa reilusti näistä laitteista. Geo 7x:n antennikorkeus oli 2,8 metriä eli antoi siinä hieman tasoitusta monille muille laitteille, mutta helpoilla paikoilla antennikorkeuden ei pitäisi vaikuttaa ja toisekseen ProXRT 1.1 saavutti paremmat tulokset noin 1,5 metrin antennikorkeudella. Huomattavaa on myös kolme yli metrin poikkeamaa.

Trimble Pro 6H antoi huonoimmat tulokset tarkkuudessa sekä suurimman poikkeaman ja yli metrin raja-arvon ylittäneiden paikannusten lukumäärän osalta. Helpoimmilla kohteilla ero muihin laitteisiin oli vain muutaman sentin luokkaa, mutta vaikeimmilla kohteilla erot näkyivät selvemmin keskitarkkuuden ollessa peräti 0,658 metriä. Tarkkuuden epäluotettavuudesta kertoo myös viisi yli metrin poikkeamaa suurimman poikkeaman ollessa lähes 2,5 metriä. Trimble ProXRT 2.0:n ohella myös tämän laitteen kanssa VRS:n älykäs korjaus asetti liian tiukat kriteerit havainnoille ja suodatti siten havaintojen määrän vähäiseksi, mikä näkyy kyllä pienempänä keskihajontana, mutta suurempana poikkeamana. Esimerkiksi Pro 6H:n huonoin tulos 2,452 m oli kahden havainnon tulos keskipoikkeaman ollessa 0,6 metriä. Vastaavasti Kuopion korjausdataa käyttäen käytettyjä havaintoja olisi 1216, keskihajonta 0,9 metriä ja poikkeama 0,767 metriä.

Taulukko 6. Laitteen luotettavuudesta ja tasaisuudesta kertovat suurin poikkeama, lukumäärä rajatapauksista (0,8 – 1 m) sekä yli metrin vähimmäistarkkuuden ylittävistä mittauksista. Tulokset ovat jälkikorjattuja parhaalla käytettävissä olevalla menetelmällä.

Laite	Mittausjaksot	Suurin poikkeama, m	80 – 100 cm	Yli 1 m
Trimble R10	51	0,347	0	0
Trimble ProXRT 1.2	52	1,085	0	1
Trimble ProXRT 1.1	50	1,186	3	1
Trimble ProXRT 2.0	38	2,252	0	4
Topcon Hiper SR	49	0,820	1	0
Trimble Geo 7x	52	1,404	1	3
Trimble Pro 6H	50	2,452	2	5
Keskiarvo	49	2,452	7	2

Tarkkuuden varmuudesta ja luotettavuudesta kertoo vähimmäistarkkuuden saavuttaneet tulokset suhteessa mittausmääriin (kuvio 1). Keskipoikkeamaa oleellisempaa on verrata hyvien, lähes kelvottomien ja kelvottomien tulosten suhdetta. Trimble R10 oli ainoa laite, jolla hyvien tulosten osuus oli täydet 100 %. Myös Topcon Hiper SR täytti jokaisella paikannuksella metrin tarkkuusvaatimuksen, mutta yksi paikannus (2 %) oli rajatapaus. Erittäin kelvolliset tulokset saatiin myös ProXRT 1-sarjan laitteilla 98 % tuloksilla. Matalammalla antennikorkeudella rajatapauksia oli tosin runsaammin. Tässä vertailussa ProXRT 2.0 tulokset erottuivat vielä selvemmin negatiivisessa mielessä tarkkuusvaatimukset täyttävien tulosten ollessa vain 89 prosenttia. Tyydyttävään tulokseen ylsi myös Geo 7x (92 + 2 %), joka oli odotusarvojen mukainen. Sen sijaan Pro 6H:n olisi odottanut olevaan vähintään Geo 7x:n tasolla, mutta jäi vain 86 +4 prosenttiin.



Kuvio 1. Tarkkuusvaatimukset täyttävät tulokset (< 80 cm), niukasti täyttävät (80 – 100 cm) ja ylittävät tulokset prosentuaalisesti suhteessa mittausjaksojen määrään (N).

Havaintoja puolen tunnin jakson aikana tulisi kertyä 1800 eli yksi per sekunti, joista jälkikorjauksen yhteydessä suodatetaan huonoimmat havainnot pois. Trimble R10:n ja Topcon Hiper SR:n jälkikorjauksessa käytettyjen havaintojen määrä on muita suurempi (taulukko 7), mikä oli oletettavaa kun kyseessä ovat lähtökohtaisesti tämän testin parhaat laitteet.

Havaintojen keskihajonta oli kaikilla laitteilla keskiarvollisesti suurempi kuin keski-
poikkeama, mutta yksittäisissä tuloksissa keskihajonta oli muutamissa tapauksissa taso-
poikkeamaa suurempi. Trimble R10:n kohdalla tulos on neliöllinen keskiarvo, joka las-
ketaan hieman eri tavalla, ja siitä myös johtuu muita suurempi lukema.

ProXRT 2.0:n reilusti muita suuremmat DOP-keskiarvolukemat selittyvät yhdellä mit-
tauksella, jossa mm. PDOP-lukema oli yli 800, mutta muuten lukemat olivat linjassaan
muiden kanssa. Satelliittien määrän perusteella ei voida arvioida mittauksen tarkkuutta.
Kyseessä on vain niiden satelliittien määrä, joita jälkikorjauksessa käytettiin, toisin sa-
noen havaittujen satelliittien määrä on enemmän.

Taulukko 7. Mittausarvojen keskiarvolukemia havaintotarkkuuteen oleellisesti vaikutta-
vista tekijöistä. Lukemat ovat peräisin VRS-jälkikorjatuista tuloksista pl. Topcon.

Laite	Havainnot	Keski- hajonta	PDOP	HDOP	Satelliitit
Trimble R10	1750	0,414	3,4	-	14,5
Trimble ProXRT 1.2	1610	0,242	11,2	6,8	18,2
Trimble ProXRT 1.1	1497	0,362	11,6	7,1	17,8
Trimble ProXRT 2.0	1494	0,379	33,3	15,8	18,4
Topcon Hiper SR	1789	-	3,6	1,7	16,8
Trimble Geo 7x	1627	0,427	8,3	4,1	18,0
Trimble Pro 6H	1432	0,388	7,8	4,4	18,1
Keskiarvo	1604	0,368	10,5	6,3	17,4

5.2 Antennikorkeuden vaikutus

Tulokset antennikorkeuden vaikutuksesta olivat ennakko-odotusten mukaisia. Helppoissa ja keskivaikeissa paikoissa antennikorkeudella ei juuri ole merkitystä, mutta vaikeissa kohteissa keskimääräinen poikkeama oli jo 0,206 metriä enemmän matalalla antennilla

(Pro XRT 1.1) verrattuna 4,5 metrissä olevaan antenniin (taulukko 8). Kokonaistarkkuudessa oli 7 cm ero korkeamman antennin hyväksi. Matalampi antennikorkeus antaa hyviä tuloksia, kun laitteiden tarkkuusvaatimukset ovat 1 metri. Täytyy kuitenkin muistaa, että vertailuun ei saatu mukaan todella vaikeita kohteita, joissa antennikorkeuden vaikutuksen voi olettaa kasvavan.

Taulukko 8. Antennikorkeuden vaikutus eri vaikeustason mittauskohteilla. Taulukon tulokset ovat keskiarvopoikkeamia (m) mittausjaksojen kesken. Tasopoikkeamat ovat korjattu Geotrimin VRS-verkon korjausdatalla.

Laite	Vaikeusaste			Yhteensä
	Helppo	Keskivaikea	Vaikea	
Trimble ProXRT 1.1	0,057	0,069	0,439	0,207
Trimble ProXRT 1.2	0,055	0,091	0,233	0,137
Erotus	0,002	-0,022	0,206	0,070

Matalammalla antennikorkeudella havaintojaksoja saatiin 2 vähemmän johtuen tallentimen akun loppumisesta kesken mittauspäivän (taulukko 9). Suurin yksittäinen poikkeama oli matalalla antennilla noin 10 cm enemmän kuin korkealla olevalla antennilla. Yli metrin poikkeamia tuli molemmilla laitteilla yksi kappale, mutta rajatapauksia, jotka ovat lähes kelvottomia tuloksia, tuli matalammalla antennilla merkittävästi enemmän.

Taulukko 9. Yhteenvedo antennikorkeuden vaikutuksesta, jossa nähtävillä havaintojaksojen yhteismäärä, suurin virhe (m) sekä lukumäärä lähes kelvottomista ja kelvottomista tuloksista. Tasopoikkeamat ovat korjattu Geotrimin VRS-verkon korjausdatalla.

Laite	Mittausjaksot	Suurin poikkeama	80 – 100 cm	> 1 m
Trimble ProXRT 1.1	50	1,186	3	1
Trimble ProXRT 1.2	52	1,085	0	1
Erotus	-2	0,101	3	0

Mittaustarkkuuteen vaikuttavat tekijät antennikorkeuksien välillä olivat ennako-odotusten mukaisia arvojen ollessa heikompia matalammalla antennikorkeudella (taulukko 10). Havaintojen keskiarvomäärä jäi pienemmäksi, havaintojen keskihajonta jäi suuremmaksi, DOP-lukemat olivat suurempia sekä satelliittien määrä jäi pienemmäksi.

Nämä tulokset ovat VRS-jälkikorjauksen jälkeen, josta huonoimpia havaintoja on karsittu pois. Vertailun vuoksi taulukossa 11 samaiset tulokset ovat korjaamattomana, jotta nähdään jälkikorjauksen vaikutus.

Taulukko 10. Mittausarvojen keskiarvolukemia havaintotarkkuuteen oleellisesti vaikuttavista tekijöistä. Lukemat ovat peräisin VRS-jälkikorjatuista tuloksista.

Laite	Havainnot	Keskihajonta, m	PDOP	HDOP	Satelliitit
Trimble ProXRT 1.1	1497	0,362	11,60	7,10	17,84
Trimble ProXRT 1.2	1610	0,242	11,22	6,84	18,21
Erotus	-113	0,120	0,38	0,26	-0,37

Taulukko 11. Ylemmän taulukon mukaiset lukemat vertailun vuoksi korjaamattomana.

Laite	Havainnot	Keskihajonta, m	PDOP	HDOP	Satelliitit
Trimble ProXRT 1.1	1805	1,194	3,41	1,99	19,98
Trimble ProXRT 1.2	1799	0,881	2,16	1,05	20,35
Erotus	6	0,313	1,25	0,94	-0,37

5.3 Jälkikorjausmenetelmien vertailu

Jälkikorjauksessa oletuksen mukaan tarkimpiin tuloksiin päästään käyttämällä lähintä mahdollista tukiasemaa. Toisin sanoen tarkimpiin tuloksiin päästään yleensä VRS-menetelmillä, joissa luodaan virtuaalinen tukiasema lähelle mittauskohteita. Suomessa on kuitenkin tarjolla monia korjauspalveluita, joissa on koko Suomen kattava tukiasemaverkosto, ja joita käyttämällä on mahdollista päästä hyviin tarkkuuksiin.

Virtuaalista tukiasemaa käyttäen tulokset ovat keskimääräisesti parhaita (taulukko 12). VRS-korjaus manuaalisilla asetuksilla antaa huonon keskiarvon, sillä liian tiukaksi määritetyt asetukset karsivat havaintojen määrää ratkaisevan paljon etenkin vaikeilla paikoilla. Kuopion tukiasemaa käyttäen saa lähes yhtä hyvät tulokset kuin virtuaalista tukiasemaa käyttäen, sillä etäisyys ei kasva merkittävästi. Joensuun ja Rovaniemen tukiaseman suhteen tehdyt korjaukset taas kertovat etäisyyden vaikutuksen.

Taulukko 12. Yhteenveto eri korjausmenetelmien tarkkuuksista (m). Korjaamattomat tulokset ovat havainnollistamassa jälkikorjauksen vaikutusta, eikä niitä ole laskettu keskiarvoriville. Vertailusta puuttuu Topcon ja R10:ltä puuttuu VRS Manual.

Korjaustapa	Keski- poikkeama	> 1 m	Suurin poikkeama
<i>Korjaamaton</i>	1,452	32	6,421
VRS Smart	0,210	2	2,452
VRS Manual	0,415	7	3,346
Kuopio	0,239	2	1,909
Joensuu	0,329	3	1,831
Rovaniemi	0,572	5	2,369
Keskiarvo	0,353	4	2,381

5.3.1 Korjausohjelmiston asetukset

VRS-korjausdataan perustuen tehtiin Trimble Pathfinder Officella jälkikorjaus kaksilla eri asetuksilla: automaattisilla älykkäillä asetuksilla sekä tiukoilla manuaalisesti asetuilla raja-arvoilla. Manuaalisella korjauksella pyrittiin hyödyntämään vain parhaita havaintoja satelliittigeometrialtaan ja signaali-kohinasuhteeltaan. Näin ajateltuna sen pitäisi antaa parempia tuloksia, mutta oletuksenkin mukaan osassa mittauksissa ei välttämättä olisi kuin muutama tai pahimmassa tapauksessa ei yhtään raja-arvot täyttävää havaintoa, mikä taas ei ole paikannuksen luotettavuuden tai toimivuuden kannalta hyvä. Jokaisesta paikannuksesta kuitenkin saatiin tulos näilläkin kriteereillä, mutta osassa vaikeimmista paikoista havaintojen määrä jäi hyvin pieneksi, mistä kertoo taulukon 13 keskiarvolukemat havaintojen määristä.

Taulukko 13. VRS-korjauksen laitekohtainen vertailu erilaisten jälkikorjausohjelmaan syötettyjen asetusten välillä. VRS Smart on automaattinen korjaus ja VRS Manual tarkoittaa manuaalisesti asetettuja asetuksia (Max PDOP 2, SNR 43, korkeusmaski 15°).

Laite	VRS Smart			VRS Manual		
	Poikkeama, m	Havainnot	> 1 m	Poikkeama, m	Havainnot	> 1 m
Trimble ProXRT 1.1	0,207	1497	1	0,516	1240	11
Trimble ProXRT 1.2	0,137	1610	1	0,236	1350	3
Trimble ProXRT 2.0	0,248	1494	4	0,526	1303	9
Trimble Pro 6H	0,321	1432	5	0,429	1175	7
Trimble Geo 7x	0,255	1627	3	0,402	1148	5
Keskiarvo	0,232	1535	3	0,415	1241	7

Helppoilla kohteilla tiukoilla asetuksilla päästään lähes samoihin tuloksiin, mutta vaikeimmilla kohteilla erot näkyvät selvästi (taulukko 14). Yksittäisiä paikannuksia verrattaessa manuaalisilla asetuksilla päästiin vain muutamissa tapauksessa älykkäitä asetuksia parempiin tuloksiin, mutta yleensä puhuttiin vain muutamasta millistä ja yksittäisissä tapauksissa maksimissaan noin 10 cm erosta. Vaikeilla kohteilla tarkkuus jää manuaalisilla asetuksilla lähes kaksi kertaa huonommaksi. Se kertoo siitä, että vaikeilla kohteilla täytyy käyttää paikannukseen niitä havaintoja mitä saadaan, eikä karsia niitä minimiin. Etenkin matalan antennikorkeuden ProXRT oli vaikeuksissa vaikeilla paikoilla manuaalisten asetusten kanssa, vaikka havaintoja verrattuna muihin laitteisiin oli keskiarvoisesti kohtuullinen määrä.

Taulukko 14. VRS-korjauksen laitekohtainen tarkkuuden vertailu (m) vaikeusasteittain erilaisilla jälkikorjausohjelmiston asetuksilla.

Laite	Helppo		Keskivaikea		Vaikea	
	VRS Smart	VRS manual	VRS Smart	VRS manual	VRS Smart	VRS manual
Trimble ProXRT 1.1	0,057	0,057	0,069	0,170	0,439	1,147
Trimble ProXRT 1.2	0,055	0,057	0,091	0,105	0,233	0,474
Trimble ProXRT 2.0	0,074	0,076	0,077	0,126	0,485	1,101
Trimble Geo 7x	0,076	0,097	0,125	0,164	0,493	0,824
Trimble Pro 6H	0,092	0,079	0,099	0,142	0,658	0,896
Keskiarvo	0,071	0,074	0,093	0,142	0,461	0,877

5.3.2 Yksittäisen tukiaseman etäisyyden vaikutus

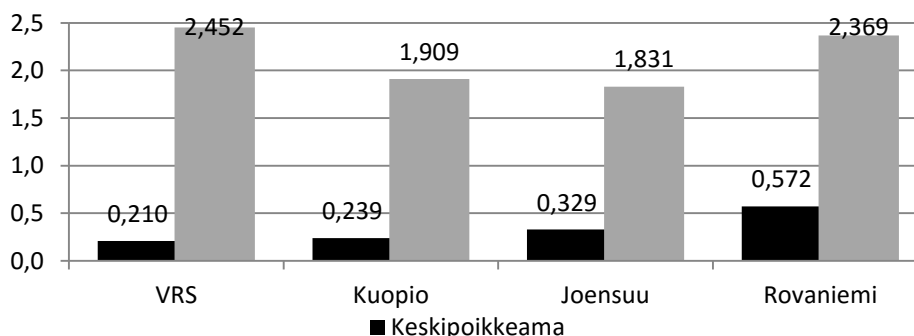
Tukiaseman etäisyyden vaikutukset tarkkuuteen olivat oletusten mukaisia. Mitä kauempana tukiasema on, niin sitä epätarkempi tulos (taulukko 15). Kuopion tukiaseman suhteen lasketut tulokset ovat parhaita, jos VRS-palvelua ei lasketa mukaan. Joensuun tukiaseman korjausdataa käyttäen pyrimme simuloimaan tilannetta, jossa lähin tukiasema ei olisi toiminnassa tai käytössä olisi Paikkatietokeskuksen korjauspalvelu, jonka tukiasemaverkosto on huomattavasti harvempi kuin Geotrimilla. Merkittäviä eroja Kuopion ja Joensuun tukiasemien välillä ei ole, puhutaan noin kymmenestä sentistä. Rovaniemen tukiaseman suhteen tarkkuus luonnollisesti heikkenee huomattavasti. Kun katsoo Joensuun ja Rovaniemen tukiasemien suhteen laskettuja tarkkuuksia, voi todeta tarkkuuden heikentyvät noin 10 cm/100km. Joensuun tukiasema sijaitsee reilun 100 km

päässä ja Rovaniemen tukiasema reilun 400 kilometrin päässä. Tarkkuuserot Joensuun ja Rovaniemen korjauksilla suhteessa VRS-korjattuun tarkkuuteen ovat 0,119 ja 0,362 metriä.

Taulukko 15. Yksittäisten tukiasemien laitekohtainen tarkkuus (m) ja yli metrin poikkeamien lukumäärä suhteessa virtuaalista tukiasemaa käyttävään VRS-palveluun sekä tukiaseman etäisyyden vaikutus tarkkuuteen.

Laite	VRS Smart		Kuopio		Joensuu		Rovaniemi	
Trimble ProXRT 1.1	0,207	1	0,244	3	0,363	2	0,517	7
Trimble ProXRT 1.2	0,137	1	0,160	1	0,243	2	0,430	2
Trimble ProXRT 2.0	0,248	4	0,268	3	0,403	5	0,562	4
Trimble Pro 6H	0,321	5	0,343	5	0,385	5	0,565	5
Trimble Geo 7x	0,255	3	0,299	2	0,346	2	0,573	8
Trimble R10	0,105	0	0,129	0	0,256	1	0,782	5
Keskiarvo	0,210	2	0,239	2	0,329	3	0,572	5

Kuviosta 2 voi vertailla diagrammin muodossa tarkkuuden heikentymistä tukiaseman etäisyyden mukaan. Suurin yksittäinen poikkeama taas ei ole linjassaan johtuen laitteiden tarkkuus -luvussa mainituista ongelmista ProXRT 2.0:n ja Pro 6H:n kanssa. Tämänkin pohjalta voi ihmetellä, miksi kyseisillä laitteilla VRS-korjauksella muutama yksittäinen korjaus on mennyt niin pieleen, että korjausohjelman asetuksilla Rovaniemen tukiaseman suhteen suurin poikkeama on pienempi. Esimerkiksi VRS:n huonoin tarkkuus oli Pro 6H:n 2,452, mutta sama paikannus Rovaniemen tukiaseman suhteen tehdyllä korjauksella tarkkuus oli peräti 0,955. Jos jätetään ProXRT 2.0 ja Pro 6h pois laskuista, niin VRS-korjauksen suurin poikkeama olisi 1,404 metriä, mikä olisi paremmin vertailukelpoinen muiden korjausmenetelmien suhteen.




Kuvio 2. Keskiarvoiset poikkeamat sekä suurimmat yksittäiset poikkeamat (m) eri jälkikorjausmenetelmillä. Mukana vertailussa kaikki laitteet lukuun ottamatta Topconia.

5.4 Laitteiden ergonomia ja käytettävyys

Laitteiden käsittely ja ergonomia ovat kiinni paljon vastaanottimen lisävarusteluista. Itse vastaanotin voi olla yksittäin helppo kantaa, mutta kokonaisuus ratkaisee. Vastaanotin vaatii lisäksi antennin, tallentimen, kartoitussauvan ja kolmijalat. Osassa laitteissa on sisäänrakennettuna antenni ja/tai tallennin (taulukko 16). Mitä vähemmän erillisiä osia laite vaatii, niin sitä helpompi sitä on teoriassa käsitellä. Kuljetusrepulla tai muilla mahdollisilla varusteluilla on mahdollista parantaa ergonomiaa. Oleellista on myös laitteen toimivuus metsäisissä olosuhteissa ja akun kesto.

Taulukko 16. Vastaanottimien ergonomiaan ja käytettävyyteen liittyviä tekijöitä.

Trimble Pro 6H	Trimble Pro XRT	Trimble Geo7x	Trimble R10	Topcon Hiper SR
				
Vastaanottimen omapaino (sis. akun), g				
1040	1550	1080	1120	850
Integroitu antenni				
kyllä	ei	kyllä*	kyllä	kyllä
Vastaanottimien mitat, cm				
20,4 x 13,8	24 x 12 x 5	23,4 x 9,9 x 5,6	11,9 x 13,6	15 x 15 x 6,4
Vastaanottimen akun kesto, h				
> 12 vaihdettava	13 kiinteä	10,5 vaihdettava	5,5 vaihdettava	> 20 kiinteä

* vaatii erillisen antennin mittauksissa, joissa antenni joudutaan nostamaan ylös

Käyttökokemusten valossa Topcon Hiper SR antoi parhaimman vaikutelman. Hiper SR on Trimblen vastaavaa laitetta kevyempi, ja litteän muotoilunsa vuoksi se ei ole niin herkkä tuulelle kuin Pro 6H tai R10. Laite on helppo kiinnittää kartoitussauvan päähän, ja se toimii myös antennina. Akun kesto on muihin nähden ylivoimaisesti paras, mutta kiinteä akku voidaan nähdä puutteena. Koska akkua ei voida vaihtaa, niin laite on aina muistettava ladata täyteen ennen käyttöä. Laitteen ohjaamiseen käytettiin Topcon FC-336 -maastotietokonetta, joka oli näppärä taskuun mahtuva malli.

Toiseksi parhaan käyttökokemuksen antoi Trimble R10. Vastaanotin on itsessään toiseksi painavin näistä malleista mutta ei vaadi erillistä antennia ja on muotoilultaan Pro6H:ta parempi. Laitteessa on adapteri, jonka avulla laite on helppo kiinnittää kartoit-

tussauvaan. Laitteiden painoissa erot ovat hyvin pieniä, joten kokonaisuus ratkaisee. Akun kesto R10:llä on vähäisin, vain 5,5 tuntia, mutta vaihdettava akku mahdollistaa pidemmänkin mittauspäivän. Tallentimena käytimme Trimblen tablettia, joka lisäsi painoa merkittävästi. Iso näyttö ja laajat käyttömahdollisuudet ovat kuitenkin eduksi. Laitteissa pystytään käyttämään myös muita tarkoitukseen sopivia tallentimia, kunhan vain ohjelmistot ovat yhteensopivia.

Edullisempien laitteiden sarjasta Trimble Pro 6H ja Geo 7x antoivat parhaan vaikutelman, joissa molemmissa on omat hyvät ja huonot puolensa. Pro 6H:ssa on sisäänrakennettu antenni, joka on helppo liittää kartoitussauvaan. Muodoltaan Pro 6H oli kaikkein herkin tuulelle suurikokoisuutensa vuoksi. Laite on kevyt mutta isokokoinen. Akun kesto on yli 12 tuntia ja se on myös mahdollista vaihtaa. Tallentimena käytettiin Trimble Juno 5 -laitetta, joka osoittautui ongelmalliseksi tämän ja myös Pro XRT 2.0 -laitteen kanssa. Erityisesti tallentimen akun kesto oli heikko ja bluetooth-yhteys katkeili tallentimen ja laitteen välillä.

Trimble Geo 7x -kämmenmikro on laitteena monipuolinen sisältäen sekä sisäänrakennetun antennin, tallentimen että myös etäisyysmittarin. Tosin tehtäessä pitkäkestoista staattista mittausta, jossa antenni joudutaan nostamaan ylös, niin silloin laitteen sisäänrakennettu antenni ei tule kysymykseen. Käytännössä mittaus vaatii erillisen antennin ja kaapelin vastaanottimelta antennille. Vastaanotin itsessään on kevyt ja antenni ei juuri lisää painoa, etenkin kun tämä ei vaadi erillistä tallenninta. Laitteen akun kesto on hyvä ja se on mahdollista myös vaihtaa.

Käyttömukavuudeltaan huonoimman vaikutelman antoi Trimble ProXRT, joita meillä oli käytössä kolmin kappalein. Vastaanotin on suurikokoinen ja laitetestin painavin. Lisäksi se vaatii pitkän kaapelin vastaanottimelta erilliselle antennille. Vastaanotin pakollisine lisävarusteluineen (antenni, tallennin, kartoitussauva ja kolmijalat) on hankala kantaa. Käyttömukavuutta ja ergonomiaa on kuitenkin helppo lisätä kuljetusrepun avulla, jossa vastaanotin kulkee helposti mukana. Laitteen akun kesto on valmistajan mukaan 13 tuntia, ja vaikka se on kiinteä, niin se riittää hyvin päivän mittauksiin.

5.5 Tarkkuuksien luotettavuuden arvioiminen paikannusdatasta

Saatujen tulosten pohjalta selvitettiin, kuinka arvioida paikannusten luotettavuuksia tilanteissa, joissa paikannettavan pisteen koordinaatteja ei ole tiedossa. Kun paikannuslaitteesta siirretään raakadata paikkatieto-ohjelmistoon ja se jälkikorjataan asianmukaisin menetelmin, antaa se koordinaattien lisäksi tiettyjä mm. paikannuksen luotettavuuteen liittyviä arvoja. Metsäkeskuksen käytössä ja myös tässä tutkimuksessa on käytetty Pathfinder Officen uusinta versiota 5.70. Tulosten luotettavuutta voi arvioida tarkastelemalla keskihajontaa sekä tarkkuusestimaattia, jonka luottamusväliä on mahdollista säätää: 68 % (oletus), 95 % sekä 99 %.

Pathfinder Office antaa paikannukselle tarkkuusestimaatin asetetun luottamusvälin mukaan. Luottamusvälit ilmaisevat virhemarginaalin eli käytännössä ilmaistuna ”todellinen tulos on x %:n varmuudella näiden rajojen sisällä”. Tutkimuksena oli selvittää kerätystä aineistosta, mitä luottamusväliä käyttäen saadaan todenmukaisin tarkkuusestimaatti. Keskiarvillisesti lähimpänä on 95 %:n luottamusväli (taulukko 17), mutta keskiarvon sijaan oleellisempaa on erottaa huonot paikannukset.

Taulukko 17. Keskiarvotulokset laitekohtaisesti eri luottamusväleillä suhteessa todelliseen keskiarvoon.

Laite	Keski-poikkeama	Tarkkuusestimaatti eri luottamusväleillä, m		
		68 %	95 %	99 %
Trimble Geo 7x	0,255	0,138	0,263	0,350
Trimble Pro 6H	0,321	0,116	0,220	0,298
Trimble ProXRT 1.1	0,207	0,138	0,256	0,356
Trimble ProXRT 1.2	0,137	0,115	0,221	0,292
Trimble ProXRT 2.0	0,248	0,121	0,232	0,318
Kaikki yhteensä	0,232	0,126	0,239	0,323

Todellisemman kuvan saa vertailemalla tarkkuusestimaattien tarkkuutta suhteessa todelliseen poikkeamaan paikannuskohtaisesti laitteittain (liite 6). Suurinta luottamusväliä (99 %) käytettäessä estimaatit ovat luonnollisesti suurempia, mutta myös sillä suurimmat yksittäiset poikkeamat ylittävät luottamusvälin rajat. Kun mitataan metsäisissä olosuhteissa vaikeilla paikoilla, niin luottamusvälien prosenttilukemat eivät pidä paikkaansa. Tällä aineistolla todelliset luottamusvälit eli prosentuaalinen suhde tarkkuusestimaatin sisällä olevista tuloksista on laskettu taulukossa 18.

Taulukko 18. Todellinen luottamusväli laitekohtaisesti verrattuna Pathfinder Officessa asetettuun luottamusväliin.

Laite	Todellinen luottamusväli		
	68 %	95 %	99 %
Trimble Geo 7x	42 %	79 %	79 %
Trimble Pro 6H	34 %	60 %	64 %
Trimble ProXRT 1.1	60 %	80 %	86 %
Trimble ProXRT 1.2	60 %	92 %	96 %
Trimble ProXRT 2.0	55 %	79 %	84 %
Kaikki yhteensä	50 %	78 %	82 %

Tarkkuusestimaatin ohella keskihajonta on toinen tärkeä lukema arvioitaessa paikannustarkkuutta. Keskihajonta on useimmissa tapauksissa hieman suurempi kuin itse paikannustarkkuus (liite 7). Aina siihen ei voi kuitenkaan täysin luottaa. Havaintojen määrä tekee keskihajonnasta luotettavamman. Havaintojeni perusteella vähän havaintoja sisältäneiden paikannusten keskihajonta saattoi jäädä huomattavasti pienemmäksi kuin lopullinen tarkkuus. Keskihajonta oli monessa tapauksessa todella suuri, jopa yli metrin enemmän kuin todellinen poikkeama, eli suuri keskihajonta ei välttämättä tarkoita huonoa paikannustarkkuutta.

6 Pohdinta

6.1 Tulosten tarkastelu

Tuloksia tarkastellessa ei voida pohjautua suoraan aiempiin tutkimuksiin, sillä täysin vastaavia tutkimuksia ei ole tehty. Tarkkuuden tutkimuksia GNSS-laitteilla on tehty monia, mutta erilaisella kokoonpanolla, erilaisissa olosuhteissa ja eri aikakausina. Satelliittipaikannus on kehittynyt kovaa tahtia, jossa jo muutama vuosi tarkoittaa merkittävää tekniikan kehittymistä.

Yleisellä tasolla tulokset ovat vertailukelpoisia aikaisempiin tutkimuksiin. Tämä on yksittäisenä tutkimuksena hyvin monipuolinen useine tutkimusongelmineen.

6.1.1 Laitteiden tarkkuus

Tutkimuksen pääasiallisena tarkoituksena oli selvittää yltävätkö Metsäkeskuksen nykyisin käytössä olevat paikannuslaitteet jälkikorjattuna metrin tarkkuusvaatimukset täyttäviin tasotarkkuuksiin. Tulosten mukaan ainoastaan yksi paikannus viidestäkymmenestä kahdesta jäi hieman vaaditusta tarkkuudesta. Tavoitetarkkuuksiin ylettiin Metsäkeskuksen Trimble ProXRT -vastaanottimilla molemmilla antennikorkeuksilla 98 prosenttisesti. Varmuus ja keskipoikkeama tekivät näistä laitteista tämän laitetestin parhaat edullisemmän tason paikantimista.

Nykyisten laitteiden hyvä tarkkuustaso ei anna välitöntä syytä vaihtaa kalustoa luokkaa tarkempiin laitteisiin. Luonnonvarakeskuksen VMI-mittauksissa käyttämä Topcon Hyper SR oli Paikkatietokeskuksen korjausdataa käyttäen tuloksiltaan luotettavan tarkka eli VMI-mittausten tuloksia voinee käyttää huoletta referenssikoealojen puustotunnusten keräämisessä. Trimble R10 antoi parhaat tulokset ja oli vakuuttava etenkin kaikista vaikeimmilla kohteilla ollen Topconin kanssa ainoa laite, jolla ylettiin 100 prosenttisesti tavoitetarkkuuksiin. Valitettavasti laitetesti ei sisältänyt todella haastavia mittauskohteita, joissa laitteiden erot olisivat todennäköisesti erottuneet selvemmin.

Trimble ProXRT 2.0 ja Pro 6H yllättivät testissä negatiivisesti. Mielenkiintoinen yksityiskohta on, että molemmat käyttivät Trimble Juno 5 -tallenninta. Kyseinen tallennin jätti havaintoja välistä ilmeisesti bluetooth-yhteyden katkoksien takia sekä akun keston kanssa oli ongelmia. Myös VRS-korjaus toimi muista poikkeavalla tavalla kun katsotaan paikannuksessa käytettyjen havaintojen lukumäärää, niin kyseiset laitteet miehittivät häntäpään. Tallentimen itsessään ei pitäisi vaikuttaa tarkkuuteen ja pienien bluetooth-yhteydestä johtuvien katkoksien ei tulisi vaikuttaa näin merkittävästi puolen tunnin mittausjakson aikana.

Todennäköisin syy löytynee kuitenkin antennista. ProXRT 2.0:n kanssa käytettiin Tornado-antennia, joka on noin puolta edullisempi kuin Zephyr Model 2 ja näin ollen myös huonompi. Maahantuojan mukaan antennin erojen ei tulisi näkyä kuin käyttämällä tallentimen ohjelmistona TerraSync Senttimetri-versiota, joka on tarkempi kuin tässä tutkimuksessa käytössä ollut TerraSync Pro -ohjelmisto, jossa antennin erojen ei siis pitäisi näkyä. Tulosten mukaan siinä on kuitenkin merkittävä ero paikannustarkkuuden kuin

havaintojen laadunkin perusteella. Voi olla myös mahdollista, että antennissa tai laitteessa itsessään olisi ollut rakenteellinen tai aiemmassa käytössä tullut vika, joka aiheutti tarkkuuden heikentymistä, mutta en pidä sitä todennäköisenä. Trimble Pro 6H:n sisäänrakennetusta antennista ei ole tarkempia tietoja, mutta se ei kuitenkaan liene ainaakaan samaa tasoa Zephyrin kanssa, ja ei ehkä edes Tornadon kanssa. Geo 7x taas todennäköisesti hyötyi Zephyrin antennista suhteessa Pro 6H:hon. Tornadon antennilla tulokset olisivat voineet olla samaa luokkaa näiden kahden laitteen välillä.

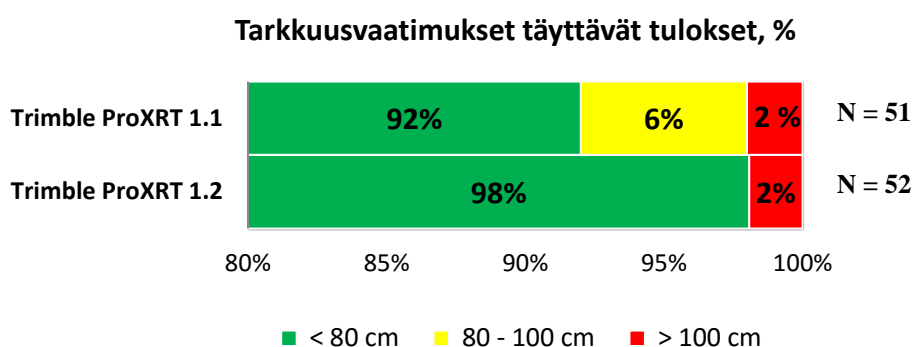
Antennin merkitys tarkkuuteen on näiden pohdintojen mukaan huomattava. Hyvä vastaanotin ei takaa hyvää tarkkuutta, vaan se vaatii myös hyvän antennin. Tutkimuksen alkuperäisenä tarkoituksena ei ollut tutkia antennin vaikutusta tarkkuuteen, mutta tämä havainto on hyvin merkityksellinen. Metsäkeskuksen nykyisin käytössä olevissa vastaanottimissa valtaosassa antennimallina on huonommaksi todettu Tornado. Toisin sanoen tämä testi väärästi todellisia tuloksia. Laite todettiin hyväksi, mutta antenni ei vakuuttanut. Tämän argumentin mukaan kaluston päivittäminen olisi ehkä sittenkin tarpeellista vähintään antennien osalta mittaustarkkuuksien luotettavuuksien varmistamiseksi.

Manzera, Mauro, Rodriguez-Solano, & Valbuena (2010) ovat tutkineet GNSS-laitteiden tarkkuutta metsäisissä olosuhteissa laitteilla Leica SR530 Topcon Hiper Pro ja Topcon GMS2. Keskivirheet 30 minuutin paikannuksessa differentiaalisen korjauksen kanssa olivat 0,657 (SR540), 0,672 (GMS2) ja 0,935 (Hiper SR). Keskivirheet ovat huomattavasti suurempia kuin tässä tutkimuksessa saadut tulokset, mutta lähtökohdatkaan eivät olleet samat. Viiden vuoden kehitys tekniikassa ja uudemmat paikannuslaitteet huomioidaan ottaen tuloksia näiden kahden tutkimuksen välillä voidaan pitää linjassaan.

6.1.2 Antennikorkeuden vaikutus

Toinen tutkimusongelma oli selvittää antennikorkeuden vaikutus tarkkuuteen. Tulosten mukaan sillä on vaikutusta, mutta ei niin merkittävää kuin olisi voinut olettaa. Molemmilla antennikorkeuden vertailussa käytettävillä laitteilla päästiin lähes yhtä varmasti tavoitetarkkuuteen. Molemmilla laitteilla oli ainoastaan yksi yli metrin poikkeama, mutta pienen eron tekee korkeamman antennikorkeuden laitteelle mittausjaksojen suurempi

määrä sekä pienempi suurin yksittäinen poikkeama. Selvimmin eron näkee tarkastelemalla rajatapauksia, jossa matalammalla antennikorkeudella neljä (8 %) paikannusta oli tarkkuudeltaan huonompia kuin 0,8 metriä (kuvio 3). Voi olettaa, että vähänkään vaikeammissa olosuhteissa nämä rajatapaustulokset eivät olisi enää täyttäneet kriteerejä. Lisäksi täytyy huomioida, että vaikka vähimmäistarkkuus on yksi metri, niin suositeltavaa olisi kuitenkin yltää parempiin tarkkuuksiin. Matalampi antennikorkeus ei missään nimessä ole sovelias etenkin vaikeilla mittauskohteilla, jos halutaan luotettavasti tarkkoja tuloksia metsäisissä olosuhteissa.



Kuvio 3. Hyvien, tyydyttävien ja huonojen paikannusten suhdelukujen vertailu antennikorkeuksien välillä.

Tarkemmin antennikorkeuden vaikutusta voidaan arvioida tarkastelemalla keskipoikkeamia testikoealoittain (liite 4, taulukko 20). Sen mukaan kaikkein vaikeimmalla testikoealalla keskipoikkeama oli lähes tuplasti isompi matalalla antennikorkeudella mitattaessa. Myös kahdella muulla vaikeaksi määritetyllä pisteellä (2 ja 8) antennikorkeudella oli huomattava vaikutus etenkin koealalla 2, jossa keskipoikkeama oli lähes viisinkertainen. Vastaavasti taas kokonaistulosten mukaan toiseksi vaikeammilla koealalla (3) matalammalla antennikorkeudella tulokset olivat yllättäen hieman parempia. Tähän löytyy uskoakseni selitys puuston ominaisuuksista. Koealalla 3 puusto on hyvin kookasta, jossa 4,5 metrin antennilla ei juuri saavuteta parempaa näkyvyyttä. Koealat 2 ja 8 ovat taas nuorempaa ja matalampaa, mutta hyvin tiheää kuusikkoa, jossa 1,5 metrin ja 4,5 metrin väliin jää paljon peittävää oksistoa ja näin ollen korkeammalla antennilla päästään paljon peitteettömämpään mittauspaikkaan.

Antennikorkeuden vaikutus riippuu siis paljon mittauskohteen vaikeudesta ja antennikorkeus täytyy arvioida kohteittain. Helpoilla kohteilla antennikorkeuden voi jättää al-

haisemmaksi sen vaikuttamatta merkittävästi paikannustarkkuuteen. Avoimilla paikoilla on jopa suositeltavaa jättää antennia hieman alemmaksi etenkin tuulisella säällä. Vaikeilla kohteilla, etenkin kookkaat tai tiheät kuusikot, antenni olisi suositeltavaa nostaa edelleen 4,5 metriin paikannustarkkuuden varmistamiseksi. Helppimillakin kohteilla (aukeat ja matalat taimikot) olisi suositeltavaa nostaa antenni vähintään 2–2,5 metriin, jotta mittaaajan ympärillä pyöriminen ja aluskasvillisuus eivät vaikuta satelliittisaatavuuteen, ja saa paremman näkyvyyden taivaalle ja horisonttiin.

Brach, M. & Grala (2009) tutkivat antennikorkeuden vaikutusta metsäisissä olosuhteissa käyttämällä 5, 10 ja 15 metrin antennia. Paras keskiarvopoikkeama tuli viiden metrin antennilla (0,12 m), kun taas 15 metrin antennilla keskiarvopoikkeama oli 0,29 metriä. Tutkimuksen mukaan korkeimmalla antennilla sai parhaan yhteyden tukiasemaan ja korjauksen laatu oli useimmissa tapauksissa parempi kuin muilla antennikorkeuksilla. Huonompi keskiarvopoikkeama selittyy kuitenkin kartoitussauvan liikkeestä, sillä 15 metrin alumiinisauva on epävaka. Tämä sama havainto tulee ilmi myös tässä tutkimuksessa, jossa todettiin jo noin 4,5 metrin tai korkeamman antennin epävaka avonaisilla ja tuulisilla kohteilla (Trimble R10:n tulokset helpoimman vaikeustason kohteilla).

6.1.3 Jälkikorjausmenetelmien vertailu

Kolmas tutkimusongelma oli selvittää millä jälkikorjausmenetelmillä ja asetuksilla päästään parhaimpiin tuloksiin sekä simuloida yksittäisen tukiaseman etäisyyden vaikutusta tarkkuuteen. Tulokset olivat näiden suhteen varsin odotettuja. Jälkikorjausohjelmistossa Trimble Pathfinder Officessa vertailtiin paikannustarkkuuksia älykkäillä asetuksilla sekä manuaalisesti asetetuilla tiukoilla asetuksilla. Vain muutamissa tapauksissa manuaalisilla asetuksilla päästiin hieman parempiin tuloksiin, mutta kokonaisuutena älykkäät asetukset olivat huomattavasti varmempia ja niillä pääsi tasaisesti hyviin tuloksiin.

Yksittäisillä tukiasemilla simuloitiin tukiaseman etäisyyden vaikutusta paikannustarkkuuteen. Alkuperäinen tarkoitus oli vertailla Geotrimin jälkikorjauspalvelua ilmaiseen Paikkatietokeskuksen korjauspalveluun, jonka tukiasemat ovat huomattavasti harvemmassa. Valitettavasti jälkikorjausohjelmisto ei ollut yhteensopiva Paikkatietokeskuksen

korjausdatan kanssa, mikä pakotti simuloimaan etäisyyden vaikutusta vain Geotrimin palvelun sisällä käyttäen etäämpänä sijaitsevia tukiasemia. Tukiaseman etäisyydellä on odotetusti huomattava vaikutus tarkkuuteen (noin 10 cm/100 km). Luotettavien tulosten takaamiseksi olisi suositeltavaa käyttää maksimissaan noin sadan kilometrin säteellä olevaa tukiasemaa.

Poikkeuksena Topconin tulokset korjattiin laitetta lainanneen Luonnonvarakeskuksen toimesta, ja jonka korjauksissa käytettiin Paikkatietokeskuksen noin 120 kilometrin päässä sijainneen tukiaseman korjausdataa. Mikäli vertailtaisiin tarkkuuksia Topconilla Paikkatietokeskuksen Kivetyt tukiaseman ja muilla laitteilla Geotrimin Joensuun tukiaseman (joka sijaitsee noin samalla etäisyydellä) suhteen, niin Paikkatietokeskuksen korjausdata Topconin laitteella oli erittäin vertailukelpoista suhteessa Geotrimin tukiasemien korjausdataan.

Laitetestin referenssipisteiden sijainnit olivat siinä mielessä hankalat Paikkatietokeskuksen korjauspalvelun suhteen, sillä ne sijaitsivat lähes mahdollisimman kaukana lähimmästä tukiasemasta. Paikkatietokeskuksen korjausdata on varmasti kelvollista, mutta harva tukiasemaverkosto voi olla ongelmallinen. Tästä asiasta ei kuitenkaan saatu kattavaa ja luotettavaa aineistoa tarkempiin johtopäätöksiin.

6.1.4 Tarkkuuksien luotettavuuden arvioiminen paikannusdatasta

Mikäli halutaan erottaa tarkkuusestimaatteja tarkastelemalla myös ne huonoimmat paikannukset, on suositeltavaa käyttää 99 %:n luottamusväliä. Se ei ole tarkkojen paikannusten arviointiin mutta ehdottomasti tarkkojen huonojen paikannusten arviointiin, mikä on oleellisempaa. Merkille pantavaa on kuitenkin tarkat 99 %:n luottamusvälin estimaatit heikoimpien paikannusten osalta Trimble ProXRT 1.2 -laitteella. Kyseessä oli tässä vertailussa mukana olleista laitteista tarkkojen. Kun tarkastellaan myös muiden laitteiden todellisia luottamusvälejä, voidaan todeta laitteen todellisen tarkkuuden vaikuttavan tarkkuusestimaattien luotettavuuteen.

Paikannuksen luotettavuutta arvioidessa kannattaa käyttää hyödykseen tarkkuusestimaattia yhdessä keskihajonnan kanssa. Näiden tulosten pohjalta olisi suositeltavaa käyt-

tää luottamusvälinä 99 %:ia tai vähintään 95 %:ia. Näin saadaan parhaiten erotettua karkeat virheet ja arvioida tarvetta uudelle paikannukselle.

6.2 Tutkimuksen luotettavuus

Ensimmäinen luotettavuuteen vaikuttava tekijä on referenssipisteiden tarkkuus. Testiradan rakentamisessa aika ja resurssit eivät mahdollistaneet absoluuttisen tarkkoja koordinaatteja referenssipisteille. Voidaan kuitenkin luottaa siihen, että niiden tarkkuus on muutaman senttimetrin sisällä todellisuudesta. Muutaman sentin mahdollinen poikkeama ei käytännössä vaikuta tulosten luotettavuuteen, sillä tavoitteiden mukaan laitteiden vähimmäistarkkuus on 1 metri. Luotettavuutta haettiin samanaikaisilla paikannuksilla, minkä vuoksi jouduimme tekemään jokaiselle laitteelle oman referenssipisteen yhden koealan sisälle. Vaikka referenssipisteet yhden koealan sisällä olivat lähekkäin, niin tosiasiasa niiden olosuhteet eivät olleen täysin identtisiä. Tämä ongelma kuitenkin huomioitiin kiertämällä koealat useampaan kertaan, siten että laitteiden paikkoja vaihdettiin aina mittauskertojen välillä.

Laitevertailun mittausjaksoilla pyrittiin saamaan samanaikainen paikannus ja yhtäläinen määrä havaintoja. Käytännössä tämä ei täysin toteutunut, sillä inhimillisestä tai teknisestä syystä paikannuksen aloittaminen tai lopettaminen saattoi viivästyä. Lisäksi oli ongelmia joidenkin laitteiden tai lähinnä tallentimien akun keston suhteen, jolloin tallennus saattoi jäädä kesken ja osa laitteista jouduttiin hyllyttämään kesken päivän. Joidenkin vastaanottimien ja tallentimien välinen bluetooth-yhteys saattoi välillä pätkiä, mikä johti vähäisempään havaintojen määrään. Pieniä eroja tulee myös mittajaan huolellisuudesta. Toisin sanoen oliko kartoitussauva täsmälleen referenssipisteen kohdalla ja oliko se säädetty suoraan. Mahdollinen sauvan kaltevuus aiheuttaa pieniä laitteista johtuvia poikkeamia. Erot laitteiden välillä ovat lähtökohtaisesti melko pieniä, joten paljon riippuu mittajaan huolellisuudesta.

Paikannuksia tuli seitsemällä laitteella yhteensä 342 eli keskimääräisesti 49 paikannusta laitetta kohden. Mittausjaksojen lukumäärissä ei tullut suuria eroja lukuun ottamatta Trimble ProXRT 2.0 -vastaanotinta, jolla yllettiin vain 38 paikannukseen johtuen tallentimen huonosta akun kestosta. Testirata sisälsi yksitoista ominaisuuksiltaan erilaista

metsäistä ympäristöä. Jokainen koeala kierrettiin useampaan kertaan saaden siten paljon toistoja. Jälkikorjausmenetelmiä tutkittiin useammalla eri tavalla mitattujen paikannusten osalta.

Kokonaisuudessaan saadun datan määrä oli erittäin suuri. Kattava ja laaja tutkimusaineisto antaa luotettavan pohjan tuloksille. Tutkimusongelmiin löytyi perustellut vastaukset, mutta herätti myös uusia tutkimusongelmia. Näkisin tämän tutkimuksen kuitenkin päässeen asetettuihin tavoitteisiin.

6.3 Jatkotutkimus- ja kehittämisideat

Tutkimusta varten kerätyn datan määrä oli suurehko, josta tällä erää laaditaan kolme eri opinnäytetyötä. Jo tässä vaiheessa kerätystä aineistosta on myös mahdollista toteuttaa myöhemmin lisätutkimuksia.

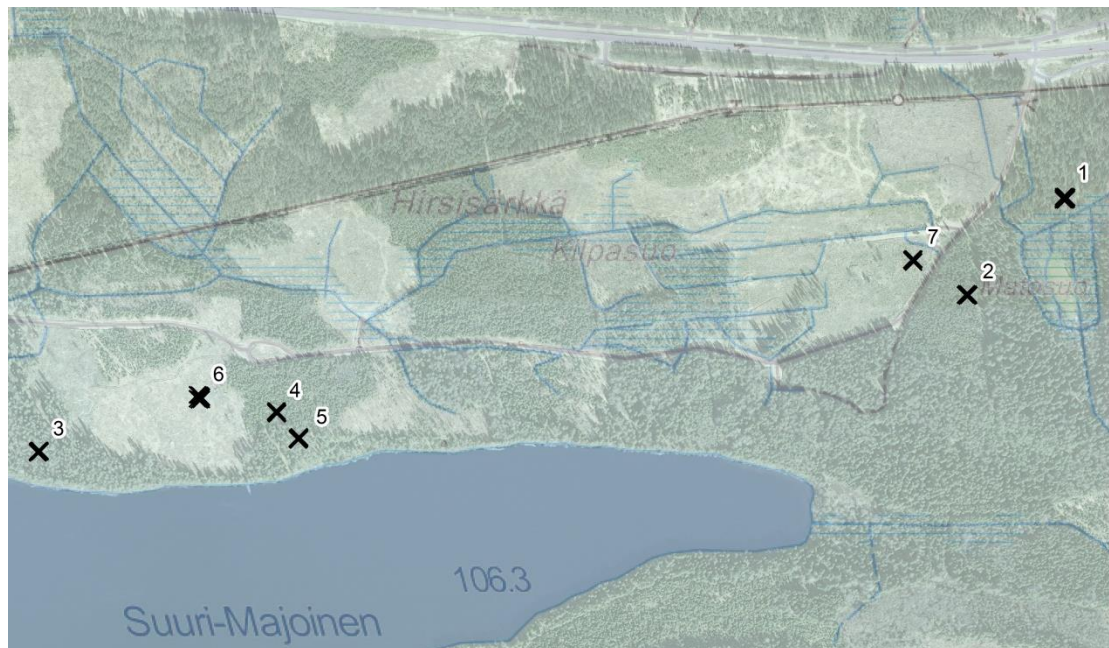
Tuloksien analysointivaiheessa nousi esille uusi tutkimusongelma liittyen antennimallin vaikutukseen tarkkuuteen. Metsäkeskuksen omissa laitteissa oli käytössä kalliimmat Zephyr Model 2 -antennit, mutta valtaosa yrityksen käytössä olevista antenneista ovat edullisempia Tornadoja. Tarpeellista olisi ollut testata antennin vaikutusta yhdellä Metsäkeskuksen omalla ProXRT:llä Tornado-antennilla varustettuna. Hieman osviittaa tästä antoi lainassa ollut uudempi ProXRT kyseisellä antennilla, mutta tarkemmat tutkimukset vaatisivat parempaa vertailuaineistoa.

Tutkimussuunnitelmassa oli tarkoitus vertailla Paikkatietokeskuksen korjauspalvelun tarkkuutta verrattuna Geotrimin jälkikorjauspalveluihin. Valitettavasti Paikkatietokeskuksen korjausdata ei ollut yhteensopivaa käytössämme olleiden korjausohjelmien kanssa, joten se jäi vielä tutkimatta. Hieman vertailupohjaa Paikkatietokeskuksen palvelusta saatiin Topconin kyseisen palvelun jälkikorjausdatalla korjatuista tuloksista, mutta se ei missään nimessä riitä luotettavaksi aineistoksi. Perusteellisempaan korjauspalveluiden lisätutkimuksiin voi olla tarpeellista ottaa mukaan myös Leica Geosystems Oy:n SmartNet-palvelu.

Lisätutkimuksia voi aina suorittaa uusilla laitteilla. Uusin Geotrimin tarjoama Trimblen laite on Trimble R8s. Kyseinen on jalostettu R10:n edeltäjästä ja uutuuutena siinä on mahdollisuus valita tarvittava ohjelmistokokonaisuus. Laitteen hinta määräytyy ominaisuuksien mukaan eli mikäli tarvitaan ainoastaan staattinen mittaus jälkikorjauksella, niin myös hinta jää alhaisemmaksi. Ergonomialtaan ja käytettävyydeltään laite vastaa testaamaamme R10-vastaanotinta ja myös tarkkuus on oletuksena samaa luokkaa.

Lähteet

- BeiDou. 2015. System Introduction. <http://en.beidou.gov.cn/index.html>. 7.7.2015.
- Brach, M. & Grala, N. 2009. Analysis of GNSS receiver accuracy in the forest environment. <http://ptip.org.pl/download/files/rg2009z2-gralabrach.pdf>. 7.10.2015.
- ESA. 2015a. The story so far. http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_story_so_far. 6.7.2015.
- ESA. 2015b. Galileo and Egnos. http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_and_EGNOS. 6.7.2015.
- ESA. 2015c. Galileo Navigation Signals and Frequencies. http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future__Galileo/Galileo_navigation_signals_and_frequencies. 6.7.2015
- GPS. 2015a. Space Segment. <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>. 27.5.2015.
- GPS. 2015b. New Civil Signals. <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>. 27.5.2015.
- Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja. Helsinki. Information-analytical centre. 2015. GLONASS history. <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/>. 27.5.2015
- Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Jyväskylä: Kopijyvä Oy.
- Maanmittauslaitos. 2015. Satelliittimittaus eli GPS-mittaus. <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus>. 9.5.2015.
- Manzera, J.A., Mauro, F., Rodriguez-Solano, R. & Valbuena, R. 2010. Accuracy and precision of GPS receivers under forest canopies in a mountainous environment. Spanish Journal of Agricultural Research.
- Miettinen, S. 2006. GPS Käsikirja. Porvoo: Painopaikka WS Bookwell Oy.
- Poutanen, M. 1999. GPS-paikanmääritys. Hämeenlinna: Karisto Oy:n kirjapaino.
- Suomen metsäkeskus. 2015. Metsätiedon keruu. <http://www.metsakeskus.fi/metsatiedon-keruu#.VUynbvtmko>. 8.5.2015.

Testikoealojen sijainnit

Kuva 3. Suuri-Majoinen alueen testikoealat 1-7.



Kuva 4. Haapamäen testikoealat 8-11.

Testikoealojen puustotiedot ja kuvaukset

Mittauspiste	1				
Vaikeustaso	Keskivaikea				
Kehitysluokka	04				
PI	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä	6		25,0	35,0	66
Ku	13		20,0	25,0	126
Ko	6		22,0	27,0	59
Mule					
Yht.	25	0	22,3	29,0	251
Muita huomioita					
Avonainen paikka ajouran varressa. Järeää puustoa, mutta hyvä näkyvyys.					



Mittauspiste	2				
Vaikeustaso	Vaikea				
Kehitysluokka	02				
PI	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä	2		10,0	10,0	12
Ku	29		12,0	11,0	187
Ko	14		15,0	12,0	98
Mule	2		10,0	10,0	
Yht.	47	0	11,8	10,8	297
Muita huomioita					
Tiheä nuori puusto.					



Mittauspiste	3				
Vaikeustaso	Vaikea				
Kehitysluokka	04				
PI	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä					
Ku	20		23,0	23,0	220
Ko	18		24,0	28,0	191
Mule					
Yht.	38	0	23,5	25,5	411
Muita huomioita					
Kookas puusto ja tiheä puusto.					



Mittauspiste	4				
Vaikeustaso	Keskivaikea				
Kehitysluokka	02				
PI	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä					
Ku	23		12,0	12,5	144
Ko	5		13,0	12,5	31
Mule					
Yht.	28	0	12,5	12,5	175
Muita huomioita					
Tiheä nuori puusto.					



Mittauspiste	5				
Vaikeustaso	Keskivaikea				
Kehitysluokka	04				
PI	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä	18		26,0	32,0	204
Ku	3		25,0	30,0	36
Ko	8		23,0	29,0	82
Mule					
Yht.	29	0	24,7	30,3	322
Muita huomioita					
Järeää metsää. Jyrkkä alamäki etelän suuntaan, jonka alla järvi.					



Mittauspiste	6				
Vaikeustaso	Helppo				
Kehitysluokka	A0				
PI	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä					
Ku					
Ko					
Mule					
Yht.	0	0	0,0	0,0	0
Muita huomioita					
Ison aukean keskellä kallion päällä. Erinomainen näkyvyys, helppo kohde.					



Mittauspiste	7				
Vaikeustaso	Helppo				
Kehitysluokka	T2				
PI	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä		1000	2,5	2,5	
Ku		3800	3,0	3,5	
Ko		3000	2,5	1,0	
Mule		4000	2,0	1,0	
Yht.	0	11800	2,5	2,0	0
Muita huomioita					
Tiheä raivaamaton kuusentaimikko. Aukeahko mittauspaikka - hyvä näkyvyys. Korkeat antennit yltävät puuston yläpuolelle - matala ei.					



Mittauspiste	8				
Vaikeustaso	Vaikea				
Kehitysluokka	02				
PI	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä					
Ku	31		13,0	14,9	206
Ko					
Mule					
Yht.	31	0	13,0	14,9	206
Muita huomioita					
Tiheähkö istutettu kuusikko.					



Mittauspiste		9			
Vaikeustaso		Keskivaikea			
Kehitysluokka		03			
Pl	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä					
Ku	1		7,0	8,5	4
Ko	15		20,0	18,0	136
Mule		2800	2,0	2,0	
Yht.	16	2800	9,7	9,5	140

Muita huomioita

Harvahko koivikko - kohtuu näkyvyys.
Aluskasvillisuutta - voi vaikuttaa ainakin lyhyeen antenniin.



Mittauspiste		10			
Vaikeustaso		Helppo			
Kehitysluokka		T2			
Pl	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä					
Ku					
Ko		2600	7,0	6,1	
Mule		1800	2,0	1,0	
Yht.	0	4400	4,5	3,6	0

Muita huomioita

Viljelty rauduskoivikko.
Aluskasvillisuutta.



Mittauspiste		11			
Vaikeustaso		Vaikea			
Kehitysluokka		04			
Pl	PPA	rkl	h	d1,3	V
Mä					
Ku	40		18,0	18,5	344
Ko					
Mule					
Yht.	40	0	18,0	18,5	344

Muita huomioita

Järeä ja kohtuu tiheä kuusikko.



Referenssipisteiden koordinaatit

Taulukko 19. Referenssipisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

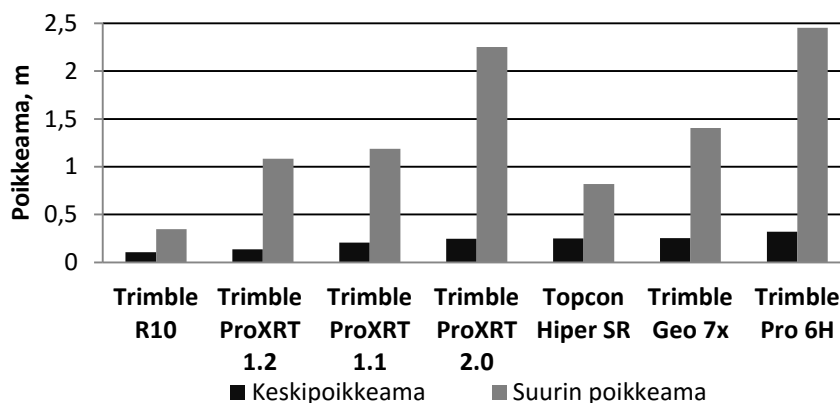
Piste	P	I	Piste	P	I
1A	6978025,027	551432,251	2A	6977897,936	551301,147
1B	6978024,811	551434,442	2B	6977895,759	551301,062
1C	6978025,850	551436,097	2C	6977896,006	551299,424
1D	6978028,150	551436,595	2D	6977894,766	551301,957
1E	6978029,477	551434,446	2E	6977895,643	551303,848
1F	6978029,063	551432,629	2F	6977897,213	551303,115
1G	6978027,081	551432,342	2G	6977896,278	551302,357
3A	6977685,291	550043,919	4A	6977737,417	550363,833
3B	6977685,317	550042,283	4B	6977737,269	550365,166
3C	6977684,053	550041,007	4C	6977735,985	550364,775
3D	6977682,761	550040,621	4D	6977735,214	550365,389
3E	6977682,480	550041,657	4E	6977735,977	550366,453
3F	6977683,977	550044,116	4F	6977738,433	550365,664
3G	6977684,071	550042,408	4G	6977738,910	550364,283
5A	6977700,971	550393,195	6A	6977755,481	550257,822
5B	6977699,764	550394,685	6B	6977754,223	550260,410
5C	6977701,231	550396,096	6C	6977754,784	550262,780
5D	6977703,064	550396,524	6D	6977757,484	550263,212
5E	6977703,917	550395,498	6E	6977759,169	550261,644
5F	6977702,492	550394,796	6F	6977760,402	550260,178
5G	6977702,095	550393,698	6G	6977760,947	550257,833
7A	6977944,954	551227,783	8A	6986343,569	535419,166
7B	6977944,448	551229,245	8B	6986342,779	535419,679
7C	6977942,698	551228,584	8C	6986341,774	535420,436
7D	6977940,605	551229,130	8D	6986341,305	535418,207
7E	6977941,632	551227,880	8E	6986340,919	535416,418
7F	6977942,679	551226,959	8F	6986343,456	535416,702
7G	6977943,600	551226,648	8G	6986343,762	535418,088
9A	6986884,209	536114,404	10A	6986380,729	535518,886
9B	6986885,690	536112,345	10B	6986380,759	535520,511
9C	6986886,669	536113,326	10C	6986381,940	535519,841
9D	6986888,355	536113,977	10D	6986381,973	535521,143
9E	6986888,105	536115,340	10E	6986383,934	535519,351
9F	6986887,047	536115,849	10F	6986382,890	535518,690
9G	6986885,663	536114,185	10G	6986381,708	535517,870
11A	6986316,916	535751,091			
11B	6986318,173	535749,338			
11C	6986321,661	535750,235			
11D	6986321,375	535752,744			
11E	6986320,074	535753,189			
11F	6986319,626	535751,228			
11G	6986316,068	535752,603			

Laitteiden tarkkuus

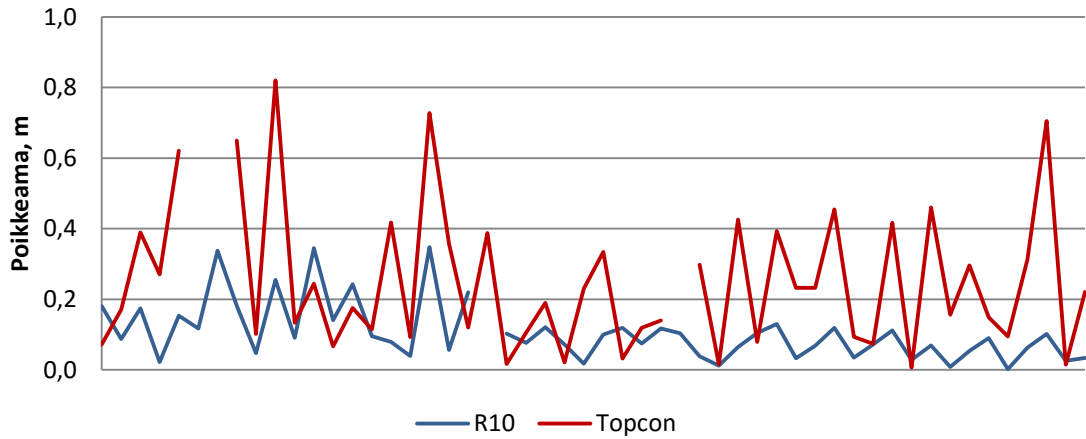
Liitteen ensimmäisellä sivulla on keskiarvollisia poikkeamia testikoealoittain sekä kokonaisuutena esitettyinä pylväsdiagrammilla yhdessä suurimpien yksittäisten poikkeamien kanssa. Toisella sivulla on yksityiskohtaisemmat viivadiagrammit, joissa laitteiden välisiä eroja voi verrata paikannuskohtaisesti. Viivojen mahdolliset katkeamiset johtuvat siitä, että laiteella on jouduttu esim. akun loppumisen takia jättämään paikannusvälistä.

Taulukko 20. Laitteiden keskipoikkeamat testikoealoittain. Kirjain testikoealasarakkeessa kertoo vaikeusasteen: H = helppo, K = keskivaikea ja V = vaikea. Paksunnokset kullakin rivillä kertovat millä laitteilla kullakin testikoealalla saatiin keskiarvollisesti parhaat tulokset.

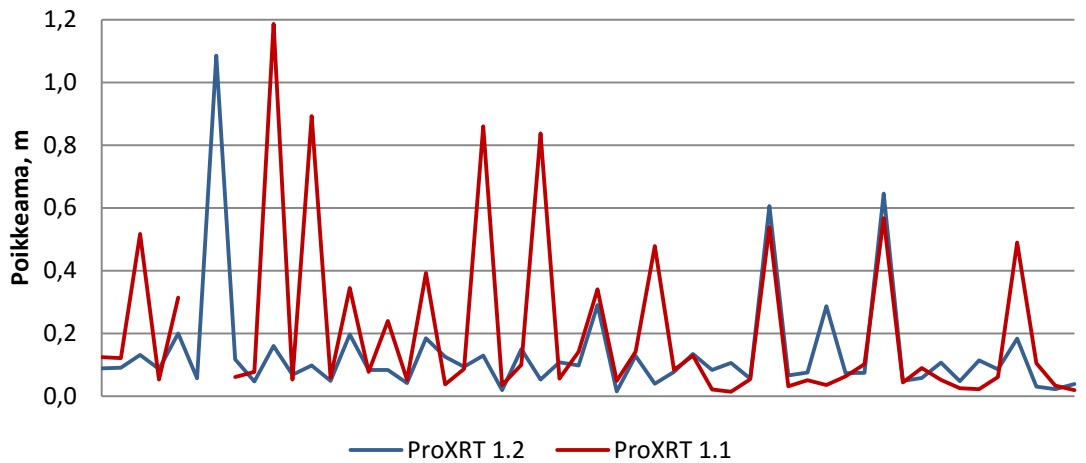
Testikoeala		Trimble R10	Trimble ProXRT 1.2	Trimble ProXRT 1.1	Trimble ProXRT 2.0	Topcon Hiper SR	Trimble Geo 7x	Trimble Pro 6H	Keskiarvo
1	K	0,085	0,121	0,120	0,114	0,174	0,123	0,140	0,126
2	V	0,110	0,109	0,524	0,083	0,351	0,174	0,584	0,301
3	V	0,095	0,354	0,331	0,361	0,374	0,719	0,807	0,437
4	K	0,058	0,084	0,044	0,070	0,272	0,226	0,053	0,118
5	K	0,051	0,079	0,064	0,081	0,127	0,076	0,137	0,088
6	H	0,020	0,066	0,033	0,020	0,011	0,121	0,046	0,047
7	H	0,084	0,049	0,051	0,069	0,021	0,075	0,141	0,072
8	V	0,188	0,117	0,326	0,201	0,401	0,284	0,149	0,238
9	K	0,060	0,080	0,048	0,048	0,219	0,074	0,069	0,087
10	H	0,086	0,057	0,077	0,087	0,108	0,059	0,060	0,075
11	V	0,271	0,351	0,610	1,028	0,528	0,793	1,092	0,674
Keskiarvo		0,105	0,137	0,207	0,248	0,250	0,255	0,321	0,216



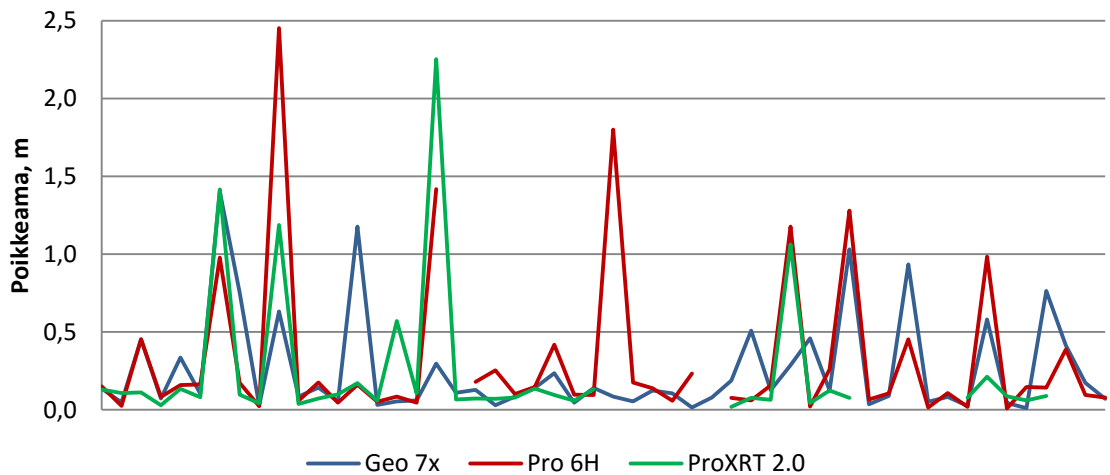
Kuvio 4. Laitteiden keskimääräiset poikkeamat sekä suurimmat yksittäiset poikkeamat Geotrimin VRS-palvelun korjausdatalla korjattuna (poikkeuksena Topcon Hiper SR).



Kuvio 5. Yksittäiset paikannukset laitteilla Trimble R10 ja Topcon Hiper SR.



Kuvio 6. Yksittäiset paikannukset laitteilla Trimble ProXRT 1.1 ja 1.2.

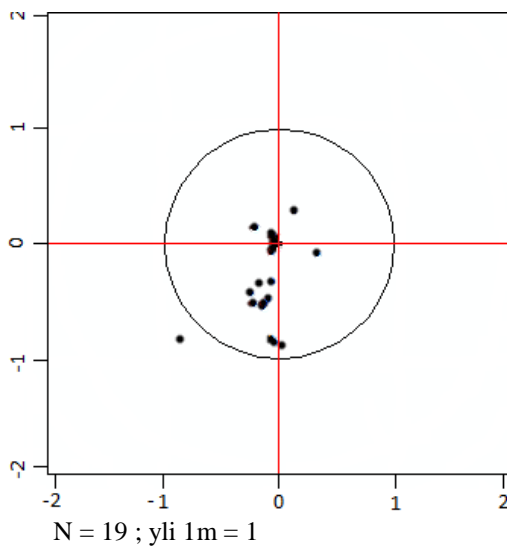


Kuvio 7. Yksittäiset paikannukset laitteilla Trimble Geo 7x, Pro 6H ja ProXRT 2.0.

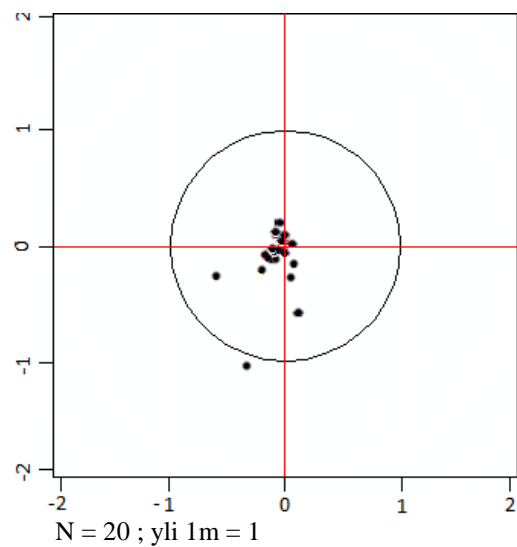
Tasopoikkeamien virhekuvat

Kuvissa esitetään kunkin laitteen paikannustarkkuudet vaikeimpien testikoealojemme osalta (koealat 2, 3, 8 ja 11). Helppoissa ja keskivaikeissa kohteissa poikkeamat ovat sen verran pieniä, että en nähnyt tarpeelliseksi esittää niitä virhekuvin. Kuvat on skaalattu tarpeen mukaan. Mikäli yhden metrin ympyrä mahtuu kuvaan, se on piirretty. Trimble R10:n ja Topconin virhekuvien mittakaava on pienempi ja metrin ympyrää ei ole näkyvissä. Huom! Osa pisteistä on jäänyt neliön ulkopuolelle.

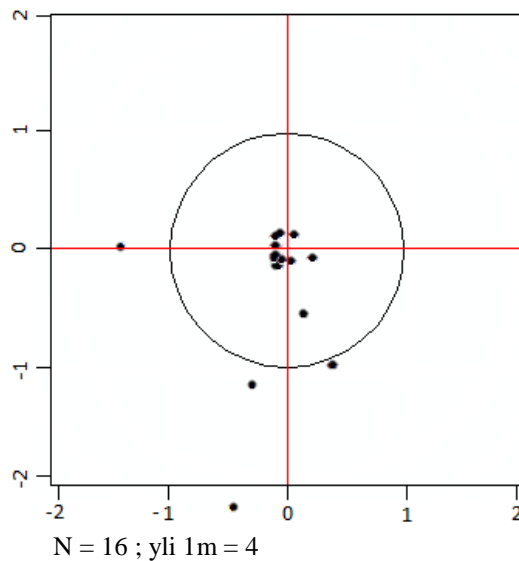
Trimble ProXRT 1.1



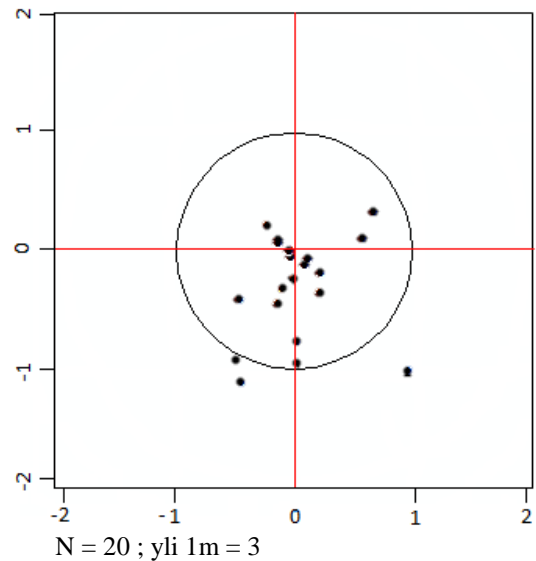
Trimble ProXRT 1.2



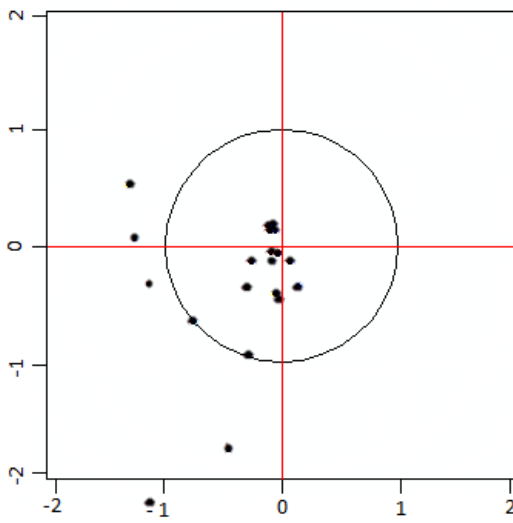
Trimble ProXRT 2.0



Trimble Geo 7x

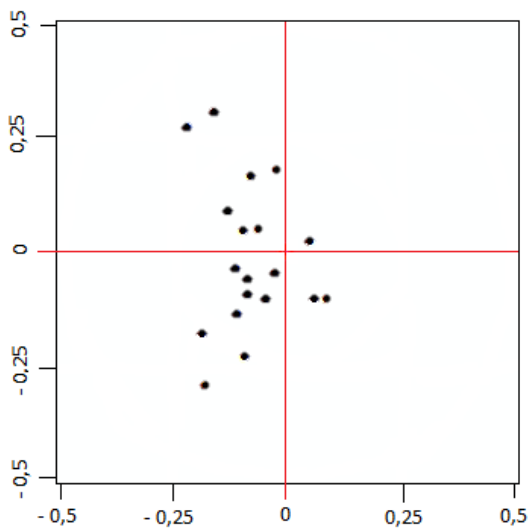


Trimble Pro 6H



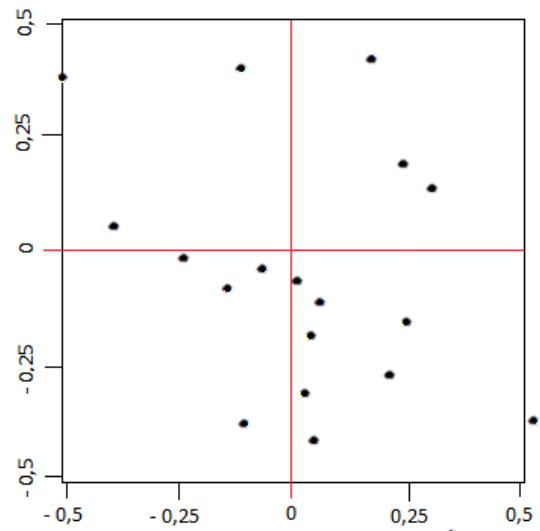
N = 20 ; yli 1m = 5

Trimble R10



N = 20 ; yli 1m = 0

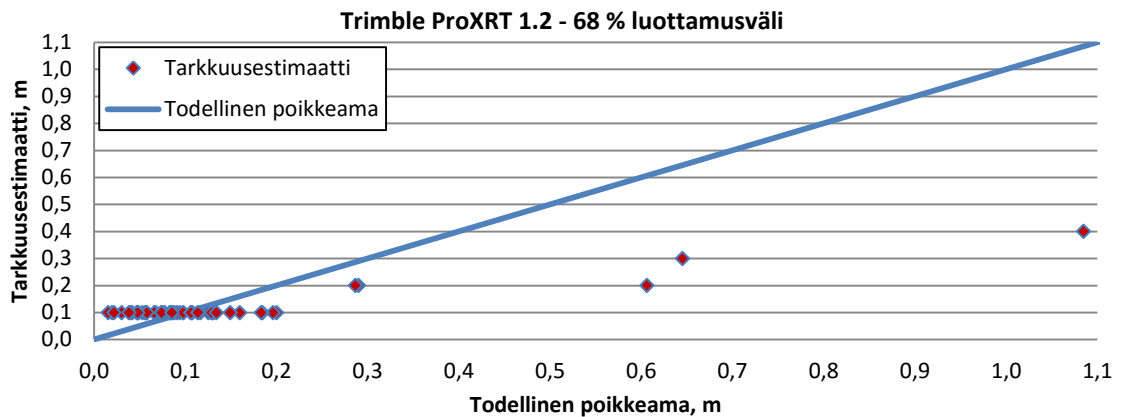
Topcon Hiper SR



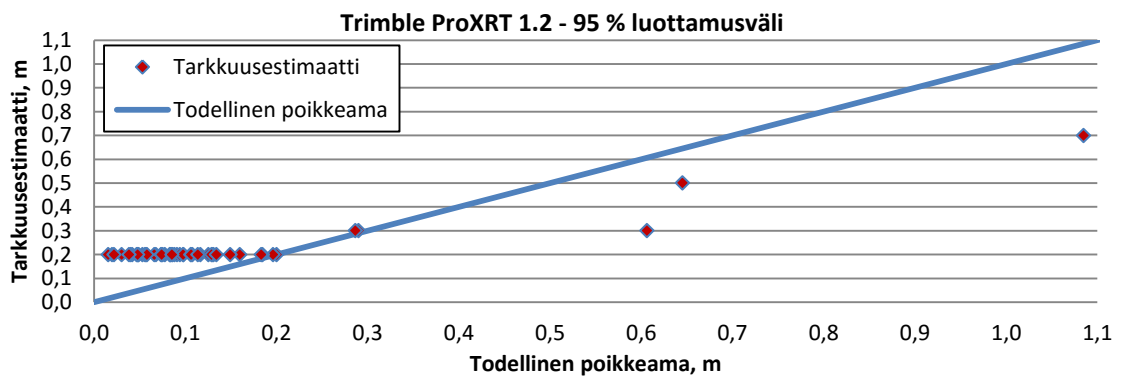
N = 19 ; yli 1m = 0

Tarkkuusestimaattien tarkkuus eri luottamusväleillä

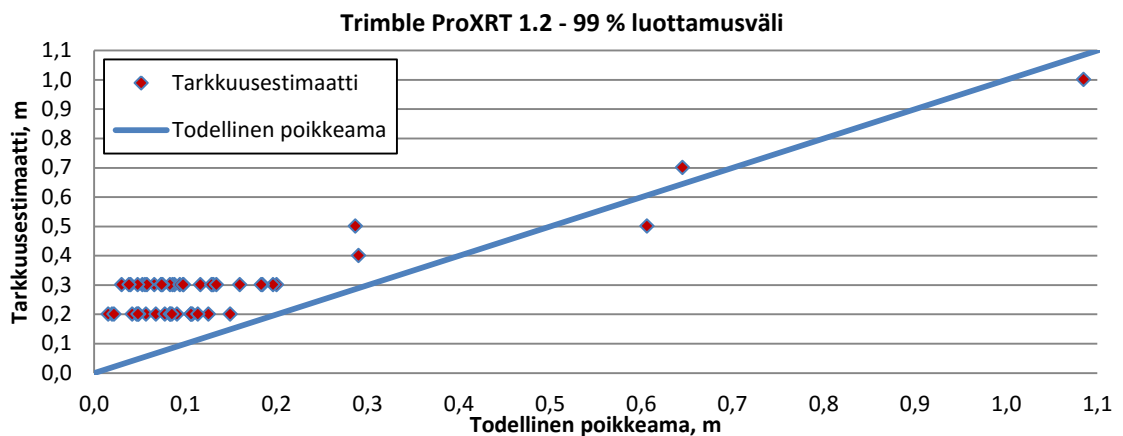
Kuvioissa havainnollistetaan tarkkuusestimaattien tarkkuus laitekohtaisesti käytettäessä luottamusväleinä 68 %, 95 % sekä 99 %. Pystyakselilla juokseva viiva kuvaa todellista poikkeamaa ja vaaka-akselilla olevat pisteet ovat tarkkuusestimaatteja. Mikäli piste on viivan yläpuolella, on todellinen mittaus tarkempi kuin estimaatti. Viivan alapuolelle jäävät pisteet kertovat poikkeaman olevan suurempi kuin estimaatti antaa olettaa.



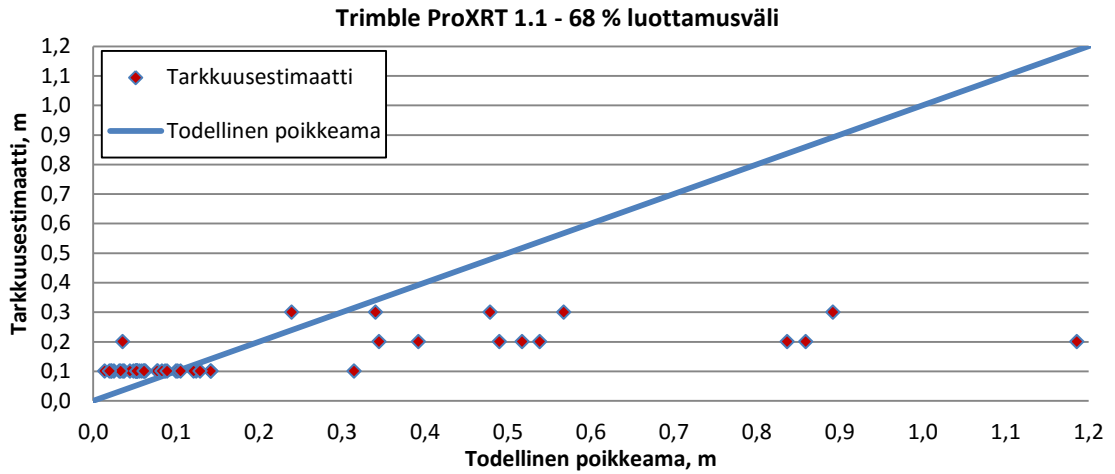
Kuvio 8. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 68 % luottamusvälillä ProXRT 1.2:lla.



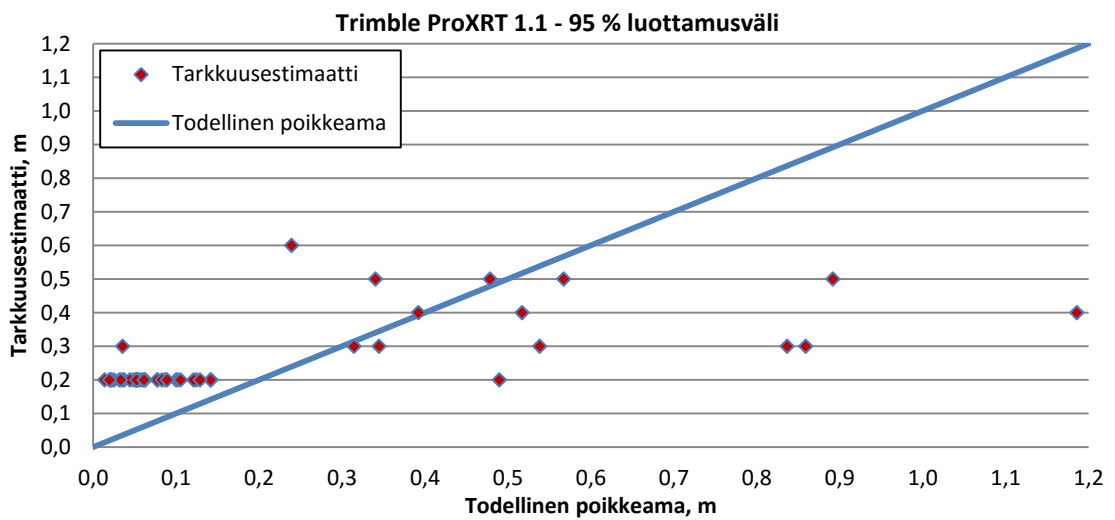
Kuvio 9. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 95 % luottamusvälillä ProXRT 1.2:lla.



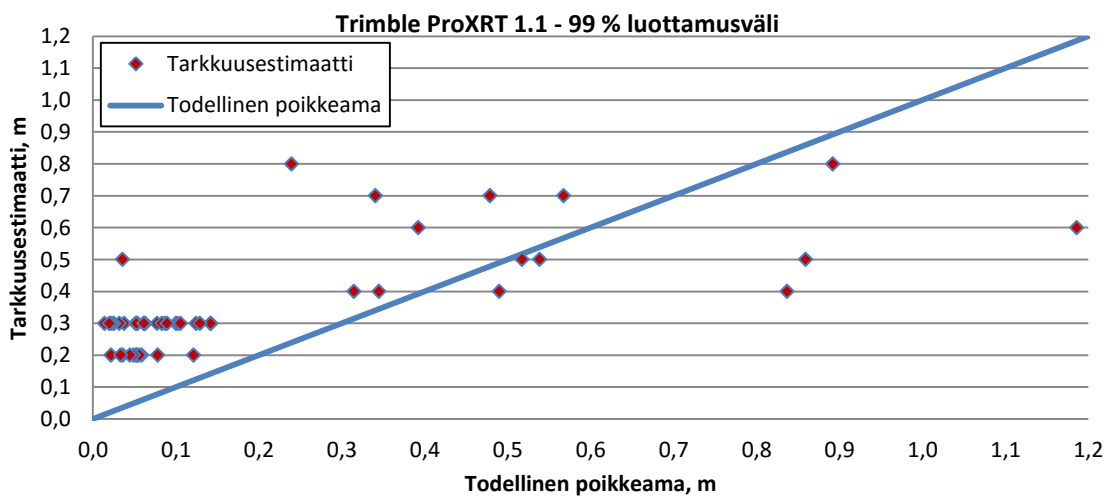
Kuvio 10. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 99 % luottamusvälillä ProXRT 1.2:lla.



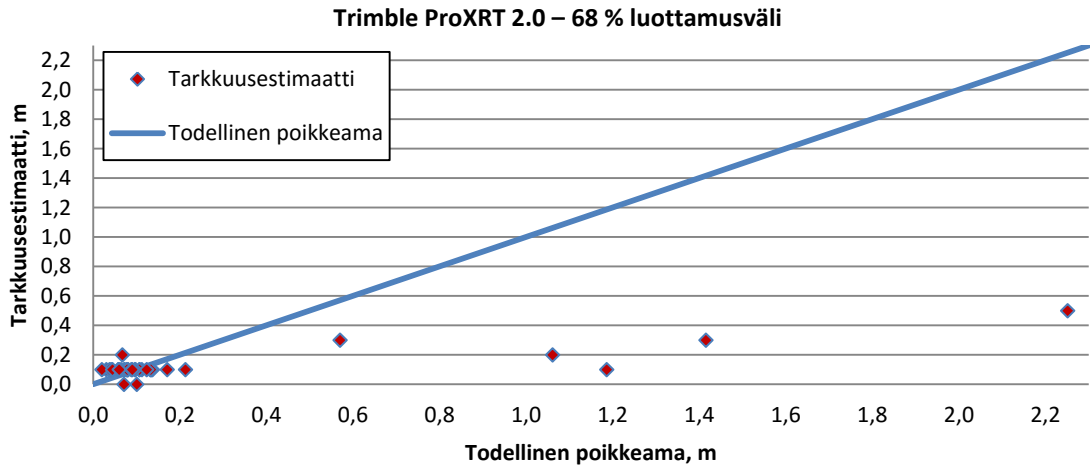
Kuvio 11. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 68 % luottamusvälillä ProXRT 1.1:llä.



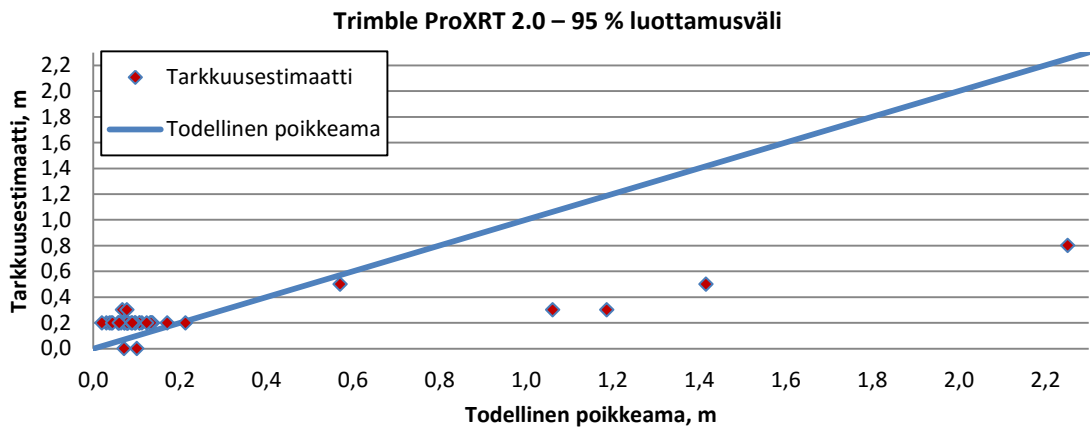
Kuvio 12. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 95 % luottamusvälillä ProXRT 1.1:llä.



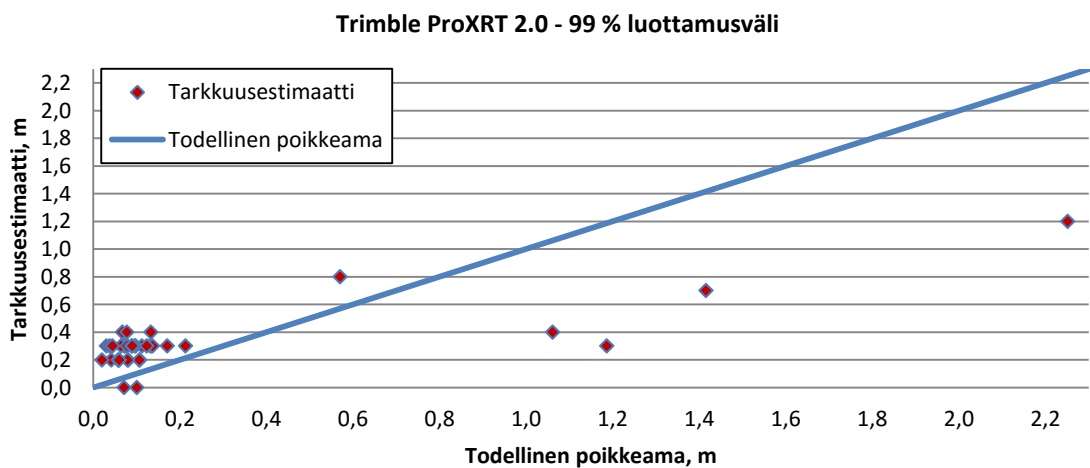
Kuvio 13. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 99 % luottamusvälillä ProXRT 1.1:llä.



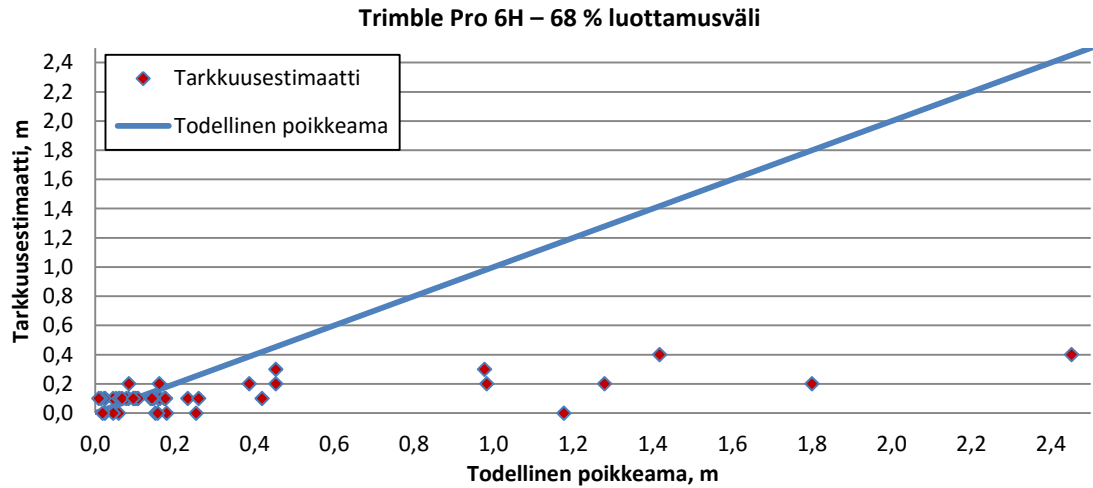
Kuvio 14. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 68 % luottamusvälillä ProXRT 2.0:lla.



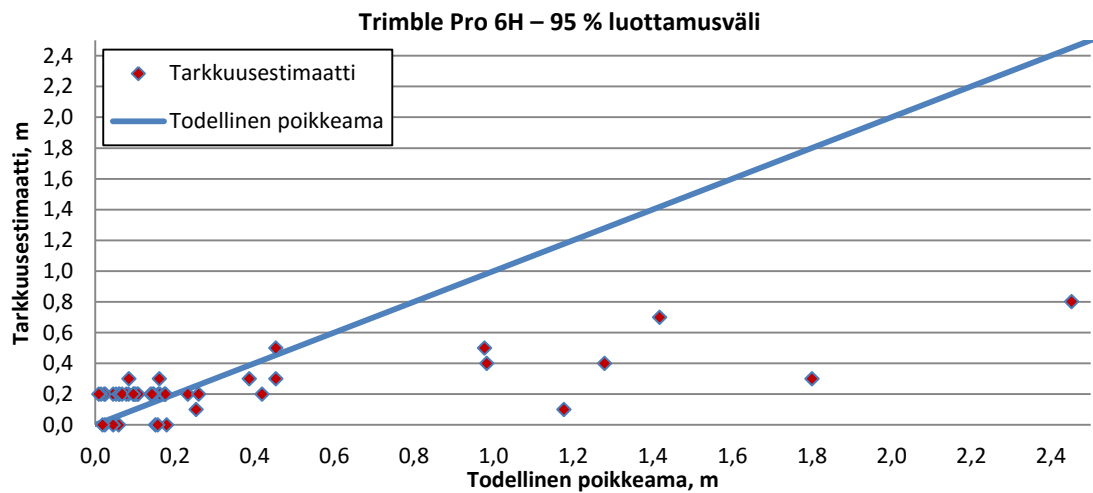
Kuvio 15. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 95 % luottamusvälillä ProXRT 2.0:lla.



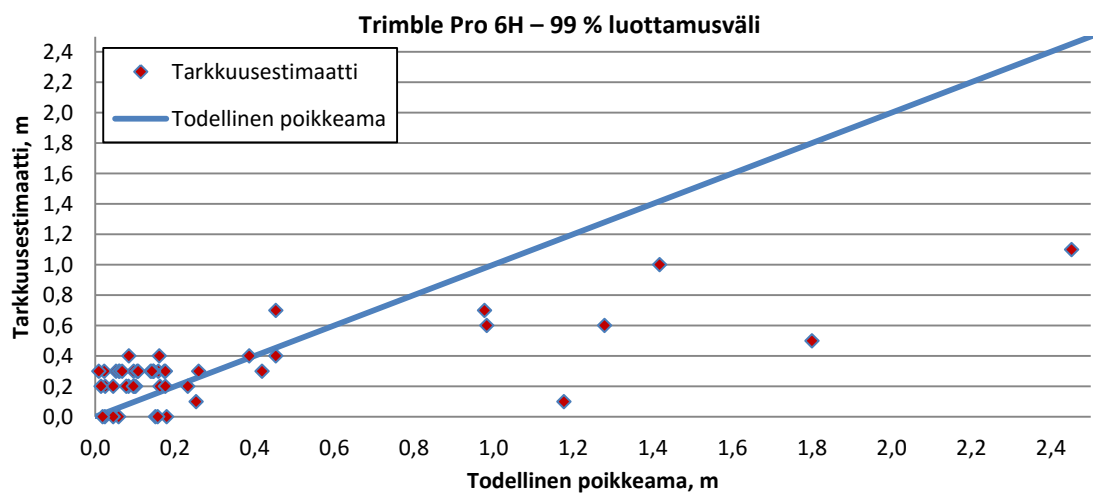
Kuvio 16. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 99 % luottamusvälillä ProXRT 2.0:lla.



Kuvio 17. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 68 % luottamusvälillä Pro 6H:lla.



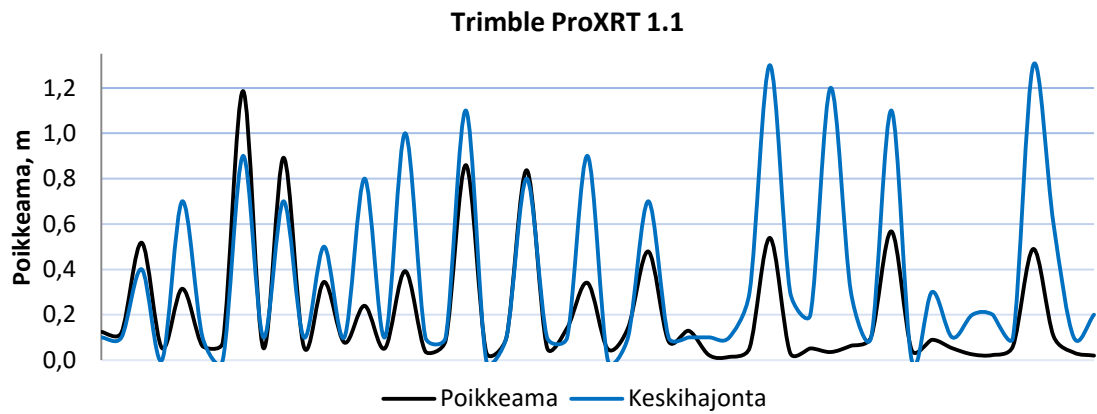
Kuvio 18. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 95 % luottamusvälillä Pro 6H:lla.



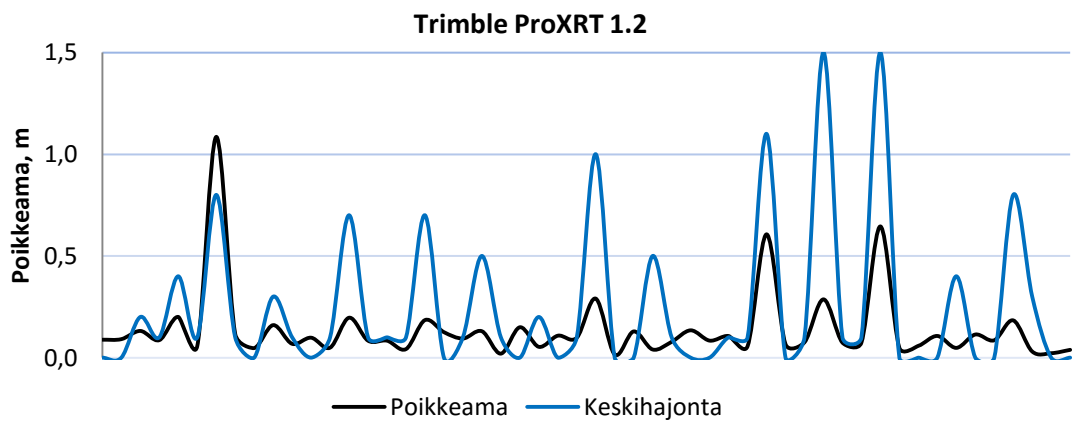
Kuvio 19. Tarkkuusestimaattien tarkkuus 99 % luottamusvälillä Pro 6H:lla.

Keskihajonnan vertailu todelliseen poikkeamaan

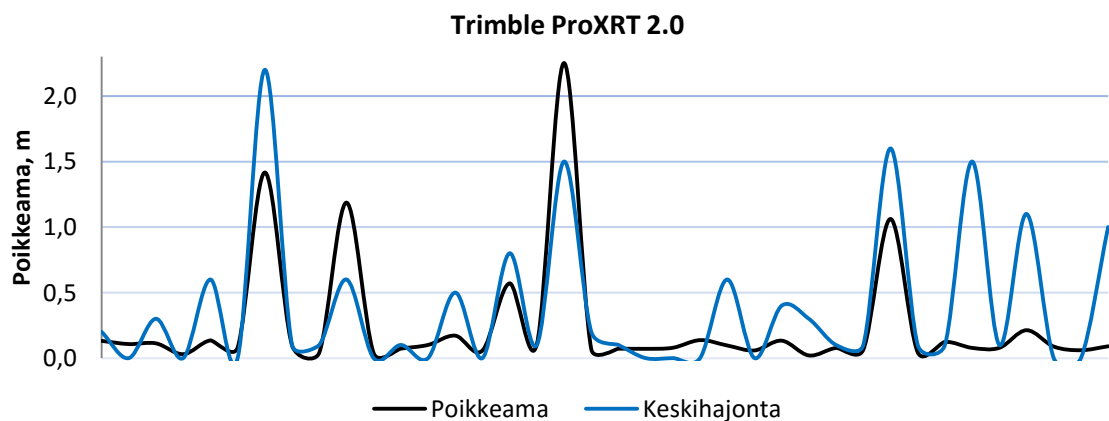
Kuvioissa on todellinen poikkeama suhteessa keskihajontaan Trimblen ProXRT- vastaanottimien osalta.



Kuvio 23. Todellinen poikkeama suhteessa keskihajontaan ProXRT 1.1:llä.



Kuvio 24. Todellinen poikkeama suhteessa keskihajontaan ProXRT 1.2:llä.



Kuvio 25. Todellinen poikkeama suhteessa keskihajontaan ProXRT 2.0:lla.