

AURINGON AKTIIVISUUDESTA JOHTUVIEN ILMAKEHÄN  
HÄIRIÖIDEN VAIKUTUSTEN MINIMOINTI  
GPS-MITTAUKSISSA

Kupulisoja Janne

Opinnäytetyö

Maanmittaustekniikka  
Insinööri (AMK)

2025

Maanmittaustekniikka  
Insinööri (AMK)

---

<b>Tekijä</b>	Janne Kupulisoja	<b>Vuosi</b>	2025
<b>Ohjaaja</b>	Sami Porsanger		
<b>Toimeksiantaja</b>	Maanmittauslaitos		
<b>Työn nimi</b>	Auringon aktiivisuudesta johtuvien ilmakehän häiriöiden vaikutusten minimointi GPS-mittauksissa		
<b>Sivumäärä</b>	55+32		

---

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää mahdollisuutta minimoida auringon aktiivisuudesta johtuvien ilmakehän häiriöiden vaikutusta mittaustuloksiin. Tutkimuksessa kerättiin vertailukelpoista mittaustietoa tukiaseman sijainnin ja eri tavalla välitetyn korjausdatan vaikutuksesta mittaustarkkuuteen sekä niiden välistä eroavaisuutta.

Auringossa tapahtuvat energiapurkaukset vapauttavat auringon magneettikenttään varastoitunutta energiaa, joka ionosfääriin saapuessa vaikuttaa paikannussatelliiteista lähetettävien signaalien näennäiseen kulkumatkaan ja voi johtaa huonompaan mittaustarkkuuteen tai jopa estää paikannuksen täysin.

Tutkimuksen aineisto kerättiin marras-joulukuussa 2023 Maanmittauslaitoksen testikentällä tehdyissä mittauksissa. Tutkimuksessa käytettiin vastaanottimista tunnetuille pisteille perustettuja tukiasemia ja testikentän tunnetuille pisteille sijoitettuja Rover-vastaanottimia. Vertailua suoritettiin suhteessa Maanmittauslaitoksen FINPOS-paikannuspalveluun. Tutkimuksessa testattiin tukiaseman välittämän korjausdatan ja tukiaseman etäisyyden vaikutusta havaintojen tarkkuuteen sekä määrään.

Tutkimuksen mukaan vastaanottimen käyttäminen vapaalla asemapistellä tukiasemana mahdollistaa usein mittaamisen myös alueilla, joissa mittaaminen VerkkorTK-menetelmällä olisi haastavaa tai mahdotonta. Tutkimuksessa selvisi, että ilmakehähäiriön lisääntyessä tukiaseman etäisyyden merkitys korostui havainnoissa. Voimakkaan häiriön aikaan lähelle perustetut tukiasemalaitteet pilvipalvelulla välitetyn korjausdatan kanssa keräsivät huomattavasti enemmän ja suhteessa tarkempia havaintoja FINPOS-paikannuspalvelun vertailulaitteeseen nähden. Pilvipalvelu ja oman tukiaseman perustaminen koettiin toimivaksi menetelmäksi, joka mahdollistaa mittaamisen myös ilmakehähäiriön vallitessa. Menetelmää sopisi hyödyntää toimituksissa, joissa on tarpeen mitata ja/tai merkitä useita kohteita tietyllä alueella yhdellä kerralla.

Degree programme  
Degree title

---

<b>Author</b>	Janne Kupulisoja	<b>Year</b>	2025
<b>Supervisor(s)</b>	Sami Porsanger		
<b>Commissioned by</b>	National Land Survey of Finland		
<b>Title</b>	Minimizing the impact of atmospheric disturbances caused by solar activity on GPS measurements.		
<b>Number of pages</b>	55+32		

---

The aim of this study was to explore how the effects of atmospheric disturbances caused by solar activity could be minimized in GPS observation. Solar flares release energy stored in the magnetic field of sun. When this energy reaches the ionosphere, it can interfere with the signals sent by positioning satellites. These disturbances may reduce positioning accuracy or, in some cases, prevent positioning entirely.

The study focused on collecting comparable measurement data to assess how the location of a base station and the method used to transmit correction data influence observation accuracy and how these factors differ in performance. The data for this study was collected during field measurements at the National Land Survey of Finland's test fields in November and December 2023. Base stations were set up at known reference points using GNSS receivers, and Rover receivers were placed at other known points across the area. The results were compared with data from the FINPOS positioning service provided by the National Land Survey of Finland. The study examined how both the distance to the base station and the method of transmitting correction data affected the precision and quantity of positioning observations.

The findings indicate that using a receiver at a freely chosen reference point as a base station can often enable reliable measurements in areas where network RTK methods would be difficult or impossible to use. The study showed that as atmospheric disturbances increased, the distance to the base station became more critical. During periods of strong disturbance, base stations placed nearby and transmitting correction data via cloud services collected significantly more and more accurate observations compared to the FINPOS service. The combination of a local base station and cloud-based correction transmission proved to be an effective method, enabling accurate measurements even under challenging atmospheric conditions. This approach is particularly well-suited for fieldwork that requires measuring or marking multiple targets within a defined area in a single session.

**Keywords**                      Ionosphere, reference station, satellite surveying

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	SATELLIITTIMITTAUSMENETELMÄ .....	9
2.1	Yleistä satelliittipaikannuksesta .....	9
2.2	Satelliittipaikannuksen mittaustavat .....	10
2.2.1	RTK .....	11
2.2.2	Verkko-RTK.....	12
2.2.3	Oma tukiasema .....	14
3	HAVAINNOTARKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT .....	15
3.1	Yleistä havaintotarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä .....	15
3.2	Satelliittigeometria .....	15
3.3	Aurinko .....	16
3.4	Ionosfääri.....	19
4	TUTKIMUKSEN TOTEUTUS.....	20
4.1	Tutkimuksessa käytetty kalusto .....	20
4.2	Testin suunnittelu .....	22
4.3	Testikenttä .....	25
4.4	Valitut tukiasemapisteet.....	28
4.5	Maastotyöt.....	29
5	HAVAINNOT.....	32
5.1	Tukiasema vs. Verkko-RTK .....	32
5.2	Tukiaseman etäisyyden vaikutus havaintojen määrään.....	35
5.3	Tukiaseman etäisyyden vaikutus havaintojen keskinäiseen tarkkuuteen 42	
5.4	Havaintojen suhteellinen tarkkuus .....	45
5.5	DOP-arvojen vaikutus.....	51
6	POHDINTA.....	52
	LÄHDELUETTELO .....	54
	LIITTEET .....	56

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

HRMS	HRMS "Horizontal Root Mean Square" -käsite. HRMS-arvo kuvaa vaakasuuntaista tarkkuutta GPS-paikannuksessa eli sitä, kuinka tarkasti sijainti on määritetty maan pinnan tasossa. Mitä pienempi HRMS arvo, sitä parempi paikannustarkkuus on vaakasuunnassa.
VRMS	VRMS kuvaa GPS-mittauksen pystysuuntaisen (Z-akselin) paikannustarkkuuden keskihajontaa. Mitä pienempi VRMS, sitä parempi tarkkuus. Se on yksi tapa arvioida paikannuksen tarkkuutta ja luotettavuutta GPS-tutkimuksissa.
DOP	Dilution of Precision on suomeksi tarkkuuden heikentyminen. Se kuvaa satelliittigeometrian vaikutusta mittaus-tarkkuuteen ja esitetään laskennallisten DOP-lukujen avulla. (Laurila 2012, 308–310.)
HDOP	Horizontal Dilution of Precision. HDOP on satelliittipaikannuksessa tasosijainnin epävarmuutta kuvaava DOP-luku. (Laurila 2012, 308–310.)
VDOP	Vertical Dilution of Precision. VDOP on satelliittipaikannuksessa korkeuden mittauksen epävarmuutta kuvaava DOP-luku. (Laurila 2012, 308–310.)
IPI	Ionosfäärisignaalia mittaava lukuarvo
Rover	Tukiasemalaitteen paikantava vastaanotin



mittausta, mutta staattisessa mittauksessa havainnot pitää laskea jälkikäteen, joten maastoon ei voida merkitä ennalta laskettuja kohteita. Staattisia havaintoja kerätään pitkä aika, joten kovinkaan taloudellista tai tehokasta se ei myöskään ole. Staattista mittausta käytetään tilanteissa, jolloin internetyhteyttä tai radiolähettimillä olevia vastaanottimia ei ole saatavilla. Tällä hetkellä staattinen mittaus ei ole tuotannossa kovinkaan laajasti käytössä. Maanmittauslaitoksella ei ole tuotannon käytössä häiriötilanteissa toimivaa toimintatapaa.

Tutkimuksessa vertailuyksikkönä on maanmittauslaitoksella tuotannon käytössä oleva Topcon HR, joka vastaanottaa korjausdatan Maanmittauslaitoksen ylläpitämän FINPOS-tukiasemaverkon välityksellä. Tukiaseman läheisyys ja tukiasemaverkon tiheys vaikuttavat paikannuksen onnistumiseen. Tutkimus suoritetaan noin 30 kilometrin etäisyydellä kiinteistä tukiasemista. Tutkimuksessa käytetään Verkko-RTK eli VRS (Virtual Reference Station) -mittausmenetelmää. VRS-mittauksessa useat kiinteät tukiasemat lähettävät paikannussatelliitin signaalit laskentakeskukselle. Mittausyksikkö lähettää matkapuhelinverkossa likimääräisen sijaintinsa laskentakeskukselle. Laskentakeskus prosessoi useiden kiinteiden tukiasemien eli tukiasemaverkon lähettämää dataa ja muodostaa mittaajan lähettämän likimääräisen sijaintitiedon avulla mittaajalle oman virtuaalisen tukiaseman. Virtuaalisen tukiaseman suhteen järjestelmä vastaanottaa laskentakeskuksesta korjausdatan. (Laurila 2012, 321.)

Tutkimuksessa verrokkiyksiköinä käytetään kolmea Topcon HR -laitteparia. Laitteparista toinen toimii tukiasemana ja toinen vastaanottimena (Rover). Näistä muodostetaan kolme tukiasemaa ja jokaiselle tukiasemalle oma vastaanotin testikentälle. Tukiasemat perustetaan eri etäisyyksille tunnetuille pisteille. Omaa tukiasemaa käytettäessä tukiasema saadaan perustettua lähemmäksi mittausyksikköä, tämä yleensä parantaa mittaustarkkuutta myös huonon avaruussään aikaan (Rikkinen 2023). Tukiasemana käytettävä laite välittää tukiasemaverkosta vastaanotetun korjausdatan vastaanottimelle internet yhteydellä Topcon-pilvipalvelun välityksellä. Tutkimuksessa testataan myös ensimmäistä kertaa Topcon-pilvipalvelun käytön mahdollisuutta Maanmittauslaitoksen tuotannossa.

Tutkimus on tehty Maanmittauslaitoksen toimeksiantona. Tutkimuksessa käytetty laitteisto on Maanmittauslaitoksen tuotannon käyttämät Topcon Hiper HR GPS -vastaanottimet sekä Topcon FC-5000 ja Topcon FC-6000 maastotietokoneet. Maanmittauslaitos on valtion virasto, joka toimii maa- ja metsätalousministeriön alaisena. Maanmittauslaitoksella työskenteli vuonna 2022 1778 henkilöä, joista vakinaisia oli 1522 henkilöä. Erilaisia maanmittaustoimituksia tuli vuonna 2022 vireille 18 810 kpl, joista suurin yksittäinen toimituslaji oli lohkominen 11 717 kpl. (Maanmittauslaitos 2025c.)

Tätä opinnäytetyötä avustivat Maanmittauslaitoksen maastotiimi sekä Rovaniemen toimipisteen henkilökunta. Maanmittauslaitoksen maastotiimi suorittaa laite- ja ohjelmatestauksia ennen niiden ottamista tuotannon käyttöön. Maastotiimi koostuu Maanmittauslaitoksen työntekijöistä eri puolilta Suomea.

## 2 SATELLIITTIMITTAUSMENETELMÄ

### 2.1 Yleistä satelliittipaikannuksesta

Satelliittipaikannus on nykyisen maastomittauksen mahdollistavan satelliittimittauksen perusta. Satelliittipaikannus perustuu tarkkaan ajansiirtoon, jonka avulla mitataan etäisyyksiä ja etäisyyseroja. Paikannussatelliitit lähettävät signaaleja, joista selviävät satelliittien sijainnit ja kellotiedot. Signaalihavainnoista selviää satelliittien sijainti havaintohetkellä, jolloin vastaanotin laskee sijaintinsa. (Laurila 2012, 291.) Ennen satelliittien mahdollistavaa paikannusta ainoa globaali paikannus perustui tähtitieteeseen (Laurila 2012, 279). Satelliittipaikannuksesta puhuttaessa puhutaan GNSS-järjestelmästä (Global Navigation Satellite System). Tunnetuin GNSS-järjestelmä on Yhdysvaltojen GPS (Global Positioning System). Muita tällä hetkellä globaaleja kaikkien hyödynnettävissä olevia GNSS-järjestelmiä ovat Euroopan unionin hallinnoima Galileo, venäläinen GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) ja kiinalainen BeiDou. Edellä mainittujen järjestelmien lisäksi alueellisesti toimivia järjestelmiä ovat intialainen NavIC ja japanilainen QZSS (Ashman 2018). GNSS-järjestelmä mahdollistaa paikantamisen lähes missä tahansa Maan pinnalla, milloin tahansa vallitsevista olosuhteista riippumatta. Paikantamisen lisäksi GNSS-järjestelmää käytetään maailmanlaajuisesti mm. ajanmäärityksessä sekä muissa yhteiskunnan keskeisissä toimissa kuten tietoverkkojen synkronoinnissa (Laurila 2012, 282).

GNSS-järjestelmä koostuu kolmesta lohkoista:

- **Avaruuslohkoon** kuuluvat järjestelmän käyttämät satelliitit, jotka kulkevat lähes ympyrämuotoisia ratoja yli 20 000 km korkeudessa. Kulloisestakin järjestelmästä riippuen satelliittien määrä vaihtelee 20 ja 30 välillä. Jokaisessa satelliitissa on useita tarkkoja atomikelloja (Ashman 2018).
- **Valvontalohkoon** kuuluvat valvonta-asemat, useat antenni- sekä seuranta-asemat. Valvonta-asemat määrittävät satelliittien ratoja ja kellovirheitä sekä varmistavat järjestelmän toimivuuden (Ashman 2018).

- **Käyttäjälohkoon** kuuluvat kaikki GNSS-järjestelmän käyttäjät. Satelliittien välittämä aika- ja sijaintitiedon käyttäjiä ovat esimerkiksi yksittäiset henkilöt, teollisuus, logistiikka, liikenne, pankki ja energia-alan eri toimijat tai valtio. GNSS-järjestelmät ovat mukana lähes kaikkien jokapäiväisessä elämässä, vaikka sitä ei itse tiedostaisi (Spacefinland 2023).

## 2.2 Satelliittipaikannuksen mittaustavat

Satelliittipaikannuksessa voidaan käyttää erilaisia mittausmoodeja. Mittausmoodit on jaettu kolmeen perusmittausmoodiin, jotka ovat absoluuttinen paikannus, differentiaalin paikannus ja vaihehavaintoihin perustuva paikannus. Mittausmoodit erotellaan muun muassa mittauksissa käytettävien havaintolaitteiden määrän, havaintosuureiden ja systemaattisten virheiden korjaamistekniikoihin (Laurila 2012, 293).

Absoluuttinen paikannus on laajimmin käytetty satelliittipaikannuksen tapa. Absoluuttiseen paikannukseen riittää yksi havaintolaite. Täten sen suurimpia käyttäjiä ovatkin mm. älypuhelimet ja navigaattorit. Absoluuttinen paikannus on peruspaikannusta, jonka paikannus tarkkuus on alle 10 m. Absoluuttisessa paikannuksessa havaitsija mittaa etäisyydet vähintään neljään tarkasti tunnetulla radalla liikkuvaan satelliittiin. Etäisyys määritetään mittaamalla satelliitin lähettämän signaalin kulku-aika C/A-koodin ja viivemenetelmän avulla. Tarkka kulkuajan mittaus edellyttää erittäin tarkkoja kelloja, minkä vuoksi paikantimen kellon käyntivirhe arvioidaan ylimääräisellä satelliittimittauksella. Havaitsijan sijainti saadaan etäisyyksien muodostamien pallopintojen leikkauspisteestä. (Laurila 2012, 293.)

Differentiaalinen paikannus vaatii havaintolaitteen lisäksi reaaliaikaisessa mittauksessa tietoliikenneyhteyden tukiasemalle, jonka avulla korjataan satelliittilohkoon ja ilmakehään liittyviä virheitä. Korjaus mahdollistaa absoluuttista paikannusta tarkemman sijainnin määrittämisen. Differentiaalisessa mittauksessa päästään 0,5–5,0 m tarkkuuksiin. Tarkemman paikannuksen ansiosta differentiaalista paikannusta käytetään mm. paikkatietoja kerätessä sekä ammattimaisessa auto- ja laivaliikenteessä. Differentiaalisen paikannuksen etäisyyden mittaus perustuu

C/A-koodihavaintoon ja paikka lasketaan suhteessa satelliitteihin. (Laurila 2012, 293).

Vaihehavaintoihin perustuva suhteellinen mittaus on yksi kolmesta perusmittaus-tavasta, muita ovat absoluuttinen paikannus ja differentiaalinen paikannus. Vai-hehavaintoihin perustuva mittaus on näistä kolmesta perusmittaustavasta tarkin. Vastaanottimen sijainti mitataan vertailuvastaanottimen eli tukiaseman suhteen. Vaihehavaintoihin perustuvan suhteellisen mittauksen käyttämällä kantoaallolla, vastaanottimen ja satelliitin etäisyys voidaan mitata jopa millimetrien tarkkuu-della. Millimetritarkkuus satelliittien suhteen on kuitenkin merkityksetöntä satelliit-tien ratojen huonomman tarkkuuden ja hallitsemattomien ilmakehävirheiden vuoksi (Laurila 2012, 282).

### 2.2.1 RTK

Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus eli RTK-mittaus (Real Time Kinematic) on tarkkuutensa vuoksi yleinen maanmittauksessa käytettävä mittausmenetelmä. RTK-mittauksilla päästään senttimetrin tarkkuuteen. RTK-mittaus on vaativa mit-taustapa, joka käyttää hyödyksi kaikkia mahdollisia havaintosuureita ja ratkaisee alkutuntemattomat ”lennosta”. RTK-mittauksessa tarvitaan tunnetulla pisteellä si-jaitseva vertailuvastaanotin eli tukiasema sekä paikantava vastaanotin, joka ky-kenee vastaanottamaan tukiasemalta korjaustietoa. Tukiasema välittää teke-mänsä vaihehavainnot vastaanottimelle, joka prosessoi yhteiset havainnot, rat-kaisee alkutuntemattomat ja muut mittauksessa tarvittavat suureet reaaliajassa. (Laurila 2012, 319.)

RTK-mittauksessa tukiaseman ja vastaanottimen välille vaaditaan tiedonsiirtoyh-teys, jolla tukiasema lähettää korjausviestiä vastaanottimelle. Tiedonsiirtoyhteys voidaan toteuttaa radiomodeemilla tai matkapuhelinverkon välityksellä. Ra-diomodeemilla toteutettu tiedonsiirtoyhteyden toimintasäde on maastosta riip-puen muutamia kilometrejä. Matkapuhelinverkolla tukiaseman ja vastaanottimen etäisyydellä ei ole rajoitetta tiedonsiirtoon, mutta mittaustapa estää käytännössä yli 20 km etäisyyden. Etäisyyden ylärajan määrittävät ilmakehän ionosfäärihäiriöt

sekä mahdolliset näkemäesteet ja monitieheijastukset. Tukiaseman ja vastaanottimen välisen etäisyyden kasvaessa yli 10 km ionosfärihäiriöt alkavat vastaanmaan paikannussignaalin kantoaallon pituutta, joka estää riittävän alkutuntemattomien luotettavan tuloksen saavuttamisen. Alkutuntemattomien luotettavan tuloksen estynyt saavuttaminen näkyy käytännössä vastaanottimen alustusajassa ja alustuksen luotettavuudessa. Tukiasemalla ja vastaanottimella tulee olla käytännössä seurannassa samaan aikaan 6–7 satelliittia riittävän luotettavuuden saavuttaakseen. Yhtäaikainen satelliittien seuranta vaikeutuu mahdollisesti myös vastaanottimen ja tukiaseman välisen etäisyyden kasvaessa. (Laurila 2012, 319–320.)

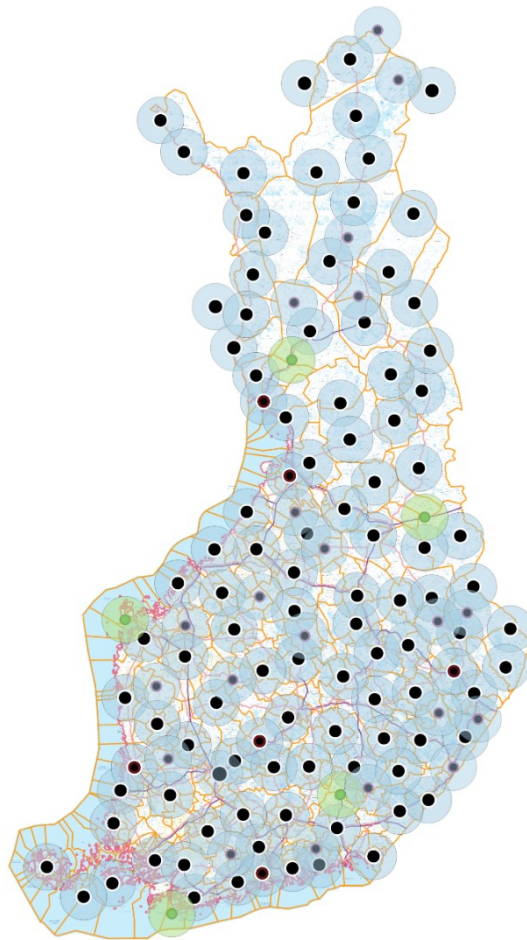
### 2.2.2 Verkko-RTK

Verkko-RTK on RTK-mittausmenetelmä, jossa vastaanotin vastaanottaa korjausviestiä yhden tukiaseman havaintojen sijasta laskentakeskuksen ja usean yksittäisen tukiaseman muodostamalta tukiasemaverkkojärjestelmältä. Verkko-RTK-menetelmässä tukiasemat vastaanottavat satelliittidatan ja välittävät sen laskentakeskukselle. Laskentakeskus prosessoi tukiasemien lähettämän datan sekä mittaaajan vastaanottimen lähettämän likimääräisen sijainnin ja muodostaa laskennallisen tukiaseman eli virtuaalitukiaseman vastaanottimen lähelle (Laurila 2012, 321). Virtuaalitukiasema lasketaan jokaisen mittaaajan vastaanottimelle erikseen, jolloin tukiaseman etäisyys pysyy aina lyhyenä (Tötterström, 2000). Virtuaalitukiaseman avulla mittaaajan etäisyys kiinteään tukiasemaan ei enää vaikuta samoin mittaustarkkuuteen kuin yhden tukiaseman RTK-mittauksissa. Verkko-RTK-mittauksessa tukiasemaverkosto mahdollistaa ilmakehän virheiden paremman mallintamisen, jolloin ionosfääriin ja troposfääriin liittyvät virheet voidaan korjata paremmin. (Laurila 2012, 320.)

Verkko-RTK tarvitsee RTK:n tavoin datayhteyden korjausviestin välittämiseen laskentakeskuksen ja vastaanottimen välille. Tukiasemaverkon tiheyttä lisätään sen toimivuuden takaamiseksi. Verkon tiheydestä huolimatta katvealueita esiintyy edelleen. Katvealueilla mittaaminen täytyy suorittaa omaa tukiasemavastaanotinta käyttäen. Tukiasema perustetaan alueelle, jossa vielä on tiedonsiirtoyh-

teys. Korjausdata välitetään tukiasemavastaanottimelta mittaajan vastaanottimelle radio- tai datayhteydellä. Tukiasemavastaanotin toimii lähelle tuotuna paremmin heikon yhteyden alueilla kuin kaukana sijaitseva kiinteä tukiasema. Ilmakehähäiriöt voivat myös hidastaa tai estää mittaamisen kokonaan tukiaseman ja vastaanottimen etäisyyden kasvaessa.

Suomessa toimivia Verkko-RTK paikannuspalveluita ovat Trimnet, HxGN SmartNet, Karera ja TopNet Live sekä Maanmittauslaitoksen oma FINPOS-paikannuspalvelu. Edellä mainituilla palveluilla on tällä hetkellä käytössä noin 130 tukiasemaa (kuvio 1). (Maanmittauslaitos 2023.)



Kuvio 1. FINPOS-paikannuspalvelussa käytössä olevat tukiasemat. Vihreällä kuvatut asemat ovat tulossa käyttöön syksyn 2023 aikana. (Maanmittauslaitos 2025a)

### 2.2.3 Oma tukiasema

Vastaanottimella perustettu tukiasema mahdollistaa usein mittaamisen myös alueilla, joissa mittaus ei Verkko-RTK-menetelmillä onnistuisi. Tukiasema pitää perustaa joko ennalta tunnetulle kiintopisteelle tai piste pitää mitata RTK- tai Verkko-RTK-menetelmällä. Vastaanottimen sijainti määritetään tukiaseman mukaan. Tukiaseman pystytys ja vieminen sille soveltuvalla paikalla vie aikaa ja vaatii osaamista. Tukiaseman ja vastaanottimen välinen yhteys muodostetaan joko radio- tai datayhteydellä.

Radioyhteys toimii lähes kaikkialla, myös alueilla, joissa datayhteyttä ei ole tai se on liian heikko alkutuntemattomien ratkaisuun ja alustukseen. Radioyhteydellä on kuitenkin rajoitteita etäisyyden ja maaston suhteen. Suuret korkeuserot ja esimerkiksi puusto voi estää radiosignaalin kulun. Radiomodeemilla varustettujen vastaanottimien hankintahinta on myös korkeampi kuin ilman radiomodeemia.

Datayhteydellä muodostettu yhteys ei ole enää samalla tavalla riippuvainen tukiaseman ja vastaanottimen välisestä etäisyydestä tai maastonmuodoista kuin radioyhteys. Datayhteyden ongelma tulee alueilla, joissa puhelinverkkoa ei ole tai se on heikko. Vastaanottimen antenni on kuitenkin huomattavasti parempi kuin matkapuhelimen, joten järjestelmä toimii usein myös paikoissa, joissa matkapuhelimen internetyhteys ei enää toimi.

### 3 HAVAINTOTARKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

#### 3.1 Yleistä havaintotarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä

Satelliittihavaintojen tarkkuuteen vaikuttaa monia tekijöitä. Mittaukseen käytetyn havaintojakson aikana vastaanotin ja paikannussatelliitti liikkuvat, jolloin satelliittien sijainti on tunnettu vain rajallisen ajan. Paikannussignaalin ratatietojen ja tarkan ajanmittauksen avulla paikannussatelliitin sijainti voidaan laskea riittäväällä tarkkuudella.

Avaruussää, jolla tarkoitetaan Maan ionosfäärin ja lähiavaruuden muuttuvia olosuhteita, kuten auringosta johtuvat ilmakehän häiriöt, on vaikeasti ennustettava ja hallittava. Avaruussään vaikutus on yleensä Maan magneettikentän muodon vuoksi voimakkaampaa lähempänä Maan magneettisia napa-alueita. (Ilmatieteen laitos 2025e.)

Havaintotarkkuuteen vaikuttaa satelliittien määrä sekä havaintohetkellä vallitseva satelliittigeometria. Myös vastaanottimen ympäristössä olevat mahdolliset minitieheijastumat sekä vastaanottimen tai mittajaan virheellinen toiminta vaikuttavat havaintotarkkuuteen. (Laurila 2012, 305–306.)

#### 3.2 Satelliittigeometria

Satelliittigeometria tarkoittaa satelliittien sijoittumista suhteessa vastaanottimeen. Ionosfäärin vaikutus havaintoihin kasvaa mitä pidemmän matkan paikannussignaali joutuu matkaamaan ionosfäärin läpi. Lähimpänä horisonttia olevat satelliitit, joiden signaalin matka ilmakehässä olisi pisin, voidaan sulkea mittauksesta pois katkaisukulmaa säätämällä. Paikannuksen tarkkuuden vuoksi olisi hyvä ainakin yhden satelliitin sijaita pystysuoraan ylhäällä eli zenitissä vastaanottimeen nähden. Satelliittigeometrian vaikutusta mittaushavaintojen tarkkuuteen kuvataan DOP-lukujen avulla. DOP (Dilution of Precision) tarkoittaa tarkkuuden heikentymistä satelliittien sijainnin suhteen. Tutkimuksessa seurattavat DOP-luvut ovat

HDOP (Horizontal Dilution of Precision), jolla kuvataan tasosijainnin epävarmuutta sekä VDOP (Vertical Dilution of Precision), jolla kuvataan korkeussijainnin epävarmuutta. (Laurila 2012, 308.)

DOP-lukujen lisäksi havaintojen tarkkuutta kuvaavia arvoja ovat VRMS (Vertical Root Mean Square), jolla ilmoitetaan GPS-vastaanottimen havainnoiman korkeuden poikkeama todellisesta korkeudesta. HRMS (Horizontal Root Mean Square), jolla kuvataan GPS-vastaanottimen havainnoiman sijainnin vaakatasoisen sijainnin poikkeamaa todellisesta sijainnista. (Laurila 2012, 309.)

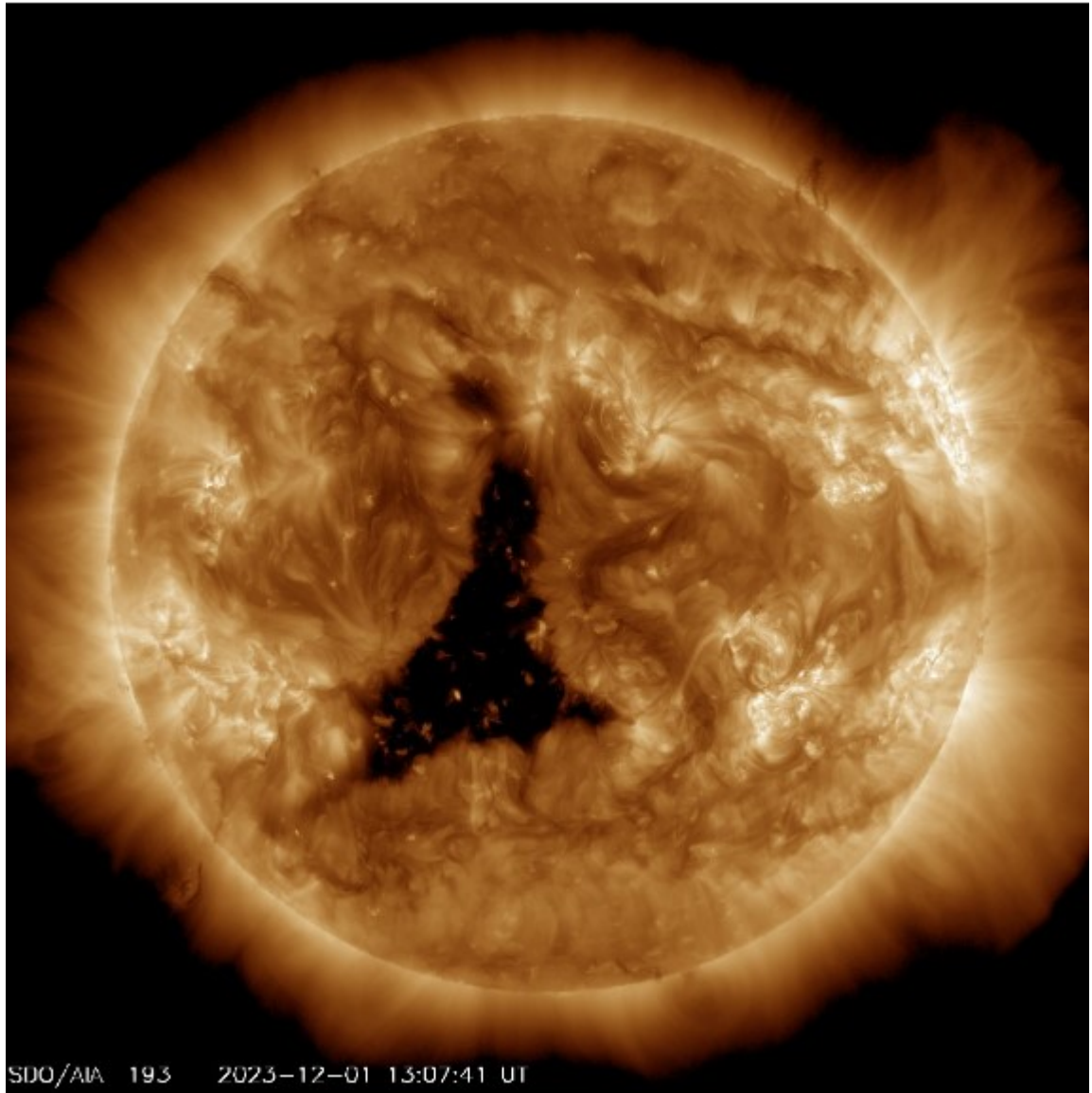
### 3.3 Aurinko

Maasta katsoen aurinko voi näyttää aina melko samalta, vaikka todellisuudessa se on aurinkokuntamme dynaamisin jatkuvasti muuttuva ainoa tähti. Aurinko on kaasupallo, jossa valtavan kuumuuden takia kaasu on täysin ionisoitunutta, jolloin sitä kutsutaan plasmaksi. Auringon rakenne voidaan jakaa kolmeen vyöhykkeeseen. Näissä vyöhykkeissä tapahtuu jatkuvaa energian muodostumista ja liikettä. Auringon ytimen lämpötila on n. 15 miljoonaa celsiusastetta. Ytimen korkeassa lämpötilassa jatkuvasti neljä miljoonaa tonnia ainetta muuttuu fuusioprosessissa energiaksi. Ytimestä vapautuva energia kulkee hitaasti sähkömagneettisena säteilynä ytimen ympärillä olevan säteilyvyöhykkeen läpi yllä olevalle konvektiovyöhykkeellä. Konvektiovyöhykkeellä kuplivan plasman lämpötila on viilentynyt n. 2 miljoonaan celsiusasteeseen. Konvektiovyöhykkeellä energia siirtyy ylemmäs konvektion reaktion ylläpitämin virtauksin, jossa vapautuva kuumempi ja kevyempi aine nousee kohti pintaa ja viilentynyt painavampi osa vajoaa takaisin konvektiovyöhykkeen pohjalle. Energian siirtyminen on varsin hidasta ja energian matka ytimestä pinnalle kestääkin noin 170 000 vuotta. (NASA 2023.) Auringolla ei ole varsinaista kiinteää pintaa, vaan auringosta vapautuva energia leviää säteilynä ja kaasuihin muodostaen kaasukehän. Kaasukehä on jaettu kolmeen osaan fotosfääriksi, kromosfääriksi ja koronaksi. Auringon ihmissilmille näkyvää ”pintaa” kutsutaan fotosfääriksi, jota seuraa ohut kromosfääri, jonka yläosa lämpenee ja muuttuu koronaksi. Koronan kaasu on hyvin kuumaa eikä Auringon

painovoima pysty pitämään sitä paikoillaan vaan korona laajenee koko ajan pois-päin auringosta. Tätä koronasta etäännyvää energiaa kutsutaan aurinkotuuleksi. (Ilmatieteen laitos 2025b.)

Aurinko tuottaa magneettikentän, joka vaikuttaa Maahan ja koko aurinkokuntaamme. Auringon pyöriessä myös magneettikenttä pyörii jättimäistä spiraalia. Aurinko ei käyttäydy koko ajan samalla tavalla, vaan sillä on aktiivisempia ja passiivisempia vaiheita. Nämä muodostavat auringon syklin. Yleisesti puhutaan 11 vuoden syklistä, jonka aikana Auringon maantieteelliset navat vaihtavat magneettista napaisuuttaan. Napojen magneettisuus vaihtuu eli palautuu taas noin 11 vuoden kuluttua, joten todellisuudessa magneettinen jakso kestää kokonaisuudessaan noin 22 vuotta. Tunnetuin Auringon aktiivisuuden mitta on auringon pilkkuluku. Pilkkuluku ei ole kovin täsmällinen suure, mutta jo 1600 luvulla aloitettu havaintojen keruu mahdollistaa pitkän havaintojen seurannan ja vertailun. Auringonpilkkut ovat auringon pinnalla näkyviä tummia läiskiä. Voimakkaan magneettikentän läpäistessä auringon pinnan se estää plasman virtailun, joka normaalissa tilanteessa nostaisi lämpöä Auringon alemmista osista. Magneettikentän läpäistessä pinnan jumiin jäänyt kaasu säteilee auringosta vapautunutta energiaa avaruuteen ja jäähtyvä kaasu muuttuu ympäristöä tummemmaksi. Magneettikentän heikennyttyä alemmista vyöhykkeistä kumpuava kuuma plasma nousee pintaan ja tumma pilkku katoaa. (Ilmatieteen laitos 2025a). Auringon aktiivisesta ajasta käytetään myös termiä pilkkumaksimi. Auringon pilkkuluku kuvaa kohtuullisesti myös muuta auringon aktiivisuutta, kuten roihujen ja masapurkausten määrää. (NASA 2023.)

Usein pilkkuryhmien ympärillä nähdään myös muita auringon aktiivisuuteen liittyviä purkauksia. Roihupurkaukset ovat konvektiovyöhykkeen yläpuolella magneettikenttään varastoituneen energian räjähdysmäinen vapautuminen, joka lähettää avaruuteen syöksyn suurenergisiä hiukkasia sekä sähkömagneettista säteilyä. Roihupurkauksista vapautuva säteily ja suurenergiset hiukkaset voivat vahingoittaa ja haitata satelliitteja tai jopa pahimmillaan vaarantaa avaruuslentäjien terveyden. (Ilmatieteen laitos 2025c.)



Kuvio 2. Nopean aurinkotuulen lähdealueina toimivat korona-aukot näkyvät mustina alueina auringon pinnalla (Nasa 2023)

Roihupurkausten lisäksi Auringon sinkoamia jättimäisiä kaasupilviä kutsutaan koronan massapurkauksiksi (kuvio 2). Koronanpurkausten sisältämä aine on peräisin alemmista kaasukehän osista, joka isoissa massapurkauksissa voimistaa aurinkotuulen virtausta sekä sen kuljettamaa magneettikenttää, mikä vaikuttaa ionosfäärin sähköjohtavuuteen häiriten siten mm. radioliikennettä ja GPS-signaaleja. Nopeat aurinkotuulen muutokset magneettikenttään saattavat myös aiheuttaa sähkövirtoja Maassa sijaitseviin johdinverkkoihin, mahdollisesti vaurioittaen esimerkiksi muuntajia. Yleinen auringosta johtuva avaruussään ilmentymä on reontulet. (Ilmatieteen laitos 2025c.)

### 3.4 Ionosfääri

Ionosfääri on ilmakehän ylin osa, joka alkaa n. 80 kilometrin korkeudesta, eikä sillä ole selkeää ylärajaa. Ionosfäärissä kaasusta suurin osa on ionisoitunutta eli plasmaa. Auringon röntgen- ja ultraviolettisäteiden sekä Maan magneettikehältä tulleiden nopeiden hiukkasten törmäyksien vaikutuksesta kaasumolekyylien uloimmat elektronit irtoavat ja kaasu ionisoituu eli siitä muodostuu plasmaa.

Tiheimmillään ionosfäärin plasma on 100–400 kilometrin korkeudessa. Kaasun tiheyden pienentyessä ylöspäin kohotessaan ionosfääri sulautuu Maan magneettikehään. Maapallon koko ilmakehä, mukaan lukien ionosfääri, toimii satelliittien lähettämän paikannussignaalin etenemisen väliaineena. Erityisesti ionosfäärin ja troposfäärin tilat vaikuttavat paikannussignaalin etenemiseen. Ionosfäärin plasma on hyvä sähkönjohde, joten se on tärkeässä vuorovaikutuksessa sähkö- ja magneettikenttien kanssa. (Ilmatieteen laitos 2025d.)

Auringon aktiivisuus vaikuttaa ionosfäärin tilaan. Ionosfääri on jatkuvassa muutostilassa. Auringosta vapautuneiden hiukkasten ja säteilyn voimistuessa ionosfäärin vapaiden elektronien määrä kasvaa. Elektronien tiheydestä riippuu, mitä aallonpituuksia se heijastaa ja kuinka suurta viivettä se aiheuttaa paikannussignaalin aallonpituuksien kulkuun. Auringosta vapautuneiden aktiivisten hiukkassäteilyiden aikana paikannussignaalin näennäinen kulkumatka vaihtelee liikaa häiriten signaalin etenemistä. Riittävä määrä häiriötä voi jopa estää satelliittipaikannuksen kokonaan. (Laurila 2012, 306–305.) Ionosfäärin läpi kulkeminen aiheuttaa satelliittien lähettämiin radiosignaaleihin vääristymän, jonka suuruus riippuu signaalin lähetystaajuudesta sekä signaalin kohtaamien vapaiden ionien määrästä. (Maanmittauslaitos 2025c.)

Ionosfäärissä tapahtuvat myös revontulet, jossa auringosta lähteneet hiukkaset päätyvät Maan magneettikentän myötä törmäämään ionosfäärissä happiatomeihin ja typpimolekyyleihin virittäen ne hetkellisesti korkeampaan energiatilaan. Viritystilän purkautuminen energia vapautuu valona. (Ilmatieteen laitos 2025e.)

## 4 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

Tutkimus toteutettiin Maanmittauslaitoksen toimeksiantona. Maanmittauslaitos tarjosi tutkimukseen tarvittavan kaluston sekä työvoiman ja ohjelmat tutkimuksen suorittamiseksi. Tutkimuksen maastotyöt suoritettiin usean päivän aikana erilaisen ilmakehän häiriötilojen saavuttamiseksi. Tavoitteena saada erilaisten häiriötilojen vallitessa erilaisissa mittausolosuhteissa kerätty vertailukelpoista havaintodataa.

### 4.1 Tutkimuksessa käytetty kalusto

Tutkimuksessa testit suoritettiin Maanmittauslaitoksen tuotannon käyttämällä kalustolla. Käytössä oli Topcon Hiper HR -satelliitivastaanottimet sekä Topcon FC-5000 ja Topcon FC-6000 maastotietokoneet. Käytettäviin laitteisiin ladattiin tukiaseman käytön pilvipalvelun välityksellä mahdollistavat lisenssit. Tukiasema ja Rover-vastaanotin laiteparien ohjelmistoversioiden varmistettiin olevan samat. Tukiasemalaitteisiin ladattiin aina ennen testipäiviä ajantasaiset TopGeon toimitamat asetustiedot. Tutkimuksessa käytettävän vertailulaitteen ohjelmistoversio oli tuotannon käytössä oleva Firmware 5.5-PROD. Maastotiimin mukana oli testattavana myös uusi versio Firmaware 5.5.2-PROD, jonka toimintaa verrattiin tuotannon nykyisin käytössä olevaan Firmware 5.5-PROD versioon.

Tukiasemalaitteet asetettiin entuudestaan tunnetuille pisteille. Testissä käytettiin kahta kiintopistettä sekä yhtä ennalta takymetrillä RTK-mittauksilla määritetyistä apupisteistä mitattua testikentän apupistettä. Valituilla tukiasemapisteillä saatiin vertailudataa tukiaseman etäisyyden vaikutuksesta havaintoihin. Tukiasemavastaanottimet asetettiin kolmijaloilla tunnetuille pisteille ja tasattiin optisen pakko-keskitysalustan avulla (kuvio 3). Vastaanottimen korkeus suhteessa kiintopisteen tai testikentän AP5 pulttiin mitattiin rullamitalla pisteen pinnalta vastaanottimen sivun alareunaan. Maastotietokone laskee tukiaseman alustusvaiheessa vastaanottimen antennin leveyden ja vinomitan avulla Pythagoran lausetta käyttäen antennin todellisen pystymitan. Kauimmaisat tukiasemalaitteet yhdistettiin ulkoihin akkuihin, mikäli niitä oli käytettävissä, pidemmän toiminta-ajan takaamiseksi.



Kuvio 3. Valmis tukiasema perustettuna AP5-pisteelle

Mittausyksikkö pystytettiin kolmijaloilla ennalta mitatun tunnetun pisteen päälle. Kaikkien vastaanottimien korkeus asetettiin silmämääräisesti samalle tasolle, mutta ympäröivän maaston ja mahdollisten esteiden yläpuolelle. Antennin korkeus mitattiin rullamitalla vastaanottimen pohjasta, testikentän pulttiin tai putkeen. Asetuksia määritettäessä antennin korkeus ilmoitettiin vinomittana, jolloin ohjelma laskee Pythagoraan lauseen avulla antennin todellisen korkeuden.

## 4.2 Testin suunnittelu

Testin suunnittelu aloitettiin Teams-tapaamisilla, joissa keskusteltiin testin suunnittelusta ja tavoitteista. Konkreettinen tutkimuksen valmistelu alkoi 1.11.2023 kun työsuhteeni Maanmittauslaitoksen PATI (Peruspaikkatietopalvelu) tulosityksikköön astui voimaan. Tutkimuksen suunnitteluun osallistui Marko Ollikainen (johtava asiantuntija) sekä maastotiimin jäsenet, Jani Koivuniemi (toimitusinsinööri), Simo Marila (asiantuntija), Teppo Peltomäki (kartoittaja), Timo Äijö (kartoittaja), Esko Kananen (toimitusinsinööri) ja Kari Kaikkonen (toimitusinsinööri).

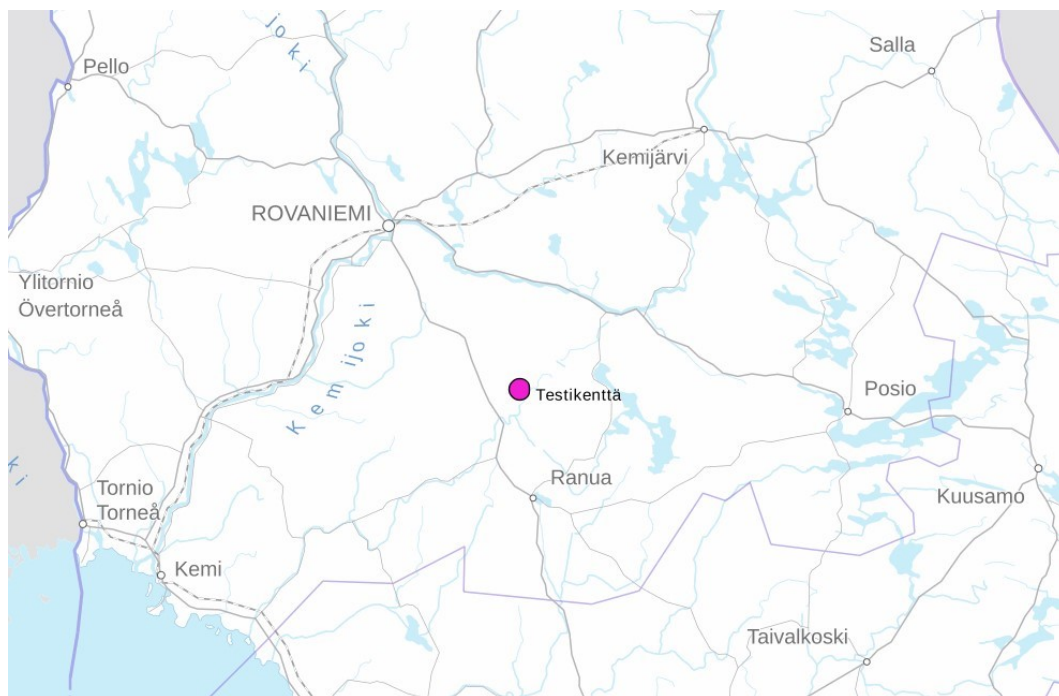
Maanmittauslaitoksen maastotiimin tehtävänä on suorittaa laite- ja ohjelmatestauksia ennen niiden ottamista tuotannon käyttöön. Maastotiimillä on testikenttiä eri puolilla Suomea. Testikenttien pisteille on rakennettu kiinteitä pultteja tai putkia (kuvio 4), joiden sijainti on mitattu takymetrillä. Pisteitä kutsutaan referenssipisteiksi. Näille pisteille asetetun vastaanottimen havaintoja voidaan verrata todellisiin tasokoordinaatteihin ja korkeuslukemaan. Testin suorittaminen valmiilla maastotiimin testikentällä mahdollisti ajankäytön keskittämisen käytännön havaintojen keräämiseen, eikä kohteita tarvinnut enää alkaa tarkistusmittaamaan takymetrillä.



Kuvio 4. Testikentän R2 kiveen poratut puldit

Suunnitelma eteni viikoittaisilla Teams-palavereilla. Palavereissa käsiteltiin tutkimuksen etenemistä ja tutkimuksen kenttätestauksen suunnittelua. Maastomittauksia oli tarkoitus suorittaa maastotiimin kanssa viikolla 45 sekä otollisten olosuhteiden vallitessa myös myöhemmin marras-joulukuun aikana Ilpo Kaihuan (kartoittaja) sekä Kari Kaikkosen (toimitusinsinööri) ja muutaman vapaaehtoisten avustuksella.

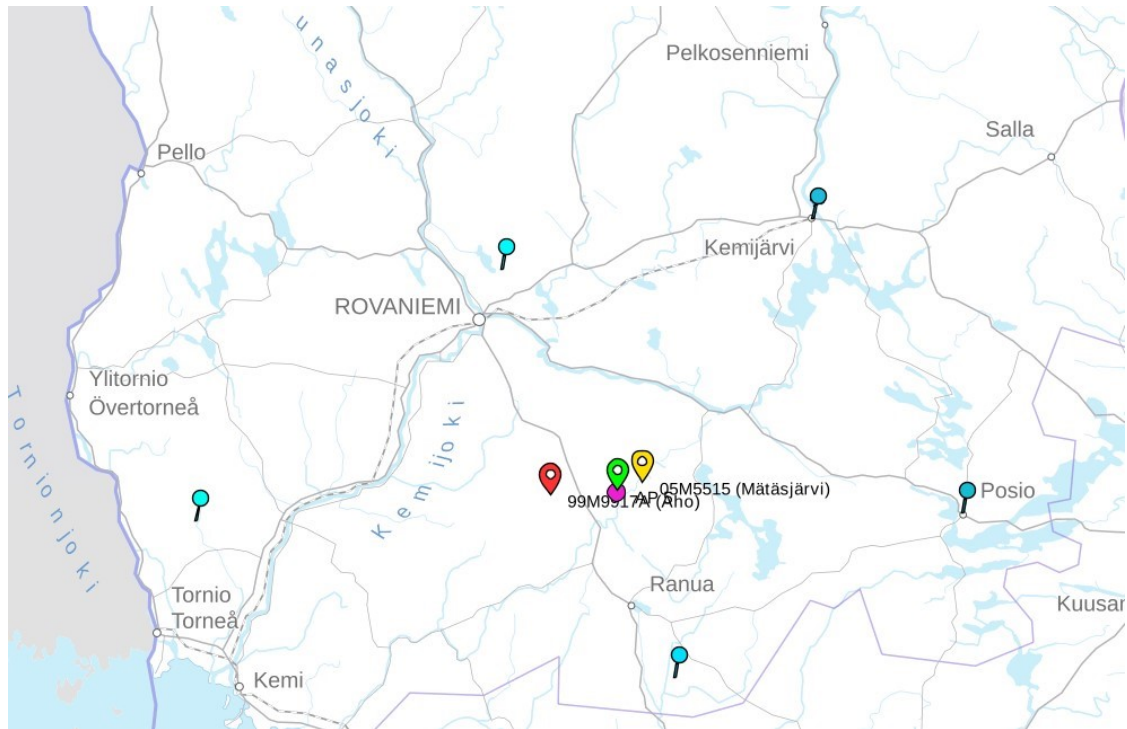
Tutkimuksen tarkoituksena oli saada vertailukelpoista mittausdataa tukiaseman sijainnin sekä pilvipalvelun ja FINPOS-paikannuspalvelulla välitetyn korjausdatan vaikutuksesta mittaustarkkuuteen ilmakehässä tapahtuvien erilaisten häiriötilojen vallitessa. Maastotestin suurimpana haasteena oli ajoittaa testit otolliselle ajankaksolle. Testi vaati aina vähintään neljä henkilöä, jotta jokaisella olisi yksi käytettävä laite testin aikana. Vaadittavien henkilöiden aikataulun yhteensovittaminen nopealla aikataululla ja toivotun tai ennusteen mukaisen ilmakehähäiriötilan yhteensovittaminen oli haasteellista. Erilaisia ilmakehän häiriöennusteita seuraamalla saattoi yrittää ajoittaa testijakson häiriölliseen aikaan, mutta häiriöiden ennustaminen edes päivien päähän osoittautui erittäin haasteelliseksi. Testin havaintojen keruu-aikaa pyrittiin pidentämään lisäämällä tukiasemalaitteisiin ulkoinen virtalähde. Edes ulkoinen virtalähde ei aina riittänyt toivottuun testausaikaan yltämiseen. Ilmakehähäiriöiden ennustettavuuden vaikeuden vuoksi viikon 45 jälkeiset testit pyrittiin tekemään lyhyellä varoitusajalla otollisten olosuhteiden sekä tutkimukseen osallistuvien aikataulun puitteissa.



Kuvio 5. Ranuan testikentän sijainti

Testit suoritettiin Maanmittauslaitoksen maastotiimin vuonna 2019 valmistamalla testikentällä Ranuan kunnassa Kämäjoen ja Mätäskairantien varressa (kuvio 5). Testin suorituspaikkaa valitessa tärkeää oli löytää alue, joka on riittävän kaukana Maanmittauslaitoksen käytössä olevista tukiasemista eli niin kutsutulla katvealueella (kuvio 6). Tällaisella alueella suoritettu testi vastaa parhaiten Maanmittauslaitoksen henkilöstön käytännön mittaamisessa kohtaamia ongelmatilanteita. Kiinteiden tukiasemien etäisyyden kasvaessa oli oletettavaa, että tukiasemaverkon vastaanottimelle välittämän korjausviestin vastaanottaminen hidastuu aktiivisen ilmakehähäiriön vallitessa.

Testi suoritettiin Pohjois-Suomessa ilmakehähäiriöiden mahdollisuuden maksimoimiseksi. Maan magneettikentän muoto ohjaa auringosta lähiavaruuden kautta tulevia varattuja hiukkasia Maan magneettisten napojen alueille (-2025e). Tästä syystä ilmakehän häiriöitä havaitaan varmemmin pohjoisessa.



Kuvio 6. FINPOS (vaalea turkoosi), FinnRef asemat (tumma turkoosi), testissä käytetyt tukiasemapisteet (punainen, vihreä ja keltainen symboli) sekä testikenttä (violetti pallo).

Testikenttää lähimmät maanmittauslaitoksen käytössä olevat FINPOS- ja FinnRef- asemat:

Ranua	44 km	FinnRef
Rovaniemi	56 km	FinnRef
Kemijärvi	76 km	FINPOS
Posio	78 km	FINPOS
Tornio	95 km	FINPOS

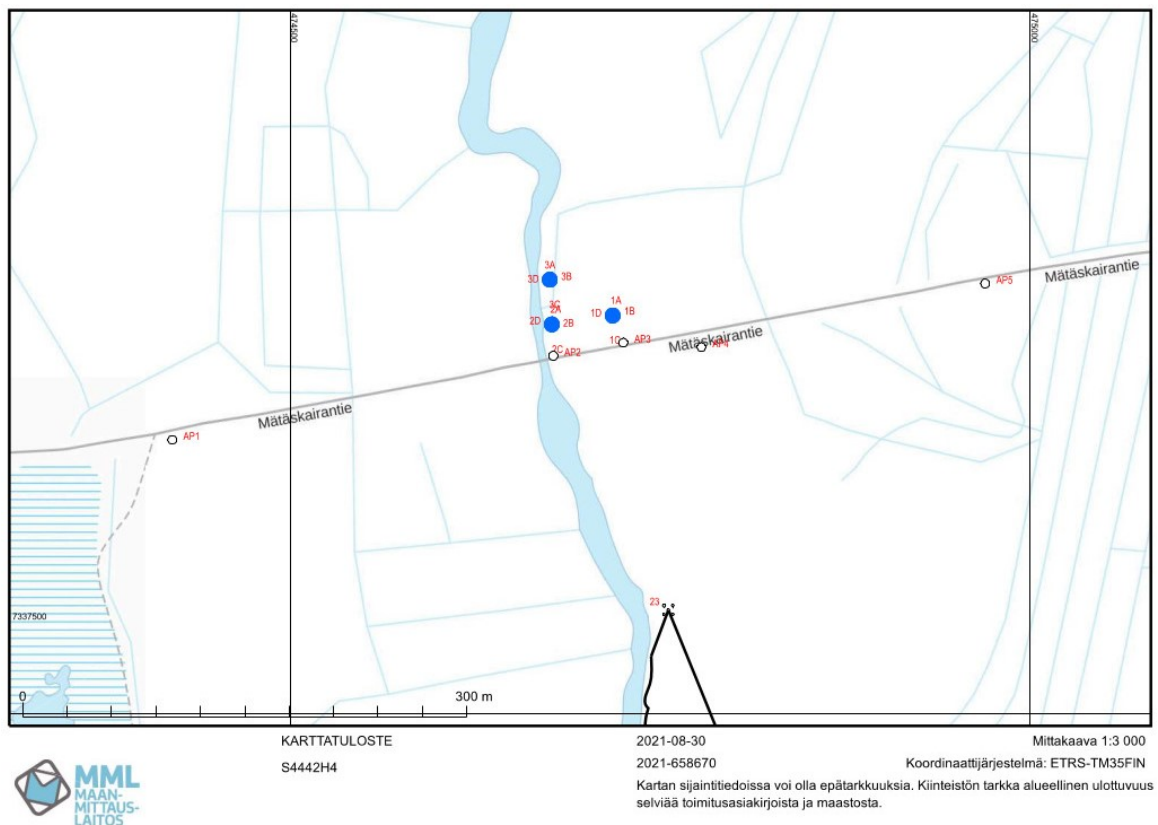
(Ollikainen 2023.)

### 4.3 Testikenttä

Ranuan testikohteessa on kolme maastotiimin valmistamaa testikenttää (kuvio 7). Testikentät on nimetty seuraavasti R1, R2 ja R3. Jokainen kenttä sijaitsee puuston ja maaston suhteen erilaisessa ympäristössä. Testikentät on rakennettu 2019 maastotiimin toimesta riittävän etäälle käytössä oleviin tukiasemiin nähden.

Testikentällä R2 käytettävät tunnetut pisteet olivat maakiveen porattuja pultteja, joiden päässä oli kaiverruttu risti kartoitussauvan tarkkaa asettamista varten. Testikentällä R3 käytetyt tunnetut pisteet olivat maahan upotettuja metalliputkia. Kartoitussauvan asettaminen putkiin onnistui helposti ja statiivi tuki sauvaa estäen sen heilumisen. Pisteiden sijainti on rakennusvaiheessa todettu takymetrilla. Testikenttäpisteiden lisäksi alueella on apupisteitä, joita on käytetty testikenttien pisteiden mittaamisessa. Apupisteiden sijainti on todettu takymetrilla.

Testikenttä R1 sijaitsee ylempänä avarammalla paikalla suhteessa R2 ja R3 kenttään. R1 kenttää oli tarjottu käyttää vain ilmakehänhäiriöiden ollessa niin voimakkaita, ettei mikään laite saa havaintoja R2 ja R3 kentillä.



Kuvio 7. Ranuan testikentät. R1-testikentän pisteet kuvassa 1A,1B ja 1C. R2-testikentän pisteet kuvassa 2A, 2B, 2C. R3-testikentän pisteet kuvassa 3A, 3B, 3C.

Testissä käytettiin R2 ja R3 kenttää. R2 ja R3 kentän välinen etäisyys on noin 30 m. R2 kenttä on koivumetsässä suhteellisen helppossa maastossa ilman suurempia esteitä signaalin kulkemiseen (kuvio 8). Testit suoritettiin alkutalvesta, joten koivuissa ei ollut signaalia estäviä lehtiä ja maassa oli lunta, joka puolestaan voi jopa parantaa signaalin kulkua R2 kentällä.



Kuvio 8. Testikenttä R2.

Kenttä R3 sijaitsee korkeassa ja tiheässä kuusikossa (kuvio 9). Kuusikon oksisto on kauttaaltaan peittävä. Koillisen suunnalla oksistossa oli pieni aukko, joka mahdollisesti vaikutti 6 km päässä olevan tukiaseman ja Rover-vastaanottimen tiedonsiirtoon positiivisesti. Jokaisella käytettävillä testikentillä on neljä kiinteää taakymetrillä mitattua tunnettua pistettä.



Kuvio 9. Testikenttä R3.

#### 4.4 Valitut tukiasemapisteen

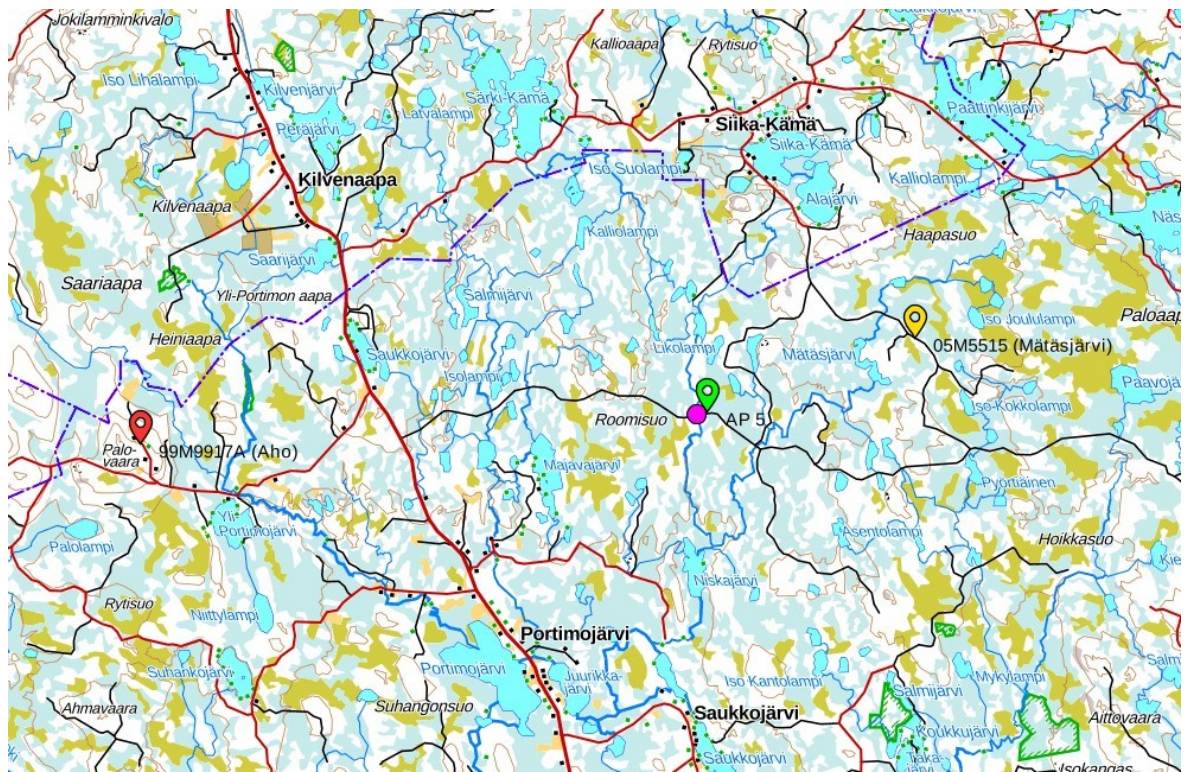
Testissä käytettävien tukiasemien sijaintiin vaikutti niiden etäisyys testikenttiin. Tavoitteena oli saada vertailukelpoista mittausdataa kolmelta eri etäisyydeltä sijaitsevalta tukiasemalta. Ensimmäinen tukiasema pyrittiin asettamaan alle kilometrin päähän kentästä, toinen tukiasema noin 5 kilometrin päähän ja kolmas n. 15 kilometrin päähän testikentistä. Tavoitteena oli käyttää tarkkoja tunnettuja pisteitä tarkkojen vertailuhavaintojen saamiseksi. (Kuvio 10.)

Lähin tukiasema asetettiin testikentän läheisyyteen apupiste AP5- koordinaateilta löytyvälle putkelle. AP5 sijaitsi Mätäskairantien penkereellä noin 1 m sivussa ajouralta. AP5 pisteen tukiasema sijaitsi 285 m päässä testikentältä. Tukiaseman

länsi-itä suunnassa oli avonainen taivasnäkymä ja länsi-etelä suunnalla korkeaa havupuustoa vajaan 10 m päässä.

Keskimmäinen tukiasema asetettiin 05M5515 (Mätäsjärvi) kiintopisteelle. Kiintopisteen ETRS89-koordinaatit ovat tasotarkkuusluokkaa 2. Kiintopisteen rakenteena on pultti maakivessä noin 60 metriä Joutenojan tiestä lounaaseen mäntymetsässä. Matkaa testikentille noin 6 kilometriä.

Kauimmainen tukiasema asetettiin 99M9917A (Aho) kiintopisteelle. Kiintopisteen ETRS-89 -koordinaatit ovat tasotarkkuusluokkaa 2. Kiintopisteen rakenteena on pultti maakivessä. Kiintopiste sijaitsee Palovaarantien päässä, avoimella pellolla ladon seinästä 14.5 m etelään, muuntaja pylvästä 25.7 m lounaaseen. Matkaa testikentille on noin 15 kilometriä.



Kuvio 10. Tukiasemalaitteiden sijainnit paikkamerkillä. Testikenttien sijainti kuvattu pinkkinä ympyränä. (Paikkatietoikkuna 24.1.2024.)

#### 4.5 Maastotyöt

Maastotyöt aloitettiin viemällä laiteparien tukiasemalaitteet valituille pisteille. Tukiasemat pystytettiin aiemmin mainitulla tavalla kolmijalan päälle, alustettiin ja

saatettiin toimintakuntoon. Tukiasemalaitteen ja havaintoja keräävän Rover-laitteen välille muodostettiin yhteys, jonka avulla tukiasemalaite välittää Topcon-pilvipalvelusta saatavaa korjausdataa Rover-laitteelle.

Testikentällä tukiasemalaitteiden Rover-vastaanottimet sekä FINPOS-vertailuvastaanotin asetettiin testikentän rakennetuille pisteille. Mittausasetukset määritettiin laitteisiin yhdenmukaisiksi. Laitteet ottavat viisi havaintoa ennen tallentamista ja havaintojen tarkkuudeksi asetettiin VRMS suunnassa 0.05 m ja HRMS suunnassa 0.03 m. Mittaushavaintojen kerääminen aloitettiin yhtä aikaa kaikilla laitteilla. Jokaisen tallennetun havainnon jälkeen laite alustettiin uudelleen. Tukiasemalaitteiden Rover-vastaanottimien alustus suoritettiin peittämällä antenni foliolla päällystetyllä levyllä. Antenni pidettiin peitettynä, kunnes laite menetti yhteyden satelliitteihin ja meni "auto"-tilaan. Mikäli tukiasemavastaanotin alustetaan Magnet field -sovelluksen kautta, yhteys tukiasemaan katkeaa. Uuden yhteyden luominen vaatii vastaanottimen maastotietokoneen ja tukiasemana olevan GPS-vastaanottimen bluetooth-yhteyden. FINPOS-vertailuvastaanotin alustettiin Magnet Field -ohjelman alustatoiminnon kautta. Lisäksi FINPOS-vertailulaitteen yhteys laskentakeskukseen katkaistiin ja virtuaalinen tukipiste muodostettiin uudelleen aina kymmenen tallennetun mittaushavainnon jälkeen. Virtuaalisen tukipisteen uudelleen muodostamisella pyrittiin vähentämään mahdollisten virheellisten alustusten ja havaintojen tallentamista. Havainnot yksilöidään tallennusvaiheessa juoksevilla koodilla. Mikäli jollain laitteella tulee testiä haittaava tai hidastava ongelma, kaikilla laitteilla testaaminen lopetetaan ja testiä jatketaan yhtä aikaa sen ollessa jälleen mahdollista.

Testipäivät muodostuivat yleensä kahdesta testistä, joiden välissä oli ruokatauko. Testin pituus vaihteli noin 50 minuutista noin 1 tuntiin ja 45 minuuttiin. Kahtena testipäivänä saatiin tehtyä vain yksi testijakso yhteysongelmien vuoksi. Testiajan määrittä usein tukiasemien akkujen kesto sekä ilmakehän häiriötilanne. Testausjaksolta dataa kerättiin yhteensä kymmeneltä testijaksolta kuuden päivän ajalta.

Tukiasemalaitteiden akun kesto vaikutti suuresti testin suorittamiseen. Kauimmaisilla tukiasemilla pyrittiin käyttämään ulkoisia lisävirtalähteitä, jotka lisäävät toiminta-aikaa huomattavasti. Satunnaisesti internetyhteys katkesi tukiaseman

päästä, joten myös tukiaseman yhteys pilvipalvelimeen katkesi ja Rover-vastaanottimelle ei saatu enää korjausdataa, joka aiheutti testin keskeyttämisen.

Testikenttää vaihdettiin R2 ja R3 välillä niin, että molemmilta kentiltä saataisiin havaintodataa sekä ilmakehähäiriön vallitessa että ilmakehähäiriön ollessa vähäistä tai olematonta. Kokonaisuudessaan testit jakautuivat niin, että R2 kentällä suoritettiin kuusi testijaksoa ja R3 kentällä neljä jaksoa.

## 5 HAVAINNOT

Tutkimuksen havainnotja verratessa jaan havaintojen analyysin kahteen osaan: tukiaseman ja tuotannon käytössä olevan Verkko-RTK palvelun (FINPOS) havaintojen välisiin eroavaisuuksiin sekä tukiaseman etäisyyden vaikutus havaintojen suhteelliseen tarkkuuteen.

### 5.1 Tukiasema vs. Verkko-RTK

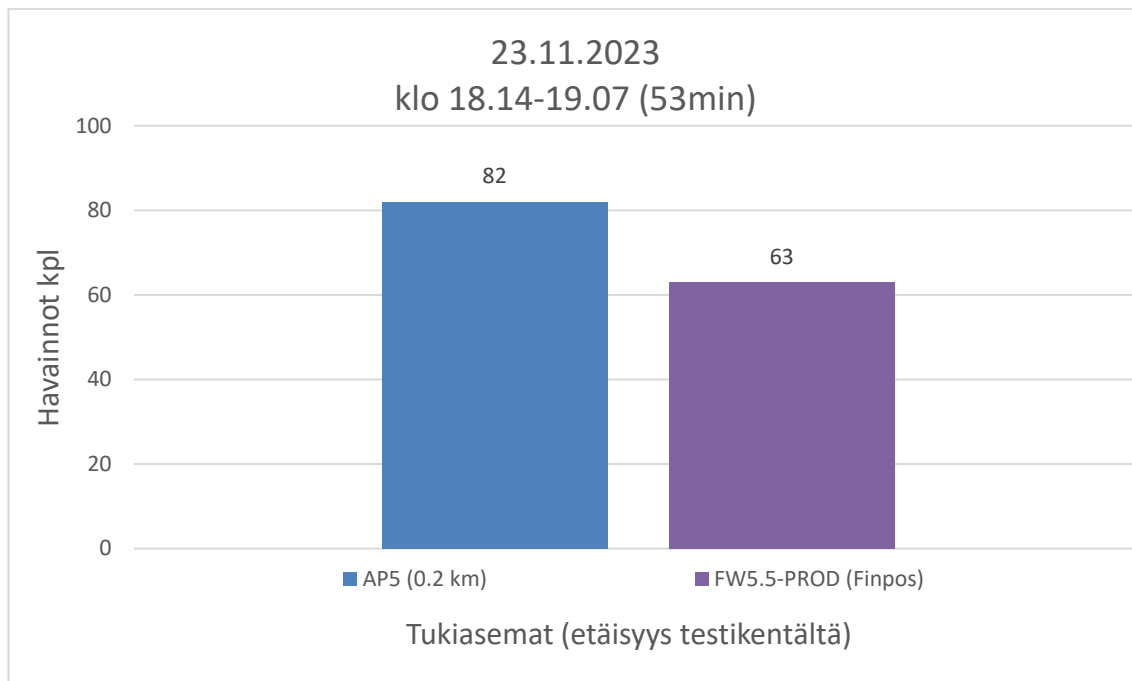
Tutkimuksessa käytetty lähin tukiasema (AP5) sijaitsi Mätäskairantien varressa noin 1m sivussa ajourasta (kuvio 11). AP5 tukiasema sijaitsi 285 m päässä, noin 5 metriä havaintoja keräävää Rover-vastaanotinta ylempänä, länsi-itä välillä oli avonainen taivas näkymä, länsi-etelä suunnalla oli korkeaa havupuustoa vajaan 10 m päässä. Alueella oli heikohko matkapuhelinverkko. Tuotannon käytössä oleva vertailulaite oli yhteydessä Maanmittauslaitoksen FINPOS järjestelmään, jonka lähimmät tukiasemat olivat etelässä Ranualla 44 kilometriä ja pohjoisessa Rovaniemellä 56 kilometrin päässä.



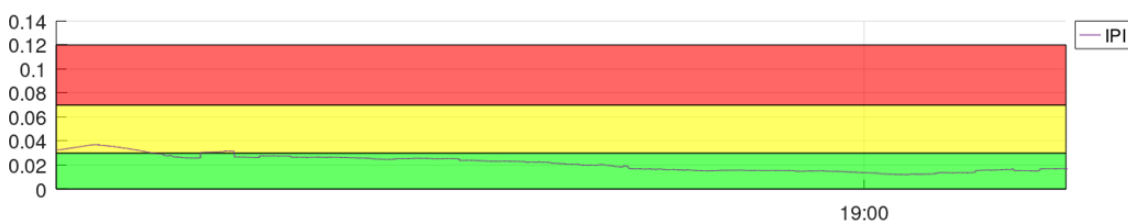
Kuvio 11. AP5 tukiaseman maasto.

Tutkimuksen aikana ilmakehähäiriöiden ollessa vähäisiä (kuvio 13) tai kun niitä ei esiintynyt, tukiaseman ja tuotannon vertailulaitteiden keräämien havaintojen määrässä tai tarkkuudessa ei havaittu merkittävää eroavaisuutta ottaen

huomioon tutkimuskohteen etäisyyden FINPOS-järjestelmän tukiasemiin (kuvio 12). Tukiaseman etäisyyden vaikutus näkyi myös näissä tilanteissa, tukiasemalaitteen keräten enemmän havaintoja. Molempien laitteiden havainnoista vain noin 1 % oli 10 cm sivussa havaintojen keskipisteestä.

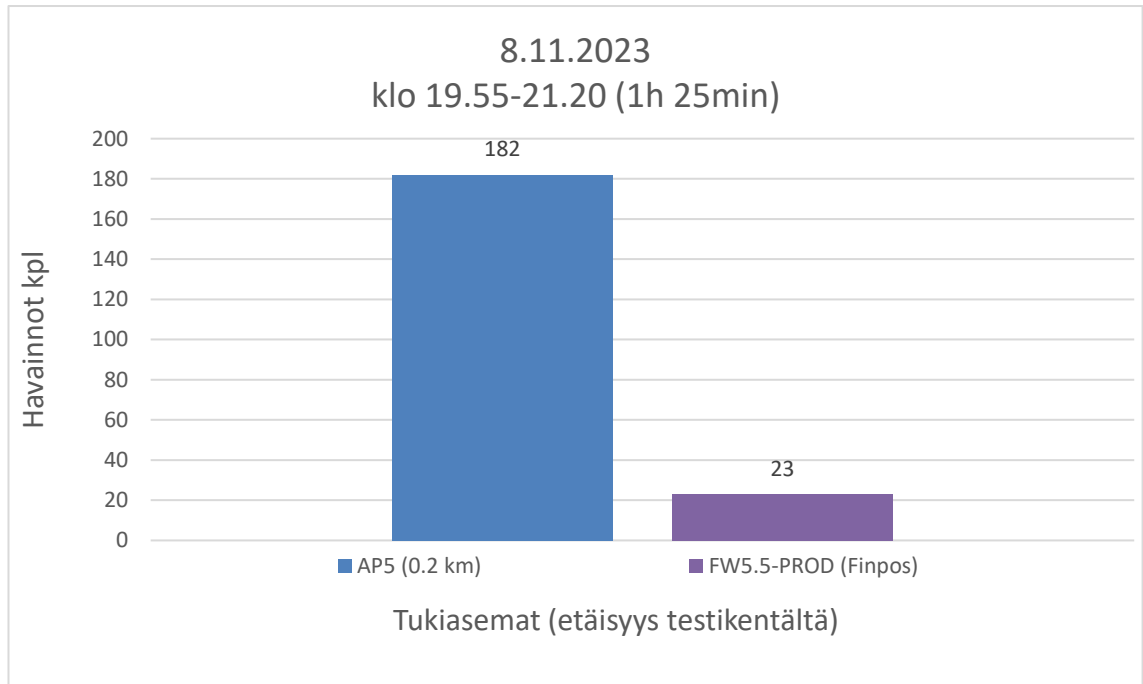


Kuvio 12. Havaintomäärä 23.11.2023 klo 18.14–19.07, lähin tukiasema (AP5) ja vertailulaite FINPOS-järjestelmä

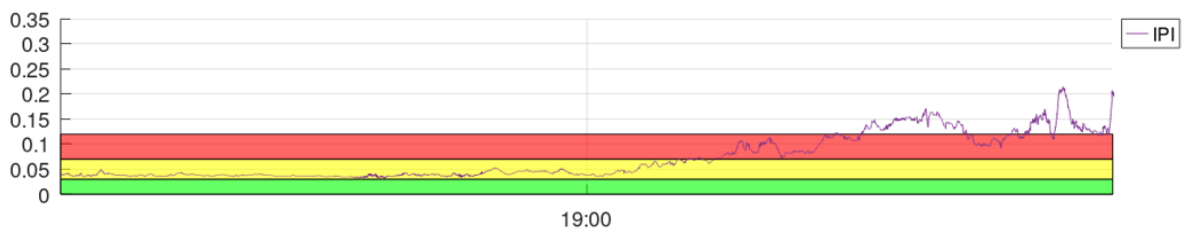


Kuvio 13. IPI-arvo 23.11.2023 klo 18.14–19.07

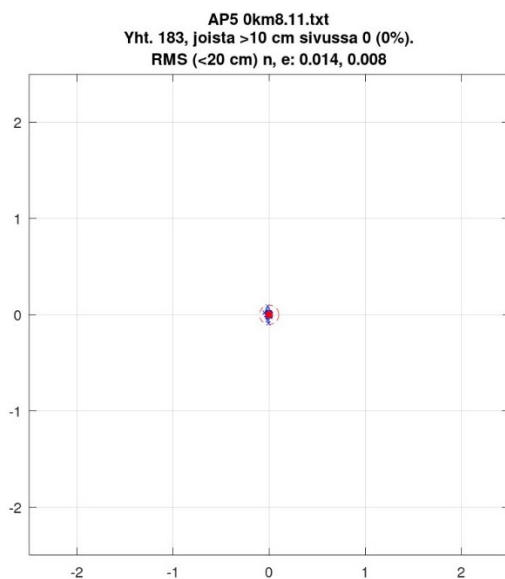
Ilmakehänhäiriön lisääntyessä lähelle perustettu tukiasema keräsi enemmän havaintoja sekä vähemmän virrehavaintoja FINPOS-laitteeseen nähden (kuvio 14). Häiriön ollessa voimakasta (kuvio 15) FINPOS-vertailulaite ei saanut ratkaistua alkutuntemattomia ja havaintojen kerääminen keskeytyi.



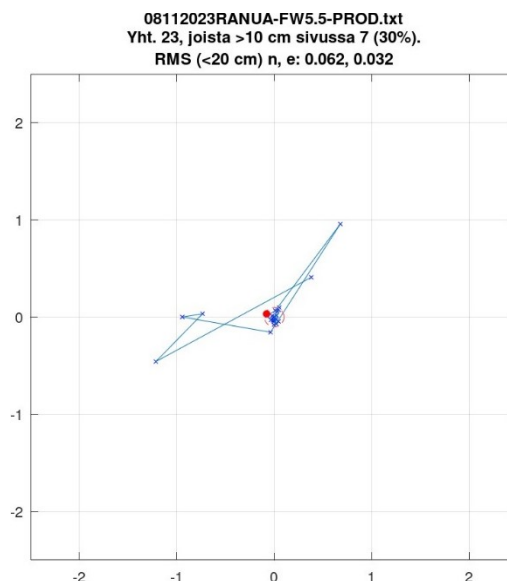
Kuvio 14. Havaintomäärä 8.11.2023 klo 19.55–21.20, lähin tukiasema (AP5) ja vertailulaite FINPOS-järjestelmä.



Kuvio 15. IPI-arvo 8.11.2023 klo 19.55–21.20.



Kuvio 16. Ilmakehähäiriön aikana AP5-tukiaseman havaintojen määrä ja tarkkuus. Havaintoja kerättiin 1 h 25 min. Referenssipiste punaisella.



Kuvio 17. Ilmakehähäiriön aikana tuotannon vertailulaite FINPOS-havaintojen määrä ja tarkkuus. Havaintoja kerättiin 1 h 25 min. Referenssipiste punaisella.

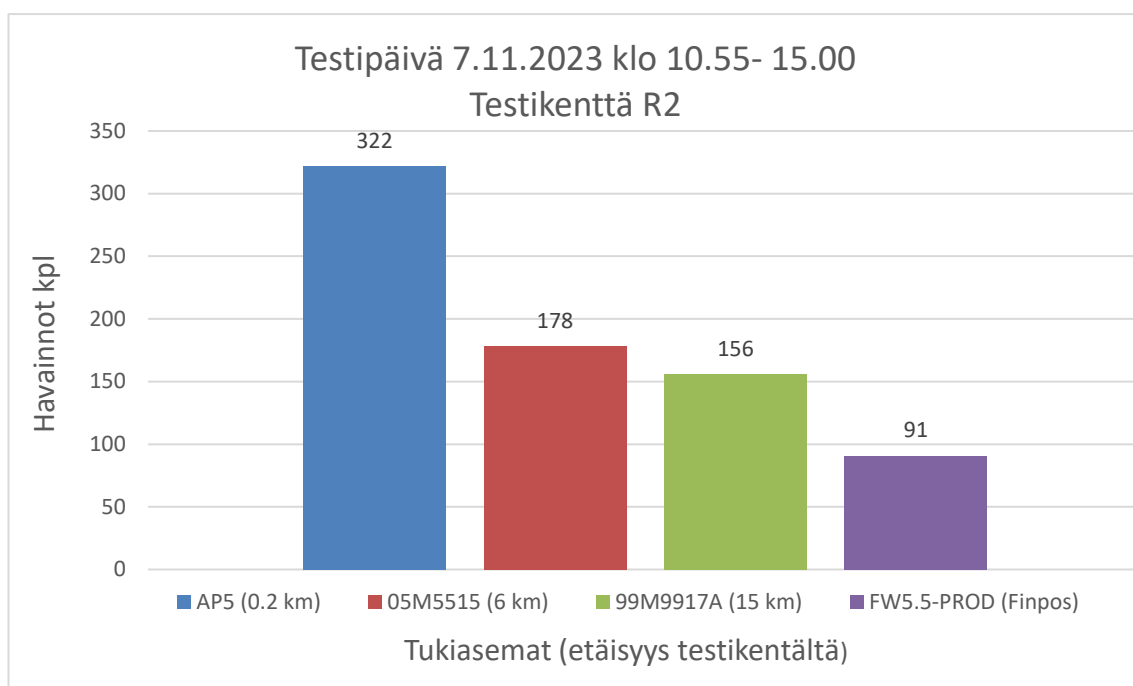
Ilmakehähäiriöt eivät vaikuttaneet juurikaan lähellä olevan tukiasemalaitteen havaintojen keskinäiseen tarkkuuteen (kuvio 16). Tuotannon FINPOS-järjestelmässä ilmakehässä tapahtuvat häiriöt näkyivät havaintojen määrän laskun lisäksi havaintojen keskinäisten virheiden määrän kasvussa (kuvio 17).

Oletettavissa olevien ilmakehähäiriöiden aikana on näiden havaintojen mukaan erittäin suositeltavaa käyttää omaa tukiasemaa ja pilvipalvelua korjausdatan välittämiseen.

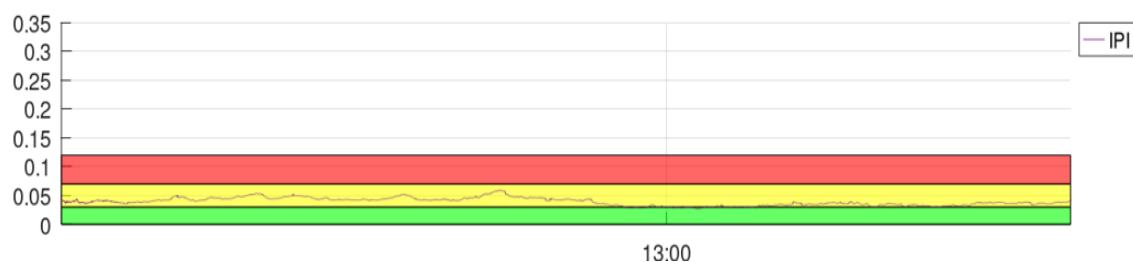
## 5.2 Tukiaseman etäisyyden vaikutus havaintojen määrään

Kaikki tukiasemalaitteet keräsivät aina enemmän havaintoja kuin tuotannon verrokilaite. Usein havaintojen määrä sekä havaintojen keskinäinen virhemäärä oli suoraan verrannollinen tukiaseman etäisyyteen. Lähin tukiasema keräsi useimmin eniten ja tarkimmin havaintoja, keskimäinen toiseksi eniten ja

kauimmainen vähiten. Poikkeuksena oli 9.11., jolloin keskimmainen tukiasema laite keräsi eniten havaintoja (kuvio 22) ja 23.11. (kuvio 26), jolloin kauimmainen tukiasemalaite keräsi eniten. Tilanne olisi mahdollisesti tasoittunut, mikäli kyseistä testijaksoa olisi pidennetty, mutta pidentäminen ei tuolloin onnistunut tukiasemalaitteiden virran ja yhteysongelmien sekä maastotiimin aikataulun vuoksi. Pilvipalvelun käytöstä korjausdatan siirtämiseen on toistaiseksi hyvin vähän testikokemusta eikä syytä poikkeuksiin osattu määrittää. Mahdollisia syitä voisi olla laitekohtainen häiriö tai laitteen hetkellinen yhteysongelma.

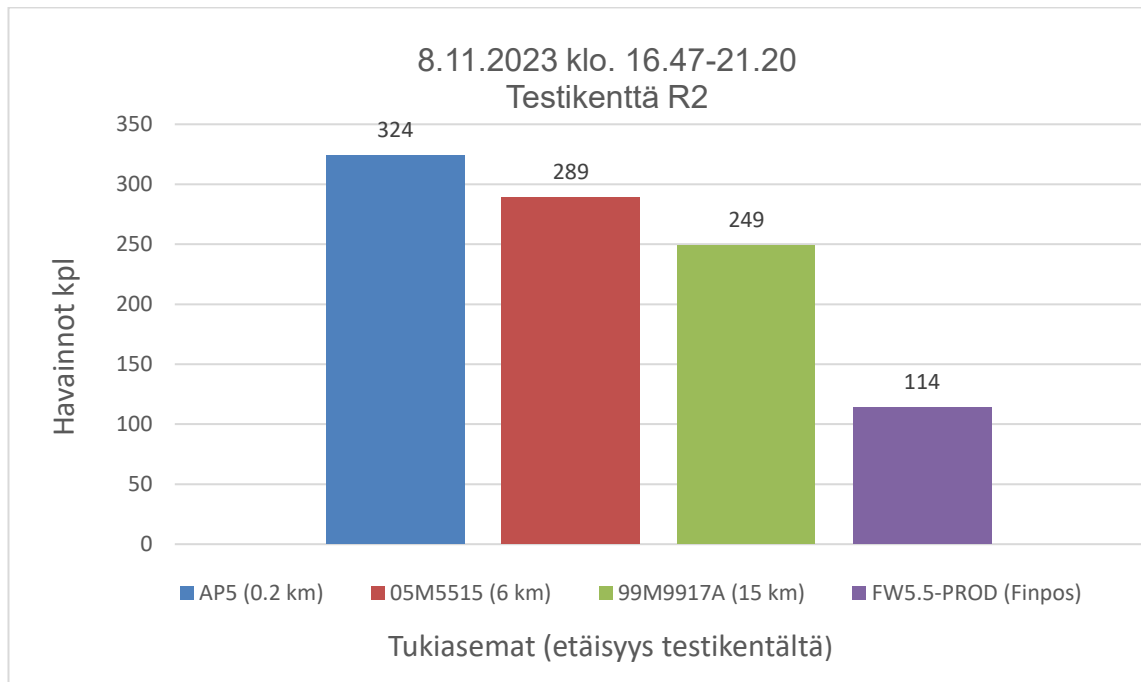


Kuvio 18. 7.11.2023 testipäivän havaintomäärät tukiasemalaitekohtaisesti

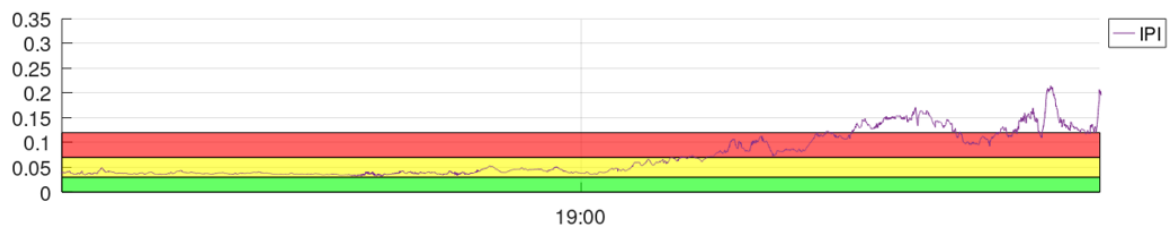


Kuvio 19. Testipäivä 7.11.2023 IPI-arvon kehittyminen testin aikana. Ionosfäärin IPI-keskiarvo testipäivän aikana 3.2.

Testipäivänä 7.11.2023 testi koostui kahdesta testijaksosta. Testi suoritettiin R2 kentällä, eli maastollisesti helpommalla testikentällä. Ensimmäinen testijakso oli klo 10.55–12.05 ja toinen klo 13.18–15.00. 7.11. testipäivän testien yhteenlaskettu laitekohtainen havaintomäärä noudatti tukiaseman etäisyyttä (kuvio 18). Testijaksojen aikana keskimääräinen IPI-arvo oli 3.2 (kuvio 19).



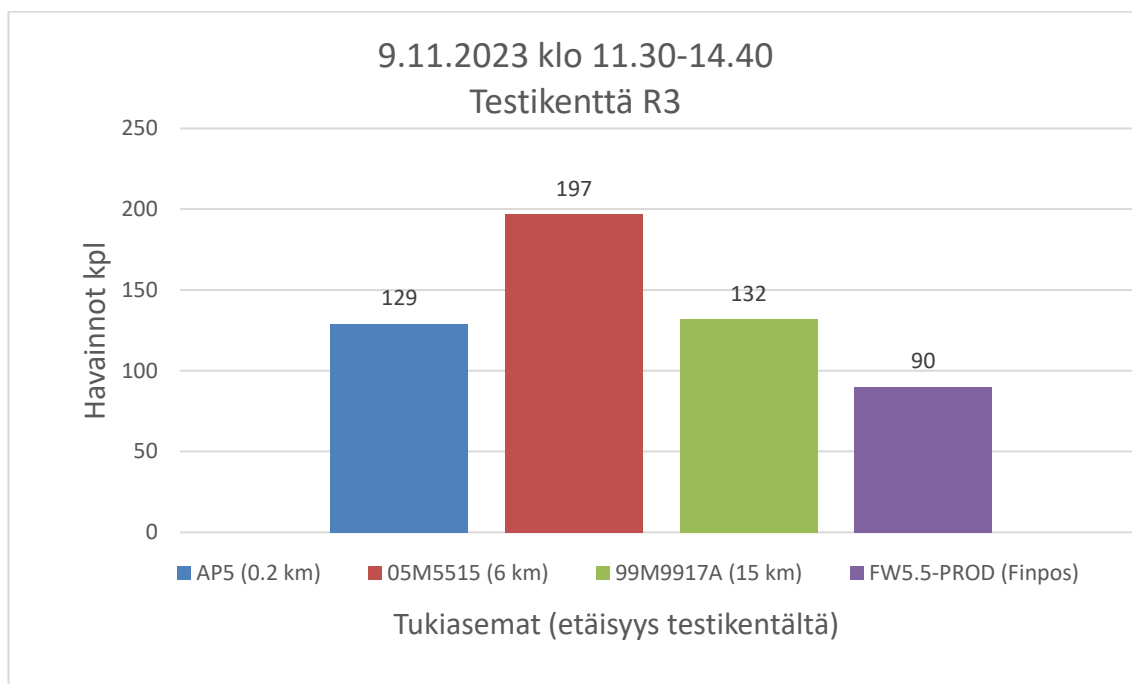
Kuvio 20. 8.11.2023 testipäivän havaintomäärät tukiasemalaittekohtaisesti.



Kuvio 21. Testipäivän 8.11.2023 IPI-arvon kehittyminen testi aikana. Ionosfäärin IPI-keskiarvo testipäivän aikana 5.4.

Testipäivänä 8.11.2023 testi päätettiin keskittää iltaan toivoen aiempien päivien tapaan häiriön lisääntyvän illan aikana. Testipäivä koostui kahdesta testijaksosta. Ensimmäinen testijakso oli klo 16.47–18.00 ja toinen klo 19.55–21.20. Ilmakehähäiriö lisääntyi testijakson loppua kohden (kuvio 21). Häiriön lisääntyessä tuotannon verrokki-laite jäi selvästi havaintojen määrässä tukiasemalaitteistoiden keräämistä havaintomäärästä (kuvio 20), myös havaintojen suhteellinen

tarkkuus heikkeni huomattavasti. Toisella testijaksolla lähin tukiasemalaite keräsi 182 havaintoa ja tuotannon FINPOS-verrokkilaite vain 23 havaintoa. Toisen testijakson keskimääräinen IPI-arvo oli 7.2. Testi suoritettiin testikentällä R2, joka on maaston suhteen helpompi. 8.11. testipäivän aikana keskimääräinen IPI-arvo oli 5.4.

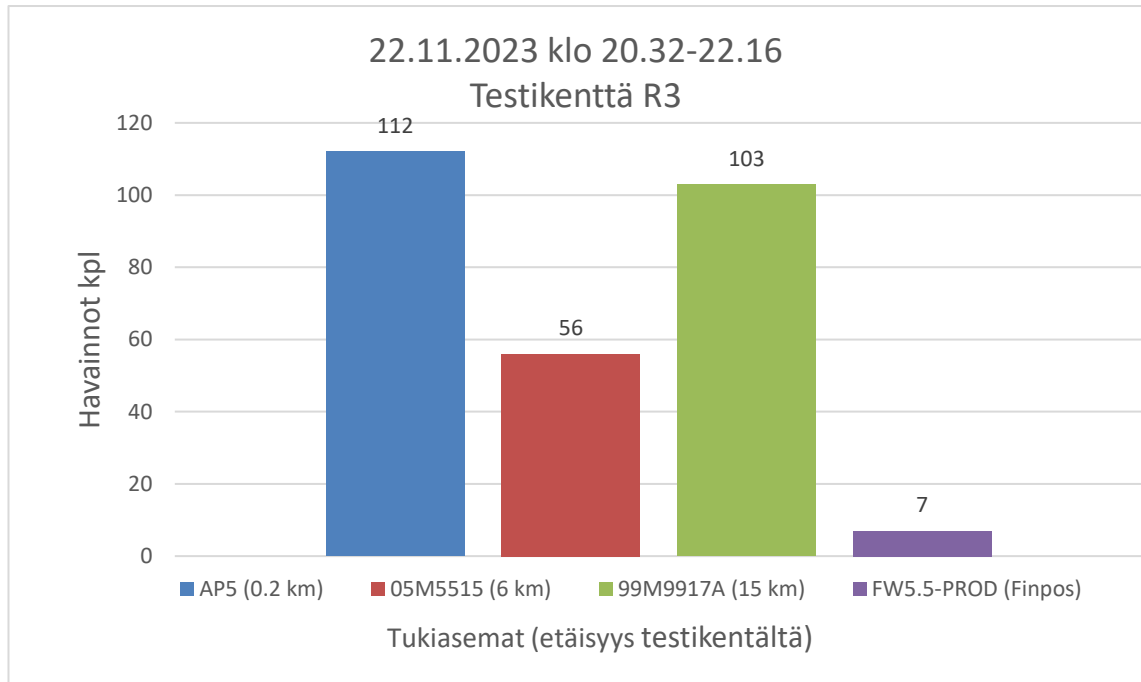


Kuvio 22. 9.11.2023 testipäivän havaintomäärät tukiasemalaitekohtaisesti.

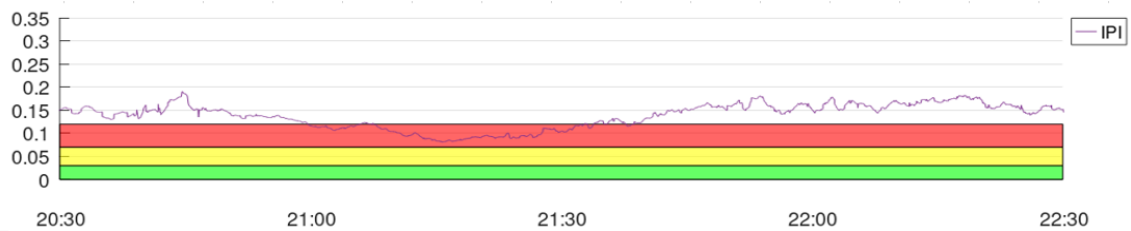


Kuvio 23. Testipäivä 9.11.2023 IPI-arvon kehittyminen testi aikana. Ionosfäärin IPI-keskiarvo testipäivän aikana 3.8

Testipäivänä 9.11.2023 testi koostui kahdesta testijaksosta. Testit suoritettiin maastotiimin aikataulun takia päivällä. Ensimmäinen testijakso oli klo 11.30–12.45 ja toinen klo 13.54–14.40. Testi suoritettiin haastavammalla R3 testikentällä. 9.11. testipäivän aikana ilmakehänhäiriön määrä pysyi suhteellisen tasaisena (kuvio 23), testipäivän keskimääräinen IPI-arvo oli 3.8.



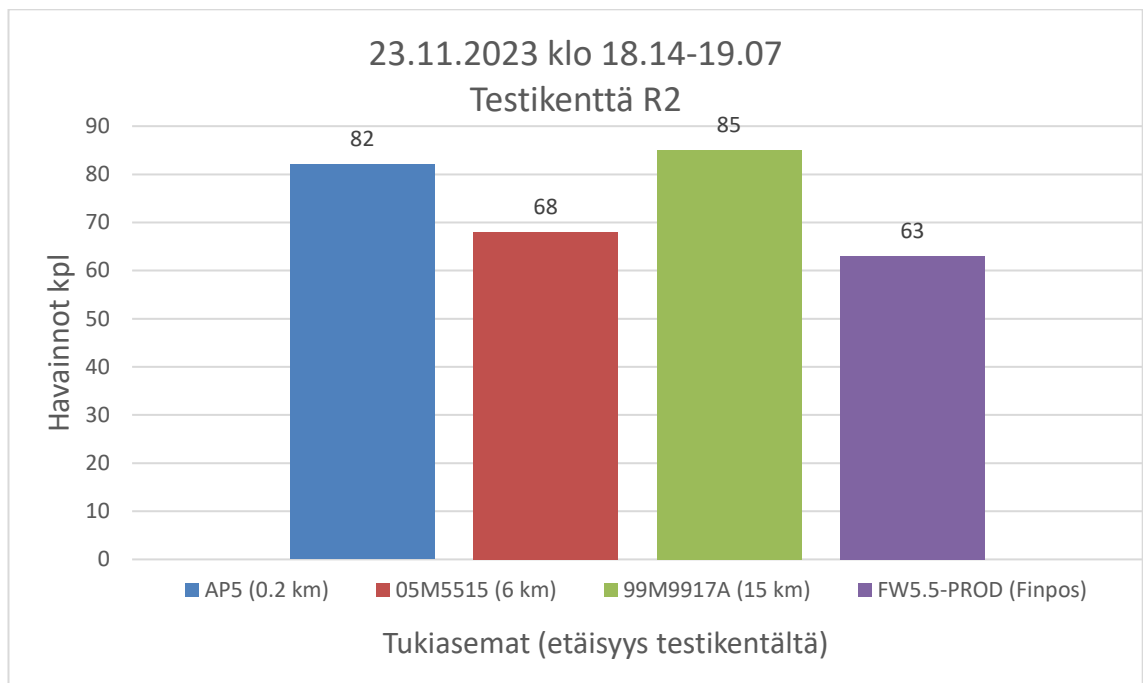
Kuvio 24. Testipäivän 22.11.2023 havaintomäärät tukiasemalaitekohtaisesti.



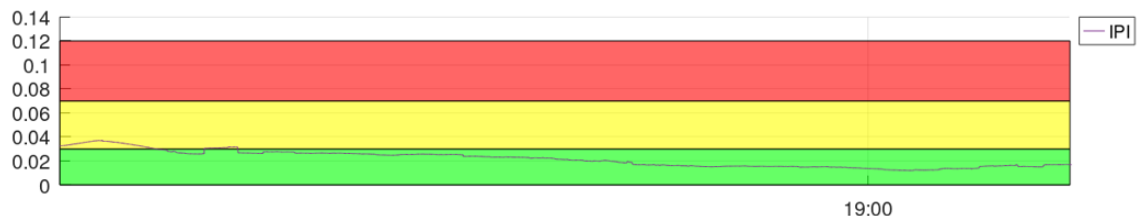
Kuvio 25. Testipäivä 22.11.2023 IPI-arvon kehittyminen testi aikana. Ionosfäärin IPI-keskiarvo testipäivän aikana 5.9.

Testipäivänä 22.11.2023 oli ensimmäinen testipäivä Rovaniemen Maanmittauslaitoksen toimipisteen laitteistolla. Laitteistoon oli asennettu pilvipalvelun vaatimat viimeisimmät ajantasaiset asetukset TopGeolta. Eroa aiemmin käytettäviin laitteisiin oli mm. maastotietokoneen Magnet Field -sovelluksen ohjelmistoversioissa, joiden vaikutuksesta tukiasemakäyttöön ei ollut aiempaa kokemusta. Tukiasemien valmiuteen saattamisessa oli vaikeuksia pilvipalveluyhteyksien muodostamisessa ja tukiaseman alustamisessa. Vaikeudet saattoivat johtua Magnet Fields -ohjelman vanhemmista versioista, mutta varmuutta tähän ei saatu. Useimmiten kärsivällinen yhteyden uudelleen muodostaminen lopulta johti yhteyden muodostamiseen. Muita ratkaisuja oli tukiasemapisteen uudelleen ni-

meäminen. Ongelmista oltiin yhteydessä myös TopGeon laitetoimittajaan, ja hänen avullansa testiä päästiin jatkamaan. Tukiasemien valmiiksi saattamiseen kului edellä mainittujen ongelmien takia yllättävän kauan aikaa ja se johti lyhyempään testijaksoon. Testijakson aikana saatiin hyvää ilmakehän häiriöaikaa peitteisessä maastossa. Haastava testikentän paikka ja ilmakehähäiriöt (kuvio 25) näkyivät selvästi kerättyjen havaintojen määrissä (kuvio 24) ja suhteellisissa tarkkuuksissa. Tukiasemalaitteet keräsivät odotetusti huomattavasti enemmän ja suhteellisesti tarkempia havaintoja. 22.11. testipäivän aikana keskimääräinen IPI-arvo oli 5.9.

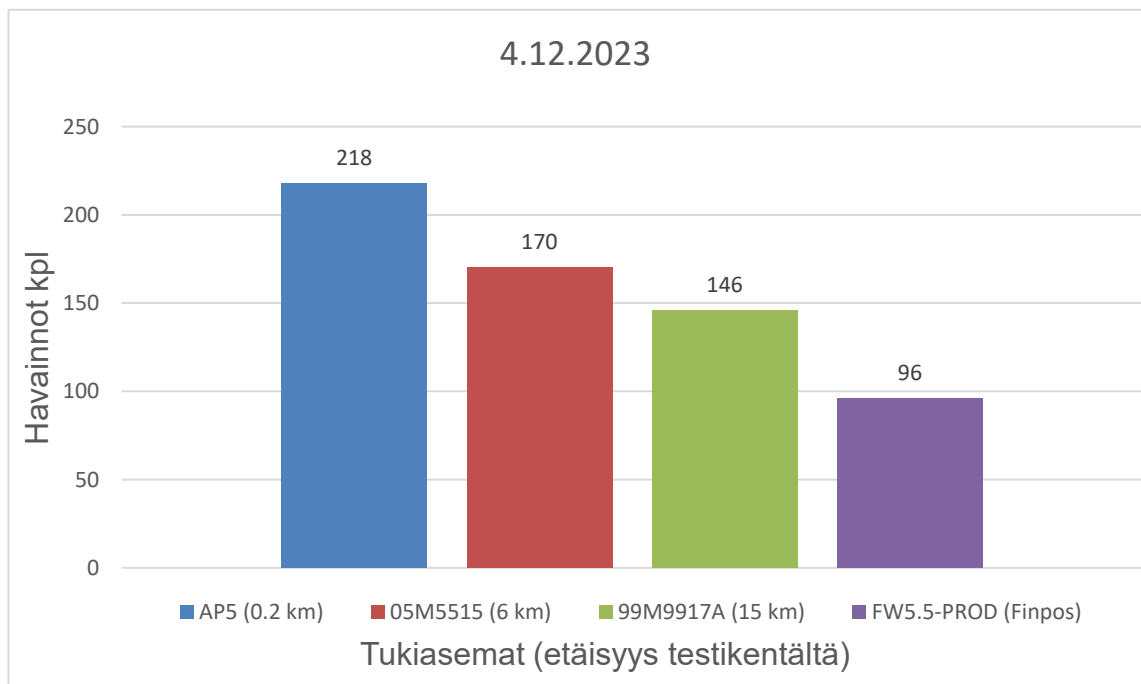


Kuvio 26. Testipäivän 23.11.2023 havaintomäärät tukiasemalaittekohtaisesti.



Kuvio 27. Testipäivä 23.11.2023 IPI-arvon kehittyminen testi aikana. Ionosfäärin IPI-keskiarvo testipäivän aikana 1.8.

Testipäivä 23.11. suoritettiin illalla varmemman häiriötilan saavuttamiseksi. Testi suoritettiin edellisen päivän testistä poiketen helpommalla R2-testikentällä. Testin alkaessa häiriötä ei havaittu (kuvio 27). Testijakso keskeytyi yhteyden katkettua keskimmäiseen (05M55) noin kuuden kilometrin päässä olevaan tukiasemaan. Yhteys tukiasemaan pyrittiin palauttamaan, mutta siinä ei onnistuttu. Tässä vaiheessa myös muiden tukiasemien akut olisi pitänyt vaihtaa. Testipäivä päätettiin päättää. Testijakso jäi 53 minuutin pituiseksi. Lyhyen testipäivän ja rauhallisen ionosfäärin tilan vuoksi havaintojen määrissä ei saatu suuria eroavaisuuksia (kuvio 26). Testipäivän 23.11. aikana keskimääräinen IPI-arvo oli 1.8.



Kuvio 28. Testipäivän 4.12.2023 havaintomäärät tukiasemalaitekohtaisesti.

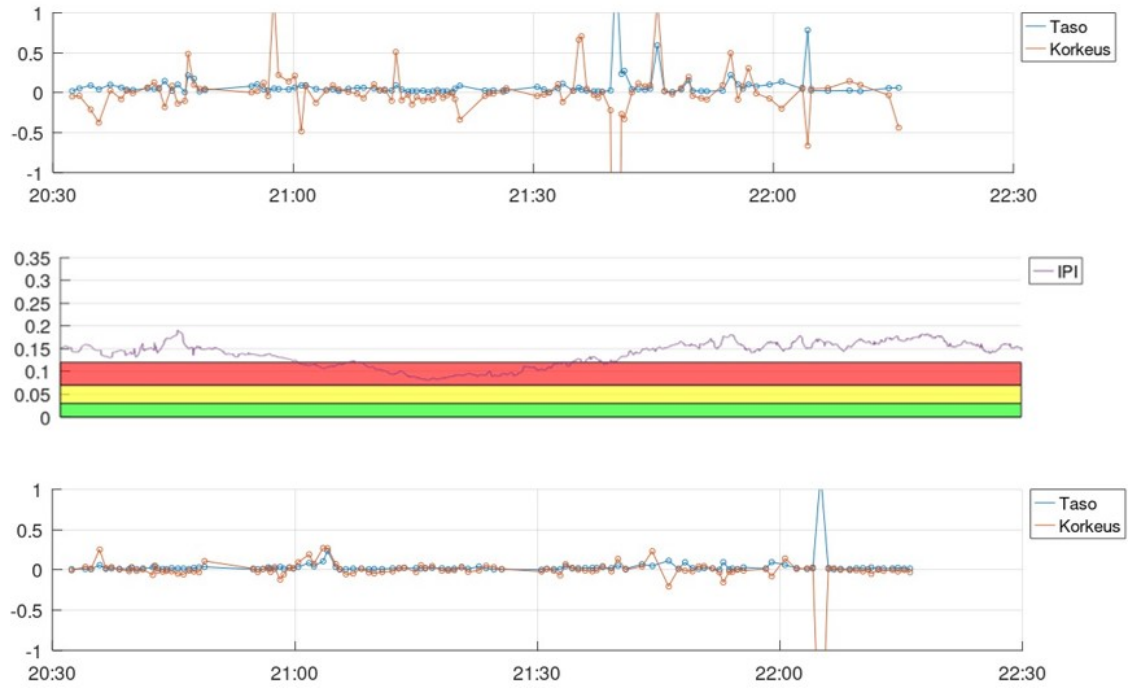


Kuvio 29. Testipäivä 4.12.2023 IPI-arvon kehittyminen testin aikana. Ionosfäärin IPI-keskiarvo testipäivän aikana 5.85.

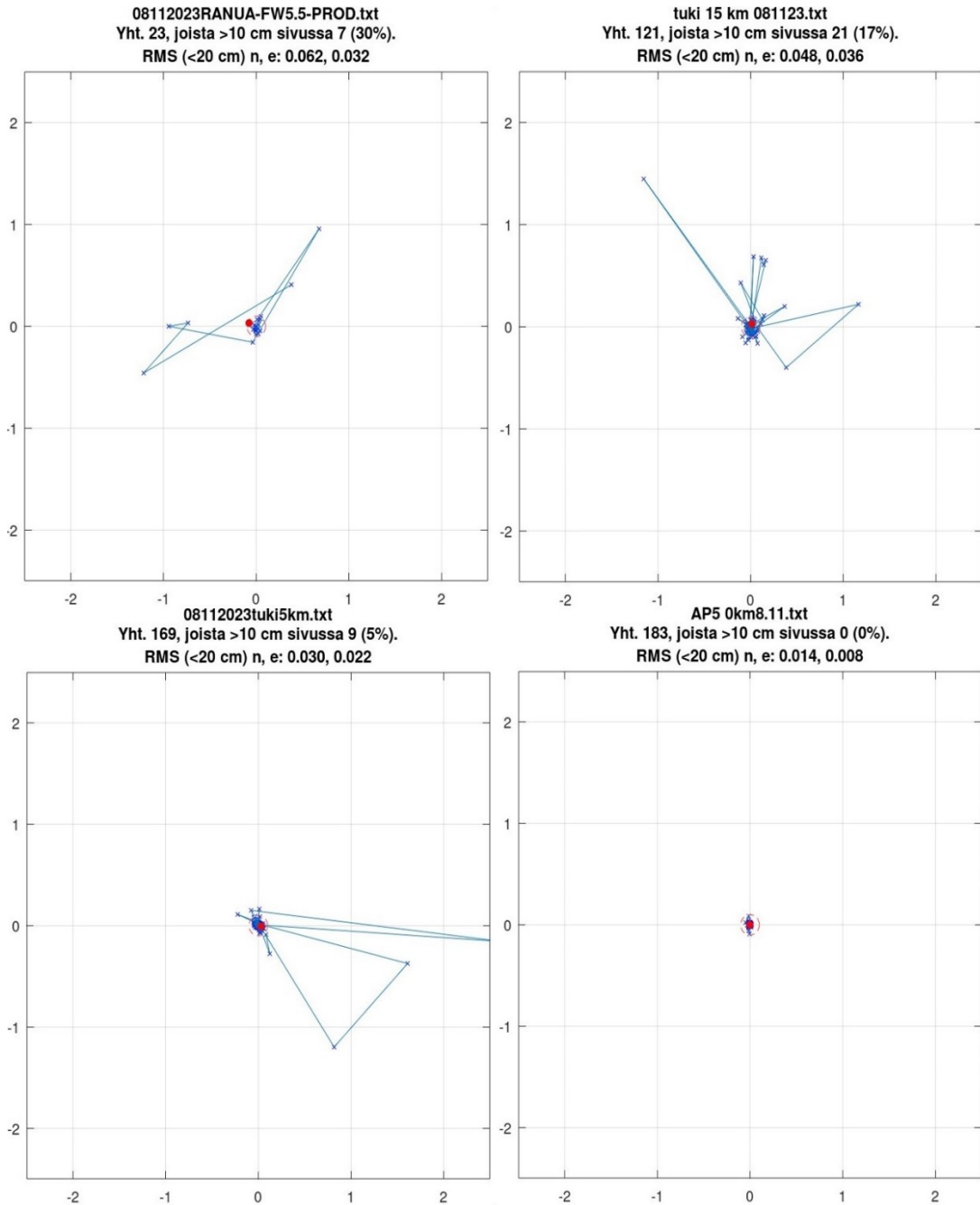
Testipäivä 4.12.2023 suoritettiin kaksi testijaksoa klo 14.26–15.30 ja klo 16.48–18.08 (kuvio 28). Ensimmäinen testijakso suoritettiin haastavammalla testikentällä R3. Ensimmäisen testijakson aikana keskimääräinen IPI-arvo oli 4.5 ja tänä aikana tukiasema laitteet keräsivät huomattavasti enemmän havaintoja kuin vertailulaite. Lähin tukiasema (AP5) keräsi 100 havaintoa, kun tuotannon FINPOS-vertailulaite keräsi vain 26 havaintoa. Toinen testijakso suoritettiin helpommalla testikentällä R2. Toisen testin aikana ilmakehähäiriöt heikkenivät (kuvio 29) niin, että toisen testijakson keskimääräinen IPI-arvo oli 2.7. Koko päivän keskimääräinen IPI-arvo oli 3.6.

### 5.3 Tukiaseman etäisyyden vaikutus havaintojen keskinäiseen tarkkuuteen

Tutkimuksessa kävi ilmi, että tukiaseman etäisyys vaikutti laitteen keräämien havaintojen suhteelliseen tarkkuuteen. Testin aikana ilmakehän häiriön lisääntyminen alkoi näkyä alkutuntemattomien selvittämisen keston pidentymisenä ja korkeushavainnon suurina vaihteluina (kuvio 30). Alkutuntemattomien ratkettua ja laitteen saavutettua ”FIX” tila, seurattiin havainnon suhteellista tarkkuutta aiempiin havaintoihin reaaliajassa tasolinjassa maastotietokoneella nähtävällä ruudukolla. Tuloksia tutkiessa voitiin havaita korkeushavainnossa tapahtuvan suurempia heittoja kuin tasohavainnoissa. Heittojen määrä ja suuruus kasvoi tukiaseman etäisyyden kasvaessa (kuvio 30).



Kuvio 30. Ylimmällä aikajaksolla 15 km tukiaseman (99M9917A, Aho) Rover-laitteen 22.11.2023 havainnot ja poikkeamat pisteinä. Keskimmaisella aikajaksolla ilmakehähäiriötä kuvaava IPI-käyrä. Alimmalla aikajaksolla lähimmän 0 km tukiaseman (AP5) Rover-laitteen havainnot ja poikkeamat pisteinä.



Kuvio 31. Testipäivän 8.11.2023 toisen testijakson klo 19.55–21.20 testilaitteiden havainnot ja tarkkuus. Testijakson aikainen ilmakehänhäiriötä kuvaava IPI-arvo keskiarvo oli 7.2.

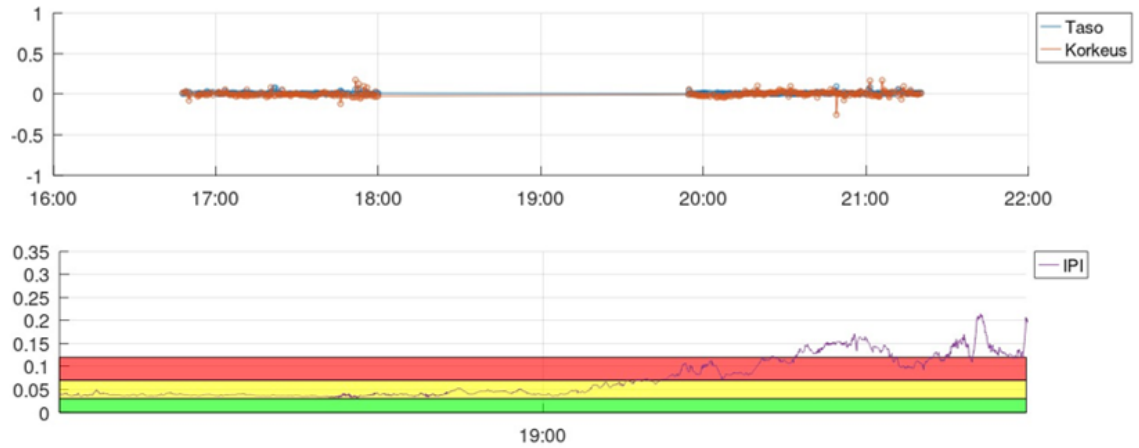
Tasohavainnoissa suhteellisesta havaintojen keskipisteestä 10 cm sivussa olevien havaintojen määrä kasvoi tukiasemaetäisyyden kasvaessa (kuvio 31). Tukiasemalaittepareista enimmillään 10 cm sivussa olevien havaintojen määrä oli 15 km tukiaseman (99M9917A, Aho) Rover-vastaanottimen 22.11.2023 sekä 8.11.2023 toisen testijakson (klo 19.55–21.20) keräämistä kaikista havainnoista

17 %. Samalla testijaksolla 22.11.2023 lähimmän tukiaseman AP5 vastaanottimen keräämistä havainnoista vain 4 % ja 8.11.2023 toisella testijaksolla 0 % oli 10 cm sivussa referenssipisteestä (kuvio 33).

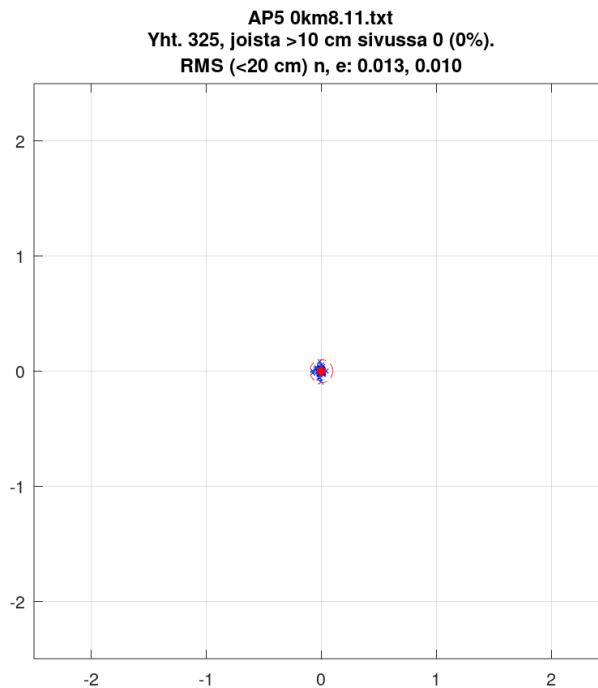
#### 5.4 Havaintojen suhteellinen tarkkuus

Tutkimuksessa pilvipalvelua ja lähelle perustetuilla tukiasemilla kerättyjen havaintojen suhteellinen tarkkuus vaikutti olevan yhdenmukainen kerättyjen havaintojen määrään ilmakehän häiriöstä riippumatta. Laitepari, joka keräsi eniten havaintoja, oli myös aina referenssipisteeseen nähden suhteessa tarkin. Ilmakehässä olevan häiriön aikaan suurimmat huomiot havainnoissa ilmenivät korkeus tasossa. FINPOS-vertailulaitteen havainnot taso- ja korkeussuunnassa heittelivät voimakkaasti (kuvio 36). Tukiasemalaitteissa havaittiin myös heittoja havainnoissa, mutta ne olivat huomattavasti pienempiä (kuvio 32).

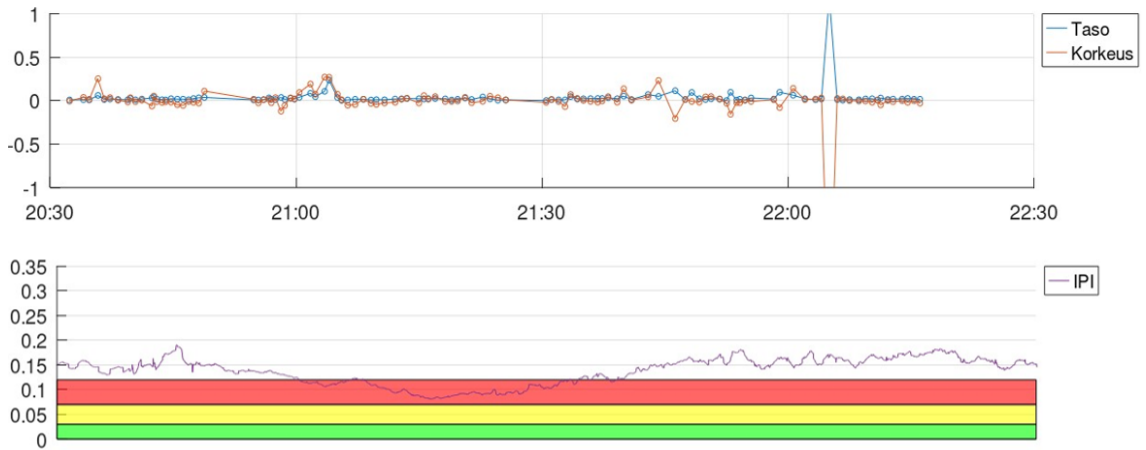
Testin aikana taso havaintoja tarkastellessa, voimakkaimpien häiriötilojen aikana tukiasema AP5 keräämistä havainnoista < 3 % oli 10 cm sivussa referenssipisteestä (kuvio 35). Vastaavina testipäivinä FINPOS-vertailulaitteen keräämistä havainnoista jopa 30% oli sivussa referenssipisteestä (kuvio 37).



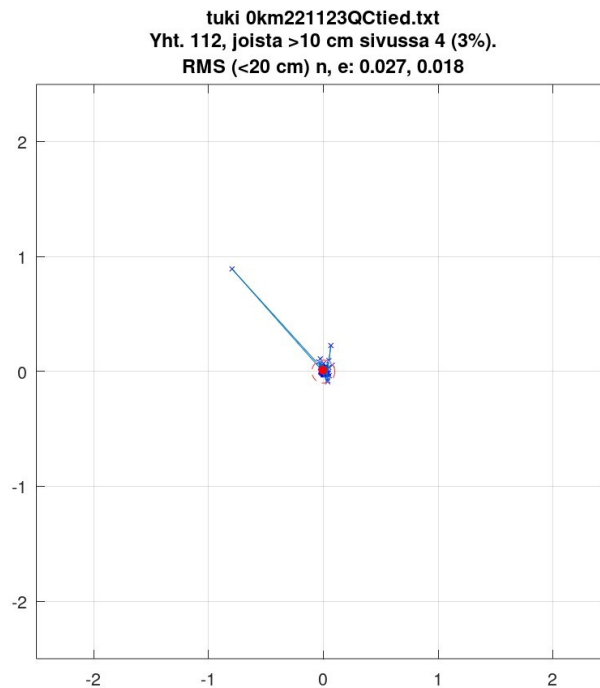
Kuvio 32. Ylemmällä aikajanalla AP5 tukiasemalaitteen 8.11.2023 kahden testijakson havainnot pisteinä suhteessa referenssipisteeseen sekä niiden taso ja korkeuspoikkeamat metreinä suhteessa ilmakehänhäiriön määrään, joka näkyy alemmalla aikajanalla.



Kuvio 33. AP5 tukiaseman keräämät havainnot 8.11.2023. Kuvassa referenssipiste punaisella. Ruutu 1 m\*1 m.



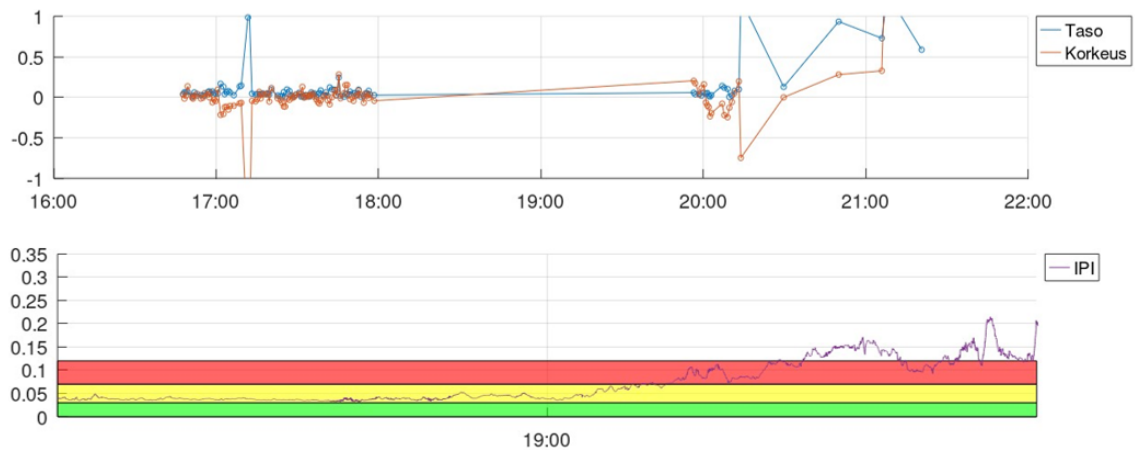
Kuvio 34. Ylemmällä aikajanelalla AP5-tukiasemalaitteen 22.11.2023 havainnot pisteinä suhteessa referenssipisteeseen sekä niiden taso- ja korkeuspoikkeamat metreinä ilmakehän häiriön määrään nähden, joka näkyy alemmalla aikajanelalla.



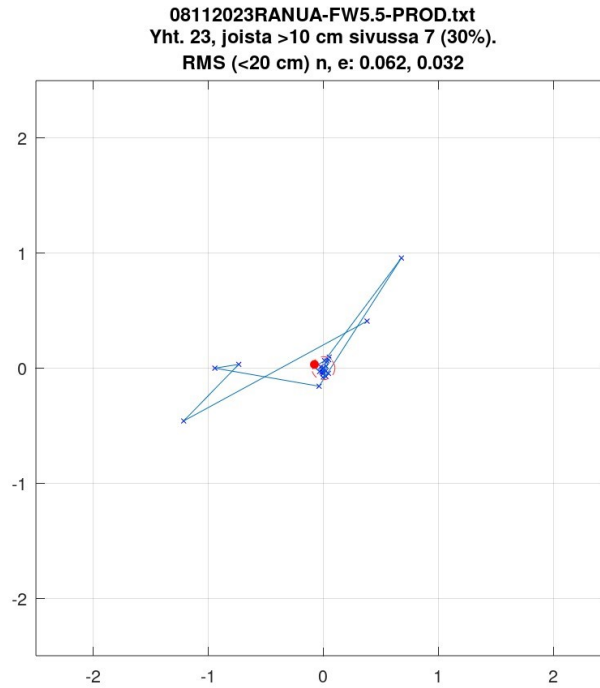
Kuvio 35. AP5 tukiaseman keräämät havainnot 22.11.2023. Kuvassa referenssipiste punaisella. Ruutu 1 m\* 1 m.

Ilmakehänhäiriö ollessa runsasta lähimmän tukiasemalaitteen (AP5) Rover-vastaanottimen keräämät havainnot olivat tarkimmat. Ilmakehänhäiriön vaikutus AP5-tukiaseman Rover-vastaanottimen keräämiin havaintoihin näkyi voimak-

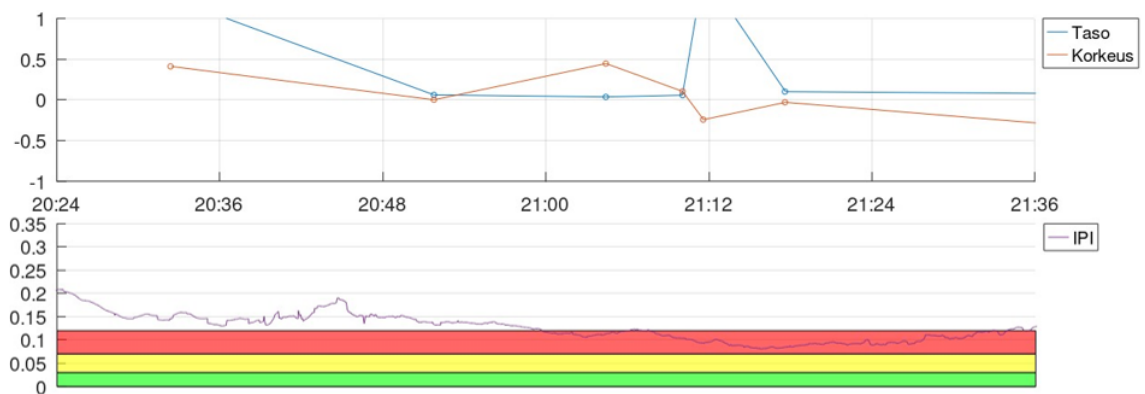
kaammin korkeushavainnoissa kuin tasohavainnoissa (kuvio 34). FINPOS-ver-  
tailulaitteen keräämät havainnot runsaan ilmakehähäiriön aikaan vaikutti ha-  
vaintojen määrään sekä taso- ja korkeushavaintojen voimakkaaseen heittelyyn  
(kuvio 36).



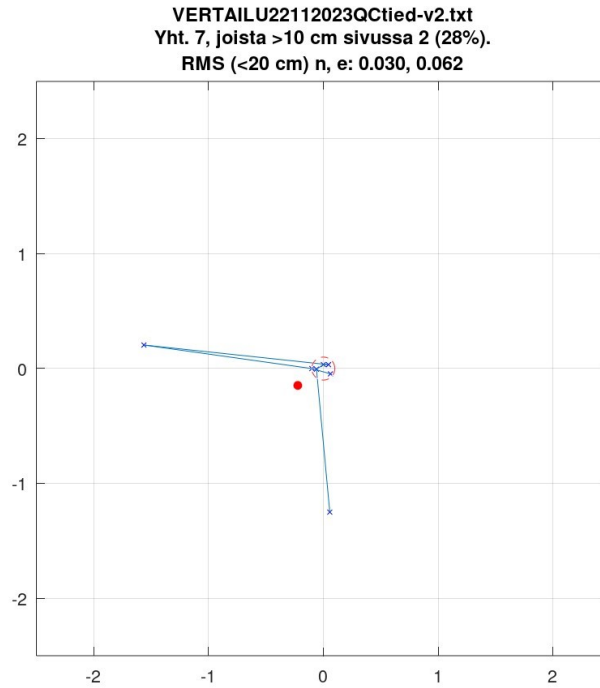
Kuvio 36. Ylemmällä aikajanalla FINPOS-ver-  
tailulaitteen 8.11.2023 havainnot  
pisteinä suhteessa referenssipisteeseen, joka näkyy nollalinjalla sekä niiden  
taso- ja korkeuspoikkeamat metreinä suhteessa ilmakehähäiriön määrään, joka  
näkyy alemmalla aikajanalla.



Kuvio 37. FINPOS-vertailulaitteen keräämät havainnot 8.11.2023. Kuvassa referenssipiste punaisella. Ruutu 1 m\*1 m.



Kuvio 38. Ylemmällä aikajanalla FINPOS-vertailulaitteen 8.11.2023 havainnot pisteinä suhteessa keskimääräiseen havaintoon nollalinjalla sekä niiden taso- ja korkeus poikkeamat metreinä suhteessa ilmakehän häiriön määrään IPI-arvona alemmalla aikajanalla.

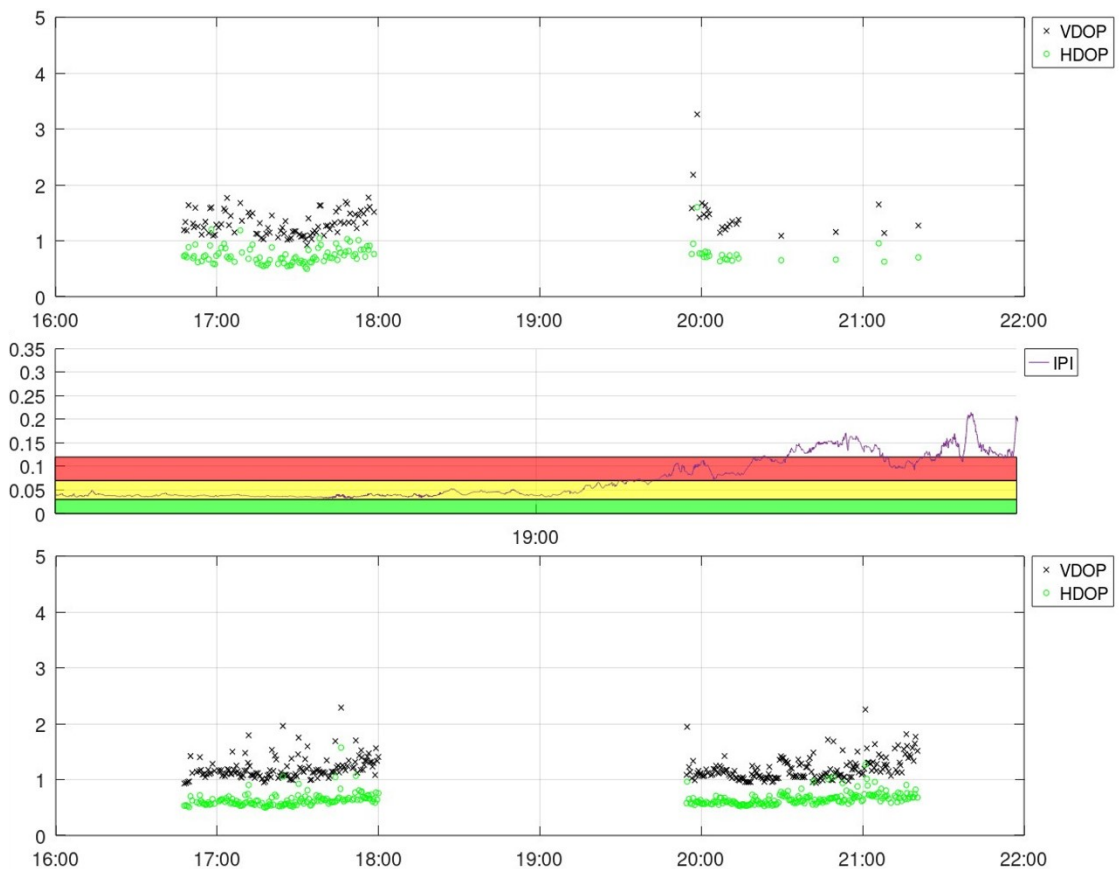


Kuvio 39. FINPOS-vertailulaitteen keräämät havainnot 23.11.2023. Kuvassa referenssi punaisella. Ruutu 1 m\* 1 m.

FINPOS-vertailulaitteen keräämät havainnot jäivät voimakkaimman ilmakehähäiriön aikaan vähäisiksi, joka saattoi vääristää havaintojen suhteellista tarkkuutta otannan vähyydestä johtuen (kuvio 39). 23.11.2023 FINPOS-vertailulaitteen havaintojen keho tarkkuus käy selvästi ilmi taso ja korkeus havainnoista (kuvio 38). Ajoittain FINPOS-vertailulaitteen tasohavainnoissa oli jopa enemmän heittoa kuin korkeushavainnoissa.

## 5.5 DOP-arvojen vaikutus

DOP-arvojen kehityksestä IPI-arvoon nähden oli nähtävissä vertikaalisen havainnon suurempi heittely. Kuvio 40 havainnollistaa havaintojen DOP-arvojen määrän sekä sijainnin heittelyn IPI-arvon noustessa. Vertikaalisen havainnon vaihtelu oli havaittavissa jo testin aikana, vaikka mittauksen alussa VRMS-arvo asetettiin HRMS-arvoa suuremmaksi, joka mahdollistaa laitteen alustamisen heikommalla VRMS-arvolla. Havaintojen määrään vaikuttaa oleellisesti alustusajan pituus, joten vertikaalisen arvon (VRMS) vaihtelun vuoksi alustus kesti usein huomattavasti pidempään. Alustusten välisiä havaintoja tarkkailtaessa vertikaalinen arvo vaihteli tallennettujen havaintojen välillä.



Kuvio 40. Ylimmällä aikajanalla FINPOS-vertailulaitteen 8.11.2023 havainnot, VDOP ja HDOP -lukuarvot. Keskimmaisella aikajanalla ilmakehähäiriötä kuvaava IPI-käyrä. Alimmalla aikajanalla lähimmän 0 km tukiaseman (AP5) Rover-laitteen havainnot, VDOP- ja HDOP-lukuarvot.

## 6 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia mahdollisuutta minimoida auringon aktiivisuudesta johtuvien ilmakehähäiriöiden vaikutusta mittaushavaintoihin. Tutkimuksessa verrattiin tukiaseman sijainnin ja pilvipalvelun käyttämistä korjausdatan välittämiseen ja sen vaikutusta mittaushavaintoihin. Tutkimuksen vertailuyksikkönä käytettiin maanmittauslaitoksella käytössä olevaan FINPOS-järjestelmää. Tukiaseman etäisyyden minimoimisen Rover-laitteesta uskottiin parantavan mittaushavaintoja. Etäisyyden vaikutusta mittaushavaintoihin testattiin kolmelta eri etäisyydeltä.

Tutkimuksen havaintojen keruu suoritettiin marras-joulukuussa 2023 kuutena päivänä. Kuuden päivän aikana suoritettiin yhteensä 10 mittaustestiä. Testien aikana havaintoja kerättiin yhteensä 12 h 12 min. Yhteensä havaintoja kerättiin lähimmällä tukiasemalla (AP5) 1187 kpl, keskimmaisella tukiasemalla (05M5515 Mätäsjärvi) 958 kpl ja kauimmaisella tukiasemalla (99M9917A) 871 kpl sekä FINPOS-vertailulaiteella 461 kpl.

Havaintojen perusteella lähelle perustettu tukiasema suoriutui yleensä parhaiten. Se keräsi eniten havaintoja ja havaintojen keskinäinen tarkkuus pysyi hyvänä. Tukiaseman etäisyyden kasvattaminen hidasti vastaanottimen suoritusta ja havaintojen keräämistä sekä lisäsi virrehavaintojen määrää. Kaukaisin tukiasema suoriutui ilmakehähäiriön aikana paremmin kuin FINPOS-vertailulaite. Poikkeuksellisesti testien aikana yhdessä testissä lähin tukiasema keräsi vähemmän havaintoja kuin keskimmainen tukiasema ja yhdessä vähemmän kuin kauimmainen tukiasema. Syy tähän oli mahdollisesti paremmin suoriutuneen tukiaseman suotuisampi paikannussatelliittien sijainti suhteessa taivasaukkoon. Ilmakehähäiriön ollessa vähäistä tukiasemalaitteet keräsivät edelleen enemmän ja tarkempia havaintoja kuin FINPOS-vertailulaite, mutta ero ei ollut enää niin suuri. Vähäisen ilmakehähäiriön aikana FINPOS-vertailulaite keräsi parhaimmillaan noin 9 % vähemmän havaintoja kuin vähiten havaintoja kerännyt tukiasemalaite. Ilmakehähäiriön ollessa voimakasta FINPOS-vertailulaite keräsi heikoimmillaan noin 80 % vähemmän havaintoja kuin vähiten havaintoja kerännyt tukiasemalaite. Testausta voisi jatkaa, mutta koen 10 testin jakson olevan riittävän laaja otanta

tutkimuksen tulosten tarkastelulle. Mahdollisten lisätestien en usko muuttavan tämän tutkimuksen perusteella tehtyjä havaintoja. Testin aikana ilmakehän häiriön määrä vaihteli ja molemmilta käytetyiltä testikentillä saatiin suoritettua testejä erilaisissa ilmakehän olosuhteissa.

Oman tukiaseman ja pilvipalvelun käyttö korjausdatan välittämiseksi vaikutti toimivalta ratkaisulta ilmakehähäiriöiden aikana mitattaessa. Pilvipalvelun käyttöönottamisessa oli kuitenkin laite- ja ohjelmistoversiokohtaisia eroja ja ongelmia. Palvelun laajempi käyttöönotto vaatii ehdottomasti lisää käytännön testausta ja henkilöstön koulutusta. Tukiaseman ja pilvipalvelun käyttö tulisi kehittää mahdollisimman helpoksi, jotta se saataisiin laajempaan käyttöön. Tukiasemien ja pilvipalvelun käyttö auttaisi varautumaan auringon aktiivisuuteen ja mahdollistavan ilmakehähäiriöiden aikana mittaamisen. Tukiaseman käyttö edellyttää tarkat koordinaatit joltain tunnetulta pisteeltä. Käytännössä tämä piste voi olla jokin tarkka pyykki tai mikäli mahdollista, voidaan tukiaseman paikka myös mitata ennen tukiaseman perustamista. Mittaaminen ei tietenkään ole mahdollista ilmakehähäiriön aikana. Vaikka mittaaminen onnistuisi ja piste saataisiin mitattua, voidaan koordinaatit kyseenalaistaa, jolloin myös Roverilla kerätyt havainnot voivat olla virheellisiä. Tukiaseman sijainti ja perustaminen tulee suunnitella etukäteen ennen mittauksen aloittamista. Tukiaseman sijoittamiseen ja perustamiseen kuluu aina ylimääräistä aikaa, varsinkin jos tukiasema sijoitetaan kohteeseen, johon joudutaan kulkemaan eri kautta kuin varsinaiselle työkohteelle. Tämä kannattaa ottaa huomioon työn suunnittelussa ja aikatauluttamisessa. Suunnittelussa kannattaa ottaa myös huomioon minkälaisessa kohteessa tukiaseman käyttöönottoon vaadittava ylimääräinen aika on järkevää.

Näkisin tukiaseman käytön järkevänä kohteissa, joissa mitattavaa tai merkittävää on suhteellisen paljon pienellä alueella. Tällainen on esimerkiksi tonttien pyykitys alueella, jossa työ on saatava suoritettua tietynä ajankohtana ja tämän ajankohdan osuessa aikaan, jolloin ilmakehässä on häiriötä. Myös suojelualueitoimituksissa tukiaseman käyttö on järkevää ja perusteltua.

## LÄHDELUETTELO

Ashman, B. An Introduction to Global Navigation Satellite Systems [PDF]. Viitattu 5.11.2018 <https://ntrs.nasa.gov/citations/20180003146>.

Ilmatieteenlaitos 2025a. Auringonpilkut. Viitattu 25.11.2023 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/auringonpilkut>.

-2025b. Auringon rakenne ja elinkaari. Viitattu 25.11.2023 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/rakenne-ja-elinkaari>.

-2025c. Avaruussään vaikutuksia. Viitattu 26.11.2023 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/avaruussaan-vaikutuksia>.

-2025d. Ionosfääri. Viitattu 12.12.2023 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ionosfaari>.

-2025e. Revontulet. Viitattu 12.12.2023 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tietoa-revontulista>.

Laurila, P. 2012. Mittaus ja kartoitustekniikan perusteet, 4 painos. Rovaniemen ammattikorkeakoulu.

Maanmittauslaitos 2025a. Auringon aktiivisuus vaikuttaa tarkkaan paikannukseen. Viitattu 15.10.2023 <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/auringon-aktiivisuus-vaikuttaa-tarkkaan-paikannukseen>.

-2025b. Auringon oikutteleva luonne vaikuttaa alkavaan maastokauteen. Viitattu 20.3.2025 <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/auringon-oikutteleva-luonne-vaikuttaa-alkavaan-maastokauteen>.

-2025c. FINPOS. Viitattu 20.9.2023 <https://www.maanmittauslaitos.fi/finpos>.

-2025d. Maanmittauslaitoksen vuositilastoja 2022. Viitattu 26.9.2023.  
[https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/attachments/2023/12/mml-vuositilasto\\_2022.pdf](https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/attachments/2023/12/mml-vuositilasto_2022.pdf).

-2025e. Satelliittipaikannus. Viitattu 10.4.2025. <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/satelliittipaikannus>.

Nasa 2023. Our Sun. Viitattu 26.11.2023.  
<https://science.nasa.gov/sun/facts/#hds-sidebar-nav-8>.

Ollikainen 2023. FINPOS- ja FinnRef- asemat. Yksityinen sähköpostiviesti 19.12.2023. Viestin saaja: Janne Kupulisoja.

Rikkinen, T. 2023. Paikannuksen haasteet ja niihin varautuminen. Maanmittauslaitos PowerPoint.

Spacefinland 2023. Satelliittinavigointijärjestelmät. Viitattu 2.12.2023 <https://spacefinland.fi/satelliittinavigointijarjestelmat>.

Tötterström, S. GPS RTK-Network ja virtuaalitukiasema (VRS), [PDF], [https://www.maankaytto.fi/arkisto/mk500/mk500\\_387\\_totterstrom.pdf](https://www.maankaytto.fi/arkisto/mk500/mk500_387_totterstrom.pdf), 24.11.2023.

## LIITTEET

- Liite 1. Pisteselyskortit
- Liite 2. Valokuvia
- Liite 3. Mittaustuloksia

## LIITE 1

## Pisteselityskortit (1/2)

## Tietoja kiintopisterekisteristä

Tulostettu 10.11.2023

**Kiintopiste**

Kiintopisteen numero:	99M9917A
Kiintopisteen nimi:	Aho
Kunta:	Ranua
<b>ETRS89-koordinaatit</b>	
Pisteen mitannut organisaatio:	Maanmittauslaitos
Viitenumero:	EF2T41
Tasotarkkuusluokka:	2. luokka
N (ETRS-TM35FIN):	7336926.898
E (ETRS-TM35FIN):	459676.304
Lat (ETRS89):	66.150086272 ( 66°9'0.31058" )
Lon (ETRS89):	26.106270241 ( 26°6'22.57287" )
Korkeus ellipsoidista (GRS80):	244.013

**KKJ-koordinaatit**

Pisteen mitannut organisaatio:	Maanmittauslaitos
Viitenumero:	3509.3
Tasotarkkuusluokka:	3. luokka
N:	7339996.039
E:	3459832.711

**N60-korkeus**

Pisteen mitannut organisaatio:	Tuntematon mittaaja
Korkeustarkkuusluokka:	4. luokka
H:	224.82

**N2000-korkeus**

Pisteen mitannut organisaatio:	Ei mitattu
N2000 muunnettu N60:	225.19
Korkeustarkkuusluokka:	muunnettu

**Muita tietoja**

Yleislehtijaon karttalehti:	352212d
TM35-karttalehti:	S4442D2
GPS-sopivuus:	Erinomainen
Keskusmerkin tyyppi ja alusta:	pultti ja kolmio kivessä
Kiintopisteen sijainti:	tiestä länteen 50 metriä
Sijainti maanpinnasta:	0.3
Lisätietoja:	Palovaaran pt:n päässä. Ladon seinästä 14.5m etelään, muuntajapylv. 25.7m lounaaseen.

## Tietoja kiintopisterekisteristä

Tulostettu 10.11.2023

### Kiintopiste

Kiintopisteen numero:	05M5515
Kiintopisteen nimi:	MÄTÄSJÄRVI
Kunta:	Ranua
<b>ETRS89-koordinaatit</b>	
Pisteen mitannut organisaatio:	Maanmittauslaitos
Viitenumero:	EF2T41
Tasotarkkuusluokka:	2. luokka
N (ETRS-TM35FIN):	7339787.436
E (ETRS-TM35FIN):	480571.379
Lat (ETRS89):	66.177730092 ( 66°10'39.82833" )
Lon (ETRS89):	26.568925322 ( 26°34'8.13116" )
Korkeus ellipsoidista (GRS80):	216.871
<b>KKJ-koordinaatit</b>	
Pisteen mitannut organisaatio:	Maanmittauslaitos
Viitenumero:	3511.8
Tasotarkkuusluokka:	3. luokka
N:	7342857.679
E:	3480736.206
<b>N60-korkeus</b>	
Pisteen mitannut organisaatio:	Tuntematon mittaaja
Korkeustarkkuusluokka:	4. luokka
H:	197.96
<b>N2000-korkeus</b>	
Pisteen mitannut organisaatio:	Ei mitattu
N2000 muunnettu N60:	198.32
Korkeustarkkuusluokka:	muunnettu
<b>Muita tietoja</b>	
Yleislehtijaon karttalehti:	361307a
TM35-karttalehti:	T4333A3
GPS-sopivuus:	Erinomainen
Keskusmerkin tyyppi ja alusta:	pultti ja kolmio kivessä
Kiintopisteen sijainti:	tiestä lounaaseen 60 metriä
Sijainti maanpinnasta:	1
Lisätietoja:	



Kiintopiste 99M9917A (Aho)



Kiintopiste 05M5515 (Mätäsjärvi)



Apupiste AP5



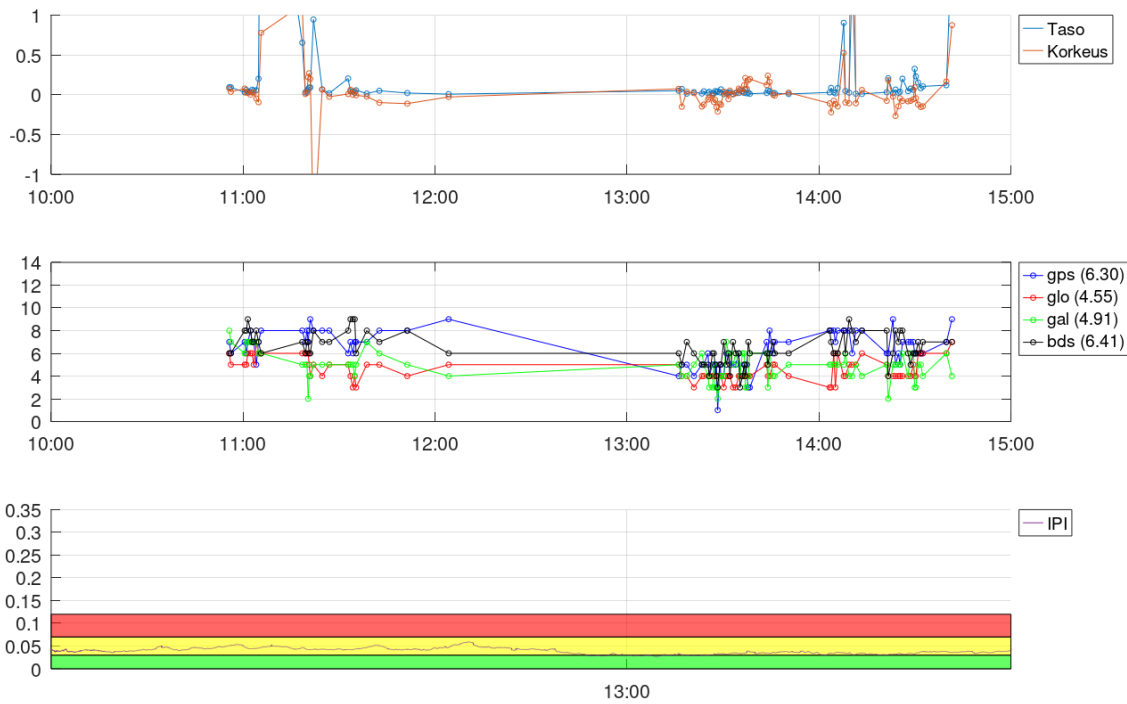
Testikenttä R2



Testikenttä R3

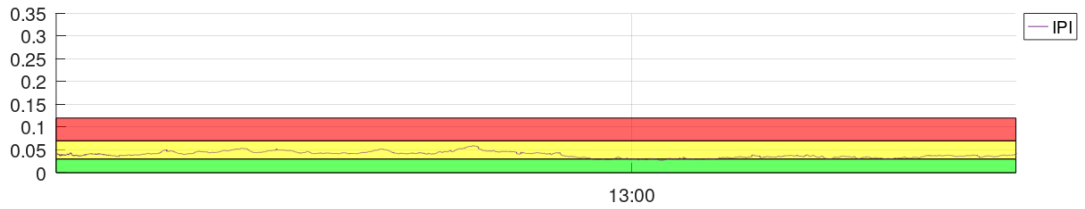
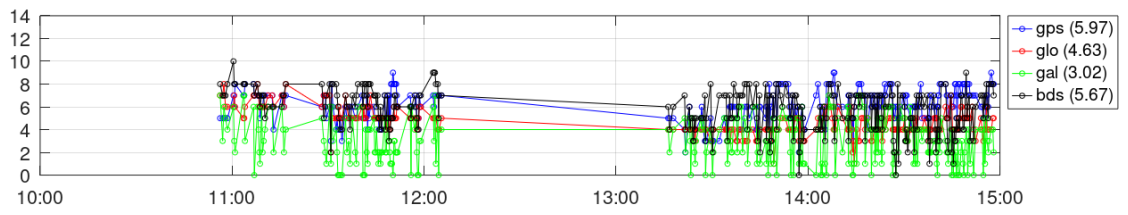
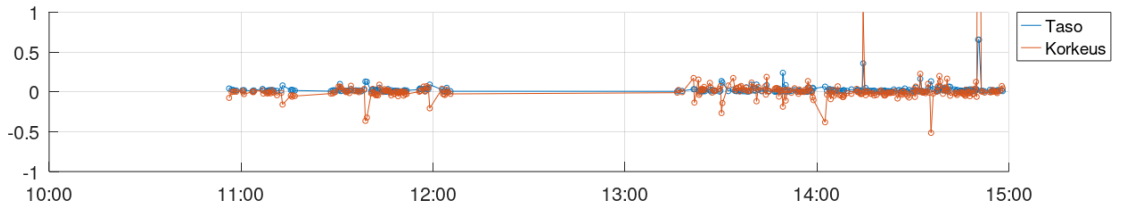
## LIITE 3

## Mittaustuloksia (1/24)

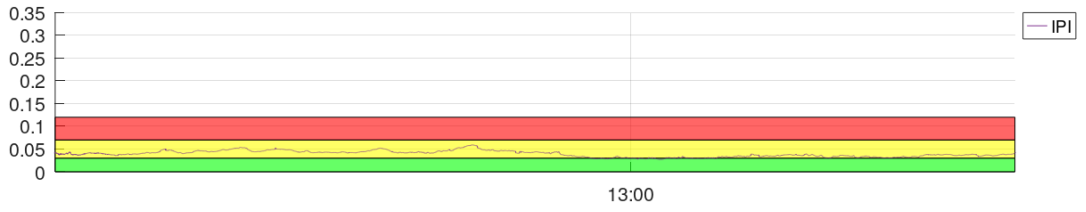
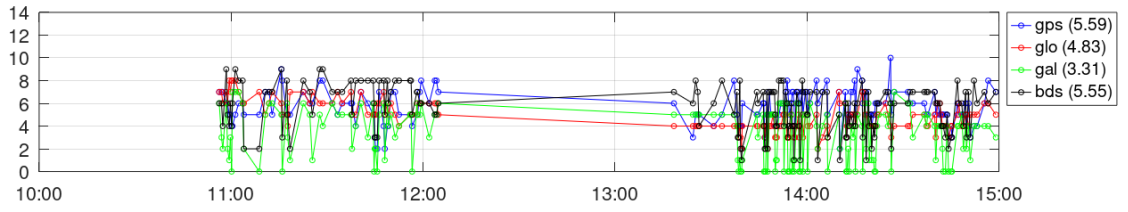
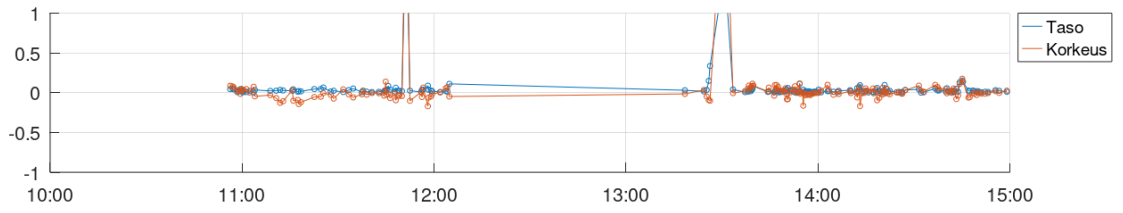


FINPOS 7.11.

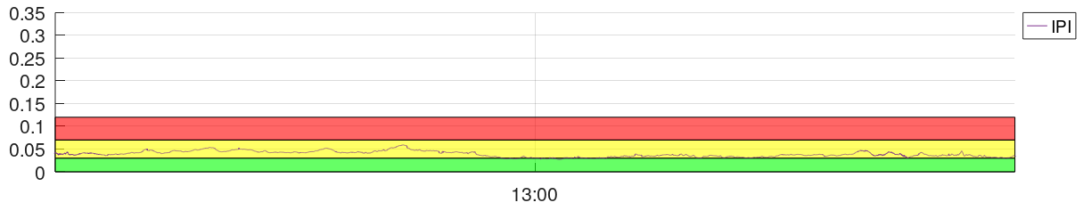
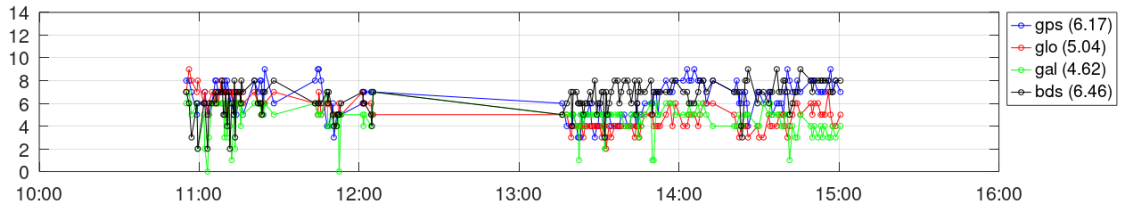
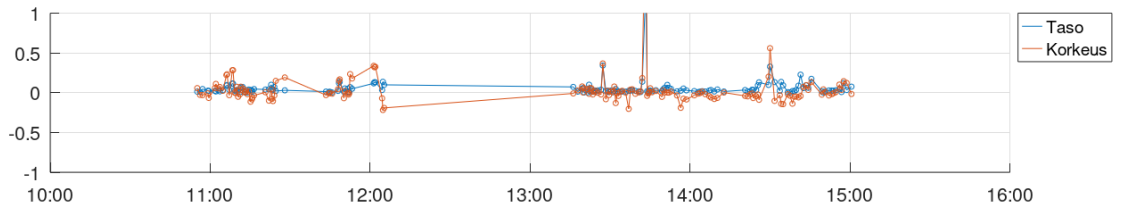
(2/24)



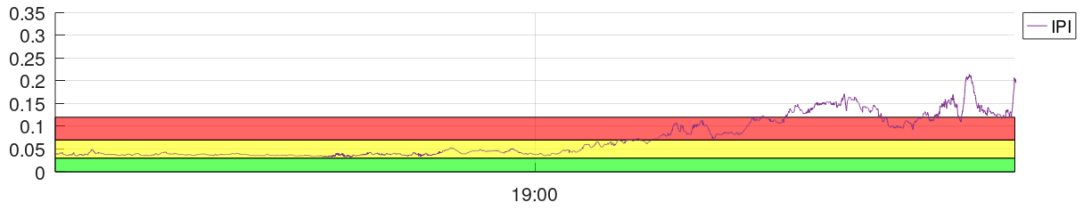
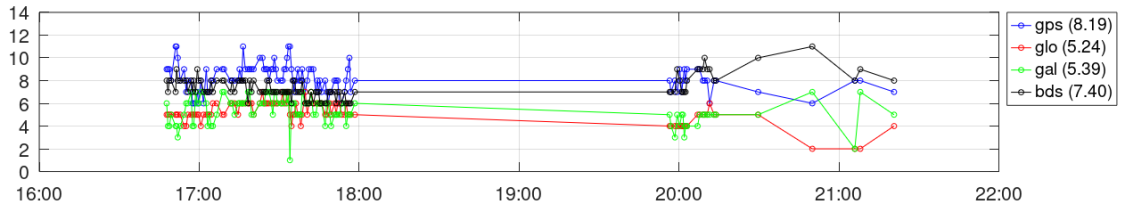
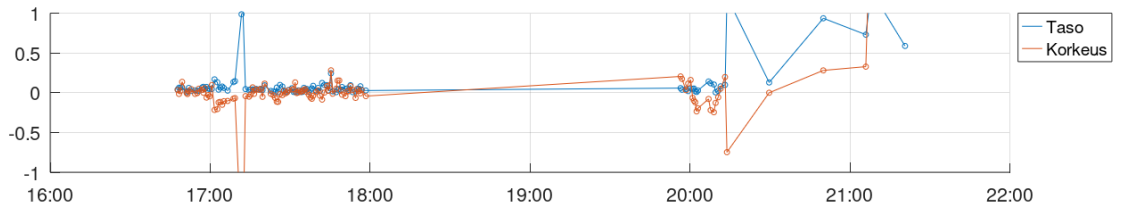
AP5 7.11



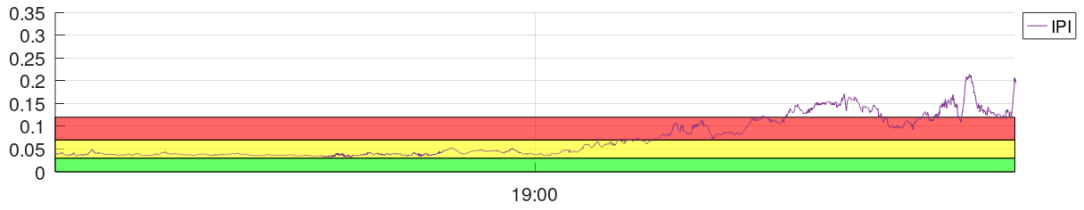
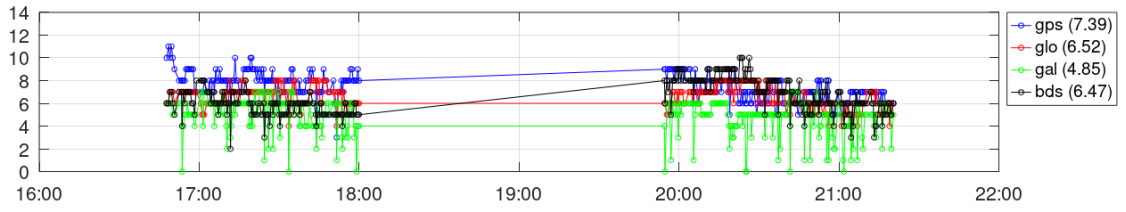
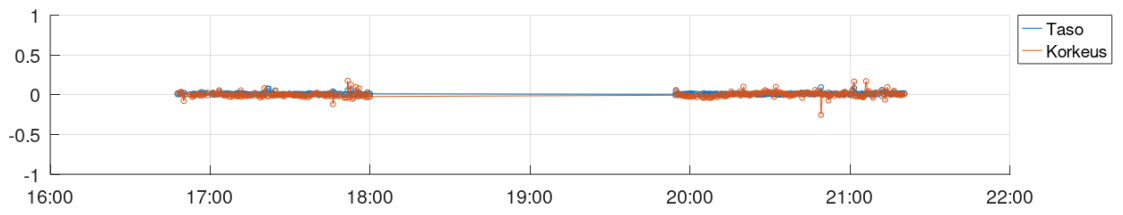
05M5515 (Mätäsjärvi) 7.11



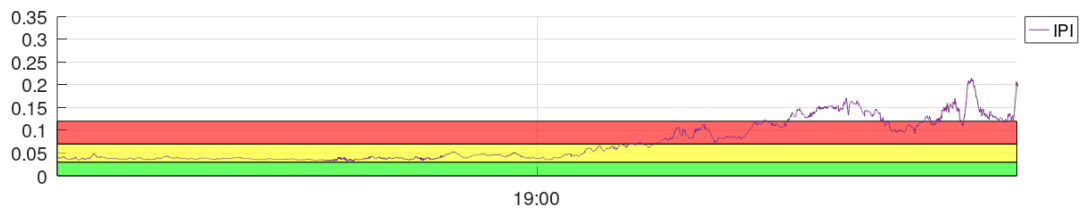
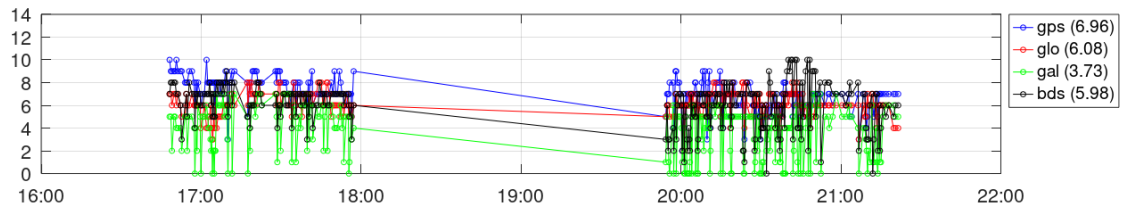
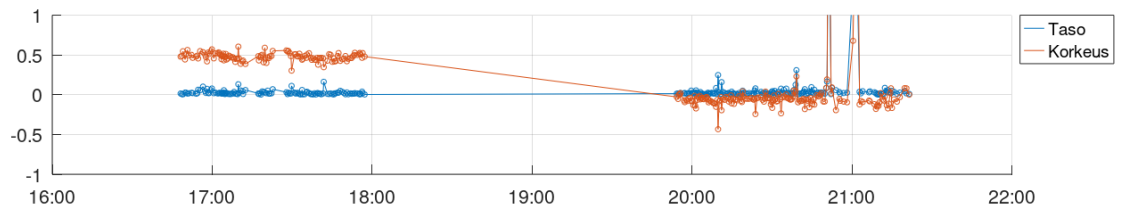
99M9917A (Aho) 7.11



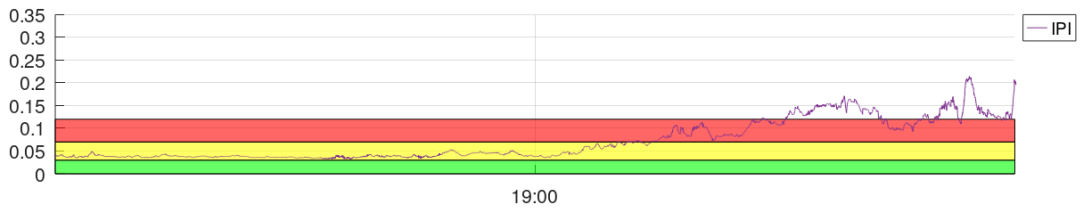
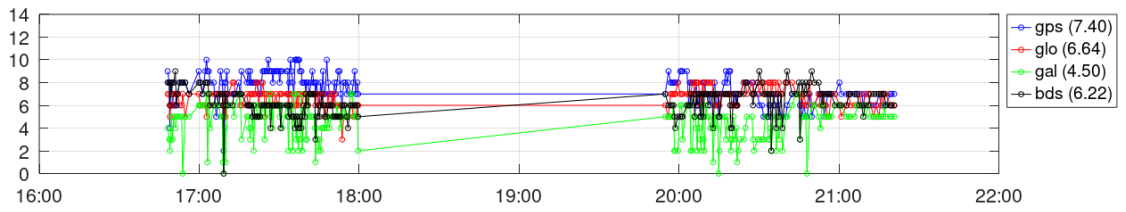
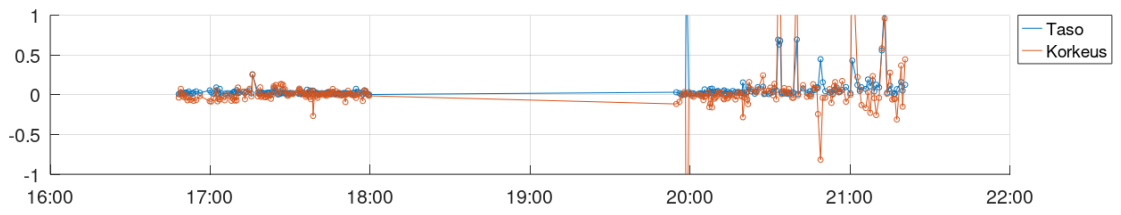
FINPOS 8.11.



AP5 8.11

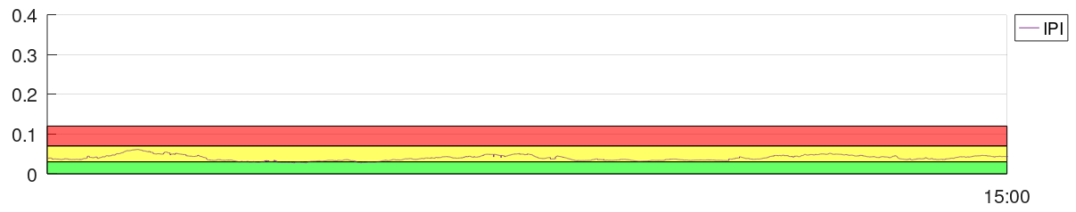
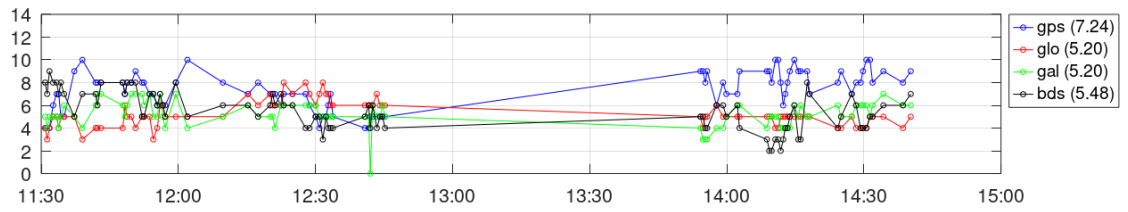
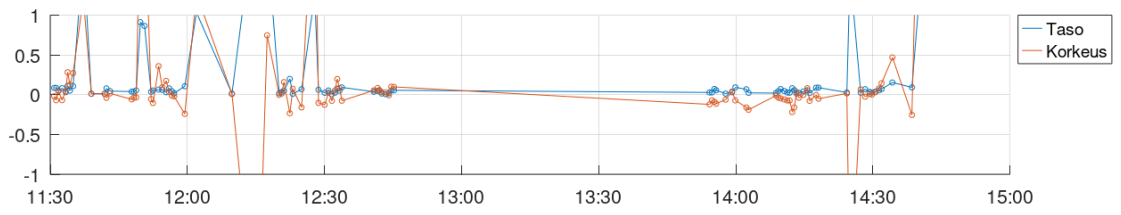


05M5515 (Mätäsjärvi) 8.11



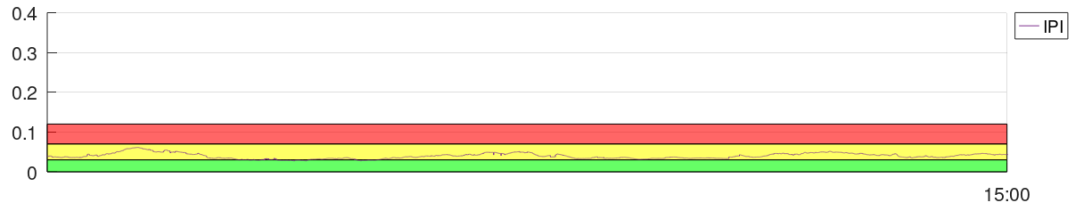
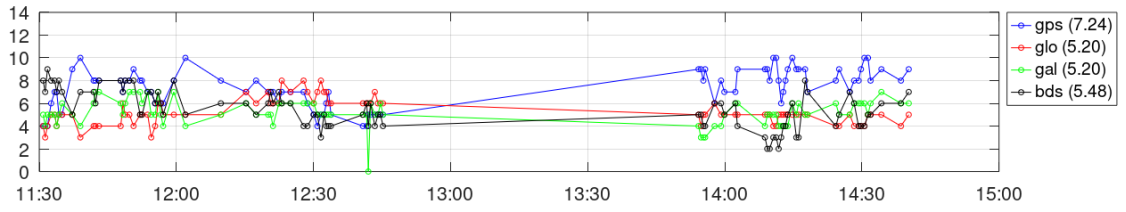
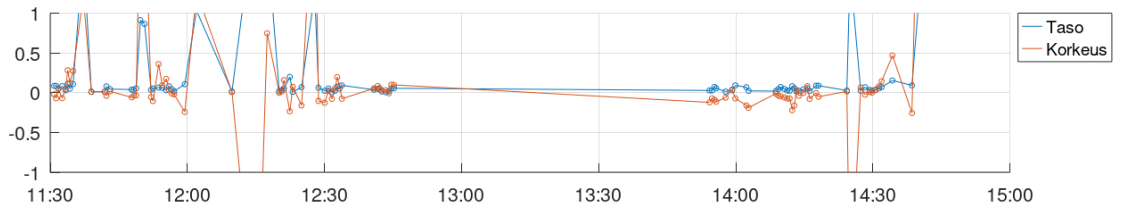
99M9917A (Aho) 8.11

(9/24)



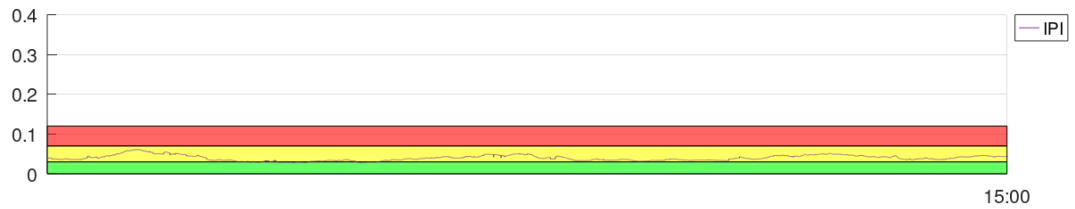
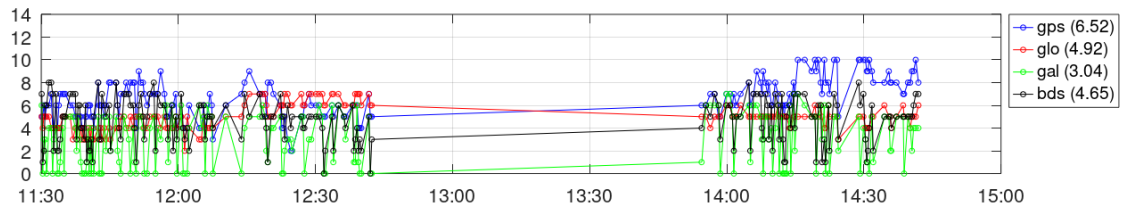
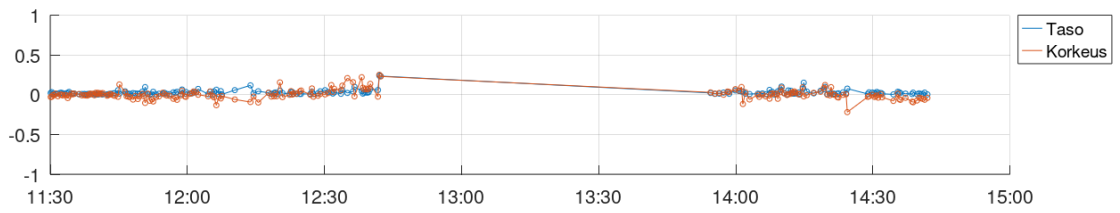
FINPOS 9.11.

(10/24)



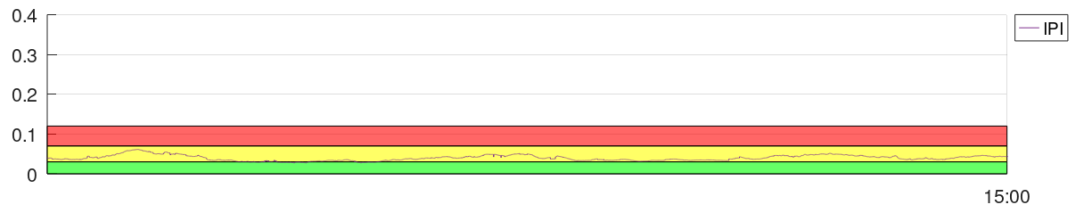
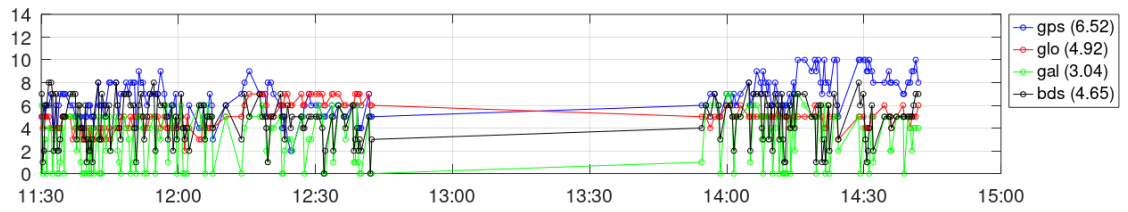
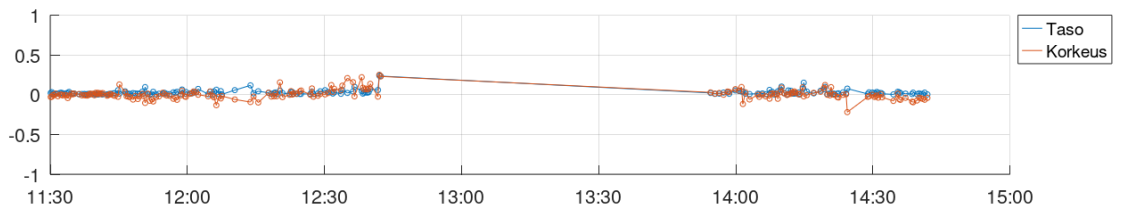
AP5 9.11

(11/24)

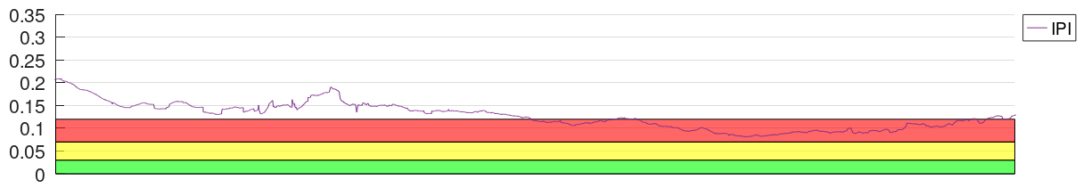
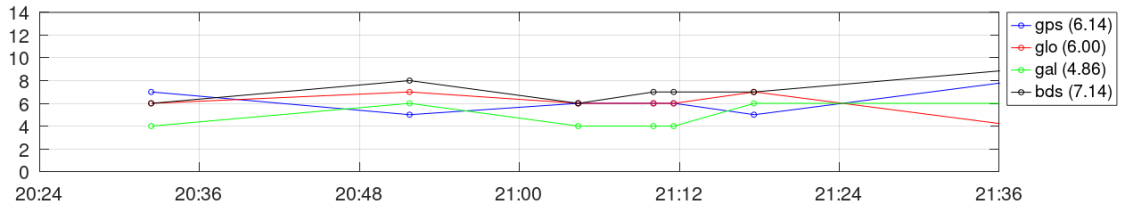
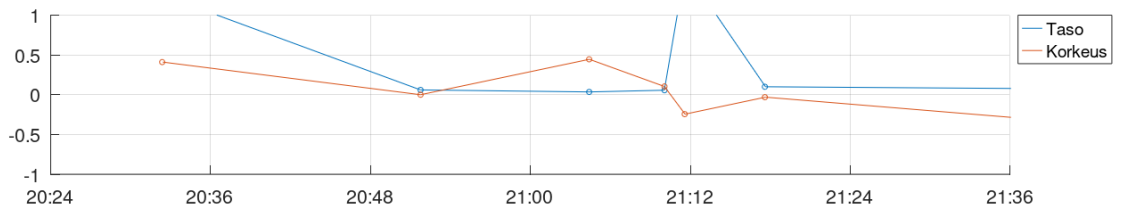


05M5515 (Mätäsjärvi) 9.11

(12/24)

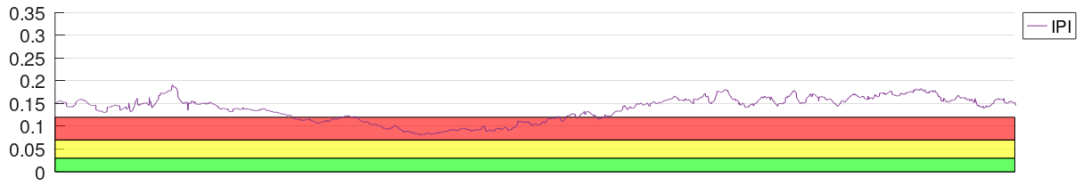
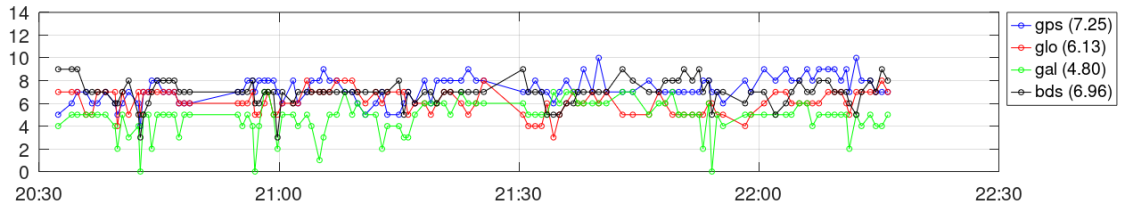
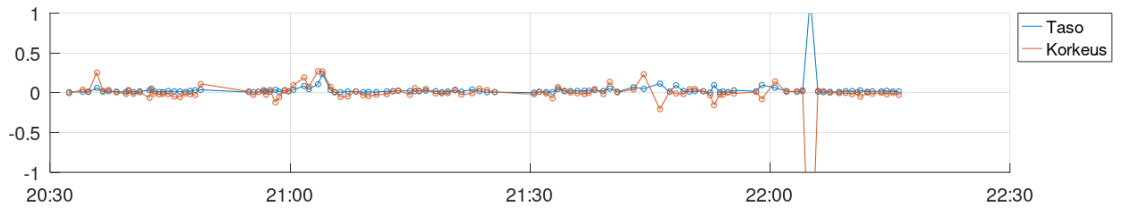


99M9917A (Aho) 9.11



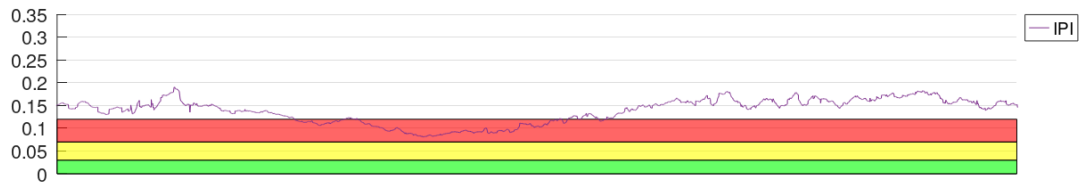
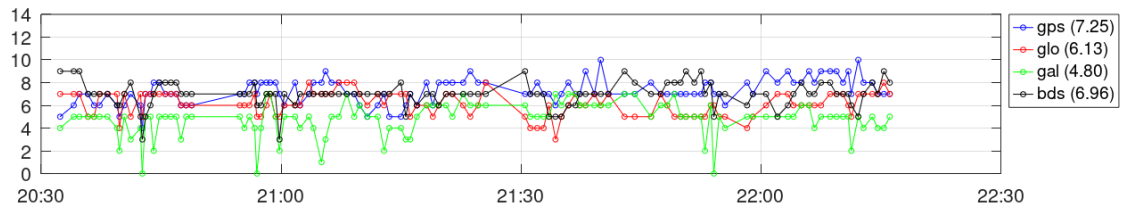
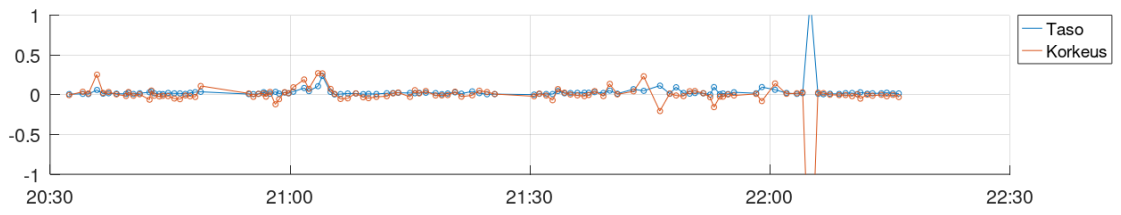
FINPOS 22.11.

(14/24)



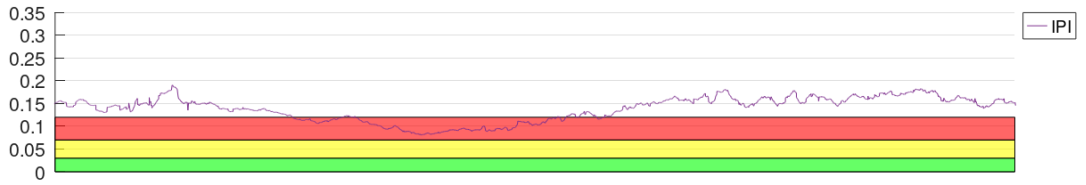
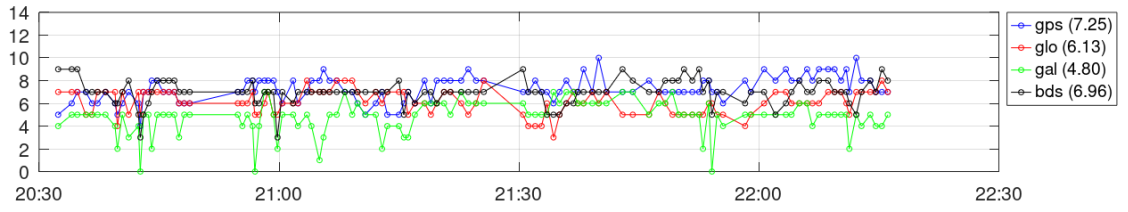
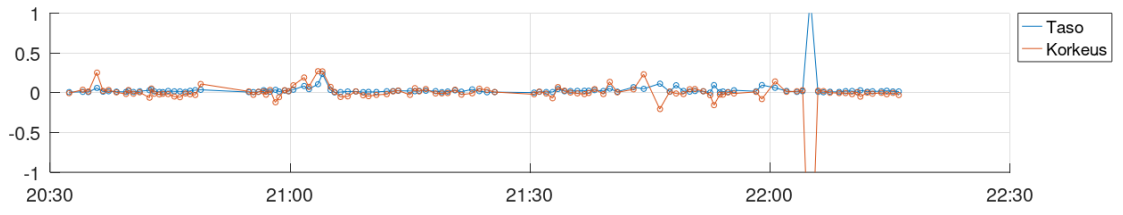
AP5 22.11

(15/24)



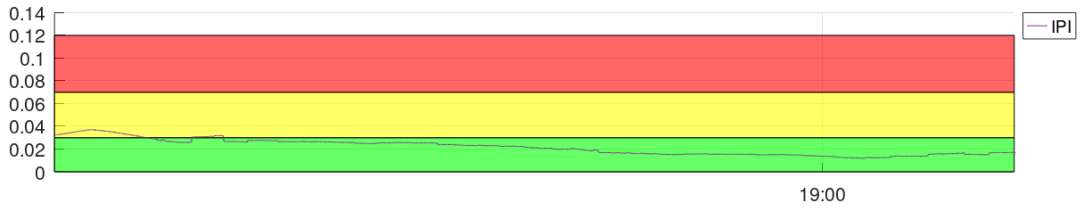
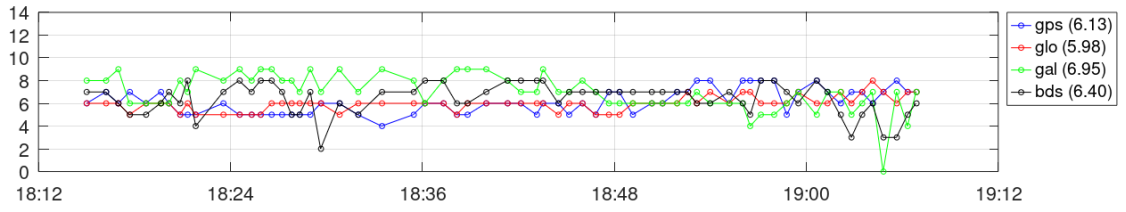
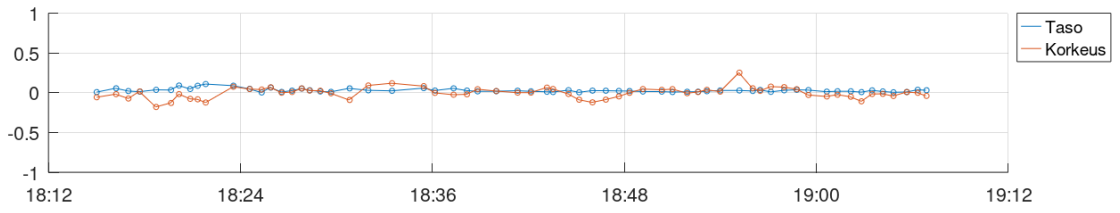
05M5515 (Mätäsjärvi) 22.11

(16/24)



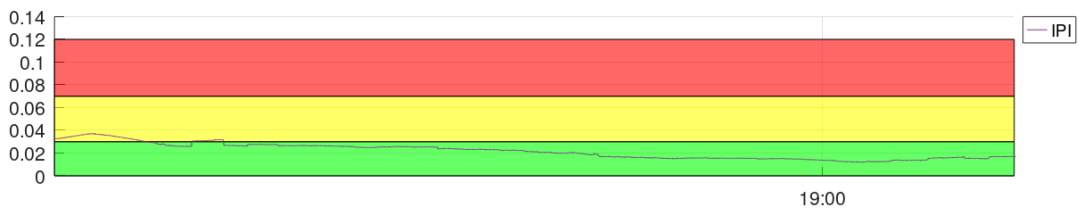
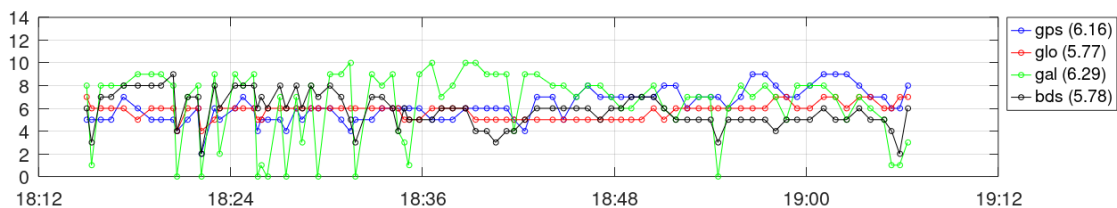
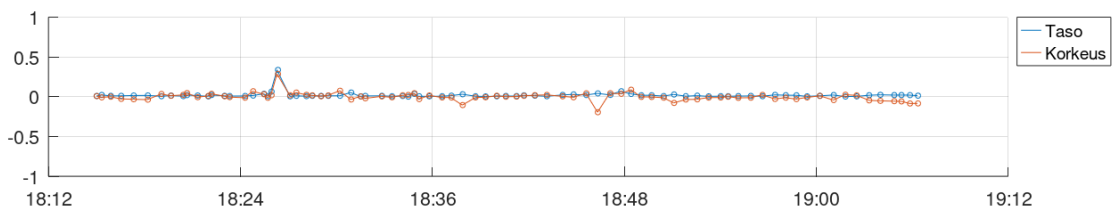
99M9917A (Aho) 22.11

(17/24)



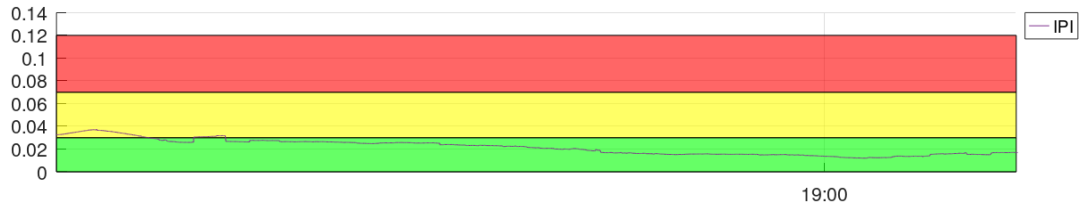
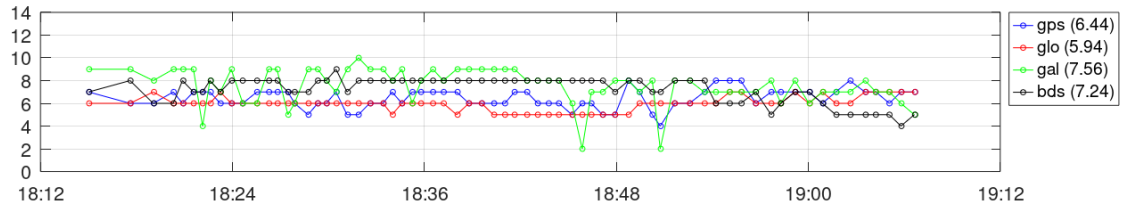
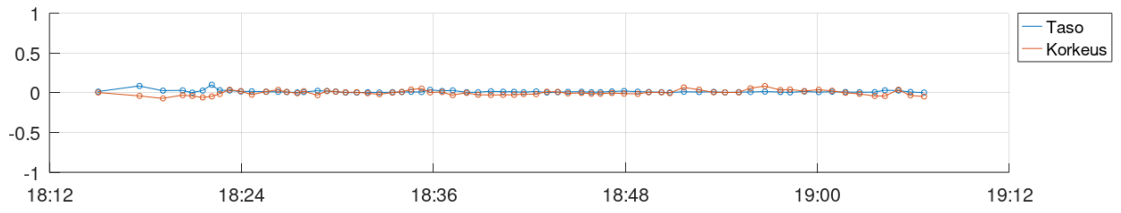
FINPOS 23.11.

(18/24)



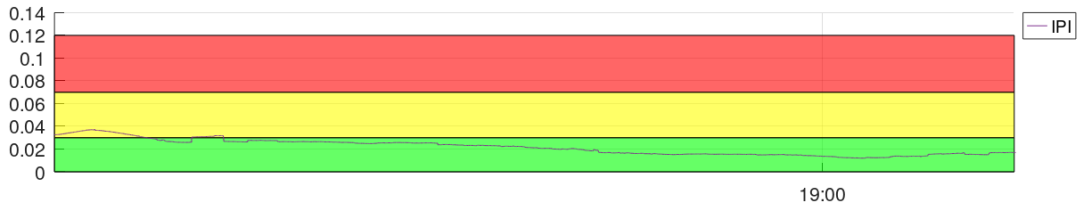
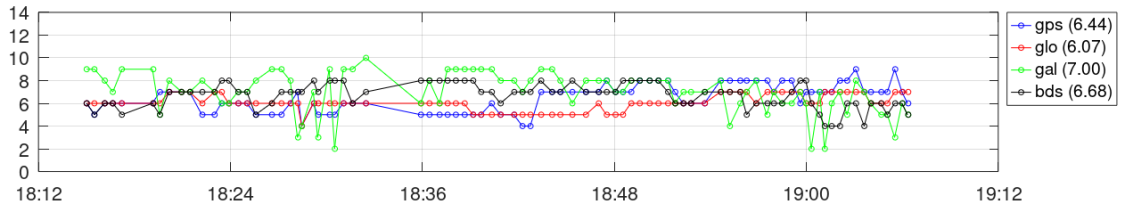
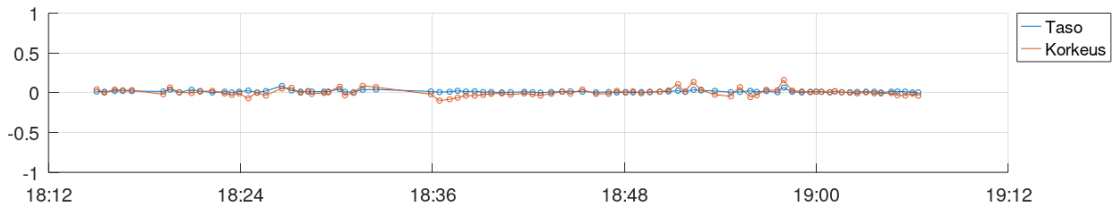
AP5 23.11

(19/24)



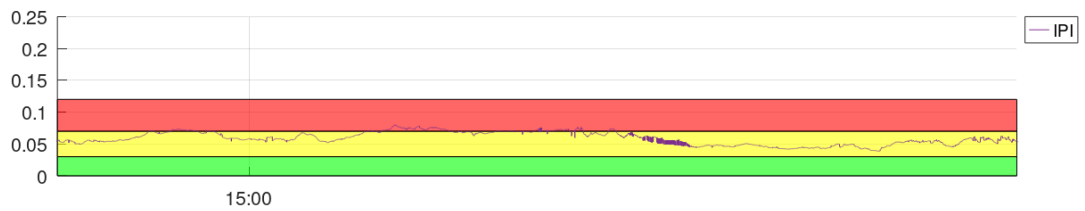
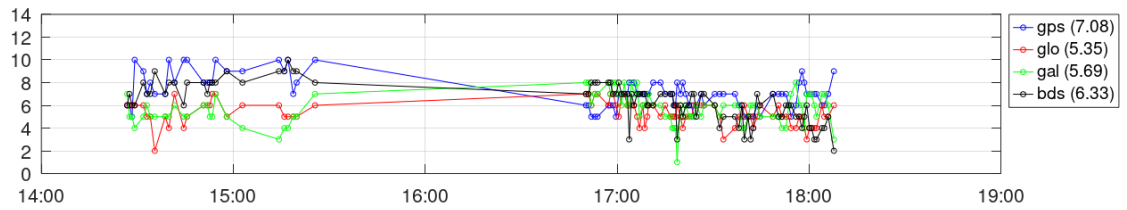
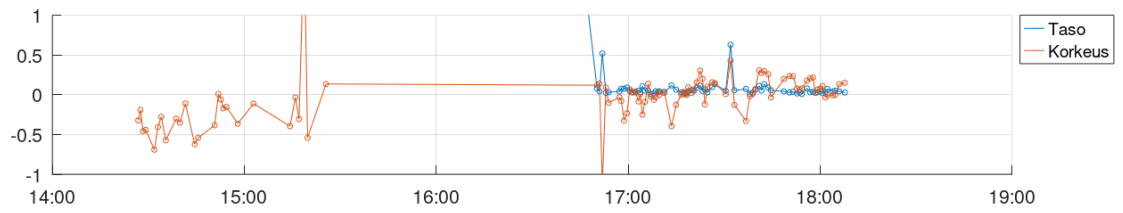
05M5515 (Mätäsjärvi) 23.11

(20/24)



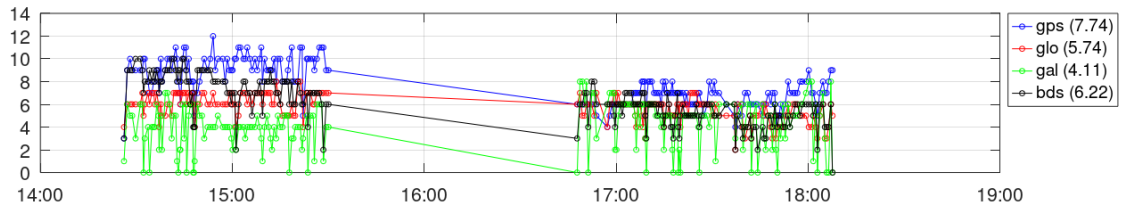
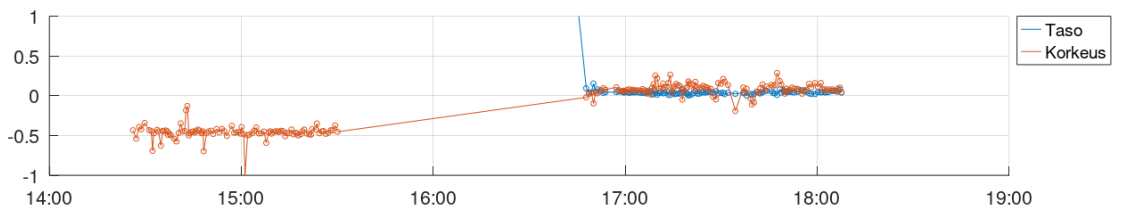
99M9917A (Aho) 23.11

(21/24)



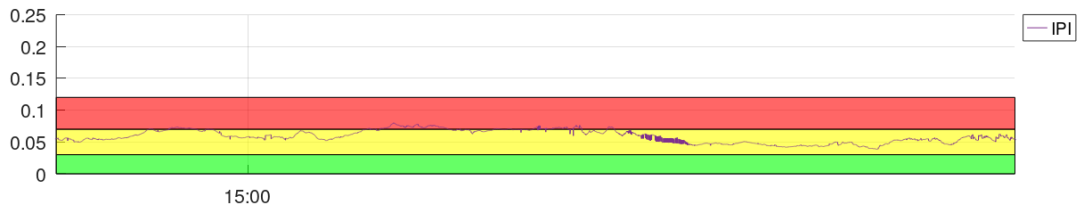
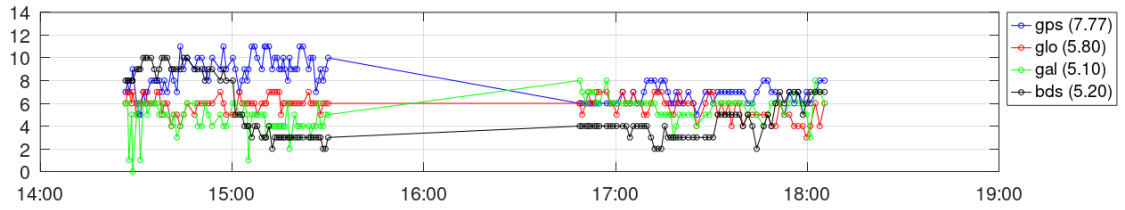
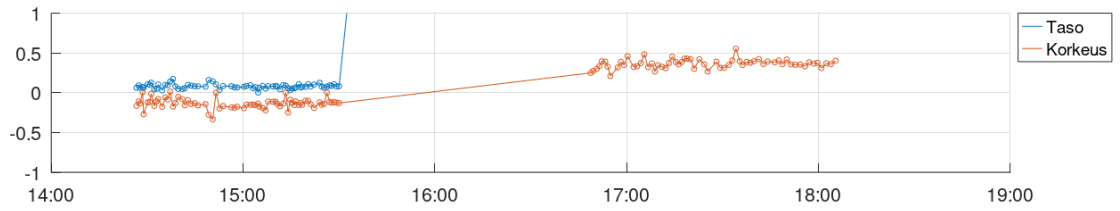
FINPOS 24.11.

(22/24)



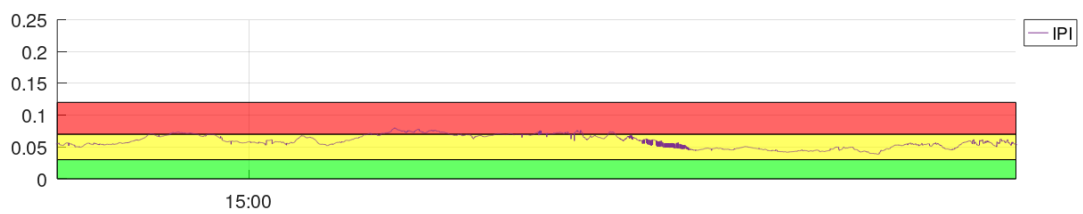
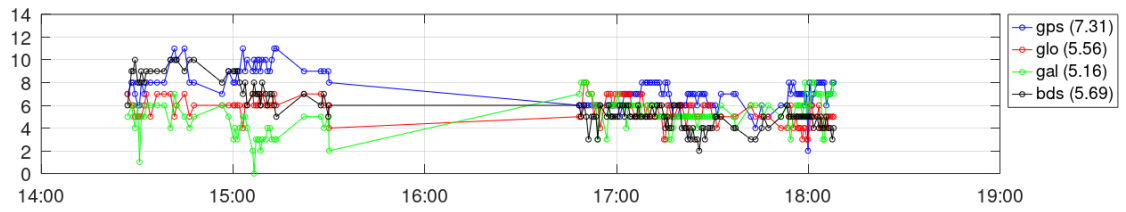
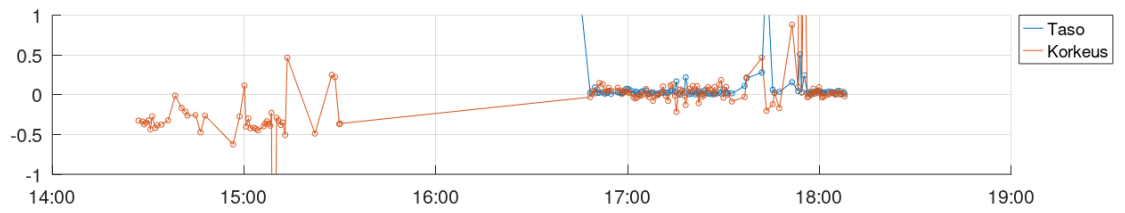
AP5 24.11

(23/24)



05M5515 (Mätäsjärvi) 24.11

(24/24)



99M9917A (Aho) 24.11