

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Maanmittaustekniikan koulutusohjelma

Samuel Ritakallio

**Suomen pysyvän GPS-verkon uudistaminen
GNSS-yhteensopivaksi**

Insinööri työ 4.6.2009

Ohjaaja: erikoistutkija Hannu Koivula
Ohjaava opettaja: yliopettaja Vesa Rope

Tekijä Otsikko	Samuel Ritakallio Suomen pysyvän GPS-verkon uudistaminen GNSS-yhteensopivaksi
Sivumäärä Aika	81 4.6.2009
Koulutusohjelma	maanmittaustekniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja Ohjaava opettaja	erikoistutkija Hannu Koivula yliopettaja Vesa Rope
<p>Tämän työn aihe on Suomen pysyvän GPS-verkon FinnRefin uudistaminen. Työssä tutkitaan eri organisaatioiden vaatimuksia ja suosituksia, joita pysyvän GNSS-verkon tulee täyttää. Selvitysten pohjalta muodostetaan suositus Suomen uudeksi pysyväksi GNSS-verkoksi. Työn tilaaja on Geodeettinen laitos, joka hyödyntää selvityksen tuloksia ja annettua suositusta lopullisen GNSS-verkon suunnittelussa.</p> <p>Tarve FinnRefin uudistukselle perustuu uusiin GNSS-taajuuksiin ja -signaaleihin, joita verkko ei nykyisellään kykene havaitsemaan. Uudistus tapahtuu rakentamalla uusi GNSS-verkko nykyisen FinnRefin rinnalle. Työssä esitetty suositus FinnRefin seuraajaksi käsittää 18 uutta GNSS-asemaa tasaisesti eri puolilla Suomea. Asemista kahdeksan (mukaanlukien nykyiset IGS- ja EPN-asemat) rakennetaan ensisijaisesti vanhojen FinnRef-asemien viereen ja kymmenen rakennetaan uusille paikoille.</p> <p>Kaikkien asemien antennialustatyypiksi suositellaan poraamalla tuettuja alustoja, jotka tarjoavat kallioon ankkuroituna vakaimman mahdollisen perustan antennille. Antennialustan ja koko havaintoaseman ympäristön tulee tarjota mahdollisimman suotuisa signaaliympäristö, ja mahdolliset monitieheijastusten lähteet tulee minimoida. Vastaanottimiksi ja antenniksi suositellaan IGS:lle entuudestaan tunnettuja <i>all in view</i> -vastaanottimia ja choke ring -antenneja. Kaikkien antennien päälle suositellaan asennettavaksi mahdollisimman tasalaatuiset puolipallon muotoiset suojakuvut. Jokaiselle antenni- ja suojakupu -parille tulee tehdä yksilöllinen absoluuttikalibrointi. Varsinaisten asemien lisäksi suositellaan rakennettavaksi samalla laitteistolla varustettu testiasema, jonka antenniasennukset voidaan tasaisin väliajoin irroittaa kontrollitarkoituksessa tehtäviä uusintakalibrointeja varten. Kaikkien antennialustojen vakautta suositellaan seurattavaksi toistuvien EPLA-mittausten avulla.</p> <p>Työssä tehdyt selvitykset modernien GNSS-asemien suunnittelusta ovat tärkeää taustatietoa, jota tullaan jatkossa soveltamaan pysyvän GNSS-verkon suunnittelussa ja rakentamisessa. Työ antaa hyvän pohjan myös asemien rakenteen mahdollisille yksityiskohtaisille jatkotutkimuksille.</p>	
Hakusanat	FinnRef, GNSS, GPS-verkko, pysyvä asema, GNSS-signaalit

Author	Samuel Ritakallio
Title	Renewal of the Finnish Permanent GPS Network to conform with GNSS
Number of Pages	81
Date	4.6.2009
Degree Programme	Land Surveying
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Hannu Koivula, Senior Research Scientist Vesa Rope, Principal Lecturer
<p>This thesis deals with the renewal of the Finnish Permanent GPS Network FinnRef. The objective is to study specific demands and recommendations given to permanent GNSS networks by different organizations. Based on these studies, a recommendation for the new Finnish Permanent GNSS Network is given. The thesis is ordered by the Finnish Geodetic Institute, that will apply the results and recommendations of this work in the designing process of the final GNSS network.</p> <p>The need to renew FinnRef arises from the new GNSS frequencies and signals that the current network can not track. The renewal is carried out by building a new GNSS network beside the old FinnRef. The recommendation for the new network, provided in this thesis, consists of 18 new GNSS stations, which are evenly distributed over Finland. Eight of the new stations (including all IGS and EPN stations) are built next to old FinnRef stations and 10 are built to new locations. The new stations will eventually fully replace the old ones.</p> <p>The recommended monument types for all new stations are drilled braced monuments. When anchored to bedrock, they give the best possible foundation to the antenna. The monument and the station site should provide a favourable signal environment and all the possible sources of multipath signals should be minimized. For the receivers and antennas to the new network, "all-in-view" receivers and choke ring antennas, known to the IGS, are being recommended. Homogeneous hemispherical radomes should be installed on all the antennas. An individual absolute calibration must be performed on all antenna and radome pairs. In addition to the actual stations, it is recommended that also a test station is built. The purpose of this test station is to provide an equivalent antenna assembly that can be removed in order to repeatedly calibrate it. This provides useful comparison data to actual stations. The stability of all the monuments should be repeatedly monitored using EPLA measurements.</p> <p>This thesis presents valuable background knowledge concerning the designing of up-to-date GNSS stations. The results are going to be applied in the designing and building of the final GNSS network. The thesis also provides a basis for the subsequent and more detailed studies of the structure of the stations.</p>	
Keywords	FinnRef, GNSS, GPS network, permanent station, GNSS signals

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

1 Johdanto.....	6
2 Suomen pysyvä GPS-verkko FinnRef.....	8
2.1 FinnRef-asetat.....	8
2.1.1 Asemien sijainti.....	8
2.1.2 Antennialustat.....	9
2.1.3 Vastaanottimet.....	12
2.1.4 Antennit.....	13
2.1.5 Tiedonsiirrot.....	15
2.2 Verkon merkitys Suomelle ja maailmalle.....	16
2.2.1 Kansalliset koordinaattijärjestelmät.....	16
2.2.2 Kansainväliset koordinaattijärjestelmät.....	16
2.2.3 Geodynamiikan tutkimus.....	18
3 GNSS – tekninen kehitys.....	19
3.1 GPS.....	19
3.2 GLONASS.....	23
3.3 Galileo.....	26
3.4 Compass.....	29
4 Uuden GNSS-verkon taustatutkimus.....	31
4.1 Havaintoasema.....	31
4.1.1 Maaperä.....	32
4.1.2 Satelliittien näkyvyys.....	32
4.1.3 Monitieheijastusten, sironnan ja radiohäiriöiden lähteet.....	33
4.1.4 Aseman saavutettavuus ja infrastruktuuri.....	35
4.1.5 Asemapaikkojen tutkiminen maastossa.....	35
4.2 Antennialustat.....	38
4.2.1 Rakenteellisia tavoitteita.....	38
4.2.2 Mastotyyppejä.....	39
4.2.3 Antennin kiinnitys alustaan.....	51
4.2.4 Seurantamittaukset ja vara-antennialustat.....	52
4.3 Vastaanottimet.....	54
4.3.1 GNSS-signaalit.....	54
4.3.2 IGS:n ja EPN:n suositukset GNSS-asettien vastaanottimille.....	56
4.4 Antennit.....	57
4.4.1 Nykyisten antennien käyttömahdollisuus.....	57
4.4.2 IGS:n ja EPN:n suositukset antennille.....	59
4.5 Yhteys EUREF-FINiin.....	64

5 Suositus Suomen uudeksi GNSS-verkoksi.....	65
5.1 Havaintoasemien sijainti.....	65
5.2 Asemapaikan valinta.....	69
5.3 Asema.....	70
5.3.1 Antennialusta.....	70
5.3.2 Laitteisto.....	72
5.3.3 Seurantamittaukset.....	74
6 Yhteenveto.....	75
Lähteet.....	77

1 Johdanto

1990-luku oli pysyvien GPS-asemien (Global Positioning System) kehityksen kannalta tärkeää aikaa Euroopassa. Tarkka satelliittipohjainen paikanmäärittäminen avasi uusia ulottuvuuksia koordinaattijärjestelmien realisointiin ja ylläpitoon. Pohjoismaisen yhteistyön tukemana Geodeettinen laitos käynnisti pysyvän GPS-verkon suunnittelun Suomeen talvella 1992–93. Tuloksena syntyi Suomen virallisen koordinaatiston EUREF-FINin ylin luokka, 12 pysyvän GPS-aseman verkko FinnRef. Verkko laajeni 13 asemaan vuonna 2005, kun Degerbyn GPS-asema rakennettiin.

FinnRef toimii maassamme käytettävien koordinaattijärjestelmien perustana, liittää ne saumattomasti kansainvälisiin järjestelmiin ja on samalla arvokas työkalu geodynamiikan tutkimuksessa.

Tämän insinööriyön aihe on FinnRef-verkon uudistaminen. Työn tilaajana toimii Geodeettisen laitoksen geodesian ja geodynamiikan osasto. Osaston yhtenä tehtävänä on ylläpitää valtakunnallisia koordinaattijärjestelmiä ja samalla tätä tarkoitusta varten rakennettua FinnRefiä.

FinnRef on rakennettu pääosin 90-luvun puolivälissä. Se on nykyisellään yksinomaan kaksitaajuus-GPS-verkko. Satelliittipaikannusjärjestelmät, eli GNSS:t (Global Navigation Satellite System), käyvät tällä hetkellä läpi merkittäviä uudistuksia. GPS:n, GLONASSin ja Galileon kehityksen myötä tarjolle tulee huomattava määrä uusia havaintosuureita, joita FinnRef ei nykyisellään kykene havaitsemaan. Uusien GNSS-taajuuksien ja -signaalien havaitsemisesta saatavat hyödyt ovat syy verkon uudistamiseen. Tässä työssä käsitellään uudistuksen eri osa-alueita ja tutkitaan parhaita menetelmiä niiden toteuttamiseksi.

Eri tahot ovat asettaneet nykypäivän pysyville GNSS-asemille lukuisia suosituksia ja vaatimuksia. Aiheeseen liittyvää tietoa ja tutkimustuloksia on runsaasti, mutta ne ovat hajallaan eri lähteissä. Tämän työn tarkoituksena on koota yhteen uutta tietoa

suosituksista GNSS-asemien suunnittelussa ja esittää tämän pohjalta oma suositus FinnRefin uudistamiseksi GNSS-yhteensopivaksi.

Työn painopiste on uuden GNSS-verkon infrastruktuurin ja laitteiston tutkimisessa. Nykyisten FinnRef-asemien antennialustoja ei tulla käyttämään uudessa GNSS-verkossa, vaan tarkoitus on rakentaa uudet alustat. Useissa vanhoissa antennialustoissa on paljon metallia ja niissä voi esiintyä ongelmia monitieheijastusten kanssa. Korvaavat uudet antennialustat rakennetaan nykypäivän suositusten mukaisiksi. Työssä käsitellään myös nykyisten antennien käyttömahdollisuus uudessa verkossa. Kantavana ajatuksena on rakentaa uusi GNSS-verkko nykyisen FinnRefin rinnalle ja käyttää verkkoja rinnakkain mahdollisimman pitkään. Selvitysten pohjalta esitetään lopullinen ehdotus pysyväksi GNSS-verkoksi.

2 Suomen pysyvä GPS-verkko FinnRef

2.1 FinnRef-asetat

2.1.1 Asemien sijainti

Geodeettisen laitoksen ylläpitämä FinnRef-verkko käsittää 13 pysyvää GPS-asemaa. Verkko toimii perustana geodeettisille koordinaattijärjestelmille ja on tärkeässä roolissa geodynamiikan tutkimuksessa. FinnRef on suunniteltu kattamaan koko maa siten, että maannousun maksimierot voidaan havaita. Asemien sijainti kartalla selviää kuvasta 1. (Koivula 2006: 3; Ollikainen ym. 1997: 7.)



Kuva 1. Suomen pysyvä GPS-verkko FinnRef.

Asemat sijaitsevat eri puolilla Suomea ja suurin osa on rakennettu syrjäisille paikoille kauas Geodeettisesta laitoksesta. Vain osa asemista sijaitsee tutkimuskeskusten tai observatorioiden yhteydessä, taulukon 1 mukaisesti. Metsähovin GPS-aseman masto rakennettiin jo vuonna 1990, mutta varsinaisesti asemien rakentaminen aloitettiin

kesällä 1993. Tämän jälkeen asemat valmistuivat nykytilaansa vuosina 1994–96. FinnRefin 13. asema Degerby rakennettiin osaksi verkkoa jälkikäteen, vuonna 2005. Kaikkien asemien EUREF-FIN-koordinaatit ilmenevät taulukosta 1. Asemien käyttöönottopäivämäärät ja niillä käytössä oleva laitteisto on koottu yhteen taulukossa 2 sivulla 14. (Koivula 2006: 3, 17; Ollikainen ym. 2001: 12; Geodeettinen laitos.)

Taulukko 1. FinnRef-asetat ja niiden sijainti (Koivula 2006: 5–6).

Asema	EUREF-FIN-koordinaatit [°,']		Aseman sijainti tieteellisen tutkimusaseman tai muun yhteistyötahon yhteydessä
	Latitudi	Longitudi	
Degerby	60 01 54.71508*	20 23 05.30198*	Degerbyn mareografi, Merentutkimuslaitos
Joensuu	62 23 28.21582	30 05 46.14903	-
Kevo	69 45 21.19402	27 00 25.68856	Lapin tutkimuslaitos Kevo, Turun yliopisto
Kivetty	62 49 11.53609	25 42 08.12192	-
Kuusamo	65 54 36.88747	29 02 00.50258	-
Metsähovi	60 13 02.89046	24 23 43.13336	Metsähovin tutkimusasema, Geodeettinen laitos
Olkiluoto	61 14 22.74877	21 28 21.62478	Olkiluodon ydinvoimala, energiayhtiö Posiva
Oulu	65 05 11.49792	25 53 34.51516	Aarne Karjalainen observatorio, Oulun yliopisto
Romuvaara	64 13 02.62511	29 55 54.10767	-
Sodankylä	67 25 15.08494	26 23 20.56358	Sodankylän geofysiikan observatorio, Oulun yo
Tuorla	60 24 57.04810	22 26 36.30941	Tuorlan observatorio, Turun yliopisto
Vaasa	62 57 40.28640	21 46 14.27102	-
Virolahti	60 32 19.67472	27 33 17.96866	Harjun oppimiskeskus

* Määritetty myöhemmin Maanmittauslaitoksessa.

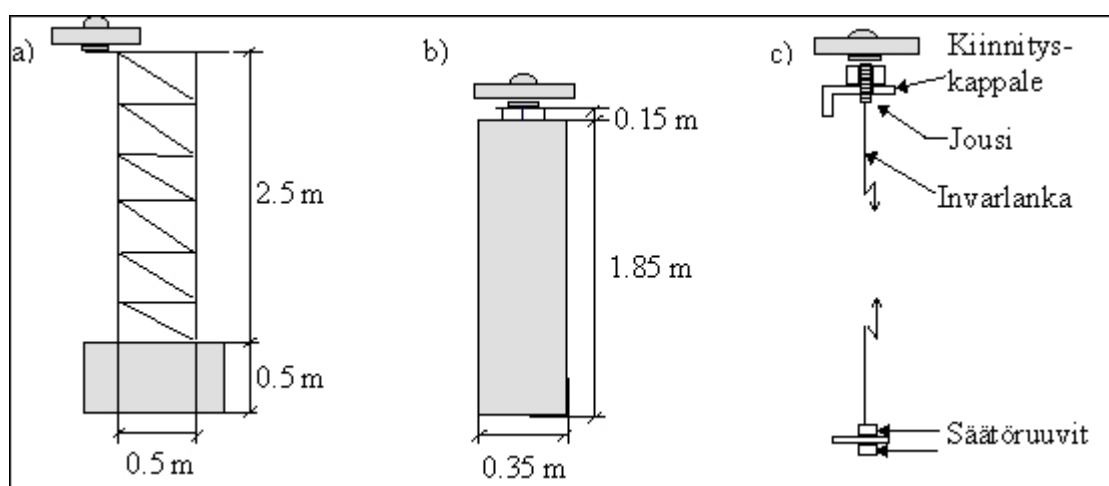
2.1.2 Antennialustat

Suunniteltaessa GPS-asettien antennialustojen korkeutta päätettiin niistä rakentaa mahdollisimman matalia, jotta vuotuisen lämpölaajenemisen aiheuttama virhe korkeuden määrittämisessä saadaan minimoitua (Ollikainen ym. 1997: 7). Suomelle tyypillisissä sääoloissa lämpötilaerot talven ja kesän välillä ovat 40 °C:n luokkaa, jolloin lämpölaajenemisen vaikutus korkeusmittauksiin saattaa maston pituudesta riippuen olla jo huomattavaa. 40 °C:n vuotuisella muutoksella kaksi metriä korkean teräsmaston korkeus muuttuu noin millimetrin ja viisi metriä korkean maston hieman yli kaksi millimetriä. Näitä muutoksia pidettiin alustoja suunniteltaessa vielä hyväksyttävänä. Kuten myöhemmin on selitetty (ks. s. 11), verkon kahta korkeinta

mastoa varten jouduttiin tekemään erityistoimenpiteitä, sillä lämpölaajenemisen aiheuttamat virheet alkoivat nousta liian suuriksi. (Koivula 2006: 13.)

FinnRef-verkon asemilla päädyttiin käyttämään antennialustoina kolmea erilaista rakenneratkaisua kuvan 2 mukaisesti. Yleisin käytetyistä alustoista on 2,5 metriä korkea teräsristikkomasto (kuvat 2 (a) ja 3), joka on käytössä Joensuun, Kuusamon, Sodankylän, Tuorlan, Vaasan ja Virolahden asemilla. Kevon asemalla käytettävä antennimasto on rakenteeltaan sama, mutta maston korkeus on viisi metriä lähiympäristössä olevan puuston takia. (Ollikainen ym. 1997: 7.)

Masto on kiinnitetty kuudella pultilla sen alle valettuun 0,5 metriä korkeaan betoniperustukseen. Perustus on valettu suoraan peruskallion päälle ja kiinnitetty siihen teräspaaluilla. Poikkeuksena on Sodankylän GPS-asema, jossa peruskallio ei ole riittävän lähellä maanpintaa. Siellä perustus on toteutettu valamalla suuri betoniantura suoraan moreenimaaperään ja kiinnittämällä masto tähän anturaan. Maston päällä on 10 mm paksu kolmionmuotoinen alumiinilevy, jossa on antennin kiinnityskierrettä vastaaviksi työstetyt 5/8" reiät kaikissa kolmessa kulmassa. Antenni on asennettu siihen kulmaan, joka on pohjoisesta myötöpäivään nähden ensimmäisenä. Itse levy on kiinnitetty teräsmastoon kuudella U:n muotoisella pultilla. (Koivula 2006: 10.)



Kuva 2. FinnRef-verkon antennialustojen kolme eri rakenneratkaisua: teräsristikkomasto, betonipilari, ja antennialustan invarstabilointi (Geodeettinen laitos).

Uusin versio teräsristikkomastosta on hieman kevyempi kolme metriä korkea masto, joka on käytössä Degerbyn aseman antennialustana. Masto on kiinnitetty suoraan suurten kivijalkojen päällä seisovaan betonilaituriin, mareografin viereen. Maston päällä on 10 mm paksu ruostumaton teräslevy, jonka keskellä on tarkasti työstetty 5/8" reikä antennin asennusta varten. Päällyslevy on hitsattu mastoon kiinni, jonka jälkeen koko masto on kuumasinkitty. (Koivula 2006: 12, 17.)

Kolme asemaa – Olkiluoto, Kivetty ja Romuvaara – rakennettiin yhteistyössä energiayhtiö Posiva Oy:n kanssa. Nämä kohteet olivat ehdolla harkittaessa ydinjätteen loppusijoituspaikan perustamista, ja tätä tarkoitusta varten asemat ovat osa niiden ympärille rakennettuja deformaatiomittausverkkoja. Verkkoja käytetään paikallisen maankuoren liikkeiden tutkimiseen. (Koivula 2009; Ollikainen ym. 1997: 7.)



Kuva 3. Joensuun GPS-aseman teräsristikkomasto (kuva: Koivula).



Kuva 4. Romuvaaran GPS-aseman betonipilari (kuva: Koivula).

Näille asemille valittiin antennialustaksi kuvissa 2 (b) ja 4 näkyvä kaksi metriä korkea teräsbetonipilari. Pilarin halkaisija on 0,3 metriä, ja se on kiinnitetty suoraan peruskallioon rautatangoilla ja betonilla. Pilaria ympäröi metallisyylinteri, joka suojaa teräsbetonisydäntä suoralta auringonsäteilyltä. Sylinteri on asennettu siten, että se ei ole kosketuksissa varsinaiseen pilariin. Pilarin yläosassa on ruostumattomasta teräksestä valmistettu kiinnitysjärjestelmä GPS-antennia varten. Kiinnitysjärjestelmässä on päällimmäisenä 10 mm paksu ruostumaton teräslevy, jonka keskelle on työstetty 5/8" reikä, johon antenni kiinnitetään pultilla. Levy on hitsattu kiinni kolmeen jalkaan, jotka upotettiin betoniin pilarin valuvaiheessa. (Koivula 2006: 10.)

Kolmas antennialustana käytetty rakenneratkaisu on antennimaston invarstabilointi (kuva 2 c). Tätä ratkaisua käytetään mastojen korkeuden takia Metsähovin 20 metriä korkeassa teräsristikkomastossa ja Oulun kahdeksan metriä korkeassa metallimastossa. Invarstabiloinnilla saadaan maston lämpölaajenemisesta aiheutuva korkeussuuntainen liike poistettua. Menetelmä perustuu erittäin pienen lämpölaajenemiskertoimen omaavan invartangon tai -langan käyttöön, joka yhdessä järjestelmän muiden komponenttien kanssa eliminoi maston lämpölaajenemisen vaikutukset antennin korkeuteen. (Paunonen 1992; Ollikainen ym. 1997: 7; Ollikainen ym. 1998: 53.)

2.1.3 Vastaanottimet

Vuonna 1994 Geodeettinen laitos hankki 5 kappaletta TurboRogue SNR-8100 -GPS-vastaanottimia FinnRef-asemien havaintolaitteiksi. Samana vuonna suoritettujen testihavaintojen aikana laitteet osoittautuivat epäluotettaviksi, minkä seurauksena tehtiin päätös niiden vaihtamisesta uusiin. Uudeksi vastaanotinmalliksi valittiin Ashtech Z-XII3, ja kyseiset vastaanottimet asennettiin Olkiluodon, Sodankylän, Tuorlan, Virolahden, Joensuun, Oulun ja Vaasan asemille vuoden 1995 aikana. Suurimmat hyödyt Ashtechin vastaanottimissa vanhoihin verrattuna olivat luotettavuuden paraneminen ja kanavamäärän nousu kahdeksasta kahteentoista. Samana vuonna uusittiin myös Metsähovin aseman vastaanotin. Asemalla vuodesta 1990 alkaen havainnoinut Rogue SNR-8C -vastaanotin vaihdettiin luotettavimpaan silloisista SNR-

8100-vastaanottimista. Ashtechin vastaanottimen käyttöön Metsähovissa siirryttiin vuonna 2000. Lopuille asemille asennettiin Ashtechin vastaanottimet sivulla 14 olevan taulukon 2 mukaisesti. (Koivula 2006: 7, 15, 17; Ollikainen ym. 1997: 8.)

Kaikilla verkon 13 asemalla on siis käytössä Ashtech Z-XII3 -GPS-vastaanotin, joka tallentaa dataa 30 sekunnin havaintovälillä. Vastaanottimet keräävät jokaista mahdollista havaintosuuretta, joita tällä laitteistolla on seitsemän: L1- ja L2-kantoaallon vaiheet, C/A-koodihavainnot L1-taajuudella, P1- ja P2-koodihavainnot L1- ja L2-taajuudella, sekä molempien taajuuksien Dopplerit D1 ja D2. (Koivula 2006: 7, 15, 17; Ollikainen ym. 1997: 8; Geodeettinen laitos.)

2.1.4 Antennit

Antennien yhteydessä on syytä ottaa esille yksi merkittävimmistä satelliittimittauksen satunnaisista virhelähteistä – monitieheijastuminen. Signaalien monitieheijastumista voivat aiheuttaa havaintoaseman lähetyvillä olevat erilaiset heijastavat pinnat. Ilmiössä satelliitin lähettämät signaalit saapuvat antenniin useampaa kuin yhtä reittiä, eli heijastuvat antennin ympärillä olevista kohteista. Monitieheijastuneet signaalit sotkevat paikkaratkaisun laskentaa vaikuttaen koodipseudoetäisyyteen ja kantoaallon vaiheeseen. Monitieheijastusten haitat ovat suurimmat havainnoilla, jotka tulevat antenniin pienistä tai jopa negatiivisista korkeuskulmista. (Poutanen 1998: 137, 147.)

FinnRef-verkon kaikilla asemilla on Dorne Margolin -tyyppiset choke ring -antennit eli vaimennusrenkailla varustetut antennit (kuva 5, s. 15). Ne on suunniteltu vaimentamaan alle 10°:n korkeuskulmasta saapuvia signaaleja ja poistamaan suurimman osan horisonttitason alapuolelta tulevista heijastuksista. Tämä antennityyppi on käytännön standardi globaalissa IGS-verkossa (International GNSS Service) sekä Euroopan laajuisessa EPN-verkossa (EUREF Permanent Network). FinnRefissä antennija on käytössä neljää eri mallia taulukon 2 mukaisesti. Allen Osborne Inc. on valmistanut kaksi vanhempaa antennityyppiä, AOAD/M_B ja AOAD/M_T.

Myöhemmässä vaiheessa osassa asemista otettiin käyttöön Ashtechin valmistamat ASH700936A_M ja ASH701945C_M antennit. (Koivula 2006: 7; Poutanen 1998: 147.)

Osa antenneista on suojattu ns. radomeilla (radar dome), eli suojakuvuilla, jotka suojaavat antennia ympäristön ja luonnonolojen haittavaikutuksilta. Suomen oloissa kuvuilla estetään signaalin kulkua haittaavan lumen kertymistä antennin päälle. Asemilla on käytössä kaksi eri suojakupumallia. Seitsemällä asemalla on Ashtechin valmistama kartiomainen SNOW-radome, ja kolmella asemalla on ”Kootwijk”-tyyppinen Alankomaissa valmistettu DUTD-radome. Kolmella asemalla antennit ovat ilman suojakupuja. (Koivula 2006: 8, 16.) Taulukosta 2 selviävät käytetyt antennit ja suojakuvut asemakohtaisesti.

Taulukko 2. FinnRefin historia ja laitteisto (Koivula 2006: 16, 18).

Asema	Asennettu	Vastaanotin	Antenni	Suojakupu	Mastotyyppi
Degerby	28.9.2005	Z-XII3	ASH701945C_M	ei	teräsristikko (3 m)
Joensuu	15.6.1995	Z-XII3	ASH700936A_M	SNOW	teräsristikko (2,5 m)
Kevo	5.7.1996	Z-XII3	ASH700936A_M	SNOW	teräsristikko (5 m)
Kivetty	5.3.1996	Z-XII3	ASH700936A_M	SNOW	betonipilari (2 m)
Kuusamo	30.10.1996	Z-XII3	ASH700936A_M	SNOW	teräsristikko (2,5 m)
Metsähovi	1.1.1992 30.4.1995 25.5.2000	SNR-C 8100 Z-XII3	AOAD/M_B " "	ei " "	teräsristikko, invarstabiloitu (20 m)
Olkiluoto	19.10.1994 19.4.1995 28.5.1995	8100 Z-XII3 "	AOAD/M_T " "	ei " DUTD	betonipilari (2 m)
Oulu	16.9.1995	Z-XII3	ASH700936A_M	SNOW	metallimasto, invarstabiloitu (8 m)
Romuvaara	7.5.1996	Z-XII3	ASH700936A_M	SNOW	betonipilari (2 m)
Sodankylä	14.8.1994 16.5.1995	8100 Z-XII3	AOAD/M_T "	ei DUTD	teräsristikko (2,5 m)
Tuorla	15.8.1994 21.1.1995	8100 Z-XII3	AOAD/M_T "	ei "	teräsristikko (2,5 m)
Vaasa	7.4.1995	Z-XII3	ASH700936A_M	SNOW	teräsristikko (2,5 m)
Virolahti	15.8.1994 24.3.1995	8100 Z-XII3	AOAD/M_T "	ei DUTD	teräsristikko (2,5 m)



Kuva 5. Choke ring -antenni (kuva: Poutanen).

2.1.5 Tiedonsiirrot

Vuoteen 2004 asti FinnRefin vastaanottimien tallentama havaintodata siirrettiin Geodeettiselle laitokselle kerran vuorokaudessa puhelinverkkomodeemien välityksellä. Vuonna 2005 suurin osa asemista siirtyi ADSL-yhteyden käyttöön, joka mahdollisti tiedonsiirron asemilta tunnin välein. Tiheä tiedonsiirto on erityisen tärkeää lähes reaaliaikaisten sovellusten käytössä, esimerkiksi sääennusteissa ja IGS:n pikaratoja laadittaessa. Nykyään, kun viimeinen asema Kivetty siirtyi vuonna 2009 käyttämään tiedonsiirrossa langatonta @450-laajakaistayhteyttä, verkon kaikkien asemien havaintodata kerätään tunnin välein. (Koivula 2006: 9; Koivula 2009.)

Geodeettiselta laitokselta havaintodata lähetetään FinnRef-datapankkiin sekä Ruotsissa sijaitsevaan Pohjoismaiseen datapankkiin. EPN-asemien data lähetetään lisäksi Saksassa ja Itävallassa sijaitseviin datakeskuksiin. (Koivula 2006: 9.)

Geodeettisella laitoksella FinnRef-verkon laskenta suoritetaan tieteelliseen käyttöön tarkoitetulla Bernese-ohjelmistolla. FinnRef-dataa prosessoidaan kansainvälisissä laskennoissa myös muilla ohjelmistoilla, kuten GIPSY:llä, jota käyttävät NASA:n JPL (Jet Propulsion Laboratory) sekä NKG:n (Pohjoismainen Geodeettinen Komissio) laskentakeskus Ruotsissa. Ruotsissa on samalla myös koko EPN:n pohjoisen alueen laskentakeskus. Bernesestä poiketen GIPSY laskee tuloksia absoluuttisina koordinaatteina erotushavaintojen sijaan. (Ollikainen ym. 1998: 59; Koivula 2009.)

2.2 Verkon merkitys Suomelle ja maailmalle

2.2.1 Kansalliset koordinaattijärjestelmät

Tarkan, ajantasaisen, helposti käytettävissä olevan ja globaaleihin järjestelmiin sidotun kansallisen koordinaatiston olemassaolo on nykyisen tietoyhteiskunnan toiminnan kannalta välttämätöntä. Geodeettisen laitoksen yksi tärkeimmistä tehtävistä onkin ylläpitää kansallisia koordinaattijärjestelmiä Suomessa. Tehtävän täyttämässä pysyvällä GPS-verkolla on erittäin tärkeä rooli. FinnRef toimii runkona Suomen viralliselle EUREF-FIN-koordinaatistolle ja yhdistää sen maailmanlaajuisen ITRF-koordinaatistoon (International Terrestrial Reference Frame). Ennen kaikkea FinnRef-verkko yhdessä muiden EUREF-FIN-tihennyspisteiden kanssa tarjoaa luotettavan lähtöpisteistön uusille mittauksille, jotka näin saadaan kiinnitettyä suoraan ajanmukaiseen koordinaatistoon. (Jokela 2007.)

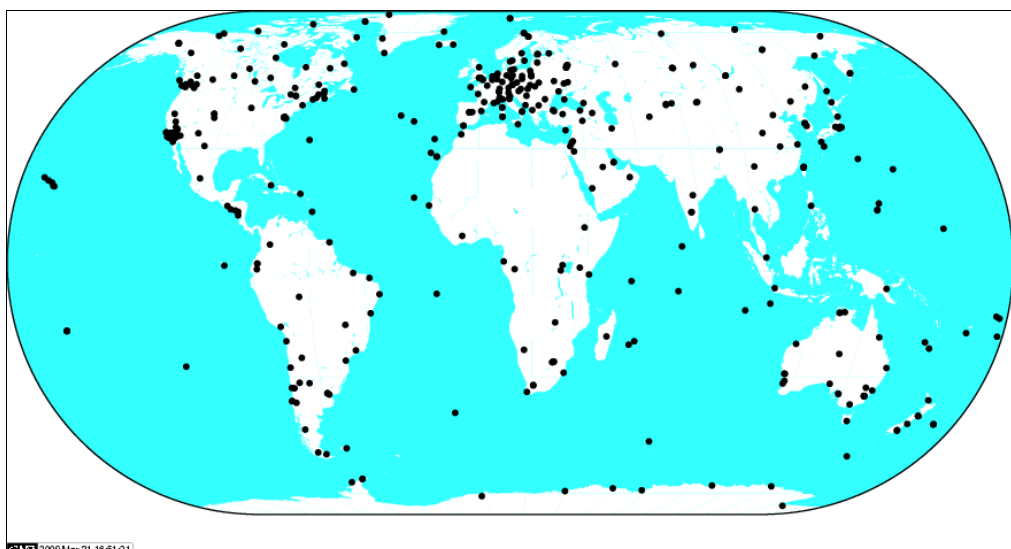
Kesällä 2008 päivitetystä Julkisen hallinnon suosituksessa 153 suositellaan valtakunnallisissa kartastotöissä ja paikkatietopalveluissa käytettäväksi yleiseurooppalaista ETRS89-koordinaattijärjestelmää – nykyisen Kartastokoordinaattijärjestelmän (kkj) sijasta. Suositus pohjautuu Euroopan komission organisoiman kokouksen vastaavanlaiseen suositukseen, jossa suositeltiin ETRS89-koordinaattijärjestelmän hyväksymistä yleiseurooppalaiseksi maantieteellisten koordinaattien järjestelmäksi. Suomessa tämän järjestelmän realisaatio eli maahan sidottu koordinaatisto on EUREF-FIN. (JHS 153.)

2.2.2 Kansainväliset koordinaattijärjestelmät

Satelliittipaikannusjärjestelmien joustava ja toimiva käyttö perustuu yhtenäiseen maailmanlaajuiseen koordinaattijärjestelmään. Ilman sitä toimivat kansainväliset paikkatietoaineistot eivät ole mahdollisia. Tämä on vankka perustelu seuraavissa kappaleissa esitettyjen kansainvälisten järjestelmien kehitykselle. (JHS 153: 3.)

Kansainvälinen yhteistyöorganisaatio IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) määritteli vuonna 1988 maailmanlaajuisen koordinaattijärjestelmän ITRS:n (International Terrestrial Reference System). Sen realisaatio on ITRF (International Terrestrial Reference Frame). Koska maailmanlaajuisien järjestelmien havaintoasemat ja kiintopisteet liikkuvat mannerlaattojen mukana, on niiden realisaatiot kiinnitettävä johonkin tiettyyn ajanhetkeen eli epookkiin. Tällöin syntyy esimerkiksi ITRF2000 epookkina 2000.0, jonka koordinaatit on redukoitu vuoden 2000 alkuhetken tilanteeseen. ITRF on globaalissa mittakaavassa tarkin realisaatio, joka soveltuu maailmanlaajuisien koordinaatistojen pohjaksi. Etenkin tutkimuskäytössä se onkin lähes ainoa käytössä oleva koordinaatisto. (Poutanen 1998.)

FinnRef-verkon asemista ITRF-koordinaatiston määrittämisessä ovat mukana Metsähovin, Joensuun, Sodankylän ja Vaasan GPS-asemat. Nämä asemat kuuluvat ITRF:n perustana käytettäviin maailmanlaajuisiin GNSS-verkkoihin. Kaikki neljä asemaa ovat osana Euroopan kattavaa kiinteiden GNSS-asemien verkkoa EPN:ää (EUREF Permanent Network). Metsähovi on lisäksi yli 200 GNSS-asemaa ympäri maailmaa käsittävässä IGS-havaintoasemaverkossa (International GNSS Service). IGS on kansainvälinen tietopalvelukeskus geodeettista ja geodynaamista tutkimustoimintaa varten. Sen tärkeimpiä tuotteita IGS-havaintoasemien (kuva 6) alkuperäisen datan lisäksi ovat mm. GPS- ja GLONASS-satelliittien tarkat ratatiedot ja kellokorjaukset. (Jokela 2007; Koivula 2006: 37.)



Kuva 6. Pysyvien IGS-havaintoasemien verkko (IGS 2009).

ITRF-koordinaatit ovat kuitenkin moniin käytännön sovelluksiin (kuten kartastotöihin) hankalia, koska ne ovat ajasta riippuvia ja järjestelmää muutetaan aika ajoin. Niinpä IAG:n alakomissio EUREF (European Reference Frame of the Commission X on Continental Networks) määritteli vuonna 1990 Euroopan laajuisen koordinaattijärjestelmän ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), joka on yhtenevä ITRS89:n kanssa epookkina 1989.0. Järjestelmä on kiinnitetty Euraasian mannerlaatan deformatumattomaan osaan, eikä se muutu ajan mukana. Järjestelmän ensimmäinen realisaatio – eli Euroopan laajuinen koordinaatisto – on ETRF89. Sen ensimmäinen GPS-kampanjana vuonna 1989 toteutettu kiintopistetiheytys tunnetaan nimellä EUREF89. Suomesta pisteitä oli tihennyksessä mukana neljä, ja tuloksena saatiin siihen asti tihein ja yhtenäisin koordinaatisto Euroopassa. Tänä päivänä ETRF:ää ylläpidetään EPN-asemien ja sitä kautta myös FinnRefin avulla. (Poutanen 1998.)

2.2.3 Geodynamiikan tutkimus

GPS on osoittautunut tehokkaaksi välineeksi maankuoren liikkeiden tutkimuksessa. Maankuoren liikkeessä liikkuvat sen mukana myös kaikki kiinteät GPS-asetat. Pysyviltä GPS-aseteilta saatavilla pitkillä yhtäjaksoisilla aikasarjoilla ja perusteellisella laskennalla saadaan maankuoren pienetkin pysty- ja vaakaliikkeet selville. Skandinaviassa tapahtuvista maankuoren liikkeistä merkittävintä on viimeisimmän jääkauden aiheuttama maankohoaminen. (Koivula 2006; Jokela 2007.)

Maankuoren liikkeiden seuraaminen pysyvien GNSS-asemien avulla on koordinaattijärjestelmien ylläpidon kannalta tärkeää. Kiintopisteiden ja GNSS-asemien liikkeessä maankuoren mukana pysyvien aseminen pitkän aikavälin havainnot mahdollistavat tarkkojen koordinaattimuunnosten tekemisen eri järjestelmien ja epookkien välillä – eli ylipäänsä eri järjestelmien välisten suhteiden tuntemisen. FinnRef palvelee täten myös geodynamiikan tutkimuksen kautta koordinaattijärjestelmien ylläpitoa.

3 GNSS – tekninen kehitys

Termi GNSS (Global Navigation Satellite System) voi tarkoittaa useita eri satelliittipaikannusjärjestelmiä. FinnRef-verkon tulevaisuuden kannalta merkittävimpiä järjestelmiä ovat GPS, GLONASS ja Galileo. Kaksi ensimmäistä ovat jo käytettävissä, ja Galileon kehitys ja käyttöönotto on edennyt huomattavan pitkälle. Kiinan kehittämä Beidou/Compass ei vielä nykytilanteessa ole FinnRefin kannalta merkittävässä roolissa.

3.1 GPS

The Global Positioning System (GPS) on Yhdysvaltain puolustushallinnon kehittämä ja ylläpitämä maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä (Poutanen 1998: 19). Se on vanhin, tunnetuin ja vielä tällä hetkellä ainoa maailmanlaajuisesti täydessä toiminnassa oleva GNSS-järjestelmä.

GPS:n konstellatioon kuuluu 24 toimivaa satelliittia ja useita aktiivisia varasatelliitteja. Satelliitit on jaettu kuudelle tasaväliselle ratatasolle (kuva 7), joiden kallistuskulma päiväntasaajaan nähden on 55° . (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 322.)



Kuva 7. GPS-konstellation kuusi ratatasoa (Team Nirvana's Query 2009).

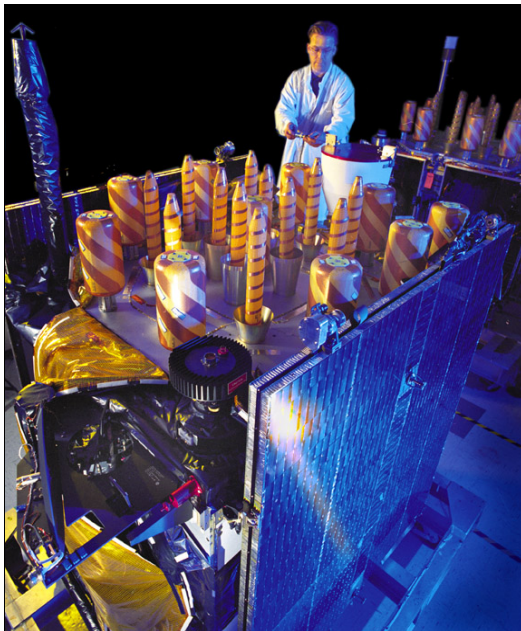
Yhdellä ratatasolla on neljä toimivaa satelliittia ja yksi tai useampi varasatelliitti. Esimerkiksi huhtikuussa 2009 konstellaatio käsitti kaikkiaan 31 satelliittia (USNO 2009a). GPS:n täysi konstellaatio takaa vähintään neljän satelliitin samanaikaisen näkyvyyden kaikkialla maailmassa. Konstellaation tarkemmat numeeriset tiedot ovat näkyvissä eri GNSS:iä vertailevassa taulukossa 6 (s.29). (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 322–323.)

GPS:n käyttämä koordinaattijärjestelmä on geosentrinen World Geodetic System 1984 (WGS-84). WGS-84:ää on hieman uudistettu vuosien varrella ja sen nykyinen realisaatio yhtyy ITRF-järjestelmään senttitarkkuudella. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 313–314.)

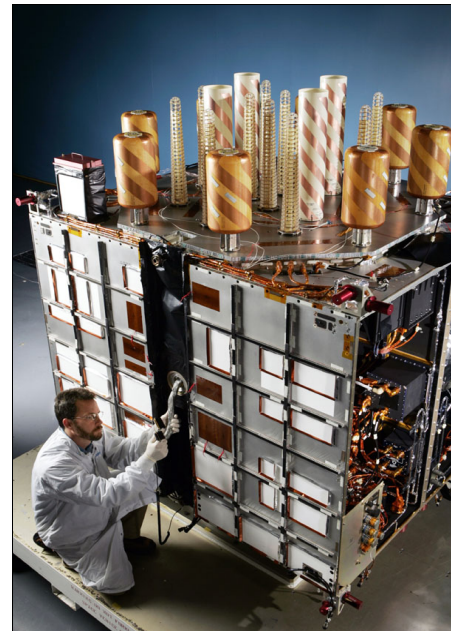
GPS-satelliittien eri versiot on luokiteltu ns. Blokkeihin, joissa suurempi järjestysnumero tai kirjain sen perässä kuvaa kehittyneempää versiota. Kaikki Blokki I:n satelliitit olivat testisatelliitteja, joita laukaistiin kaikkiaan 11 kappaletta vuosina 1978-85. Nämä satelliitit ovat jo poistuneet käytöstä. Nykyinen GPS-konstellaatio koostuu Blokki II-, Blokki IIA-, Blokki IIR- ja Blokki IIR-M -satelliiteista. Seuraavat versiot tulevat olemaan Blokki IIF ja Blokki III. Eri satelliittisarjojen ominaisuuksia selvitetään tarkemmin taulukossa 3. Kuvat 8 ja 9 ovat Blokki IIR- ja Blokki IIR-M -satelliiteista niiden valmistus- ja testausvaiheessa. (USNO 2009b; Poutanen 1998: 19.)

Taulukko 3. GPS:n satelliitti-Blokkien ominaisuuksia. Tähdellä merkityt vuosiluvut ovat USA:n ilmavoimien aikatauluja. (USNO 2009b; LA Air Force Base 2008; Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 323–324.)

Ominaisuus	Satelliitti-Blokki						
	I	II	IIA	IIR	IIR-M	IIF	III
1. laukaisu	22.2.1978	14.2.1989	26.11.1990	23.7.1997	26.9.2005	2009*	2014*
Konstellaatio 4/2009	-	-	12 kpl	12 kpl	7 kpl	-	-
Nimellinen elinikä	4,5 vuotta	7,5 vuotta	7,5 vuotta	10 vuotta	10 vuotta	12 vuotta	
Taajuudet	2: L1, L2	2: L1, L2	2: L1, L2	2: L1, L2	2: L1, L2	3: L1, L2, L5	3: L1, L2, L5
L1-signaalit	-	C/A, P	C/A, P	C/A, P	C/A, P, M	C/A, P, M	C/A, L1C, P, M
L2-signaalit	-	P	P	P	L2C, P, M	L2C, P, M	L2C, P, M
L5-signaalit	-	-	-	-	-	L5C	L5C



Kuva 8. Blokki IIR -satelliitti (Lockheed Martin Co. 2009).



Kuva 9. Blokki IIR-M -satelliitti (Lockheed Martin Co. 2009).

USA:n ilmavoimien ja avaruushallinnon suunnitelmien mukaan avaruuteen laukaistaan vielä yksi Blokki IIR-M -satelliitti. Tämän jälkeen siirrytään seuraavan sukupolven Blokki IIF -satelliitteihin, joita laukaistaan 12 kappaletta. Seuraava suuri kehitysaskel ovat Blokki III -satelliitit, joita laukaistaan 30 kappaletta. (USNO 2009b; LA Air Force Base 2008; Gibbons 2008.)

Kaikki tämänhetkiset GPS-satelliitit lähettävät signaaleja kahdella kantoaallon taajuudella: L1 (1 575,420 MHz) ja L2 (1 227,600 MHz). GPS:n tarjoamat paikannuspalvelut SPS (Standard Positioning Service) ja PPS (Precise Positioning Service) toteutetaan kantoaaltoihin moduloitujen signaalien avulla. SPS-palvelu perustuu vapaassa siviilikäytössä olevaan C/A-koodiin (Coarse Acquisition code), joka on moduloitu L1-taajuudelle. PPS-palvelu perustuu suojattuun P-koodiin, joka on moduloitu sekä L1- että L2-taajuudelle. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 315–322.)

Lähitulevaisuudessa GPS-järjestelmässä tulee tapahtumaan merkittäviä uudistuksia, joista tässä käsitellään FinnRef-verkon kannalta merkittävimpiä – taajuuksiin ja signaaleihin liittyviä muutoksia. Uusia signaaleja otetaan portaittain käyttöön kaikkiaan neljä, taulukossa 3 esitettyjen satelliittityyppien mukana.

L2-taajuudelle moduloidun L2C-signaalin lähetys alkoi vuonna 2005, kun ensimmäinen Blokki IIR-M -satelliitti liitettiin GPS:n konstellaatioon. Sen täydet hyödyt ovat kuitenkin käytettävissä vasta, kun koko konstellaatio koostuu Blokki IIR-M- tai vielä uudemmista satelliiteista. Aikataulun mukaan tämä on mahdollista noin vuonna 2012. (Shaw 2005; Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 334–335.)

Taajuusrintamalla suurin uudistus on kolmas kanta-aallon taajuus L5 (1 176,450 MHz), joka otetaan käyttöön Blokki IIF -satelliittien mukana. Näiden laukaisu on määrä aloittaa vielä vuoden 2009 aikana. L5:llä tullaan lähettämään vapaaseen siviilikäyttöön tarkoitettua L5C-navigointisignaalia. L5C:n täysipainoista käyttöä vaativaa 24:n Blokki IIF-, tai Blokki III -satelliitin konstellaatiota ei tulla saavuttamaan ennen vuotta 2015. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 330, 335-336; LA Air Force Base 2008.)

Vaikka Blokki IIF -satelliitteja ei vielä konstellaatiossa olekaan, L5-taajuuden testilähetykset alkoivat jo 10.4.2009. Tällöin 24.3.2009 avaruuteen laukaistu seitsemäs IIR-M -satelliitti SVN 49 (Space Vehicle Number) alkoi lähettää testikäyttöön tarkoitettua L5-kantaaltoa. Taajuus ei vielä sisällä navigointidataa ja sitä kehitetään edelleen, mutta sen konkreettinen lähettäminen on kuitenkin tärkeä edistysaskel. (IGS Electronic Mail 2009; USNO 2009b.)

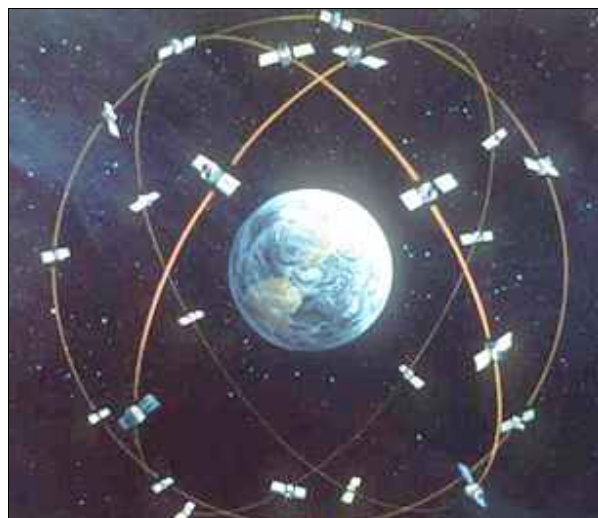
Viimeisenä uutena signaalina tullaan Blokki III -satelliittien myötä ottamaan käyttöön L1C. Se on L1-taajuudelle moduloitu siviilikoodi, jonka tarkoitus ei ole korvata C/A-koodia, vaan toimia rinnan sen kanssa. Yksi merkittävimmistä L1C:n mukaan tuomista ominaisuuksista on USA:n ja Euroopan Komission sopimukseen perustuva signaalien yhteinen modulointitapa GPS:n L1- ja Galileon E1-taajuudelle. Tämä mahdollistaa GPS:n ja Galileon L1/E1-taajuuden siviilisignaalien yhteiskäytön. Blokki III -satelliittien ensimmäiset laukaisut tapahtuvat tämän hetken aikataululla vuonna 2014, ja Yhdysvaltojen ilmavoimien suunnitelman mukaan täysi toiminnallinen valmius, FOC (Full Operational Capability), saavutetaan vuonna 2021 (Gibbons 2007; Gibbons 2008). (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 336, 340; Shaw 2005.)

3.2 GLONASS

GLONASS on Venäjän asevoimien ylläpitämä maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä. Sen kehittäminen käynnistettiin Neuvostoliitossa 1970-luvun puolivälissä ja ensimmäiset kolme testisatelliittia laukaistiin avaruuteen Baikonurin avaruuskeskuksesta 12.10.1982. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 341–342.)

Täydellinen GLONASSin konstellatio käsittää 24 satelliittia kolmella eri ratatasolla kuvan 10 mukaisesti. Satelliiteista 21 on käytössä, ja kolme on ns. aktiivisia varasatelliitteja. Satelliittien radat ovat muodoltaan pyöreitä, ja ne kiertävät maata noin 19 100 km:n korkeudella, yhden kierroksen kestäessä 11 h 15 min 44 s. Tarkempia GLONASSin teknisiä tietoja on koottu taulukkoon 6, sivulle 29. (Russian Global Positioning Satellites; Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 348.)

GLONASSin koordinaattijärjestelmä on maakeskinen PE-90-järjestelmä (Parameters of the Earth 1990). Perustuen 90-luvun lopulla suoritettuun globaaliin The International GLONASS Experiment -mittauskampanjaan ja siitä saatuihin muunnosparametreihin, PE-90:n realisaatio yhtyy metrin tarkkuudella sekä ITRF:ään että GPS:n käyttämään WGS-84-järjestelmään. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 345–346.)



Kuva 10. GLONASS-konstellatio (solarnavigator.net 2008).

GLONASS käyttää tällä hetkellä kahta kantaallon taajuusalueita: G1 ja G2. Järjestelmän modernisoinnin edetessä tullaan ottamaan käyttöön kolmas taajuusalue, G3. GPS:stä ja Galileosta poiketen kaikki GLONASS-satelliitit eivät lähetä signaaleja samoilla taajuuksilla, vaan jokaisella taajuusalueella (G1, G2, G3) on käytössä 12 eri taajuutta. Tämä johtuu tavasta, jolla eri satelliittien lähettämät signaalit erotetaan toisistaan. GLONASS käyttää eri taajuuksiin perustuvaa FDMA-menetelmää (Frequency Division Multiple Access), kun taas GPS ja Galileo erottavat signaalit niihin moduloidun koodin perusteella, CDMA-menetelmällä (Code Division Multiple Access). Jälkimmäisessä taajuudet voivat olla kaikilla satelliiteilla samat. GLONASSin jokaisen taajuusalueen 12 taajuutta on jaettu siten, että samalla ratatasolla maapallon vastakkaisilla puolilla kiertävät kaksi satelliittia jakavat yhden taajuuden. Taajuuserot eri satelliittien välillä muodostetaan nostamalla tai laskemalla vakioperustaajuutta tasaisin välein tietty määrä: 0,5625 MHz G1:llä, 0,4375 MHz G2:lla ja 0,4230 MHz G3:lla. Perustaajuudet järjestelmässä ovat G1:llä 1602,000 MHz, G2:lla 1246,000 MHz ja G3:lla 1204,704 MHz. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 356–357.)

Kantaaltoihiin moduloidut navigointisignaalit ovat periaatteeltaan samankaltaisia GPS:n vastaavien kanssa. Kaikki GLONASS-satelliitit lähettävät jatkuvasti kahta signaalia: C/A-koodia, joka on vapaaseen siviilikäyttöön tarkoitettu peruspaikannussignaali, sekä P-koodia, joka on armeijan käyttöön tarkoitettu tarkempi paikannussignaali. C/A-koodia lähetetään vain G1-taajuudella, kun taas P-koodia lähetetään molemmilla sekä G1- että G2-taajuudella. Uudemmat GLONASS-M-satelliitit lähettävät C/A-koodia molemmilla taajuuksilla. Taajuudet ja signaalit on koottu taulukkoon 4. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 347–356.)

GLONASSin tulevaisuus rakentuu The Federal GLONASS Mission Oriented Program -nimisen ohjelman varaan, jonka Venäjän hallitus hyväksyi 20.8.2001. Ohjelma takaa GLONASSille rahoituksen vuoteen 2011 asti. Sen yhtenä tavoitteena on satelliittien merkittävä modernisointi. Kaikki vanhat GLONASS-sarjan satelliitit tullaan korvaamaan tai on jo korvattu uusilla parannelluilla GLONASS-M-sarjan satelliiteilla (kuva 11). Tämän jälkeen on tarkoitus ottaa käyttöön GLONASS-K-sarja, joka on kokonaan uuteen tekniikkaan pohjautuva versio. Ensimmäiset K-sarjan satelliitit on

suunniteltu laukaistaviksi vuonna 2009. Yhtenä merkittävänä uutena ominaisuutena K-sarjan satelliiteissa tulee olemaan kolmas taajuus G3, ja sen mukana tulevat siiviilikäytön C/A₂-koodi ja armeijan P₂-koodi. K-sarjan jälkeen seuraava satelliittien sukupolvi tulee olemaan GLONASS-KM, mutta se on vasta suunnitteluvaiheessa eikä tietoja juuri ole saatavilla. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 342, 350–351.) Taulukossa 4 on tarkemmin esitetty eri satelliittisarjojen välisiä ominaisuuksia.

Taulukko 4. GLONASS-satelliittisarjojen ominaisuuksia (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 349–351; Information - Analytical Center 2009).

Ominaisuus	GLONASS	GLONASS-M	GLONASS-K
1. laukaisu	12.10.1982	9.12.2003	2009 (ennuste)
Konstellaatio 4/2009	-	20 kpl	-
Taattu elinikä	3 vuotta	7 vuotta	10 vuotta
Taajuudet	2: G1, G2	2: G1, G2	3: G1, G2, G3
G1-signaalit	C/A, P	C/A, P	C/A, P
G2-signaalit	P	C/A, P	C/A, P
G3-signaalit	-	-	C/A ₂ , P ₂



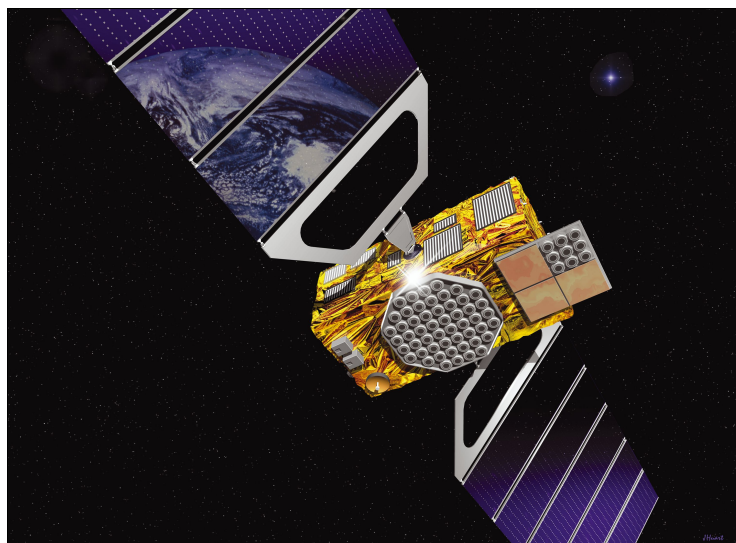
Kuva 11. Kuvassa oikealla insinöörit työskentelevät GLONASS-M-satelliitin parissa (Daylife.com).

3.3 Galileo

Vuonna 1994 Euroopan neuvosto teki Euroopan komissiolle esityksen, jonka mukaan Eurooppa vastaisi informaatioteknologian haasteisiin ja alkaisi aktiivisesti ottaa osaa satelliittipaikannukseen ja sen kehittämiseen. Esitys johti olemassa olevia GNSS-järjestelmiä (GPS ja GLONASS) hyödyntävän ja niiden tarkkuutta parantavan Euroopan laajuisen paikannuspalvelun EGNOSin (European Geostationary Navigation Overlay Service) kehittämiseen ja käyttöönottoon. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 365.)

EU ajoi asiaa eteenpäin, ja vuonna 1999 Euroopan avaruusjärjestö ESA (European Space Agency) aloitti Euroopan satelliittipaikannusjärjestelmän Galileon määrittelyvaiheen. Galileosta päätettiin tulevaksi globaali, luotettava, vapaassa käytössä oleva itsenäinen järjestelmä, joka on yhteensopiva ja yhteiskäyttöön suunniteltu muiden GNSS:ien kanssa. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 366.)

Galileon määrittelyvaihe saatiin päätökseen vuonna 2003, ja tällä hetkellä (huhtikuu 2009) on käynnissä kehitys ja kiertoratojen vahvistusvaihe. Osana tätä vaihetta kaksi testisatelliittia, GIOVE-A (Galileo In-Orbit Validation Element) ja GIOVE-B, lähetettiin avaruuteen 28.12.2005 ja 27.4.2008. Kolmas testisatelliitti GIOVA-A2 tultaneen laukaisemaan avaruuteen vielä ennen ensimmäisiä varsinaisia satelliitteja. (GNSS Modernization 2009; Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 366, 394.)

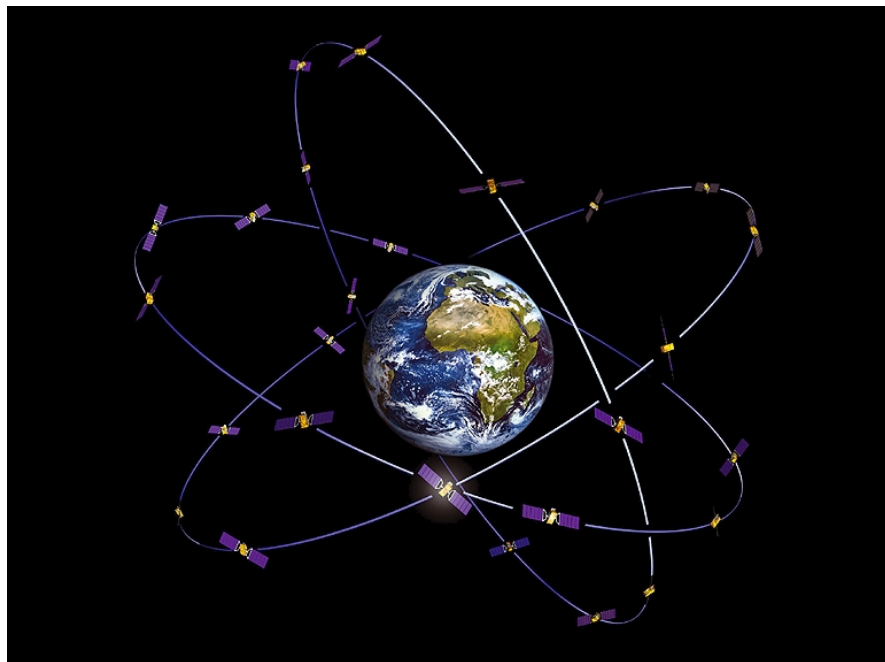


Kuva 12. Galileo-satelliitti (ESA 2009).

Käyttöönottoaiheessa ESA laukaisee ensimmäiset neljä varsinaista Galileo-satelliittia (kuva 12) radoilleen vuoden 2009 aikana. Lopullinen konstellatio rakennetaan asteittain siten, että Galileon peruspalveluiden osalta täysi toiminnallinen valmius saavutetaan vuosien 2012–2013 aikana. Turvallisuuden suhteen kriittiset palvelut ovat saatavilla noin kaksi vuotta tämän jälkeen. (The Future – Galileo; Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 368, 394.)

Galileon täydessä konstellatiossa (kuva 13) on kolmella ratatasolla yhteensä 30 satelliittia, joista 27 on toiminnassa ja 3 varalla, yksi kullakin ratatasolla. Satelliitit kiertävät maata noin 23 222 km:n korkeudella. Ratatasot ovat lähes pyöreitä, niiden kallistuskulma päiväntasaajan tasoon nähden on 56° , ja yhden satelliitin ratakiertos maan ympäri kestää 14 tuntia 4 minuuttia ja 45 sekuntia. Galileon teknistä tietoa on esitetty tarkemmin taulukossa 6, sivulla 29. (Full deployment and operations 2009.)

Galileon koordinaattijärjestelmä on Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF). Se on sidottu kansainväliseen ITRF-koordinaatistoon siten, että GTRF saa poiketa uusimmasta ITRF-koordinaatistosta korkeintaan kolme senttimetriä. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 369.)



Kuva 13. Galileon satelliittikonstellatio (ESA 2009).

Kaikki Galileo-satelliitit lähettävät signaaleja neljällä kantoaallon taajuudella: E1, E6, E5a ja E5b. Kahdesta viimeisestä käytetään monissa yhteyksissä yhteisnimitystä E5. E1:llä on sama taajuus (1 575,420 MHz) kuin GPS:n L1-taajuudella. Sama tilanne on taajuudella E5a (1 176,450 MHz), joka vastaa GPS:n taajuutta L5. E5b-kantoaalto taas tulee toimimaan samalla taajuudella GLONASSin G3-kantoaallon kanssa. Taajuuksien vastaavuus edistää GNSS:ien yhteiskäyttöä. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 382–383.)

Jokainen Galileo-satelliitti lähettää edellä mainituilla taajuuksilla yhteensä 10:tä eri navigointisignaalia. Signaalien suuri määrä mahdollistaa kaikkien Galileon tarjoamien palvelujen käytön sekä tarjoaa paremmat mahdollisuudet monipuolisten sovellusten käyttöön erilaisille käyttäjille. Galileon tarjoamat neljä palvelua ovat avoin palvelu OS (Open Service), kaupallinen palvelu CS (Commercial Service), turvallisuuspalvelu SoL (Safety-of-Life Service) ja julkinen rajoitettu palvelu PRS (Public Regulated Service). Galilen taajuudet, signaalien jakautuminen taajuuksille sekä palvelut, joihin niitä käytetään, on esitetty taulukossa 5. (Galileo Specifications 2007.)

Taulukko 5. Galileon taajuudet, signaalit ja niiden välittämät palvelut. Signaalien ns. pilottikomponentit sisältävät pelkän etäisyyskoodin ilman navigointidataa, mikä helpottaa signaalien havaitsemista. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 383–387.)

Kantoaalto	Taajuus (MHz)	Signaali	Data- / pilottikanava	Lähetettävät palvelut	Salaus
E1	1 575,420	E1A	data	PRS	koodi ja data salattu
		E1B	data	OS/CS/SoL	avoin, paitsi CS-data on salattu
		E1C	pilotti	OS/CS/SoL	avoin
E6	1 278,750	E6A	data	PRS	koodi ja data salattu
		E6B	data	CS	koodi ja data salattu
		E6C	pilotti	CS	koodi salattu
E5a	1 176,450	E5a-I	data	OS/CS	avoin, paitsi CS-data on salattu
		E5a-Q	pilotti	OS/CS	avoin
E5b	1 207,140	E5b-I	data	OS/CS/SoL	avoin, paitsi CS-data on salattu
		E5b-Q	pilotti	OS/CS/SoL	avoin

Taulukkoon 6 on koottu yhteen kolmen edellä käsitellyjen GNSS:ien tietoja. Signaaleja ei ole eroteltu tässä taulukossa niiden todellisiin komponentteihin, mutta täydellinen yhteenveto signaaleista on taulukossa 9 (s. 55).

Taulukko 6. GPS, GLONASS ja Galileo vertailussa (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 398).

Ominaisuus	GPS	GLONASS	Galileo
1. laukaisu	21.2.1978	12.8.1982	27.12.2005
Täysi toiminnallinen valmius (FOC)	16.7.1995	18.1.1996	2013 (ennuste)
Rahoitus	julkinen	julkinen	julkinen ja yksit.
Satelliittien nominaalimäärä	24	24	27
Ratatasot	6	3	3
Ratatasojen kallistuskulma	55°	64,8°	56°
Isoakselin puolikas	26 560 km	25 508 km	29 601 km
Ratatasojen väli	60°	120°	120°
Tasojen välinen vaihe	epäsäännöllinen	± 30°	± 40°
Satelliitin kiertoaika	11 t 57 min 58 s	11 t 15 min 44 s	14 t 4 min 45 s
Geodeettinen koordinaattijärjestelmä	WGS-84	PE-90	GTRF
Aikajärjestelmä	GPS-aika, UTC (USNO)	GLONASS-aika, UTC (SU)	Galileo system time
Signaalien erotustapa	CDMA	FDMA	CDMA
Taajuuksien määrä	3: L1, L2, L5	yksi kahta vastakkaista satelliittia kohti	3(4): E1, E6, E5 (E5a, E5b)
Taajuus (MHz)	L1: 1 575,420 L2: 1 227,600 L5: 1 176,450	G1: 1 602,000 + 0,5625 · k G2: 1 246,000 + 0,4375 · k G3: 1 204,704 + 0,4230 · k (k = -7, -6, ... +5, +6)	E1: 1 575,420 E6: 1 278,750 E5: 1 191,795
Signaalit	C/A, L2C, L5, L1C, P, M	C/A, C/A ₂ , P, P ₂	E1, E6, E5
Etäisyyskoodien (PRN) lukumäärä	11	6	10
Luotettavuustietojen lähetys	ei (GPS III: kyllä)	ei (GLONASS-K: kyllä)	kyllä

3.4 Compass

Edellä käsiteltyjen järjestelmien lisäksi mainittakoon vielä Kiinan kansantasavallan kehittänyt satelliittipaikannusjärjestelmä Compass, jota ei kuitenkaan tässä yhteydessä tutkita tarkasti. Compass on Kiinan 90-luvulla käynnistämän Beidou-satelliittipaikannusjärjestelmän uusin kehitysvaihe. Valmistuessaan sen on tarkoitus olla muiden GNSS:ien kanssa kilpailukykyinen maailmanlaajuinen järjestelmä. Compassista on kuitenkin vähän todellista tietoa tarjolla, joten sen teknisiä tietoja ja aikatauluja on hankala käsitellä. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 401–402.)

Tammikuussa 2009 annettiin ensimmäistä kertaa viralliselta taholta julkinen ennuste Compassin satelliittikonstellation valmistumisesta, kun Kiinan avaruusohjelman

viranomaisen Zhao Xiaojin esiintyi Kiinan televisiossa. Zhao ilmoitti Compassin saavuttavan yli 30 satelliittia käsittävän täyden konstellaation vuoteen 2015 mennessä. Hänen mukaan Kiina tulee laukaisemaan noin 10 satelliittia avaruuteen vielä vuoden 2010 aikana. (InsideGNSS 2009.)

On oletettavaa, että modernit ns. *all in view* -GNSS-vastaanottimet pystyvät ohjelmistopäivitysten avulla vastaanottamaan myös Compassin signaaleja – sikäli kun niiden saatavuus on ajankohtaista.

4 Uuden GNSS-verkon taustatutkimus

Tarve uudistaa FinnRef-verkkoa syntyy mahdollisuudesta hyödyntää uusia satelliittipaikannusjärjestelmiä sekä jo olemassa olevien järjestelmien modernisointia. FinnRef ei tulevaisuudessa voi toimia virallisen koordinaatistomme ylimpänä luokkana, jos se ei pysty vastaanottamaan uusia tarjolla olevia GNSS-signaaleja. Tässä luvussa käsitellään aihealueittain FinnRefiin kohdistuvia mahdollisia uudistuksia, niiden syitä sekä erilaisia mahdollisuuksia niiden toteuttamiseen. Käytännössä eri aihealueet kytkeytyvät usein vahvasti toisiinsa ja niiden ongelmat on ratkaistava kokonaisuutena.

Pysyviä GNSS-verkkoja ohjaavat ja ylläpitävät organisaatiot, kuten IGS, EPN ja Yhdysvaltain NGS:n (National Geodetic Survey) ylläpitämä CORS (Continuously Operating Reference Stations), listaavat asemilleen asetetut vaatimukset ja suositukset Internetistä saatavissa ohjedokumenteissa. Yhdessä Geodeettisen laitoksen omien tavoitteiden sekä tieteellisten tutkimuslaitosten yhteenliittymän UNAVCON (entinen University NAVSTAR Consortium) ohjeiden kanssa nämä suositukset ohjaavat FinnRef-uudistusta. IGS:n ja EPN:n ohjedokumenttien suositukset GNSS-asemien laitteistosta, toimintatavoista sekä fyysisistä ominaisuuksista on eritelty pakollisiin ominaisuuksiin ja toivottuihin lisäominaisuuksiin. Pakolliset ominaisuudet ovat helposti täytettävissä, mutta FinnRef-uudistuksessa pyritään täyttämään myös toivotut lisäominaisuudet niin pitkälti kuin mahdollista (Koivula 2009b).

4.1 Havaintoasema

Havaintoasemapaikan ympäristön ominaisuudet ratkaisevat paikan soveltuvuuden pysyvän GNSS-aseman sijoituspaikaksi. Ympäristö vaikuttaa vahvasti myös antennialustan malliin ja rakenneratkaisuihin. On tärkeää löytää paikka, joka tarjoaa vakaan perustan antennialustan rakentamiselle. Vakaaseen perustaan vaikuttavia elementtejä ovat mm. maaperän koostumus, peruskallion käytettävyys, pohjaveden

pinnankorkeus ja maapohjan routimissyvyys (Andersson ym. 2000). Lisäksi havaintoasemalta tulee olla esteetön näkyvyys riittävän pitkälle horisonttiin asti, jotta satelliittisignaalit saavuttavat antennin kaikilta suunnilta. Suomen olosuhteissa myös ilmastotekijät on otettava huomioon. Vuotuiset lämpötilavaihtelut ovat suuria, ja talvisin satava lumi tuo omat ongelmansa.

4.1.1 Maaperä

Käytännössä kaikki tutkimustulokset ja alan organisaatiot ovat yhtä mieltä siitä, että ehjä ja yhtenäinen peruskallio on paras perusta GNSS-antennialustalle (Andersson ym. 2000: 29; Combrinck ym. 1998; IGS Tracking Network 2009). Kalliopinnoissakin on eroja, eivätkä kaikki tarjoa vakaata rakennuspaikkaa. Kallioperän kivilaji vaikuttaa kallion yleiseen kovuuteen ja mahdolliseen murenemiseen, mutta esimerkiksi Suomen yleisin kivilaji graniitti soveltuu antennialustan pohjaksi erinomaisesti. Pintakallion pitäisi olla korkealaatuista – se ei saa sisältää halkeamia, murenneita kohtia, onkaloita, eikä muita virheitä. Tasainen kalliopinta tarjoaa jyrkästi viettävää kalliota varmemman rakennuspaikan. Tärkeää on, että käytettävä kalliopinta on osa vakaata ja liikkumatonta yhtenäistä kallioperää. (Combrinck ym. 1998; IGS Tracking Network 2009.)

Havaintoasemaa ei aina voida rakentaa peruskalliolle, vaan tällöin antennialusta joudutaan perustamaan suoraan maaperään. Tämä vaatii suuremman antennialustan ja huolellisen perustuksen, mutta on täysin mahdollinen toimintatapa. Antennialustan vakaudessa ei tosin tulla saavuttamaan kallioon perustetun antennialustan vakaustasoa.

4.1.2 Satelliittien näkyvyys

Uusilla GNSS-asevilla tulee IGS:n ja EPN:n suositusten mukaan olla antennista katsoen vapaa horisontti ja mahdollisimman vähän näköesteitä viiden asteen korkeuskulmasta ylöspäin. CORS vaatii täysin vapaata horisonttia 10°:sta ylöspäin ja

mahdollisimman vähäisiä näköesteitä tämän alapuolella. UNAVCO suosittelee esteetöntä näkyvyyttä 10–15°:n korkeuskulman yläpuolella. Näiden tavoitteiden toteuttaminen asettaa havaintoasemalle huomattavia vaatimuksia, sillä Suomen olosuhteissa puusto on erittäin yleinen näköhaittoja aiheittava tekijä. Antennialustan korkeuden säätäminen havaintoaseman olosuhteiden mukaiseksi on yksinkertaisin tapa parantaa näkyvyyttä. Korkea antennialusta tuo kuitenkin mukaan omat ongelmansa, joten tätä tulee mahdollisuuksien mukaan välttää.

Hyvä havaintoaseman paikka tulee valita siten, että näköhaittoja on alusta alkaen mahdollisimman vähän. Korkeiden maastonmuotojen katveessa olevia alueita, sekä metsäisiä paikkoja tulee välttää. Puuston ja muun kasvillisuuden jatkuva kasvu on huomioitava vuosiksi eteenpäin. Havaintoaseman lähetyvillä ei saa olla korkeita rakennuksia, eikä paikkaa kannata valita siten, että sen ympäristöön on tulevaisuudessakaan kaavailtu haittaavia rakenteita. Mitä vähemmän aseman horisontissa ja ympäristössä tapahtuu muutoksia, sitä vähemmän niillä voi olla vaikutuksia signaalien kulkuun ja mahdollisiin monitieheijastuksiin.

Puuston kaataminen havaintoaseman ympäriltä saattaa tulla kysymykseen, mutta hakkuu jouduttaisiin mahdollisesti ulottamaan laajalle alueelle riittävän näkyvyyden saavuttamiseksi, eikä uuden puuston voida antaa kasvaa alueella korkeaksi. Tälläisen menettelyn maisemahaitta on huomattava, ja maapohjan tai puuston ostaminen voi olla kallista. Avohakkuun sijasta yksittäisten puiden tai puuryhmien kaataminen hyvän näkyvyyden aikaansaamiseksi sen sijaan on perusteltua.

4.1.3 Monitieheijastusten, sironnan ja radiohäiriöiden lähteet

Selkeimpiä monitieheijastusten aiheuttajia ovat vahvasti heijastavat tasaiset pinnat, kuten rakennusten katot ja seinät, sekä ajoneuvot. Myös vesi, lumi ja jää ovat ominaisuuksiltaan potentiaalisia heijastusten aiheuttajia. Monitieheijastuksia voivat aiheuttaa kaikki antennin lähetyvillä olevat pinnat, mukaan lukien puusto ja maanpinta.

Heijastusten mahdollisuus tulee minimoida pitämällä havaintoaseman ympäristössä olevien heijastuslähteiden määrä mahdollisimman pienenä ja asentamalla antenni riittävälle korkeudelle maanpinnasta. (Combrinck ym. 1998.)

Antennin läheisyydessä olevat metallirakenteet aiheuttavat todennäköisesti GNSS-signaalin sirontaa, jonka vaikutukset ovat hyvin samankaltaiset monitieheijastuksen kanssa. Esimerkkejä tällaisista rakenteista ovat suuret radiomastot ja teräsaidat, joita tulee aseman ympäristössä välttää. (Combrinck ym. 1998.)

Myös havaintoaseman radiotaajuusympäristö on havaintojen kannalta merkityksellinen. Voimakkaat ulkopuoliset radiotaajuuslähteykset, jotka antenni ja vastaanotin vastaanottavat, saattavat lisätä mitatun datan taustakohinaa tai jopa tehdä GNSS-signaalien havaitsemisen mahdottomaksi. Voimakas radiotaajuuslähde aseman lähetyvillä saattaa ylikuormittaa antennin ja vastaanottimen etuvahvistimet. Haitallisia radiotaajuuksien lähteitä ovat TV- ja radioasemat, tutkat, korkeajännitejohdot ym. vastaavat lähteet. Ainoa keino potentiaalisen havaintoaseman radiotaajuusympäristön kartoittamiseen on pitkän koehavaintojakson (esimerkiksi 72 tuntia) mittaaminen paikalla. (Combrinck ym. 1998.)



Kuva 14. Esimerkki huonosta asemapaikasta. Antennin ympäristössä on paljon monitieheijastavia pintoja ja metallirakenteita. (IGS Station: tlse.)

4.1.4 Aseman saavutettavuus ja infrastruktuuri

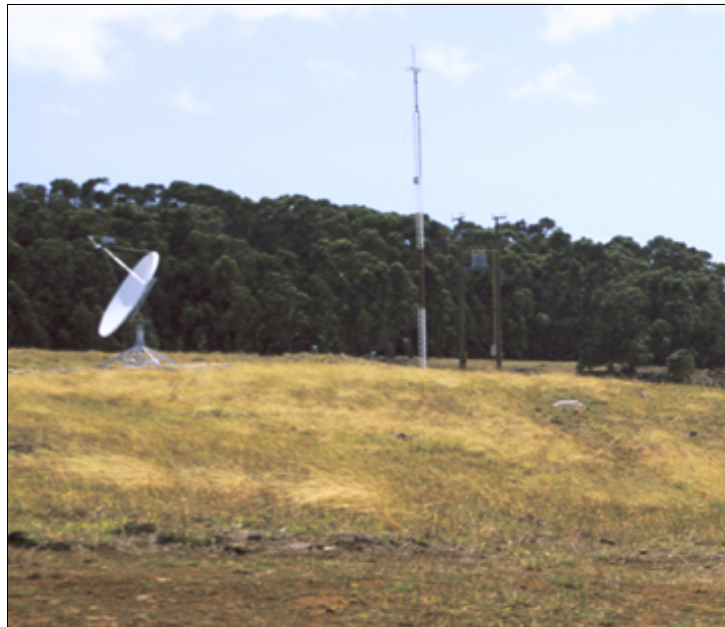
Havaintoaseman rakentamisen, normaalin käytön ja kustannusten kannalta aseman helppo saavutettavuus on avaintekijä. Rakentamisen ja normaalien tarkastus- ja huoltotoimenpiteiden sujuvuuden kannalta asema ei voi olla liian kaukana olemassa olevasta tieverkosta. Jokainen pysyvä GNSS-asema tarvitsee luotettavat sähkö- ja datayhteydet (laajakaista-Internet), joten näiden järjestäminen asemalle ei saa olla liian hankalasti toteutettavissa. Sähkökatkoihin on hyvä varautua esimerkiksi akkujen avulla toteutetulla varavirtajärjestelmällä. Jos sopivaa valmista rakennusta ei laitesuojaksi ole tarjolla, tulee tämä rakentaa erikseen. Laitesuojan tulee soveltua myös painovoimamittausten suorittamiseen (Koivula 2009c).

Erittäin toimiva ratkaisu on sijoittaa GNSS-asema olemassa olevan tieteelliseen tutkimusaseman yhteyteen. Menettely on todettu hyväksi jo nykyisessä FinnRef-verkossa, jonka asemista osa sijaitsee tutkimuskeskusten, kuten observatorioiden tai yliopistojen tutkimusasemien, yhteydessä (Koivula 2006: 5–6). Hyviä puolia on useita; tiet, sähkölinjat, hyvä Internet-yhteys ja tarvittavat rakennukset ovat usein valmiina. Tutkimukselle suotuisa ilmapiiri takaa GNSS-aseman turvallisuuden ja luotettavat havainnointiolosuhteet. Merkittävä lisähyöty saavutetaan, jos tutkimusaseman vakituisesta henkilökunnasta voidaan palkata yhteyshenkilö tarkkailemaan GNSS-aseman toimintaa säännöllisin väliajoin ja suorittamaan asemalla tarvittavia toimenpiteitä tilanteen mukaan. Tämä toimintamalli on tutkimusyhteistyön nimissä usein ilmaista, jolloin kustannuksia syntyy vain aseman ja teetetyn työn aiheuttamista suorista kuluista (Koivula 2009e).

4.1.5 Asemapaikkojen tutkiminen maastossa

Kun tulevan havaintoaseman maantieteellinen sijainti on etukäteen rajattu mahdollisimman tarkkaan, aloitetaan sopivan havaintoasemapaikan etsiminen maastossa. Maastossa suoritettavien tutkimusmatkojen aikana arvioidaan potentiaalisia

havaintoasemapaikkoja edellä esitettyjen kriteerien valossa. Arvioitaessa mahdollisten monitieheijastavien pintojen riittävää etäisyyttä antennista, voidaan nyrkkisääntönä pitää, että yksikerroksisen rakennuksen pitää olla vähintään 15 metrin etäisyydellä antennista ja tätä korkeampien rakennusten vielä kauempana. UNAVCO suosittelee piirtämään havaintoaseman paikasta luonnoksen, josta näkyvät kaikki mahdolliset näköesteet ja niiden sijainnit, sekä aseman suunnittelua, että tulevaisuuden muutosten seuranta varten. Radiotaajuushäiriöitä aiheuttavat lähteet, kuten suuret TV- tai mikroaaltolähetystornit, tulisi pitää vähintään kilometrin etäisyydellä havaintoasemasta. (UNAVCO Facility 2005.)



Kuva 15. Peittävää kasvillisuutta ja radiohäiriöiden lähteitä; radiomasto, lautasantenni ja korkeajännitemuuntaja (UNAVCO Facility 2005).

Harkittaessa potentiaalisia tapoja seurata havaintoaseman ympäristössä tapahtuvia fyysisiä muutoksia, alueen keilaaminen maalaserkeilaimella on vartenotettava vaihtoehto. Geodeettisella laitoksella on käytettävissä laserkeilaimia, joten kolmiulotteisen mallin tekeminen esimerkiksi muutaman vuoden välein on mahdollista (Koivula 2009c). Ongelmana on kuitenkin näiden keilainten lyhyt kantama (alle 100 m), kun näkyvyyttä haittaavat esteet saattavat olla kaukana asemasta. Ongelma voidaan poistaa käyttämällä pulssilaserkeilainta, jonka mittausetäisyys on tyypillisesti useita

satoja metrejä (Kukko 2005: 13). Pulssilasereita ei Geodeettisella laitoksella kuitenkaan ennestään ole (Koivula 2009c). Toinen vaihtoehto vastaavan kaltaisen mallin tekemiseen on alueen kuvaaminen kameralla. Orientoimalla kameran esimerkiksi antennialustan päälle ennen antenniasennusta, alueesta ja kaukaisestakin horisontista saa hyvän panoraamakuvan antennin näkökulmasta. Yksinkertainen keino lähialueen kartoittamiseen on myös maastomallin tekeminen takymetri-, RTK- (Real Time Kinematic) tai VRS-mittausten (Virtual Reference Station) avulla.

IGS ja UNAVCO suosittelevat testaamaan havaintopaikan monitieheijastus- ja radiotaajuusominaisuuksia ennen havaintopaikan lopullista valintaa. Tämä tapahtuu havaitsemalla tulevilla antennialustan paikalla vähintään 24 tunnin (mieluummin 48–72 tunnin) mittainen testihavaintojakso. Havainnot tulee suorittaa mahdollisimman samankaltaisella laitteistolla, kuin pysyvälle havaintoasemallekin on tulossa.

Testimittausten aikana voi olla tarpeen suorittaa mittauksia usealla eri antennikorkeudella, jotta lopullisen havaintoaseman optimaalinen antennikorkeus saadaan määritettyä. (Combrinck ym. 1998; IGS Tracking Network 2009; UNAVCO Facility 2005.)

Muita havaintoaseman suunnittelussa huomioitavia tekijöitä ovat mm. meren aalloista ja liikenteestä aiheutuvat mahdolliset värinät (Combrinck ym. 1998). Tärkeää on myös aseman ja sen laitteiden turvallisuus. Riskejä ovat villieläinten aiheuttamat haitat, asemaan kohdistuva ilkivalta ja laitteiston varastaminen. IGS ja EPN suosittelevat asemien turvatoimien, kuten aitojen, lukkojen ym., olevan paikallisten olosuhteiden mukaisia. Havaintoaseman paikan valinnalla on helppo vaikuttaa ilkvallan ja varkauksien todennäköisyyteen, esimerkiksi sijoittamalla asema syrjäiseen paikkaan kauas asutuksesta tai vastaavasti valvottuun ympäristöön.

Havaintoasemapaikan valinnassa oman tärkeän elementtinsä muodostaa aseman maapohjan omistus. Tutkimusasemien kanssa tilanne on yleensä sovittavissa, ja pitkään sopimukseen on helppo päästä. Vuokrattaessa tarvittavaa maa-aluetta yksityis- tai yhteisomistuksessa olevalta kiinteistöltä, on tärkeää neuvotella kerralla mahdollisimman

pitkä vuokrasopimus. Aseman sijainti on turvattava pitkälle tulevaisuuteen. Vuokrasopimusta tehtäessä tulee sopia myös tarvittavan puuston kaadosta, heti alussa ja jatkossa. Tarvittavan määrään ostaminen voi olla vartenotettava vaihtoehto, jos kaupoista päästään sopimukseen.

4.2 Antennialustat

4.2.1 Rakenteellisia tavoitteita

Hyvän antennialustan pitää täyttää ensisijaisesti kaksi tavoitetta. Ensimmäinen, sen on oltava äärimmäisen vakaa ja kestävä alusta antennille. Alustan tulee pysyä paikallaan vuodesta toiseen ja kestää alueelle ominaisten luonnonolosuhteiden vaikutukset muuttumattomana. Mitä pienempi vaikutus lämpölaajenemisella on mastoon, niin pysty-, kuin poikittaissuunnassakin, sitä parempi. Toiseksi maston pitää tarjota mahdollisimman suotuisa ympäristö signaalien kululle antenniin ja vaikuttaa mahdollisimman vähän antennin sähköisiin ominaisuuksiin. Signaalien kulkuun ja antennin sähköisiin ominaisuuksiin liittyvät antennialustan aiheuttamat suurimmat ongelmat ovat monitieheijastukset, resonanssikammiot sekä alustassa oleva metalli ja mahdolliset sähkölaitteet. (Anderson ym. 2000: 28.)

Monitieheijastusten vähentämisessä olennaista on antennialustan maanpäällisen osan leveys sekä antennin korkeus maanpinnasta. Jos alustan yläpinta on antennin pohjalevyä leveämpi tai muutoin paikoitellen ylittää antennin pohjalevyn, saattaa se aiheuttaa monitieheijastuksia antenniin. Antennialustan yläpinnan tulee olla kokonaisuudessaan antennin pohjalevyä kapeampi. (Anderson ym. 2000: 28.)

Antennin korkeus maanpinnasta vaikuttaa suoraan maasta tulevien monitieheijastusten tiheyteen. Korkeilla antennimastoilla (yli kolme metriä) havaitut monitieheijastukset voivat muuttua todella nopeasti, kun taas matalilla mastoilla monitieheijastusten

tiheyden hidas vaihtelu ei välttämättä tasoitu lyhyellä aikavälillä ja voi aiheuttaa näin systemaattista virhettä. Monitieheijastusten näkökulmasta ajatellen optimaalinen antennikorkeus on noin 1,5 metriä, tarjoten hyvän kompromissin korkeiden ja todella matalien mastojen ongelmien välillä. (Anderson ym. 2000: 28.)

Jos antennialustan yläpinta on tasainen ja yhtenäinen (esimerkiksi betonipilari tai metallilevy), ja sen ja antennin pohjalevyn välissä on suuri tyhjä tila, voi tähän tilaan muodostua ns. resonanssikammio. Siihen joutuessaan GNSS-signaalit heijastuvat ympäriinsä ja aiheuttavat monitieheijastuksia antenniin. Tällaisten antennialustojen tapauksissa resonanssikammioista aiheutuvat monitieheijastukset voidaan minimoida pitämällä maston yläpinnan ja antennin pohjalevyn välinen tila mahdollisimman pienenä. (Schmidt ym. 2000; Anderson ym. 2000: 28)

Sähköisten ominaisuuksiensa johdosta antennialustassa oleva, ja tätä kautta antenniin kytketty metalli vaikuttaa antennin sähköisiin ominaisuuksiin. Tämän haittavaikutuksen poistamiseksi alustan rakenteessa kannattaa käyttää niin vähän metallia kuin mahdollista. (Anderson ym. 2000: 28–29.)

Myös antennialustaan kiinnitetyt ylimääräiset elektroniset laitteet saattavat vaikuttaa häiritsevästi antennin sähköisiin ominaisuuksiin ja aiheuttaa radiotaajuushäirintää. Tällaisia ovat esimerkiksi säähavaintoasemat ja sähköisesti lämmitetyt eristekerrokset.

4.2.2 Mastotyyppejä

Maailmalla on käytössä lukematon määrä erilaisia GNSS-antennialustaratkaisuja. Yksittäistä parasta antennialustatyyppiä on mahdoton nimetä, koska havaintopaikkojen olosuhteet vaihtelevat hyvin voimakkaasti, eivätkä kaikki alustatyyppit sovi kaikkialle tai kaikkiin GNSS-sovelluksiin. Jokaisella havaintoasemalla täytyy päättää tapauskohtaisesti, mikä antennialusta sopii vallitseviin olosuhteisiin parhaiten. Tässä kappaleessa on eritelty organisaatioiden (kuten IGS ja UNAVCO) suosituksia, kokemuksia ja toteutuksia erilaisista antennialustoista. Antennialustojen hyviä ja

huonoja puolia on koottu yhteen taulukoissa 7 ja 8 sivuilla 49 ja 50. Tavallisen teräsristikkomaston ja invarstabiloidun teräsristikkomaston rakentamista ei ole erikseen tarkemmin käsitelty, koska ne ovat jo nyt käytössä FinnRef-verkossa ja Geodeettisella laitoksella on niistä paljon käytännön kokemusta. Taulukkovertailuun nämä mastotyypit on kuitenkin sisällytetty. Todettakoon vielä, että näiden mastotyyppien ongelmat ovat antennin sähköisiin ominaisuuksiin vaikuttava suuri metallin määrä, sekä todennäköiset monitieheijastukset ja signaalin sironnat metallirakenteista.

Rakennusten käyttö antennialustana on jätetty vertailusta pois, koska IGS:n mukaan rakennukseen pohjautuva antennialusta ei tarjoa riittävää vakautta pitkällä aikavälillä (IGS Tracking Network 2009).

Uuden GNSS-verkon homogeenisuuden kannalta olisi erinomaista, jos kaikilla asemilla olisi käytössä identtinen antennialusta. Tämä vahvistaisi tulosten yhtenäisyyttä ja vertailukelpoisuutta. Käytännössä yhtenäinen linja voi kuitenkin olla hankala toteuttaa havaintopaikkojen keskinäisten erojen vuoksi. Suurin haaste on yhtenäinen antennikorkeus, sillä joillakin alueilla puusto ja muut näköesteet vaativat pidempää antennikorkeutta. Vaikka verkon asemien antennikorkeuksissa esiintyisi joitain poikkeuksia, on alustatyypin yhtenäisyys muilta osin silti tavoiteltavaa.

Syvälle poraamalla tuettu antennialusta (DDBM)

Syvälle poraamalla tuettu antennialusta DDBM (Deep Drilled Braced Monument) on erittäin tukeva ja pitkäikäinen antennialusta. Se soveltuu eri alustamalleista parhaiten monenlaiseen maaperään eri olosuhteissa. Vaikka DDBM soveltuu porattavaksi myös peruskallioon, se saattaa kuitenkin olla siihen turhan järeä ja myöhemmin käsitelty matalalle poraamalla tuettu alusta riittää. Syväporattu alusta koostuu kuvan 16 mukaisesti yleensä viidestä metalliputkesta, jotka on porattu noin 12 metrin syvyyteen maahan ja hitsattu ylhäällä yhteen kulmarautatukien avulla. Lopputuloksena syntyy nelijalkaa muistuttava tukeva antennialusta. Vinoreiät porataan noin 30–40°:n kulmassa. Metalliputket ankkuroidaan reikiin täyttämällä ne laajentuvalla laastilla ja eristämällä

reiät ylhäältä PVC-putkella ja eristysmateriaalilla. Putket voidaan myös vahvistaa laittamalla niiden sisään laastin tueksi terästanko. (UNAVCO Facility 2009; Essentials for Anchored/Braced Monuments.)



Kuva 16. Syväälle poraamalla tuettu antennialusta (UNAVCO Facility 2009).

UNAVCO määrittelee syväälle poraamalla tuetun antennialustan vakaimmaksi mahdolliseksi alustaksi ja suosittelee sen käyttöä olosuhteiden niin salliessa (UNAVCO Facility 2009). Sen rakentaminen on kuitenkin kallis ja työläs projekti. Reikien poraaminen vaatii hydraulisen porauskaluston ja tätä käyttävän miehistön, jotka eivät välttämättä pysty operoimaan tai edes pääsemään vaikeakulkuisiin kohteisiin. Reikien poraaminen oikeassa kulmassa onnistuneesti on haastavaa, mutta esimerkiksi räjäytyspalveluja tarjoavat, porapaaluja, porakaivoja ja maalämpöjärjestelmiä asentavat sekä muuta maaporausta harjoittavat yritykset todennäköisesti omaavat kaluston ja ammattitaidon projektin suorittamiseen. Esimerkki mahdollisesta porauskalustosta on kuvassa 17, ja kuva 18 havainnollistaa jalkojen yläosan liitoskohtaa, jonka hitsauksen onnistumisen kannalta reikien poraus oikeassa kulmassa on välttämätöntä.



Kuva 17. Rakentaminen vaatii järeän porauskaluston (UNAVCO Facility 2009).

Kuva 18. Jalkojen on osuttava kohdalleen yläosassa (UNAVCO Facility 2009).

DDBM:n ominaisuuksia on käsitelty tarkemmin taulukossa 8 sivulla 50.

Helppokulkuisiin kohteisiin, joissa peruskallio on useita metrejä maanpinnan alapuolella, syväporaus on erityisen varteenotettava vaihtoehto. Antennialustan poraussyvyys ja muut yksityiskohdat määräytyvät tapauskohtaisesti, mutta normaaliksi antennikorkeudeksi on suunniteltu noin 1,5 metriä, jonka huomattava korottaminen voi olla ongelmallista. Tämä asettaa alustan käytölle omat rajoituksensa. Toinen käyttöä rajoittava tekijä on järeän porauskaluston ja syvälle ulottuvien reikien aiheuttama ympäristövaikutus, joka on muihin alustatyyppeihin verrattuna huomattava. Poraamalla tuetut antennialustat ovat käytännössä kokonaan metallia, joten niiden huonoihin puoliin lukeutuu myös metallirakenteen alttius lämpölaajenemiselle ja metallin vaikutus antennin sähköisiin ominaisuuksiin. (UNAVCO Facility 2009.)

Matalalle poraamalla tuettu antennialusta (SDBM)

Matalalle poraamalla tuettu antennialusta SDBM (Short Drilled Braced Monument) on samankaltainen syväporatun version kanssa, mutta alustan rakenne on kevyempi (kuva 19). Nimensä mukaisesti reiät metalliputkia varten porataan selkeästi matalammiksi, paikasta riippuen noin kahden metrin syvyyteen. Täten alustatyypin soveltuu vain pinnassa tai pinnan tuntumassa olevaan peruskallioon. Kallion tulee olla yhtenäistä ja mahdollisimman vähän lohkeillutta. (UNAVCO Facility 2009b.)



Kuva 19. Matalalle poraamalla tuettu antennialusta (UNAVCO 2009).



Kuva 20. Reikien porausta (UNAVCO 2009).

Alusta rakentuu neljästä tai viidestä metalliputkesta, jotka ankkuroidaan reikiin laajentuvalla epoksilaastilla. Tämän jälkeen reiät eristetään ylhäältä. Reikien poraaminen tapahtuu yleensä järeällä – mutta käsikäyttöisellä – poralla (kuva 20), mistä johtuen alustan rakentaminen on suhteellisen halpaa eikä vaadi niin suurta ulkoista työvoimaa. Poraamisessa voidaan myös käyttää esimerkiksi työmaapanostuksissa käytettäviä tela-alustaisia kallioporakoneita. Reikien poraaminen oikeaan kulmaan on haastavaa, jotta putket saadaan hitsattua kulmarautojen avulla ylhäältä yhteen halutussa kohdassa. (UNAVCO Facility 2009b.)

Matalaporattu antennialusta ei UNAVCON mukaan ole aivan yhtä tukeva kuin syväporattu, mutta tarjoaa hyvin rakennettuna erittäin vakaan antennialustan. UNAVCO suosittelee tätä alustatyyppiä toiseksi parhaana vaihtoehtona. Tarvittavat työkalut ja rakennusmateriaalit eivät ole ongelmallisen suuria, joten alusta voidaan rakentaa vaikeakulkuihin kohteeseen. Antennikorkeus on yhtä rajoitettu kuin syväporatussa versiossa, joten yli kaksimetriset antennialustat voivat olla tällä menetelmällä hankalia toteuttaa ilman, että vakaus kärsii. Huonoja puolia ovat myös metallirakenteiden lämpölaajeneminen ja metallin vaikutukset antennin sähköisiin ominaisuuksiin.

Teräsvahvisteinen betonipilari

Perinteinen raudoitettu betonipilari on yleisin maailmalla käytetty pysyvien GNSS-asemien antennialusta (IGS Tracking Network 2009). Kallioon perustettuna se tarjoaa vakaan antennialustan, jossa on käytetty suhteellisen vähän metallia muihin alustoihin verrattuna. Pilari on edullinen rakentaa ja materiaalit ovat yleisesti saatavilla. Se soveltuu monenlaiseen maastoon, ja sen rakennetta voidaan muokata tarpeen mukaan eri kohteisiin soveltuvaksi. Esimerkkejä ovat kuvat 21 ja 22. Vakain ja kestävin tulos saadaan perustamalla pilari suoraan ehjään peruskallioon. Rakentaminen tapahtuu poraamalla halutun syvyiset reiät kallioon, joihin pilaria vahvistavat teräsrakenteet valetaan kiinni. Tämän päälle valetaan halutun muotoinen ja korkuinen betonipilari. Jos kalliota ei ole saatavilla, voidaan pilari valaa maaperään porattuun suureen reikään tai perustaa maahan kaivettuun suureen betonianturaan. Poratun reiän on oltava riittävän syvä, jotta betoni on ankkuroitu vakaaseen ja routimattomaan maakerrokseen. Lisäksi pilarin maan sisällä olevan osan on oltava massaltaan suuri, riittävän tukevuuden saavuttamiseksi. Vastaavasti myös maahan kaivetun betonianturan on oltava riittävän massiivinen vakauden takaamiseksi. Maaperä ei kuitenkaan tarjoa pitkällä aikavälillä yhtä vakaata perustaa kuin kallioon ankkuroiminen. (UNAVCO Facility 2009c.)



Kuva 21. UNAVCON rakentama betonipilari (UNAVCO Facility).



Kuva 22. WCDA-verkon betonipilari (Schmidt ym. 2000).

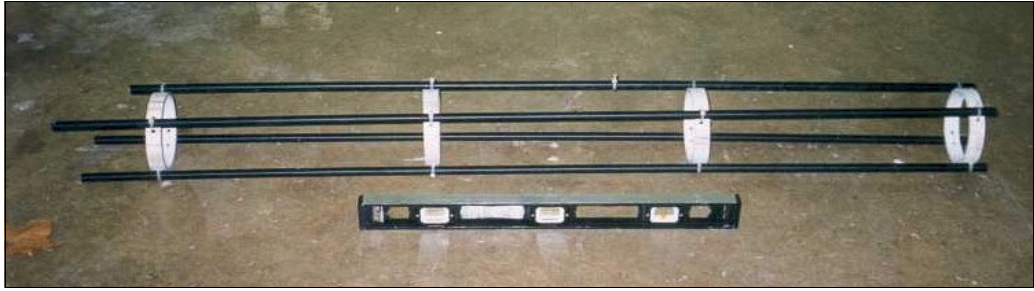
Koska teräsvahvisteisen betonipilarin rakenne on helposti muokattavissa optimaalisiin mittoihin, voidaan antennikorkeuskin päättää hieman vapaammin. Pilarin korkeuden kasvaessa sen vakaus ja lämpölaajeneminen alkavat kuitenkin olemaan rajoittavia tekijöitä. Täten pilarin eristäminen suoralta auringonvalolta pilaria kiertävän sylinterin avulla on tarpeellista. Eristäminen on suositeltavaa myös matalissa pilareissa.

Ruotsin SWEPOS-verkossa on antennialustana käytössä kolme metriä korkea teräsvahvisteinen betonipilari, joka on eristetty paksulla vaipalla. Lisäksi pilarin ulkopinnan lämpötilaksi on sähköisesti vakautettu noin +15 °C . Ylimääräiset sähköjärjestelmät antennin läheisyydessä tuovat signaaliympäristöön kuitenkin omat ongelmansa, joten menetelmän käyttäminen on kyseenalaista. (Lidberg ym. 2007.)

Betonipilarin halkaisijan, mukaanlukien mahdolliset eristykset, tulee yläosastaan olla pienempi kuin siihen kiinnitetyn antennin. Jos pilari on paksumpi, voi sen yläpinta aiheuttaa monitieheijastuksia, sekä resonanssionkalon yläpinnan ja antennin väliin. Signaaliympäristön kannalta metallin välttäminen myös eristysvaipassa on suositeltavaa. (Andersson ym. 2000.)

Kuituvahvisteisilla polymeereilla vahvistettu betonipilari

Kuituvahvisteisilla polymeereilla FRP:eillä (Fiber Reinforced Polymer) on mahdollista korvata teräs betonipilarin vahvikkeena. Tällöin on kyseessä periaatteeltaan täysin sama antennialusta teräsvahvisteisen betonipilarin kanssa, mutta betonin vahvistuksessa käytetty materiaali on eri. Kuituvahvisteisten polymeerien kuidut voivat olla esimerkiksi lasikuitua tai hiilikuitua. Niiden käytön etuna pilarin vahvistuksessa on metallin jääminen kokonaan pois antennialustan runko-osan rakenteesta. Tällöin antennin sähköisiin ominaisuuksiin kohdistuvat vaikutukset on minimoitu. Tässäkin alustaratkaisussa joudutaan todennäköisesti käyttämään metallia antennin kiinnityksessä pilariin, joten kaikkea metallia antennin läheisyydestä tämäkään alusta ei poista. (Andersson ym. 2000.)



Kuva 23. Kuituvahvistettuja polymeeritankoja valmiina sijoitettavaksi betonipilarin tukirakenteeksi. Tangot on sidottu yhteen PVC-muovirenkailla. (Andersson ym. 2000: Liite A: 6.)

CORS suosittelee kuituvahvisteisten polymeerien käyttöä betonipilarin vahvistuksessa teräksen sijasta. C-bar-nimisellä materiaalilla vahvistettu pilari on antennialustoja pohtineen työryhmän suositus uusille CORS-havaintoasemille (Andersson ym. 2000).

Pilari on rakenteeltaan täysin samanlainen teräsbetonipilarin kanssa, erona ovat vain vahvikkeet; kuitupolymeeritangot korvaavat suoraan betonin raudoituksen (kuva 23). Pilari soveltuu ja mukautuu samalla tavalla monenlaisiin kohteisiin, mutta kuituvahvikkeet ovat materiaalina kalliimpia kuin teräs ja niiden hankinta on työläämpää. Kuituvahvisteisten polymeerien käyttö betonirakennuksessa maailmalla on kasvussa, mutta kyseessä on kuitenkin verrattain uusi tekniikka, eikä polymeerien kestävydestä kymmenien vuosien aikavälillä juuri ole tutkimustuloksia. Esimerkiksi perustettaessa betonipilaria kallioon, pilarin tukirakenteet upotetaan ja valetaan kallioon pilarin ankkuroimiseksi, joten polymeeritankoihin kohdistuisi tässä tapauksessa suuri vastuu antennialustan vakaudesta.

Teräsmasto (putki)

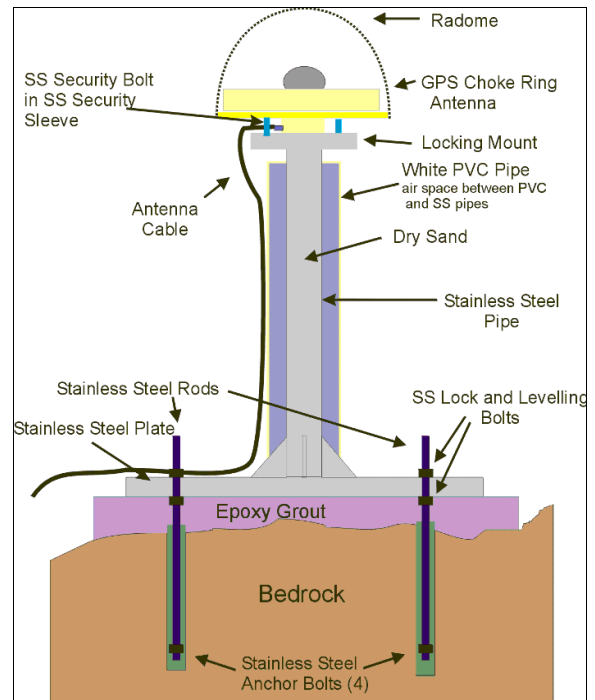
Teräsmastoja voi rakenteeltaan olla monenlaisia. Tässä yhteydessä käsitellään Western Canada Deformation Array -GPS-verkossa (WCDA) käytössä olevaa ruostumattomasta teräksestä valmistettua mastoa (kuva 24). Maston rakenne on kuvan 25 mukainen ja sen rungon muodostaa teräksiseen pohjalevyyn kulmarautatukien avulla hitsattu teräsputki. Masto tarjoaa erittäin vakaan ja kestävänn antennialustan, joka on helppo rakentaa myös vaikeakulkuisiin kohteisiin. Maston pohjalevy voidaan kiinnittää joko tukevalle betonialustalle tai mieluiten ehjään peruskallioon poraamalla. Kallioasennuksessa

pohjalevyn ja kallioon porattavien tukirautojen kiinnityksessä käytetään erityistä epoksipohjaista laastia. (Schmidt ym. 2000.)

Maston hyviin ominaisuuksiin kuuluu vakauden lisäksi auringonpaisteesta johtuvan lämpölaajenemisen pieni vaikutus. Tämä perustuu kahteen menetelmään: teräsputken ympärillä olevaan vaaleaan PVC-vaippaan ja ilmatilaan tämän ja putken välissä sekä kuivaan hienojakoiseen hiekkaan, jolla teräsputki on täytetty. Hiekka toimii lämmön välittäjänä ja sitojana pitäen putken viileämpänä. Huonona puolena mastossa on paljon metallia ja malli on suunniteltu vain 1,5 metriä korkeaksi. Tätä korkeampien versioiden vakaudesta ei ole takuita. (Schmidt ym. 2000; IGS Tracking Network 2009.)



Kuva 24. WCDA:n putkimainen teräsmasto (Schmidt ym. 2000).



Kuva 25. WCDA:n teräsmaston rakennekuva (Schmidt ym. 2000).

Invertanko betoniin koteloituna

Invar on nimitys tietyille rauta- ja nikkelpohjaisille metalliseoksille, joille on ominaista erittäin pieni lämpölaajenemiskerroin. Yleisimmin käytettyjen invarseosten lämpölaajenemiskerroin on $1,5\text{--}2,0 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ ($0\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$), kun puhtaan raudan vastaava

on $12,1 \cdot 10^{-6}/K$ ja betonin $10\text{--}15 \cdot 10^{-6}/K$ (Valtanen 2007). Käyttämällä invartankoa antennialustan perustana – ja ainoana osana, johon antenni kiinnitetään – voidaan rakentaa masto, jonka lämpölaajeneminen on mahdollisimman pientä. Tällaisia kuvan 26 mukaisia mastoja on UNAVCON ja muiden organisaatioiden suunnittelemassa käytössä ainakin Pohjois-Amerikassa ja Grönlannissa (IGS Tracking Network 2009).

Maston ytimenä on noin 2,5–4 metriä pitkä ja 2,5–5 senttimetriä paksu invartanko, joka asennetaan ehjään peruskallioon porattuun noin 1–2,5 metriä syvään reikään. Invartanko ankkuroidaan reikään laastilla tai sementillä, mutta reikää ei täytetä kokonaan, jotta invartanko pysyy ilmaeristettynä muusta materiaalista. Maanpäällinen osa suojataan esimerkiksi PVC-putkella, jonka ympärille valetaan sivusuuntaisen vakauden takaava ja mastoa suojaava teräsvahvisteinen betonipilari. Invartanko ei nojaa suoraan PVC-putkeen tai betonikoteloon, vaan välissä on eristeainetta. Invartankomaston antennikorkeus on yleensä yhdestä kolmeen metriä. (Dzurisin 1999.)



Kuva 26. Betonikoteloitu invartankomasto Yellowtonnessa (Dzurisin 1999).

Invertankoon perustuva masto on vakaa antennialusta, ja sen lämpölaajaanemis-ominaisuudet ovat huippuluokkaa, mikä pitää maston elämisen lämpötilojen mukana minimissä (IGS Tracking Network 2009). Maston aiheuttamat monitieheijastukset ovat pieniä, mutta masto sisältää kuitenkin metallia. Masto soveltuu perustettavaksi ainoastaan kallioon. Sen rakenne ei kuitenkaan ole erityisen yksinkertainen, koostuen monesta osasta ja monesta eri materiaalista, jotka eivät saa koskea toisiinsa. On olemassa riski invertangon ja maston muiden osien välillä pitkän ajan kuluessa tapahtuvista muutoksista tai elämisestä, joka estää invertangon pysymistä paikallaan muun maston liikuessa lämpölaajenemisen mukana. Seuraavat taulukot 7 ja 8 kokoavat vertailuun kaikki edellä käsitellyt mastotyypit.

Taulukko 7. Kahdeksan antennialustatyypin vertailussa, osa 1.

	Teräsristikkomasto	Teräsristikkomasto (invarstabiloitu)	Teräsmasto (putki)	Invertanko betonin sisällä
Vakaus	Vakaa.	Vakaa.	Erittäin vakaa.	Vakaa.
Signaaliympäristö	Erittäin paljon metallia. Monitieheijastukset ja sironnat todennäköisiä.	Erittäin paljon metallia. Monitieheijastukset ja sironnat todennäköisiä.	Paljon metallia. Saattaa aiheuttaa monitieheijastuksia ja sirontaa. Ei resonanssikammioita.	Invertanko ja betonirauhoitus metallia. Resonanssikammiot mahdollisia. Monitieheijastukset vähäisiä.
Rakentaminen	Helppo rakentaa. Kiinnitetään betonianturaan.	Stabiloinnin takia vaikeampi rakentaa. Kiinnitetään betonianturaan.	Helppo rakentaa ja asentaa vaikeassakin ympäristössä. Osat työstetty valmiiksi pajalla.	Selkeästi työlämpi rakentaa kuin pelkkä betonipilari. Invarin eristäminen haastavaa.
Hinta	Materiaalit ja työ ovat halpoja.	Materiaalit ja työ ovat halpoja, paitsi invar.	Materiaalit ja työ ovat halpoja.	Invar on kallista, muuten halpa.
Toimintavarmuus	Yksinkertainen rakenne, toimintavarma.	Monimutkaisempi rakenne, kuitenkin hyviä kokemuksia.	Erittäin toimintavarma.	Monimutkainen rakenne. Pitkällä aikavälillä voi olla epävarmuutta.
Käyttökohteet	Sopii monenlaiseen maaperään. Paras kallioon perustettuna.	Sopii monenlaiseen maaperään. Paras kallioon perustettuna.	Sopii vain ehjään, pinnassa tai pinnan tuntumassa (<0,5 m) olevaan kallioon.	Sopii vain ehjään peruskallioon.
Lämpölaajeneminen	Teräksen lämpölaajeneminen.	Minimoi erinomaisesti lämpölaajenemisen vaikutukset.	Teräksen kontrolloitu lämpölaajeneminen. Eristetty, ja putki täytetty hiekalla.	Minimoi erinomaisesti lämpölaajenemisen vaikutukset.
Antennikorkeus	Voidaan rakentaa huomattavan korkea masto.	Voidaan rakentaa huomattavan korkea masto.	Maksimikorkeus todennäköisesti noin 3–5 m.	Maksimikorkeus todennäköisesti noin 3–5 m.

Taulukko 8. Kahdeksan antennialustatyyppiä vertailussa, osa 2.

	Betonipilari			
	DDBM	SDBM	Raudoitettu	Kuitupolymeeri
Vakaus	Erittäin vakaa ja pitkäkestoinen.	Erittäin vakaa.	Vakaa.	Vakaa.
Signaaliympäristö	Kaikki osat metallia. Ei suuria heijastavia pintoja. Ei resonanssikammioita. Sirontaa voi esiintyä.	Kaikki osat metallia (vähemmän kuin syväversiossa). Ei suuria heijastavia pintoja. Ei resonanssikammioita. Sirontaa voi esiintyä.	Suhteellisen vähän metallia ja sekin betonin sisällä. Resonanssikammiot mahdollisia.	Itse mastossa ei yhtään metallia. Resonanssikammiot mahdollisia.
Rakentaminen	Suuritöinen. Vaatii järeän porauskaluston ja osaavan miehistön. Haastava rakentaa.	Keskiverto rakennusaika. Vaatii hyvät työkalut ja osaavan miehistön. Melko haastava rakentaa.	Helppo rakentaa, materiaalit yleisiä ja helposti saatavilla.	Helppo rakentaa. Kuituvahvistetut polymeerit ovat harvinaisia eikä niitä todennäköisesti saa Suomesta.
Hinta	Kallis rakentaa.	Materiaalit halpoja, mutta työkalut ja työaika voivat tulla kalliiksi.	Materiaalit ja työkalut ovat halpoja.	Työ ja materiaalit, kuitupolymeeria lukuunottamatta, ovat halpoja.
Toimintavarmuus	Yksinkertainen rakenne, toimintavarma.	Yksinkertainen rakenne, toimintavarma.	Yksinkertainen, erittäin toimintavarma. Voi heiketä pitkän ajan kuluessa? Yleinen ja hyväksi todettu.	Yksinkertainen, mutta kuitupolymeerien käyttäytymisestä pitkällä aikavälillä on vähän tietoa.
Käyttökohteet	Sopii erittäin hyvin monenlaiseen maaperään. Vaikea rakentaa hankalakulkuisiin paikkoihin.	Sopii vain ehjään, pinnassa tai pinnan tuntumassa (<0,5 m) olevaan peruskallioon.	Sopii monenlaiseen maaperään. Paras kallioon perustettuna.	Sopii monenlaiseen maaperään. Paras kallioon perustettuna.
Lämpölaajeneminen	Teräksen lämpölaajeneminen. Tasaa todennäköisesti lämpöään jalkojen kautta maan sisään.	Teräksen lämpölaajeneminen. Ei tasaa lämpöä kuten syväversio.	Betonin lämpölaajeneminen, vastaa kutakuinkin terästä. Pitää eristää suoralta auringolta.	Betonin lämpölaajeneminen, vastaa kutakuinkin terästä. Kuitupolymeeri? Pitää eristää suoralta auringolta.
Antenni- korkeus	Maksimikorkeus todennäköisesti 2–3 m.	Maksimikorkeus todennäköisesti 1,5–2 m.	Voidaan rakentaa korkeakin masto.	Voidaan rakentaa korkeakin masto.

4.2.3 Antennin kiinnitys alustaan

Erilaisia antennin kiinnitystapoja alustaan on useita. Yleensä alustan ja antennin välissä on kiinnitysmekanismi, jonka rakenne voi vaihdella yksinkertaisesta kierretangosta aina monimutkaiseen pakkokeskisen kaltaiseen kohdistimeen asti. Rakenne riippuu paljolti kiinnitysmekanismien käyttötarkoituksesta. Halutaanko antenni mahdollisesti irroittaa ja asentaa sen jälkeen täsmälleen samaan asentoon takaisin, vai riittääkö antennin kiinnitys paikalleen sillä periaatteella, että antenni on niillä sijoillaan toimintaikänsä loppuun asti.

IGS:llä tai EPN:llä ei ole erillisiä suosituksia antennin kiinnitystavasta antennialustaan, eikä myöskään mahdollisten kiinnitysmekanismien rakenteesta. Yleisvaatimuksena on, että antenni tulee kiinnittää alustaan tiukasti eikä se saa liikkua kiinnityskohtaan nähden 0,1:tä millimetriä enempää. Poikkeamat (pohjois-, itä- ja korkeussuunnassa) varsinaisen kiintopisteen ja antennin välillä tulee mitata ≤ 1 mm:n tarkkuudella ja raportoida havaintoaseman lokissa. Tätä mittausta ja muuta asemointia varten antennissa on käytössä antennin referenssipiste ARP (Antenna Reference Point). ARP on fyysinen merkki, joka useimmiten sijaitsee antennin alapinnan geometrisessa keskipisteessä. IGS vaatii pohjois-, itä- ja korkeussuuntaisten etäisyyksien ARP:n ja GNSS-aseman varsinaisen kiintopisteen välillä olevan alle viisi metriä, mutta EPN:lle riittää korkeussuunnan poikkeamaksi alle 10 metriä. Molemmat organisaatiot ilmoittavat kuitenkin ideaaliksi asetelman, jossa kiintopiste on vaakasuunnassa suoraan ARP:n alapuolella, eikä vaakapoikkeamia esiinny. Tämän lisäksi antenni tulee tasata ja orientoida maantieteelliseen pohjoiseen käyttäen hyväksi antennissa olevaa pohjoismerkkiä tai antennin radiotaajuusliitintä. (Guidelines for EPN Stations: 4–5, 7; IGS Site Guidelines: 6, 9; Poutanen 1998: 139.)

Näiden vaatimusten täyttämiseksi yksinkertaisin vaihtoehto antennin kiinnittämiseksi alustaan mahdollisimman vähällä määrällä liikkuvia osia, on antennialustan yläosassa oleva tarkasti työstetty reikä tai vastaavasti kierretanko, johon antenni kiinnitetään.

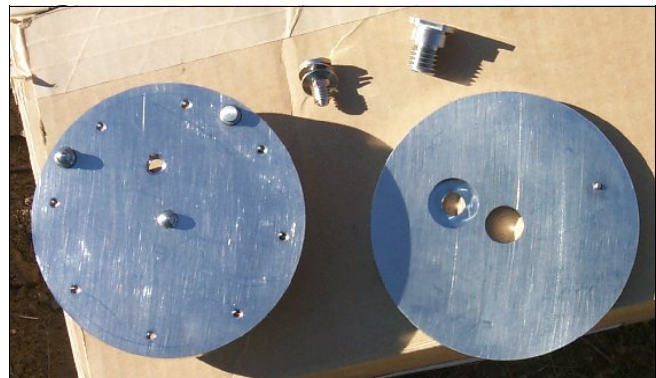
CORS:lla on antennin kiinnitystavasta tarkempi suositus: sen asemilta vaaditaan kohdistimen käyttöä. Kohdistin on antennialustan päälle kierteellä kiinnitettävä pieni

mekaaninen ja metallinen laite, jolla antenni voidaan tasata ja orientoida halutulla tavalla, sekä palauttaa mahdollisen irroituksen jälkeen täsmälleen samaan asentoon. (Guidelines for New and Existing CORS: 9.)

UNAVCO käyttää omilla asemillaan kuvan 27 mukaista SCIGN leveling mount -kohdistinta (Southern California Integrated GPS Network). Se on noin 13 cm halkaisijaltaan oleva kohdistin, joka mahdollistaa antennin tarkan kohdistamisen, sekä palauttamisen samaan asentoon irrottamisen jälkeen. Kohdistin on suojattu ilkeältä vastaan siten, että säätöjen muuttaminen on asiattomille henkilöille hankalaa. (UNAVCO Facility 2007.)



Kuva 27. UNAVCO:n suosittelema SCIGN-kohdistin (UNAVCO Facility 2007).



Kuva 28. SCIGN-kohdistimen osat erillään (UNAVCO Facility 2009b).

4.2.4 Seurantamittaukset ja vara-antennialustat

Rakennetun antennialustan ja siihen kiinnitetyn GNSS-antennin vakautta on tarpeen seurata. Tarkoitusta varten alustan ympärille tulee rakentaa vähintään kolme kappaletta kiintopisteitä, esimerkiksi kallioon porattuja pultteja. Antennialustan liikkeitä kiintopisteisiin nähden tulee seurata säännöllisin, esimerkiksi kahden vuoden, välein.

Seurantamittaukset vaativat hyvät tähykset myös antennialustaan. Näiden rakentaminen on haastavaa, mutta esimerkiksi alustan metallirakenteisiin on hitsaamalla mahdollista

kiinnittää sopivaksi työstettyjä teräviä tai sylinterinmuotoisia piikkejä. Toinen vaihtoehto voisi olla ristikkotähysten stanssaaminen metalliosiin, mutta nämä voivat ajan myötä tummua vaikeasti erotettaviksi. Betonipilaria käytettäessä alustaan voidaan valuvaiheessa upottaa vastaavanlaisia tähyksiä. Tähykset voivat tarvittaessa olla myös kooltaan suurempia, mutta varsinaisen tähtäyskohdan tulee olla yksiselitteinen.

Varteenotettava menetelmä antennialustan vakauden seuraamisessa on tarkkoihin kulmahavaintoihin perustuva EPLA (eteenpäinleikkaus avaruudessa). EPLA on kahdella (tai useammalla) elektronisella teodoliitilla suoritettava mittausmenetelmä, jossa teodoliitit orientoidaan ensin keskenään ja tämän jälkeen mittakaavaan tunnetun huipputarkan mittakaavajanan avulla. Mittauksessa havaitaan samanaikaisesti kahdelta kojeasemalta samat kohdepisteet. Mittaus suoritetaan vapaassa koordinaatistossa, ja siirryttäessä uusille kojeasemille teodoliitit voidaan orientoida uudelleen jo havaituista pisteistä. Menetelmän lopputuloksena saadaan havaittujen pisteiden erittäin tarkat avaruuskoordinaatit. EPLAn kulmahavaintojen tarkkuus perustuu samanaikaisiin tähtäyksiin täsmälleen samoihin kohdepisteiden kohtiin, joten se vaatii onnistuakseen hyvät kiinteät tähykset sekä antennialustassa että alustan ympärillä.

IGS ja EPN suosittelevat lisäantennialustojen rakentamista havaintoasemalle mahdollisuuksien mukaan. Vara-alustoja voidaan käyttää erilaisiin testauksiin, seurantamittauksiin ja ennen kaikkea varsinaisen alustan tuhoutuessa tai muuttuessa käyttökelvottomaksi. IGS suosittelee vähintään kolmen vara-alustan rakentamista karkeasti kolmion muotoon 10–15 kilometrin päähän havaintoasemasta, paikallisten, alueellisten ja suuren mittakaavan maankuoren liikkeiden erottamiseksi toisistaan. Vara-alustoja ei kuitenkaan tarvita, jos alueella on jo muutenkin riittävän tiheä GNSS-verkko. (Guidelines for EPN Stations; IGS Site Guidelines: 11.)

4.3 Vastaanottimet

4.3.1 GNSS-signaalit

Uudet GNSS-taajuudet ja -signaalit ovat avainasemassa FinnRef-verkon uudistamisella saavutettavia hyötyjä arvioitaessa. Taulukko 9 kokoaa yhteen FinnRefin tämänhetkiset ja tulevaisuuden mahdolliset havaintosuureet GPS:n, GLONASSin ja Galileon osalta.

Satelliittipaikannusjärjestelmien kehitys nostaa maata kiertävien GNSS-satelliittien määrää huomattavasti sekä tuo merkittävän joukon uusia taajuuksia ja signaaleja käyttäjien ulottuville. Tästä hyötyvät suoraan kaikki GNSS:ien käyttäjät, niin FinnRefin kaltaiset pysyvät verkot, senttimetrin tarkkuutta edellyttävät mittausalan ammattilaiset kuin karkeampia navigointipalveluja käyttävät tavalliset kuluttajatkin.

Hyödynnettävissä on yhtä aikaa enemmän satelliitteja ja käytettävissä on enemmän navigointisignaaleja, usealla eri kanta-aallon taajuudella. Satelliittien määrän kasvaessa paikannusratkaisun laskeminen helpottuu ja nopeutuu huomattavasti, jolloin mittaus onnistuu entistä vaikeammassakin olosuhteissa ja entistä nopeammin. Tarkkuus kasvaa, koska sijainnin laskemiseen on käytettävissä signaalien kulkuajakoja aikaisempaa useammasta lähteestä. Tarkkuutta lisää myös uusien taajuuksien ja signaalien myötä kasvava havaintosuureiden määrä, jolloin dataa saadaan kerättyä ja laskettua huomattavasti enemmän. Kun taajuuksia on käytettävissä riittävästi, paikannusratkaisu voidaan parhaimmillaan saavuttaa jopa yksittäisen ajanhetken eli epookin havainnoista (Morujó ja Mendes 2008). Uudet taajuudet tarjoavat myös enemmän tietoa eripituisten kanta-aaltojen etenemisestä ilmakehässä, jolloin ilmakehän aiheuttamia virheitä signaalien kulkuajassa voidaan tehokkaammin mallintaa ja poistaa.

Taulukko 9. FinnRef-verkon mahdolliset havaintosuureet nyt ja tulevaisuudessa. Aikataulut ovat eri GNSS:ien hallintojen virallisia ennusteita. (Gibbons 2007; Gibbons 2008; Hoffman-Wellenhof 2008; Revnivykh 2006; Shaw 2005.)

GNSS	Taajuus	Havaintosuureet	FinnRef		Ensimmäinen mahdollisuus havaintoihin	Täysi hyödynnettävyys (FOC)	
			Havaitsee nyt	Voi havaita tulevaisuudessa			
GPS	L1	L1-vaihe	X	X	havaitaan jo	saavutettu	
		C/A-koodi	X	X	havaitaan jo	saavutettu	
		P-koodi	X	X	havaitaan jo	saavutettu	
		L1CD-koodi		X		2021	
			L1CP-koodi		X		2021
		M-koodi			salattu		
	L2	L2-vaihe	X	X	havaitaan jo	saavutettu	
		P-koodi	X	X	havaitaan jo	saavutettu	
		L2CM-koodi		X		2012	
		L2CL-koodi		X		2012	
	M-koodi			salattu			
L5	L5-vaihe		X	2009	2015		
	L5I-koodi		X	2009	2015		
	L5Q-koodi		X	2009	2015		
GLONASS	G1	G1-vaihe		X		2009	
		C/A-koodi		X		2009	
		P-koodi			salattu		
	G2	G2-vaihe		X		2009	
		C/A-koodi		X		2009	
		P-koodi			salattu		
	G3	G3-vaihe		X			
C/A ₂ -koodi			X				
	P ₂ -koodi			salattu			
Galileo	E1	E1-vaihe		X	2009	2013	
		E1A-koodi			salattu (PRS)		
		E1B-koodi		X	2009	2013	
		E1C-koodi		X	2009	2013	
	E6	E6-vaihe		X	2009	2013	
		E6A-koodi			salattu (PRS)		
		E6B-koodi		X	2009	2013	
		E6C-koodi		X	2009	2013	
	E5a	E5a-vaihe		X	2009	2013	
		E5a-I-koodi		X	2009	2013	
		E5a-Q-koodi		X	2009	2013	
	E5b	E5b-vaihe		X	2009	2013	
		E5b-I-koodi		X	2009	2013	
E5b-Q-koodi			X	2009	2013		

Nämä parannukset johtavat tilanteeseen, jossa käyttäjät tulevat hyödyntämään kaikkia tarjolla olevia GNSS-satelliitteja ja -taajuuksia, erikseen tai niitä yhdistäen. Geodesian ja paikkatiedon ammattilaiset käyttävät paikannus- ja mittaustietoja yleensä jossain tietyssä maanpintaan sidotussa koordinaatistossa, jolloin eri koordinaattijärjestelmiin pohjautuvat GNSS-havainnot muunnetaan tähän koordinaatistoon, esimerkiksi EUREF-FINIin. Tuon koordinaatiston määrittelevän ja sitä ylläpitävän tukiasemaverkon on kyettävä vastaanottamaan samoja taajuuksia samoista satelliiteista kuin koordinaatistossa operoivat käyttäjätkin vastaanottavat. Näin kaikki GNSS:illä eri koordinaattijärjestelmissä tuotetut mittaukset saadaan luotettavasti muunnettua samaan koordinaatistoon, koska sen perustana oleva pysyvä GNSS-verkko havaitsee ja tukee kaikkia järjestelmiä. (Koivula 2009b.)

4.3.2 IGS:n ja EPN:n suositukset GNSS-asemien vastaanottimille

Kaikilla FinnRef-asemilla on tällä hetkellä käytössä 12-kanavaiset Ashtech Z-XII3 -vastaanottimet (Koivula 2006: 7). Ne ovat kaksitaajuus-GPS-vastaanottimia, eikä niillä voida vastaanottaa GPS:n L5-taajuutta, L2C-koodia, saati sitten muiden GNSS:ien signaaleja. Nykyiset vastaanottimet eivät sovellu käytettäväksi uuden GNSS-verkon yhteydessä ja verkkoa varten pitää hankkia uudet vastaanottimet.

IGS:n ja EPN:n vaatimukset vastaanottimille ovat moderneja GNSS-vastaanottimia ajatellen suppeita, ja jo nykyinen FinnRef täyttää nämä vaatimukset sellaisenaan. Vähimmäisvaatimuksia ei siksi käsitellä tässä yhteydessä tarkemmin.

Uuden GNSS-verkon vastaanottimia ajatellen organisaatioilla on myös suhteellisen vähän suosituksia. Tärkein suositus on yksinkertainen: kaikkia näkyviä GNSS-satelliitteja seuraavia ns. *all in view* -vastaanottimia pidetään parhaana vaihtoehtona (Guidelines for EPN Stations: 4; IGS Site Guidelines: 8). Näissä vastaanottimissa on riittävästi kanavia kaikkien yhtä aikaa näkyvissä olevien satelliittien seuraamiseen, ja ne tukevat eri GNSS:ien kaikkia taajuuksia ja signaaleja. *All in view* -vastaanottimet ovat

myös käytännössä ainoa keino täyttää Geodeettisen laitoksen oma vaatimus ylläpitää ajantasaista yhteyttä maailmanlaajuisiin koordinaattijärjestelmiin ja muihin GNSS-verkkoihin sekä havaita uudella verkolla kaikkia samoja signaaleja, mitä EUREF-FINissä operoivat käyttäjätkin havaitsevat.

Vastaanottimien maskikulman (pystyikulma, jonka alapuolelta tulevia signaaleja ei havaita) on IGS:n vaatimuksen mukaan oltava 10° tai pienempi. EPN:n vaatimus on vielä tiukempi, 5° tai pienempi. Ideaali maskikulma *all in view* -vastaanottimille on IGS:n suosituksen mukaan 3° tai pienempi, EPN:n ja CORS:n suositusten mukaan tasan 0° . (Guidelines for EPN Stations: 4; IGS Site Guidelines: 5, 8; Guidelines for New and Existing CORS: 12.)

Havaintoväliksi IGS ja EPN suosittelivat 30:tä sekuntia, ja havaintodatan lähetys asemalta tunneittain on toivottavaa. Vastaanottimet tulisi asettaa tallentamaan dataa myös ”epäterveiksi” asetetuista ja juuri laukaistuista satelliiteista. Vastaanottimet on hyvä suojata sähkökatkojen ja äkillisten jännitepiikkien varalta esimerkiksi asentamalla havaintoasemille varavirtajärjestelmät. Vastaanottimia, samoin kuin muita laitteita, joita ei koskaan ole ollut käytössä IGS:ssä tai EPN:ssä, tulisi välttää ennen kuin niiden käyttöä on kunnolla testattu organisaatioiden toimesta. (Guidelines for EPN Stations: 4; IGS Site Guidelines: 5, 8–9.)

4.4 Antennit

4.4.1 Nykyisten antennien käyttömahdollisuus

FinnRefin nykyisten antennien soveltuvuus osaksi uutta GNSS-verkkoa riippuu pääasiassa aallonpituusalueesta, jonka antennin esivahvistin päästää läpi. Esivahvistimen tehtävä on vahvistaa antennin vastaanottamat signaalit ja lähettää ne eteenpäin vastaanottimeen. Kahdessa vanhemmassa antennityypissä (AOAD/M_B ja

AOAD/M_T) on esivahvistin, joka päästää läpi kaikki taajuudet välillä 1–2 GHz. Uudempien Ashtechin antennien esivahvistimissa on kaksi kapeampaa kaistaa, jotka päästävät läpi vain GPS:n L1- ja L2-aallonpituusalueet suodattaen muut pois. Tämä tarkoittaa sitä, että teoriassa AOAD-tyypin antennit sopivat sellaisenaan kaikkien nykyisten ja tulevien GNSS-taajuuksien havaitsemiseen, kun taas Ashtechin antennien esivahvistimet pitää vaihtaa, jotta niillä voidaan havaita kaikkia GNSS-taajuuksia. (Koivula 2009c.)

Vanhojen antennien käyttäminen nykyisillä paikoillaan uudessa GNSS-verkossa on kuitenkin ongelmallista. Vaihtamalla antennin esivahvistin muutetaan samalla antennin sähköisiä ominaisuuksia ja vaihekeskipisteiden eli signaalien varsinaisten havaintokohtien paikkaa. Tämä katkaisee antennilla mitatut pitkät aikasarjat. Aikasarjojen katketessa ei näitä asemia voida enää käyttää yhteyden ylläpitämiseen FinnRefin ja uuden GNSS-verkon välillä. Tällöin myös yhteys EUREF-FINiin heikkenee, minkä säilyttäminen vahvana on ensiarvoisen tärkeää. Pitkien aikasarjojen jatkaminen ja yhteyden säilyttäminen vanhan ja uuden verkon välillä edellyttää, että verkkoja voidaan käyttää alkuvaiheessa rinnakkain riittävän pitkään. Esivahvistimien vaihtaminen ei palvele tätä tarkoitusta, päinvastoin. Mikäli ennen lopullisen päätöksen tekemistä kuitenkin halutaan, voidaan AOAD-antennien käyttöä ja soveltuvuutta GNSS-mittauksissa testata nykyisillä yksittäisillä asemilla ilman että aikasarjat katkeavat. (Koivula 2009c.)

Nykyisten antennien päällä olevat vanhanmalliset suojakuvut ovat olleet käytössä pitkään ja niiden uusiminen on suositeltavaa, mikäli nykyisiä antennejä käytetään uudessa GNSS-verkossa. Jos kuvut vaihdetaan, tulee aikasarjoihin joka tapauksessa katkos, koska myös suojakuppu vaikuttaa GNSS-signaalien kulkuun. Uusien suojakupujen myötä vanhojen antennien käyttö menettää tällöin merkityksensä.

4.4.2 IGS:n ja EPN:n suositukset antennille

Antennit

Vaimennusrenkailla varustettujen antennien käyttö ei EPN- ja IGS-verkoissa ole pakollista, mutta EPN pitää niitä parhaina vaihtoehtoina, ja IGS käyttää Dorne Margolin choke ring -antennia standardina, johon verrattuna muiden antennien pitää täyttää tiettyjä ominaisuuksia. Myös UNAVCO suosittelee choke ring -antennien käyttöä tarkassa geodeettisessa mittaustoiminnassa (UNAVCO Facility 2009c). Choke ring -antennit ovat siis yksimielinen suositus pysyvien GNSS-asemien antennityypiksi. Lisäksi IGS suosittelee käyttämään antennityyppiä, jotka ovat yleisessä käytössä IGS-verkossa, uusien ja erilaisten mallien käyttöönoton sijaan. (Guidelines for EPN Stations: 5; IGS Site Guidelines: 5, 8.)

Suoritettaessa uusien antennien käyttöönottoa vanhojen tilalle, IGS ja EPN suosittelevat uuden ja vanhan antennin käyttämistä aluksi rinnakkain, mikäli vaihtoehtoinen antennialusta ja muu laitteisto vain on käytettävissä. Jos järjestely on mahdollinen, organisaatiot pyytävät ilmoittamaan omille tutkijoilleen testien havainnot ja tulokset. (IGS Site Guidelines: 9; Guidelines for EPN Stations: 8.)

Antennien suojakuvut

IGS:n, EPN:n, CORS:n ja UNAVCON yleisperiaatteena on, että antennin suojakupujen käyttöä ei suositella, ellei se olosuhteiden pakosta ole välttämätöntä. Antennin päälle asennettava suojakupu vaikuttaa häiritsevästi GNSS-signaalien etenemiseen, aiheuttaen virhettä ennen kaikkea korkeushavaintoihin. Virheen suuruus vaihtelee suuresti, ja esimerkiksi UNAVCON testien mukaan virhettä voi aiheutua kahdesta millimetristä useaan kymmeneen millimetriin verrattuna antenniin ilman suojakupua. Virheen suuruuteen vaikuttavat antennin ja korkeuden maskikulman lisäksi suojakupujen

fyysiset ominaisuudet, jotka riippuvat monesta seikasta. UNAVCON testituloksia, eri ominaisuuksien vaikutuksia sekä IGS:n ja EPN:n suosituksia on koottu taulukkoon 10. (Braun ym. 1997; Guidelines for EPN Stations: 5–6; IGS Site Guidelines: 6, 8.)

Taulukko 10. Suojakupujen toivottuja ominaisuuksia ja suosituksia.

Ominaisuus	UNAVCON testitulos	IGS:n ja EPN:n suositukset
Muoto	Puolipallon muotoiset kuvut aiheuttavat vähemmän virhettä kuin kartiomaiset.	Muita kuin puolipallon muotoisia kupuja tulee erityisesti välttää.
Paksuus	Mitä ohuempi kupu, sitä parempi.	
Tasaisuus		Tavoite on tasaisesti valmistettu kupu alle 1 mm paksuusvaihtelulla.
Sijoittaminen	Kuvun kaarevuuden keskipiste tulee keskistää antennin keskimääräisen vaihekeskipisteen lähelle.	
Materiaali	Kuvut ovat yleensä muovia, esimerkiksi akryyliä. Käytetyn materiaalin vaikutus on pienempi kuvun muihin ominaisuuksiin nähden. Metallinen pohjalevy kuvun kiinnityksessä kasvattaa virhettä.	

UNAVCON testien valossa suojakupun vaikutus mittaustuloksiin minimoidaan, kun kupu on ohut, puolipallon muotoinen ja antennin keskimääräinen vaihekeskipiste sijoitetaan lähelle kuvun pallomuodon keskipistettä. (Braun ym. 1997.)

FinnRef-verkossa on käytössä kuvien 29 ja 30 mukaiset suojakuput. Kuvassa 31 on modernimpi suojakupumalli, joka on laajassa käytössä mm. UNAVCON asemilla. Tästä kuvusta on saatavilla myös kiinnitystekniikaltaan erilainen pidempi versio.



Kuva 29. SNOW-suojakupu (Koivula).



Kuva 30. DUTD-suojakupu (Koivula).



Kuva 31. SCIGN Short Radome (SCIGN Radome Project).

Vaikka suojakupu olisi teknisesti optimaalinen ja oikein asennettu, se aiheuttaa havaintoihin millitason virheitä, varsinkin korkeuskomponentissa. Tästä johtuen suojakuvun ja antennin kalibrointi yhtenä kokonaisuutena on avainasemassa näiden virheiden eliminoinnissa.

Antennien suojakuvut on lähes poikkeuksetta valmistettu erilaisista muoviseoksista. Niiden koostumuksessa on pitkän ajan kuluessa olemassa muovin ominaisuuksiin liittyvä riskitekijä – ns. muovin viruminen. Suojakupujen käyttäytymisestä pitkällä aikavälillä ei löydy tutkimustuloksia, joten virumisen mahdollisista vaikutuksista signaalien kulkuun ei juuri ole tietoa. Suojakuvun ollessa alttiina säiden vaihteluille esimerkiksi 20 vuotta, on jopa todennäköistä, että sen koostumuksessa tapahtuu jonkinlaisia muutoksia. Täten voisi olla perusteltua rakentaa uuden GNSS-verkon yhteyteen eräänlainen pysyvä testiasema, joka olisi laitteistoltaan samanlainen pysyvän GNSS-verkon asemien kanssa, mutta sen antenniasennukset voitaisiin säännöllisesti irroittaa uutta kalibrointia varten. Toistuvista antenni ja suojakupujen yhteisistä kalibroinneista saataisiin arvokasta tietoa yhdistelmän käyttäytymisestä pitkällä aikavälillä. Testiasema voisi sijaita esimerkiksi Metsähovin pysyvän aseman yhteydessä, jolloin se samalla täyttäisi IGS:n suosituksen pysyvän aseman vara-antennialustasta (ks. s. 53). (Koivula 2009c.)

Antennien kalibrointi

Antennissa jokaisella havaittavalla taajuudella on oma keskimääräinen vaihekeskipiste (eli havaintokohta) ja tähän vaikuttava, signaalin tulosuunnasta riippuva, vaihekeskipisteen vaihtelumalli PCV (Phase Center Variation). Kalibroinnilla määritetään eri taajuuksien PCV:t ja lasketaan vaihekeskipistepoikkeamat PCO:t (Phase Center Offset), eli havaintojen etäisyydet antennin referenssipisteeseen. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 148–149.)

Antennikalibroinnit voidaan jakaa kahteen ryhmään: absoluuttiseen ja suhteelliseen kalibrointiin. Suhteellisessa kalibroinnissa antennin vaihekeskipisteiden poikkeamat

(PCO) ja vaihtelut (PCV) määritetään suhteessa tunnettuun referenssiantenniin. Absoluuttisessa kalibroinnissa ei käytetä referenssiantennia, vaan PCO:t ja PCV:t määritetään kalibroitavalle antennille itsenäisesti. Absoluuttinen kalibrinti suoritetaan kuvan 32 kaltaisen robotin avulla, joka kääntää ja pyörittää antennia tarkasti haluttuihin asentoihin. (Hoffman-Wellenhof ym. 2008: 150; Koivula 2004: 114–119.)

Kumpaa tahansa kalibrintimenetelmistä voidaan soveltaa käytettäväksi kahdella eri tavalla. Antennit voidaan kalibroida jokainen yksitellen tai ns. tyypikalibrintina. Jälkimmäisessä antennia ei kalibroida erikseen, vaan sen kalibrintitietoina käytetään kyseiselle antennimallille saatuja yleisiä kalibrintituloksia. Nämä saadaan antennin valmistajalta tai IGS:n ja EPN:n kaltaisten organisaatioiden ylläpitämillä kalibrintilistoilta. Käytettäessä antennin suojakupua tämä otetaan huomioon kummassakin tapauksessa. Tyypikalibrintitietoina käytetään kyseisen antenni ja suojakupuu -parin tietoja ja yksilöllisessä kalibroinnissa laitepari kalibroidaan yhtenä kokonaisuutena.



Kuva 32. Kalibrintirobotti (Menge ja Schmitz 2001).

Sekä EPN että IGS vaativat, että käytettävän antennin ja mahdollisen suojakuvun tyyppikalibrointitietojen tulee löytyä organisaatioiden ylläpitämiltä kalibrointilistoilta. Jos näin ei ole, täytyy antenni, tai antenni ja suojakupu -pari, kalibroida erikseen tunnetussa kalibrointilaboratoriossa, kuten Yhdysvaltojen NGS:ssä tai eurooppalaisessa Geo ++ -palvelussa. (Guidelines for EPN Stations: 4–6; IGS Site Guidelines: 5–6, 8.)

Erityisesti liitettäessä kokonaan uusia antennia tai antenni ja suojakupu -pareja EPN:ään organisaatio suosittelee kyseisistä laitteista toimitettavan yksilölliset absoluuttikalibroinnit sen käyttöön. Tähän sallitaan poikkeuksia seuraavissa tapauksissa: tuntemattoman suojakuvun vaikutus tunnetun antennin vaihekeskipisteeseen on mitätön, kyseisiä laitteita ei voida absoluuttisesti kalibroida, tai jos asema sellaisenaan tuottaa huomattavaa lisäarvoa EPN:lle. (Guidelines for EPN Stations: 4–6; IGS Site Guidelines: 5–6.)

IGS ja EPN arvostavat antennin, tai antenni ja suojakupu -parin, absoluuttista kalibrointia suhteellisen kalibroinnin sijaan. Parhaana vaihtoehtona pidetään jokaisen antennin, tai antenni ja suojakupu -parin, yksilöllistä absoluuttikalibrointia, jos siihen on mahdollisuus. Absoluuttinen tyyppikalibrointi on kuitenkin hyväksytty vaihtoehto, jos antennin, tai antenni ja suojakupu -parin, absoluuttiset tyyppikalibroinnit ovat saatavilla järjestöjen listoilta.

Varsinkin kun käytetään antennin päällä suojakupua, laiteparin yksilöllinen kalibrointi on tyyppikalibrointia varmempi vaihtoehto. Kuten CORS:n suosituksissa todetaan, tämä perustuu riskiin muovisen suojakuvun mahdollisista valmistusvaiheen epätasaisuuksista tai materiaalin muutoksista ulko-oloissa, jolloin kyseisen mallin yleinen tyyppikalibrointi ei enää olekaan täysin paikkaansapitävä (Guidelines for New and Existing CORS: 11).

4.5 Yhteys EUREF-FINiin

Nykyinen FinnRef-verkko ei kata Suomea tasaisesti, sillä esimerkiksi länsi- ja luoteis-Lappi on kokonaan vailla asemia. Jotta saavutetaan paremmin koko maan kattava verkko, asemien määrää täytyy nostaa nykyisestä 13:sta, ja verkon geometriaa täytyy parantaa. Suurin osa uusista asemista pyritään rakentamaan vanhojen asemien viereen, mutta täysin uusia asemapaikkoja ei voida välttää. Uusi GNSS-verkko ei poista vanhaa verkkoa käytöstä heti, vaan molemmilla verkoilla kerätään havaintoja rinnakkain mahdollisimman pitkään. Tämä perustuu uuden GNSS-verkon vahvaan sitomiseen vanhaan FinnRefiin sekä täten myös virallisiin kansallisiin ja kansainvälisiin koordinaatistoihin. Liitoksen onnistuminen on olennaista, sillä uusi GNSS-verkko toimii tulevaisuudessa EUREF-FINin runkona ja koordinaatiston ylimpänä luokkana.

Vaikka enemmistö asemista pyritään rakentamaan olemassa olevien rinnalle, verkon tasaisuuden parantamiseksi joidenkin asemien paikkoja tulee muuttaa. Tällöin verkko kattaa paremmin koordinaatistossa tapahtuvat erilaiset mittaustoiminnat koko maan alueella ja takaa tasaisemmat olosuhteet koordinaatistomuutosten suorittamiseen.

5 Suositus Suomen uudeksi GNSS-verkoksi

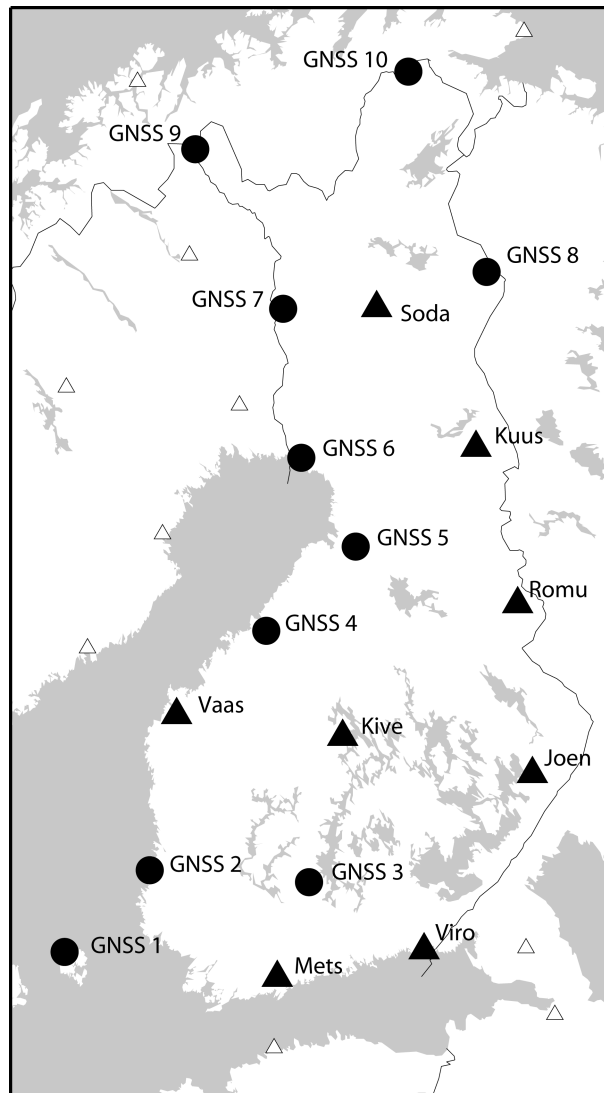
Tässä luvussa esitetään suositus, jonka pohjalta Suomen uutta pysyvää GNSS-verkkoa voidaan lähteä suunnittelemaan. Se perustuu edellisissä luvuissa käsiteltyihin aiheisiin, joista suositukseen kootaan tärkeitä painopisteitä. Suositus etenee järjestelmällisesti verkon yleisestä geometriasta ja asemien sijainnista aina asemalla käytettävään laitteistoon asti.

5.1 Havaintoasemien sijainti

Suositus Suomen uudeksi pysyväksi GNSS-verkoksi käsittää 18 asemaa, jotka kattavat koko maan tasaisesti ja hyvällä geometrialla. Verkon asemat on sijoitettu kuvan 33 mukaisesti ja huomiota on verkon geometrian ja tiheyden lisäksi kiinnitetty erityisesti verkon kattavuuteen Pohjanmaan ja Perämeren maannousalueilla. Uusi verkko asettuu tasaisesti myös muiden Pohjoismaiden, ennen kaikkea Ruotsin, GPS-asemien kanssa. Asemien määrä on pyritty pitämään mahdollisimman pienenä, ja verkossa on hyödynnetty mahdollisuuksien mukaan FinnRef-verkon asemia. Kaikki GNSS-verkon asemat ovat uusia siten, että kahdeksan asemaa rakennetaan vanhan FinnRef-aseman viereen, viisi vanhaa asemaa korvataan siirtämällä ne uuteen paikkaan ja viisi rakennetaan kokonaan uusiin paikkoihin.

Asemien sijoittelussa on painotettu voimakkaasti mahdollisuutta sijoittaa asema jo olemassa olevan tieteellisen tutkimusaseman yhteyteen. Tästä saatavia huomattavia hyötyjä on esitetty luvussa 4.1.4, mutta menettelylle on olemassa myös toinen vahva peruste. Maa- ja metsätalous- sekä ympäristöministeriön alaiset sektoritutkimuslaitokset muodostavat yhdessä Ympäristö ja luonnonvarat -konsortion, johon myös Geodeettinen laitos kuuluu. Konsortion toimintasuunnitelmassa vuosille 2009–2011 todetaan, että konsortio uudistaa tutkimusasemaverkostoaan siten, että mahdollisuuksien mukaan

laitokset voivat toimia samoissa toimitiloissa (Ympäristö ja luonnonvarat -konsortio). Täten GNSS-asemien sijoittaminen esimerkiksi Metsäntutkimuslaitoksen (Metla) tai Riistan- ja kalantutkimuslaitoksen (RKTL) tutkimusasemien yhteyteen palvelee samalla ministeriötason tavoitteita.



Kuva 33. Suositus Suomen uudeksi pysyväksi GNSS-verkoksi. Kokonaan uudet asemapaikat on merkitty ympyröillä, vanhojen asemien viereen rakennettavat on merkitty kolmioilla.

Uuden GNSS-verkon asemat on esitetty taulukossa 11, josta ilmenevät myös niiden karkeat sijainnit, vanhat FinnRef-verkon asemat sekä vanhan ja uuden verkon väliset vastaavuudet asemapaikoissa. Enemmistö uusista asemista suositellaan rakennettavaksi

vanhan aseman viereen, mikäli se vain on mahdollista. Asemapaikkoja, joissa tämä todennäköisesti onnistuu ja olosuhteet ovat muutoinkin hyvät on kahdeksan: Joensuu, Kivetty, Kuusamo, Metsähovi, Romuvaara, Sodankylä, Vaasa ja Virolahti. Täten esimerkiksi verkon kaikki IGS- ja EPN-asetat rakennetaan vanhojen asemien viereen.

Taulukko 11. Uuden GNSS-verkon asemat ja niiden vastaavuus FinnRefiin.

Verkkojen asemat (lkm)		Asemien sijoitus	Sijainti (EUREF-FIN)	
FinnRef (13)	GNSS (18)		Latitudi	Longitudi
Joensuu	Joensuu	Uusi asema vanhan viereen	62° 23'	30° 05'
Kivetty	Kivetty	Uusi asema vanhan viereen	62° 49'	25° 42'
Kuusamo	Kuusamo	Uusi asema vanhan viereen	65° 54'	29° 02'
Metsähovi	Metsähovi	Uusi asema vanhan viereen	60° 13'	24° 23'
Romuvaara	Romuvaara	Uusi asema vanhan viereen	64° 13'	29° 55'
Sodankylä	Sodankylä	Uusi asema vanhan viereen	67° 25'	26° 23'
Vaasa	Vaasa	Uusi asema vanhan viereen	62° 57'	21° 46'
Virolahti	Virolahti	Uusi asema vanhan viereen	60° 32'	27° 33'
Degerby	GNSS 1	Ahvenanmaan pääsaari	60° 17'	19° 50'
Olkiluoto	GNSS 2	Olkiluoto	61° 14'	21° 28'
Tuorla	GNSS 3	Evo	61° 13'	25° 08'
-	GNSS 4	Kannus	63° 54'	23° 57'
Oulu	GNSS 5	Muhos	64° 49'	25° 59'
-	GNSS 6	Tornio tai Kemi	65° 49'	24° 19'
-	GNSS 7	Kolari	67° 21'	23° 50'
-	GNSS 8	Tulppio (Värriö)	67° 45'	29° 26'
-	GNSS 9	Kilpisjärvi	69° 03'	20° 48'
Kevo	GNSS 10	Utsjoki (Tenojoki)	69° 55'	27° 26'

Degerbyn nykyinen asema ei sijaitse Ahvenanmaan pääsaarella, eikä sitä ole rakennettu peruskalliolle. Se korvataan pääsaarelle rakennettavalla uudella GNSS 1 -asemalla. Hyviä vaihtoehtoja asemapaikaksi ovat esimerkiksi Åbo Akademin Husön biologinen asema tai Societaksen ja Ahvenanmaan maakuntahallituksen ylläpitämä Nåtön biologinen asema. Myös muu sopiva paikka pääsaarella käy.

Vanhaa Olkiluodon asemaa joudutaan hieman siirtämään, koska se sijaitsee suoraan ydinjätteen loppusijoituspaikan ONKALON yläpuolella (Koivula 2009e). Korvaava uusi

asema GNSS 2 voisi olla Olkiluodon nykyisen deformaatiomittausverkon pisteen GPS 11 lähellä, jossa sijaitsee myös painovoiman mittauspiste (Ahola ym. 2008).

Tuorlan nykyinen asema on verkon tasaisuuden kannalta huonossa paikassa, minkä vuoksi se korvataan Evon seudulle rakennettavalla GNSS 3 -asemalla. Hyvä sijoituspaikka on esimerkiksi Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitoksen Evon tutkimusasema. GNSS 4 on Kannuksen seudulle rakennettava kokonaan uusi asema, jolle hyvä sijoituspaikka olisi esimerkiksi Metlan Kannuksen toimintayksikkö. Oulun nykyisen aseman viereen ei saa rakennettua uutta asemaa korkean puuston ja kallion vähyyden takia (Koivula 2009e). Niinpä se korvataan Muhoksen seudulle rakennettavalla GNSS 5 -asemalla. Hyvä vaihtoehto on sijoittaa asema esimerkiksi Metlan Muhoksen toimintayksikön yhteyteen.

GNSS 6–9 ovat uusia asemia, jotka parantavat verkon kattavuutta ja geometriaa. GNSS 6 rakennetaan Tornion tai Kemin seudulle sopivaan paikkaan. GNSS 7 tulee Kolarin seudulle, esimerkiksi Metlan Kolarin toimintayksikön yhteyteen. GNSS 8 tulee lähelle Venäjän rajaa Tulppion kylän seudulle. Sijoitusvaihtoehtoja ovat esimerkiksi Helsingin yliopiston Värriön tutkimusasema tai Ainijärven rajavartioasema. Värriön tutkimusaseman ongelma on saavutettavuus, se sijaitsee Värriön luonnonpuistossa, ja lähimmälle tielle on matkaa kahdeksan kilometriä. GNSS 9 rakennetaan Kilpisjärven ympäristöön, esimerkiksi Helsingin yliopiston Kilpisjärven biologisen aseman yhteyteen.

Kevon nykyisen aseman ongelma on sitä ympäröivän luonnonpuiston korkea puusto (Koivula 2009e). Jos uuden aseman rakentaminen vanhan viereen on puuston puolesta mahdollista, kannattaa näin menetellä, mutta muussa tapauksessa vanhan aseman korvaava uusi GNSS 10 -asema sijoitetaan pohjoisemmaksi Utsjoen seudulle. Hyvä vaihtoehto on perustaa asema esimerkiksi RKTL:n Tenojoen kalantutkimusaseman yhteyteen, Utsjoen ja Tenojoen risteyskohtaan.

5.2 Asemapaikan valinta

Kaikilla uusilla havaintoasemilla tulee olla antennista katsoen vapaa horisontti ja mahdollisimman vähän esteitä viiden asteen korkeuskulman yläpuolella. 15°:n yläpuolella näkyvyyden tulisi olla esteetön. Paikkaa valittaessa tulee olla tiedossa, että potentiaalisia esteitä kuten korkeaa puustoa, rakennuksia tai muita rakennelmia ei myöskään lähitulevaisuudessa nouse haittaamaan näkyvyyttä.

Kaikki uudet GNSS-asetat suositellaan ankkuroitavaksi suoraan peruskallioon. Yhtenäinen ja ehjä graniittikallio tarjoaa parhaan mahdollisen perustan antennialustan kiinnitykselle. Riippuen valitusta antennialustatyypistä kallion ei välttämättä tarvitse olla näkyvissä maan pinnalla, vaan se voi alkaa vasta esimerkiksi 0,5 metrin syvyydestä.

Jos asemaa ei ole mahdollista rakentaa kalliolle, mikäli kallion koostumuksesta tai kunnosta on epäilyksiä, tai jos kalliota todennäköisesti löytyy syvemmältä maan sisästä, on alueella suositeltavaa tehdä pohjatutkimuksia. Tämä tarkoittaa koekairausten suorittamista asianmukaisella laitteistolla. Kairaustuloksista nähdään maakerrosten koostumus ja voidaan selvittää ehjän kalliopinnan syvyys sijainti. Käytettäessä syvälle poraamalla tuettua antennialustaa, voidaan ehjän kalliopinnan sijainnin perusteella ratkaista kuinka syvälle alustan jalat tulee porata, jotta ne on ankkuroitu tukevasti kallioon.

Uuden GNSS-verkon Sodankylän aseman kannalta on huomionarvoista, että Geodeettinen laitos on teettänyt Lapin ympäristökeskuksella kesällä 2003 Sodankylän asemapaikalla koekairauksen, josta selviää maaperän koostumus (Koivula 2009e). Maa on kolmen metrin syvyyteen asti tiukkaa kivistä moreenia, jonka jälkeen on kuuden metrin syvyyteen ulottuvaa rikkonaista kalliota. Tämän jälkeen alkaa yli 50 metriin ulottuva kiintokallio. Tämä maaperä on hyvä esimerkki kohteesta, johon syvälle poraamalla tuettu antennialusta soveltuu erinomaisesti ja takaa vakaan perustan antennille.

Lopullinen asemapaikka valitaan maastokäyntien perusteella. Näiden yhteydessä potentiaalisella asemapaikalla suositellaan 48–72 tunnin mittaisen testimittauksen suorittamista, jolla kartoitetaan paikan mahdollisia monitieheijastusten lähteitä ja radiotaajuusympäristöä. Testimittaus tulee suorittaa mahdollisuuksien mukaan samanlaisella laitteistolla, kuin uusille pysyville asemillekin on tulossa. Antenni voidaan pystyttää kolmijalkojen varaan. Jos paikka vaikuttaa mittaustulosten valossa huonolta, sen käyttöä ei suositella.

Antennialustan välittömässä ympäristössä ei saa olla potentiaalisia monitieheijastusten lähteitä. Yksikerroksisten rakennusten (mukaan lukien aseman laitesuoja) tulee olla vähintään 15 metrin etäisyydellä ja tätä korkeampien vielä selkeästi kauempana. Kaikki ylimääräiset metalli- ja sähkölaitteet, kuten säähavaintoasemat, tulisi myös pitää riittävän etäällä antennialustasta. Mikäli mahdollista, kilometrin säteellä asemasta ei saisi sijaita mitään merkittäviä TV-, radio- tai mikroaaltolähetystorneja.

Havaintoaseman ympäristön fyysisiä muutoksia suositellaan seurattavaksi säännöllisesti, esimerkiksi muutamien vuosien välein laserkeilaamalla tehtävän 3D-mallin avulla. Ensimmäinen malli tulee laatia ennen aseman toiminnan aloittamista. Aseman maapohjan omistus- tai käyttöoikeus tulee varmistaa mahdollisimman pitkälle tulevaisuuteen, esimerkiksi pitkän vuokrasopimuksen avulla.

5.3 Asema

5.3.1 Antennialusta

Uuden GNSS-verkon antennialustoiksi suositellaan ensisijaisesti poraamalla tuettuja antennialustoja (DDBM ja SDBM). Perustelut ovat yksinkertaiset: nämä alustatyypit takaavat parhaan mahdollisen vakauden ja kestävyuden pitkällä aikavälillä.

Antennialustat suositellaan aina ankkuroitaviksi ehjään peruskallioon. Suositeltava antennikorkeus on 1,5–2,5 metriä.

Syvälle poraamalla tuettu antennialusta (DDBM) on näistä kahdesta vielä todennäköisesti tukevampi. Sen rakentaminen on suositeltavaa olosuhteiden niin salliessa. Ankkuroimalla alustan jalat yli 10 metrin syvyyteen kallioon, saavutetaan äärimmäisen tukeva rakenne ja pitkäikäinen antennialusta. DDBM:n rakentaminen on kuitenkin kallista, aikaa vievää, haastavaa ja sen ympäristövaikutus on suhteellisen suuri. Täten matalalle poraamalla tuettu antennialusta (SDBM) voi olla monessa tapauksessa parempi. Poraamalla alustan jalat jo kahdenkin metrin syvyyteen kallioon, on antennialusta erittäin tukeva ja pitkäikäinen. SDBM:n poraamisessa voi olla hyvä ratkaisu käyttää tela-alustaista kallioporakonetta. Molempien alustatyyppien metallijalat suositellaan lämpölaajenemisen vähentämiseksi eristämään suoralta auringonvalolta jalkojen ympärille asennettavien muoviputkien avulla. Putket tulee kiinnittää jalkoihin siten, että muovin ja metallin väliin jää riittävä ilmarako.

Jos antennialusta joudutaan rakentamaan paikkaan, jossa ei ehjää kalliota ole tai se alkaa vasta syvemmältä, suositellaan ehdottomasti käytettäväksi syvälle poraamalla tuettua antennialustaa. Tällaisissa maaperissä DDBM on tukevin mahdollinen ratkaisu.



Kuva 34. Esimerkki hyvästä havaintoasemapaikasta ja SDBM:lle sopivasta kohteesta. Ehjä kallio, vapaa horisontti, eikä signaalien kulkuun vaikuttavia rakennelmia ole näkyvissä. Kuvan suojakupu on SCIGN Tall Radome. (UNAVCO Facility.)

Poraamalla tuettujen antennialustojen suurimmat ongelmat ovat todennäköiset rajoitukset antennikorkeudessa ja kohtalaisen suuri metallin määrä. Yli kahden metrin antennikorkeudet voivat olla haastavia toteuttaa – ainakaan käytössä olevia korkeita alustoja ei muualta maailmasta helposti löydy. Jos havaintoasema edellyttää korkeaa antennialustaa ympäröivän puuston tai muiden esteiden takia, suositellaan antennialustaksi kallioon ankkuroitua perinteistä teräsvahvisteista betonipilaria. Tällä ratkaisulla saavutetaan vakaa alusta pienemmällä määrällä metallia. Betonipilari on suositeltava vaihtoehto myös normaalin antennikorkeuden tapauksessa silloin, jos poraamalla tuetun antennialustan metallirakenteella katsotaan olevan liian suuri vaikutus antennin sähköisiin ominaisuuksiin. Lämpölaajenemisen vähentämiseksi betonipilari tulee eristää suoralta auringonpaisteelta pilaria ympäröivän muovisylinterin avulla. Sylinterin ja pilarin väliin jätetään riittävä ilmarako eristyksen turvaamiseksi.

Jos betonipilarinkaan korkeusvara ei riitä, on todella korkea vaihtoehto kallioon perustettu invarstabiloitu teräsristikkomasto. Korkean teräsristikkomaston käyttöä ei kuitenkaan suositella, vaan aseman paikka tulee valita siten, että tätä mastoa ei tarvita.

Antenni suositellaan kiinnitettäväksi antennialustaan UNAVCON käyttämän SCIGN-kohdistimen avulla. Kohdistin tarjoaa vakaan kiinnityksen, jonka lisäksi antennikokonaisuus on mahdollista irroittaa esimerkiksi uutta kalibrointia varten ja palauttaa takaisin täsmälleen samaan asentoon.

5.3.2 Laitteisto

Uudessa GNSS-verkossa suositellaan käytettäväksi tasokkaita *all in view* -vastaanottimia, joissa on riittävästi kanavia ja valmiudet kaikkien GNSS-signaalien vastaanottamiseen. Yhtenäisyyden vuoksi kaikilla asemilla tulee olla samanlainen vastaanotin.

Antenneiksi suositellaan choke ring -antenneja, joilla on mahdollista vastaanottaa kaikkia nykyisiä ja tulevia GNSS-signaaleja. Kaikkien antennien päälle suositellaan asennettavaksi lumen kasaantumista estävä mahdollisimman tasaisesti valmistettu puolipallon muotoinen suojakupu. Sekä antennin että suojakuvun suositellaan olevan IGS:lle entuudestaan tuttuja. Antennien ja suojakupujen tulee olla kaikilla asemilla identtisiä. Ennen käyttöönottoa jokaiselle antenni- ja suojakupu -parille suositellaan tehtäväksi yksilöllinen absoluuttikalibrointi tunnetussa laboratorioissa. Antenni- ja suojakupu -parissa pitkällä aikavälillä tapahtuvien muutosten seuraamiseksi suositellaan testiaseman rakentamista. Testiaseman laitteisto voidaan säännöllisesti irroittaa uutta absoluuttikalibrointia varten. Myös varsinaisten asemien antenni ja suojakupu -parien säännöllistä seurantakalibrointia tulee harkita.

Antennit on asennuksen yhteydessä suunnattava tarkasti maantieteelliseen pohjoiseen, koska antennien kalibrointitulokset esitetään aina maantieteellisen pohjoisen suhteen. Suunta voidaan määrittää esimerkiksi kahden kojeaseman GPS-havaintojen avulla, joista saadaan selville atsimuutti, eli kulma maantieteelliseen pohjoiseen nähden. Tämän avulla määritetään pysyvän aseman antennin pohjoissuunta takymetria käyttäen. Pohjoissuunnan määrittäminen kompassin avulla ei ole tarkoitukseen riittävän tarkka menetelmä.

Varsinaisten GNSS-laitteiden lisäksi kaikilla asemilla tulee olla mahdollisuus absoluuttisen painovoiman mittaukseen. Aseman laitesuojassa tai muussa tarkoitukseen soveltuvassa tilassa tulee olla painovoimamittaukseen tarkoitettu noin 1 x 1 metrin kokoinen suoraan peruskallioon perustettu betonipilari, joka on irti rakennuksen muista perustuksista. Kaikilla asemilla tulee olla laajakaistatason luotettavat datayhteydet, jotka mahdollistavat tulevaisuudessa entistä tiheämmät tiedonsiirrot ja havaintovälit. Lisäksi kaikille asemille suositellaan rakennettavaksi ukkossuojajärjestelmät, jotka estävät laitteiden vahingoittumisen salamaniskuissa antennialustaan tai lähiympäristöön.

5.3.3 Seurantamittaukset

Kaikilla asemilla suositellaan tehtäväksi säännöllisiä antennialustan vakauden seurantamittauksia EPLA-menetelmän avulla. Seuranta varten antennialustojen ympärille pitää rakentaa noin kolmesta kuuteen pysyvää kiintopistettä, jotka soveltuvat EPLA-mittausten tarkkojen tähtäyksien kohteeksi. Kiintopisteet voivat olla myös vakaita kiinnitysmekanismeja, joihin asennetaan seurantamittausten ajaksi prismat, aina samaan asentoon. EPLA-mittausten toteuttamiseksi Geodeettisen laitoksen tulee hankkia mittakaavajana ja tarvittavat ohjelmistot (Koivula 2009e).

Kiinteitä tähyksiä pitää rakentaa myös antennialustaan. Poraamalla tuettuihin alustoihin voi olla mahdollista kehittää piikkimäisiä tähyksiä, jotka hitsataan kiinni alustan jalkoihin tai kulmarautatukiin. Pelkkien tähysten sijasta voidaan myös alustaan rakentaa kiinnitysmekanismit, joihin asennetaan mittausten ajaksi erilliset tähykset. Jotta tähykset eivät ole säiden vaikutuksen armoilla, voidaan niiden suojaksi kehittää jonkinlainen suojakupu tai -huppu.

6 Yhteenveto

GNSS:ien tekninen kehitys kulkee vauhdilla eteenpäin, ja seuraavien viiden vuoden kuluessa satelliittipaikannuksessa on ennakoitavissa suuria mullistuksia. Käyttäjien ulottuville tulee uusia taajuuksia ja signaaleja, jotka parantavat, nopeuttavat ja helpottavat mittauksia merkittävästi. Kansallista koordinaattijärjestelmää ylläpitävän GNSS-verkon on pystyttävä vastaamaan uudistusten synnyttämiin haasteisiin. Sen on kyettävä tarjoamaan Suomessa operoiville käyttäjille koordinaatiston ylin luokka, joka kattaa koko maan tasaisesti ja havaitsee samoja GNSS-signaaleja käyttäjien kanssa.

Yleissilmäys GNSS-uudistusten aikatauluihin ja uusiin havaintosuureisiin on nyt luotu, ja sitä voidaan käyttää hyödyksi suunniteltaessa FinnRef-verkon uudistusta. Vaikka vanhan FinnRefin antennialustojen ja antennien käytössä sellaisenaan myös uudessa verkossa on hyviä puolia, ei se tämän tutkimuksen perusteella ole suositeltavaa. Kaikille asemille tulee rakentaa uudet antennialustat ja niihin tulee asentaa uudet antenni- ja suojakupu -parit. Tämä takaa uusien signaalien luotettavan vastaanottamisen. Yhtä tärkeää on hyvän yhteyden säilyttäminen vanhaan FinnRefiin ja sitä kautta EUREF-FINIin. Tämä toteutetaan käyttämällä verkkoja rinnakkain mahdollisimman pitkään. Yhteyden vuoksi on myös tärkeää sijoittaa osa uusista asemista vanhojen välittömään läheisyyteen. Tätä on suositeltu esimerkiksi verkon kaikkien IGS- ja EPN-asemien kohdalla.

Yksi tämän työn suurimmista ongelmista on suositellun antennialustatyypin valinta. Maailmalla ja eri organisaatioilla on käytössä useita erilaisia pysyvien GNSS-asemien antennialustoja, joista monet ovat erittäin varteenotettavia vaihtoehtoja myös Suomeen. Työssä suositeltujen poraamalla tuettujen antennialustojen rakentamisesta ei Pohjoismaissa ole kokemusta, ja prosessi vaikuttaa etukäteen haastavalta. Kyseisten alustatyypien rakentaminen uuden verkon asemille vaatii jatkossa lisätutkimuksia.

Työhön on pyritty kokoamaan tärkeää tietoa IGS:n, EPN:n, UNAVCON ja muiden organisaatioiden suosituksista pysyville GNSS-asetuille. Tietoja tullaan hyödyntämään

uuden GNSS-verkon suunnittelussa. Painopisteinä olivat antennialustat ja antennikonaisuudet, joista molemmista on nyt tarjolla hyvä yleiskuva tulevaisuuden päätöksiä varten.

Luvussa 5 esitetty suositus uuden GNSS-verkon asemien sijoittelusta on teoreettinen suunnitelma, jossa on otettu monia tärkeitä seikkoja huomioon. Käytännössä tilanne ei kuitenkaan ole näin helppo. Monet ehdotetuista asemapaikoista saattavat yhteydenottojen ja maastokäyntien jälkeen osoittautua kohteiksi, joihin ei pysyvää GNSS-asemaa voi rakentaa. Tätä ongelmaa ei kuitenkaan ennen maastokäyntejä kyetä poistamaan. Siitä huolimatta työn 18 asemaa käsittävä verkko on realistinen suositus, jota voidaan hyödyntää lopullista verkkoa suunniteltaessa.

Lähteet

Ahola Joel, Koivula Hannu, Poutanen Markku, Jokela Jorma. 2008. GPS Operations at Olkiluoto, Kivetty and Romuvaara in 2007. Working report 2008-35. Posiva Oy.

Anderson Roy, Chin Miranda, Cline Michael, Hoar Dennis, Murray Orland, William Stone. 2000. National Continuously Operating Reference Station (National CORS) Site Monumentation. Final Report. Process Action Team 20. (WWW-dokumentti.) <http://facility.unavco.org/project_support/permanent/monumentation/CORS_Monumentation.pdf> 20.12.2000. Luettu 4.3.2009.

Braun J., Meertens C., Ruud O., Stephens B. 1997. The Effect of Antenna Covers On GPS Baseline Solutions. (WWW-dokumentti.) UNAVCO Facility. <http://facility.unavco.org/science_tech/dev_test/publications/dome_report/domeX5Freport-1.html> 17.6.1997. Luettu 24.3.2009.

Combrinck W. L., Schmidt M. 1998. (WWW-dokumentti.) Position Paper. Physical Site Specifications: Geodetic Site Monumentation. (WWW-dokumentti.) <http://www.hartrao.ac.za/geodesy/SITE_MON.HTM> IGS Network Systems Workshop, Annapolis. 2.-5.11.1998. Luettu 4.3.2009.

Daylife. Kuva: Engineers work on the GLONASS M space satellite. (WWW-dokumentti.) <<http://www.daylife.com/photo/03LA6sG8xReVc>> Luettu 2.4.2009.

Dzurisin Dan. 1999. Yellowstone Continuous GPS Network. (WWW-dokumentti.) <http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Yellowstone/Monitoring/GPSNetwork/yellowstone_gps_network.html> Lokakuu 1999. Luettu 14.3.2009.

EPN. 2008. EUREF-Permanent Network. (WWW-dokumentti.) <<http://www.epncb.oma.be/>> 27.8.2008. Luettu 2.2.2009

Essentials for Anchored/Braced Monuments. (WWW-dokumentti.) <http://pfostrain.ucsd.edu/gpsmon/monument_design/needs_monument.html> Luettu 5.4.2009.

Feature - How to build up a constellation of 30 navigation satellites. (WWW-dokumentti.) European Space Agency. <http://www.esa.int/esaNA/ESAAZZ6708D_galileo_0.html> Päivitetty 17.7.2007. Luettu 11.2.2009

Full deployment and operations. (WWW-dokumentti.) European Space Agency. <http://www.esa.int/esaNA/SEMF5OZCU8E_galileo_0.html> 2009. Luettu 12.2.2009

Galileo Specifications. (WWW-dokumentti.) European Space Agency. <http://www.esa.int/esaNA/SEMTHVXEM4E_galileo_0.html> Päivitetty 16.8.2007. Luettu 16.2.2009.

Geodeettinen laitos. Suomen pysyvä GPS-verkko FinnRef[®]. (WWW-dokumentti.)
<<http://www.fgi.fi/asemat/gps.php>> Luettu 16.1.2009.

Gibbons Glen. 2007. All Things GPS: Interview with Col. David Madden, the New GPS Wing Commander. Inside GNSS, July/August 2007. (WWW-dokumentti.)
<<http://www.insidegnss.com/node/154>> Luettu 18.2.2009.

Gibbons Glen. 2008. Lockheed Martin Wins GPS IIIA Contract. Inside GNSS, May/June 2008. (WWW-dokumentti.) <<http://www.insidegnss.com/node/681>>
Päivitetty 16.5.2008. Luettu 25.2.2009.

GLONASS-konstellaatio. (WWW-dokumentti.) Russian Space Agency.
<<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=202:20:2438364123430213128::NO>>
9.2.2009. Luettu 9.2.2009.

GNSS Modernization. (WWW-dokumentti.) UNAVCO.
<http://facility.unavco.org/science_tech/gnss_modernization.html>
Päivitetty 9.1.2009. Luettu 9.2.2009.

Guidelines for EPN Stations & Operational Centres. (WWW-dokumentti.) EPN Central Bureau. <http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_station_operationalcentre.pdf> Päivitetty 15.5.2007. Luettu 24.2.2009.

Guidelines for New and Existing Continuously Operating Reference Stations (CORS). (WWW-dokumentti.) National Geodetic Survey. <http://geodesy.noaa.gov/PUBS_LIB/CORS_guidelines.pdf> Päivitetty 2/2006. Luettu 29.3.2009.

Hofmann-Wellenhof Bernhard, Lichtenegger Herbert, Wasle Elmar. 2008.
GNSS - Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo, and more.
Wien: SpringerWienNewYork.

IGS. 2009. Kuva IGS-asemista. (WWW-dokumentti.) <http://igscb.jpl.nasa.gov/images/maps/all_world_clean.png> 31.3.2009. Luettu 1.4.2009.

IGS Electronic Mail. 2009. (Automaattinen sähköposti.) [IGSMAIL-5928]: L5 signal transmissions to begin 10 April. 6.10.2009.

IGS Site Guidelines. (WWW-dokumentti.) IGS Central Bureau, Jet Propulsion Lab/Caltech. <<http://igscb.jpl.nasa.gov/network/guidelines/guidelines.pdf>> Päivitetty 25.7.2007. Luettu 24.3.2009.

IGS Station: tlse. Kuva: Site photo. (WWW-dokumentti.)
<<http://igscb.jpl.nasa.gov/network/site/tlse.html>> 30.4.2009. Luettu 31.4.2009.

IGS Tracking Network. 2009. Monumentation Design and Implementation Recommendations. (WWW-dokumentti.) <<http://igscb.jpl.nasa.gov/network/monumentation.html>> Päivitetty 9.3.2009. Luettu 10.3.2009.

Information - Analytical Centre. 2009. GLONASS constellation status. (WWW-dokumentti.) <<http://www.glonassianc.rsa.ru/pls/htmldb/fp=202:20:146371627362318-01312::NO>> Päivitetty 21.4.2009. Luettu 21.4.2009.

InsideGNSS. 2009. China Aerospace Official Says Compass/Beidou Will Be Complete by 2015. (WWW-dokumentti.) <<http://www.insidegnss.com/node/1152>> 19.1.2009. Luettu 26.2.2009.

Jokela Jorma. 2007. ITRS, ITRF, ETRS, ETRF, EUREF – Uusia koordinaattijärjestelmiä ym. asiaan liittyvää. Geodesian kurssin luentomoniste (WWW-dokumentti.) Helsingin yliopisto. <http://www.geo.physics.helsinki.fi/old/kurs-sit/53511Geodesia.lec/lectures/Luento_070419.pdf> Luettu 2.2.2009.

Koivula Hannu. Kuvat 3, 4, 29 ja 30 ovat Hannu Koivulan ottamia ja hän on antanut ne tähän työhön käytettäväksi. Kuvaushetkien ajankohdat eivät ole tiedossa.

Koivula Hannu. 2004. The effects of antenna electric centre and multipath on GPS measurement and their minimization. Geodesian seminaariesitelmä. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Geodesian laboratorio.

Koivula Hannu. 2006. Implementation and Prospects for Use of a High Precision Geodetic GPS Monitoring Network (FinnRef) Covering Finland. Lisenciate Thesis. Espoo: Helsinki University of Technology.

Koivula Hannu. 2009. Erikoistutkija, Geodeettinen laitos. Kirkkonummi. Keskustelu 3.2.2009.

Koivula Hannu. 2009 (b). Erikoistutkija, Geodeettinen laitos. Kirkkonummi. Keskustelu 26.2.2009.

Koivula Hannu. 2009 (c). Erikoistutkija, Geodeettinen laitos. Kirkkonummi. Keskustelu 9.3.2009.

Koivula Hannu. 2009 (d). Erikoistutkija, Geodeettinen laitos. Kirkkonummi. Keskustelu 18.3.2009.

Koivula Hannu. 2009 (e). Erikoistutkija, Geodeettinen laitos. Kirkkonummi. Keskustelu 7.4.2009.

Kukko Antero. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin. Fotogrammetrian erikoistyö. (WWW-dokumentti.) Teknillinen korkeakoulu. <http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Antero_Kukko/Laserkeilaimen_valinta_lahifotogrammetrisiin_mittauksiin.pdf> Lokakuu 2005. Luettu 29.4.2009.

Los Angeles Air Force Base. 2008. Global Positioning System Fact Sheet. (WWW-dokumentti.) <<http://www.losangeles.af.mil/library/factsheets/factsheet.asp?id=5325>> Päivitetty 09/2008. Luettu 21.2.2009.

Menge Falko, Schmitz Martin. 2001. AOAD/M_T Choke Ring GPS Antenna. Absolute Phase Center Variations. Results of Absolute PCV Field Calibrations at IfE and Geo++ ®. (WWW-dokumentti.) <http://www.geopp.de/media/docs/AOA_DM_T/index.html> 17.5.2001. Luettu 29.4.2009.

Morujó D. B., Mendes V. B. 2008. Investigation of Instantaneous Carrier Phase Ambiguity Resolution with the GPS/Galileo Combination using the General Ambiguity Serch Criterion. Journal of Global Positioning Systems, Vol. 7, No. 1: s. 35-45.

Ollikainen Matti, Koivula Hannu, Poutanen Markku, Ruizhi Chen. 1997. Suomen kiinteiden GPS-asemien verkko. Geodeettinen laitos. Tiedote 16.

Ollikainen Matti, Poutanen Markku, Koivula Hannu. 1998. Koordinaatit siirtyvät euroaikaan. Artikkelit Maanmittaus-aikakausikirjassa Nro 1-2 1998. Meripaino Oy.

Ollikainen Matti, Koivula Hannu, Poutanen Markku. 2001. EUREF-FIN-koordinaatisto ja EUREF-pistetihennykset Suomessa. Geodeettinen laitos. Tiedote 24.

Paunonen Matti. 1992. Height-stabilised 20-metre antenna mounting system of the CIGNET GPS station at Metsähovi. 7th International symposium on Geodesy and Physics of the Earth, 5.-10.10.1992, Potsdam.

Poutanen Markku. Kuva: choke ring -antenni.

Poutanen Markku. 1998. GPS-paikanmäärittäminen. Hämeenlinna: Karisto Oy.

Revnivikh Sergey. 2006. GLONASS Status Update. (WWW-dokumentti.) <<http://www.navcen.uscg.gov/cgsic/meetings/46thMeeting/51%20Glonass%20Update%2046.pdf>> 26.9.2006. Luettu 9.2.2009.

Russian Global Positioning Satellites. 2006. (WWW-dokumentti.) Space today online. <<http://www.spacetoday.org/Satellites/GLONASS.html>> Luettu 9.2.2009.

Schmidt M., Dragert H., Hill W., Courtier N. 2000. New GPS monument design for permanent GPS installations in the Western Canada Deformation Array. (WWW-dokumentti.) <http://gsc.nrcan.gc.ca/geodyn/wcda/gpsmon_e.php#tphp> 12.-14.7.2000. Luettu 4.3.2009.

SCIGN Radome Project. (WWW-dokumentti.) <<http://pasadena.wr.usgs.gov/scign/group/dome/>> Päivitetty 31.3.2009. Luettu 3.5.2009.

Shaw Michael. 2005. GPS: A Policy and Modernization Review. (WWW-dokumentti.) <pnt.gov/public/2005/2005-12-ICG/2-Policy-Modernization.ppt> 1.-2.12.2005. Luettu 21.2.2009.

Solarnavigator.net. 2008. Kuva: Satellite constellation. (WWW-dokumentti.) <http://www.solarnavigator.net/global_positioning_system.htm> Luettu 30.3.2009.

Team Nirvana's Query. 2009. Kuva: gps-constellation-of-satellites. (WWW-dokumentti.) <<http://teamnirvana.com/blog/how-and-when-to-use-gps-tracking-a-small-guide-to-know-more.html>> Luettu 23.2.2009.

UNAVCO Facility. Kuva: NAMA Station in Saudi Arabia. (WWW-dokumentti.) <http://facility.unavco.org/lib/image_gallery/point75aspect_ratio_images/perm_namas_he.jpg> Luettu 3.5.2009.

UNAVCO Facility. 2005. Permanent GPS Stations - Reconnaissance Guidelines. (WWW-dokumentti.) <http://facility.unavco.org/project_support/permanent/reconnaissance/reconnaissance.html> Päivitetty 17.11.2005. Luettu 12.3.2009.

UNAVCO Facility. 2005 (b). Permanent GPS Stations - Monumentation - Pillar Type Monument. (WWW-dokumentti.) <http://facility.unavco.org/project_support/permanent/monumentation/pillar.html> Päivitetty 17.11.2005. Luettu 14.3.2009

UNAVCO Facility. 2007. Permanent GPS Stations - Antenna Mounts - SCIGN Mount. (WWW-dokumentti.) <http://facility.unavco.org/project_support/permanent/equipment/mounts/scignmount.html> Päivitetty 10.8.2007. Luettu 6.4.2009.

UNAVCO Facility. 2009. Permanent GPS Stations - Monumentation - Deep Drilled Braced Monument. (WWW-dokumentti.) <http://facility.unavco.org/project_support/permanent/monumentation/deepdrilled.html> Luettu 13.3.2009.

UNAVCO Facility. 2009 (b). Permanent GPS Stations - Monumentation - Short Drilled Braced Monument. (WWW-dokumentti.) <http://facility.unavco.org/project_support/permanent/monumentation/sdbm.html> Luettu 14.3.2009

UNAVCO Facility. 2009 (c). Permanent GPS Stations - GPS Antennas. (WWW-dokumentti.) <http://facility.unavco.org/project_support/permanent/equipment/antennas/antennas.html> Päivitetty 3.3.2009. Luettu 27.3.2009.

USNO (United States Naval Observatory). 2009 (a). Current GPS Constellation. (WWW-dokumentti.) <<http://tycho.usno.navy.mil/gpscurr.html>> Luettu 20.2.2009

USNO (United States Naval Observatory). 2009 (b). Block II Satellite Information. (WWW-dokumentti.) <<ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt>> Päivitetty 7.1.2009. Luettu 18.2.2009.

Valtanen Esko. 2007. Tekniikan taulukkirja. 14. painos. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy.

Ympäristö ja luonnonvarat -konsortio: toimintasuunnitelma vuosille 2009–2011. 23.1.2009. Geodeettisen laitoksen Intranet.