

# **Liikenneilmailun GNSS-signaalihäiriöt ja toimintavarmuuden takaaminen**

Liikenneilmailun GNSS-signaalia häiritsevät tekijät Suomen ja EU:n alueella sekä liikenneilmailun kyky toimia häiriöistä huolimatta.

Tietotekniikan tutkinto-ohjelma  
Tietotekniikan laitos, Teknillinen tiedekunta  
TkK-tutkielma

Laatija:  
Angelina Pellinen

Joulukuu 2025

**TkK-tutkielma**  
**Tietotekniikan laitos, Teknillinen tiedekunta**  
**Turun yliopisto**

**Tutkinto-ohjelma:** Tietotekniikka

**Tekijä:** Angelina Pellinen

**Otsikko:** Liikenneilmailun GNSS-signaalihäiriöt ja toimintavarmuuden takaaminen

**Sivumäärä:** 25 sivua

**Päivämäärä:** Joulukuu 2025

Satelliittipohjaiset navigointijärjestelmät ovat kehityksensä myötä nousseet lentoliikenteen tärkeimmäksi navigointimenetelmäksi. Vuoden 2022 aikana Suomessa kuitenkin havaittiin runsain määrin häiriöitä lentoliikenteen navigointisignaalin ja havaintojen määrä on siitä lähtien vuosittain kasvanut radikaalisti. Häiriöiden myötä lentoliikenteessä on jouduttu turvautumaan vaihtoehtoihin navigointitekniikoihin ja -menetelmiin. Tämän tutkielma tavoitteena on perehtyä siihen, mitkä tekijät aiheuttavat häiriöitä kaupallisen lentoliikenteen eli liikenneilmailun GNSS-signaaliin Suomen ja EU:n alueella. Tavoitteena on myös analysoida, millaisia vaihtoehtoisia navigointitekniikoita voidaan käyttää liikenneilmailun toimintavarmuuden takaamiseksi. Aihe on saanut häiriöiden lisääntyessä runsaasti mediahuomiota, ja tutkielman tarkoitus on kerätä yhteen teknistä tietoa aiheesta ja luoda kokonaisvaltainen kuva nykyisestä tilanteesta.

Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena IEEE- ja ScienceDirect-tietokantojen kirjalliseen materiaaliin sekä viranomais selvityksiin. Tutkielman tuloksina saatiin, että liikenneilmailun GNSS-signaaliin aiheutuu häiriöitä tahallisen häirinnän ja harhautuksen sekä signaalin kulkuun vaikuttavien ilmiöiden ja laitevikojen seurauksena. Tuloksista voidaan päätellä, että GNSS-signaali on hyvin häiriöaltista, mikä vaikuttaa liikenneilmailun operointiin heikentävästi. Liikenneilmailun toimintavarmuuden analysoinnin perusteella selvisi, että häiriöiden vaikutuksia voidaan lieventää vastaanotinteknologian ja tukijärjestelmien avulla. Tilanteissa, jossa GNSS-paikannus ei ole ollenkaan käytössä voidaan liikenneilmailun toiminta taata toissijaisilla navigointilaitteilla, joita ovat konventionaaliset sekä lentokoneen omiin laitteisiin perustuvat navigointijärjestelmät. Tutkielman tulosten pohjalta GNSS-signaalihäiriöt eivät aiheuta välitöntä vaaraa liikenneilmailulle. Häiriöiden määrän odotetaan tulevaisuudessa kuitenkin kasvavan ja toimenpiteeksi ehdotetaan signaalin kryptografisen suojauksen ja autentikoinnin toteuttamista kaikissa alajärjestelmissä. Koko GNSS-järjestelmän päivittäminen uuden ja turvallisemman teknologian käyttöön on välttämätöntä häiriönsiedon kasvattamiseksi ja tulevaisuuden toimintavarmuuden takaamiseksi.

**Asiasanat:** liikenneilmailu, satelliittipaikannus, GNSS-signaalihäiriöt, radiotaajuushäirintä, harhautus, tukijärjestelmät, konventionaaliset navigointilaitteet

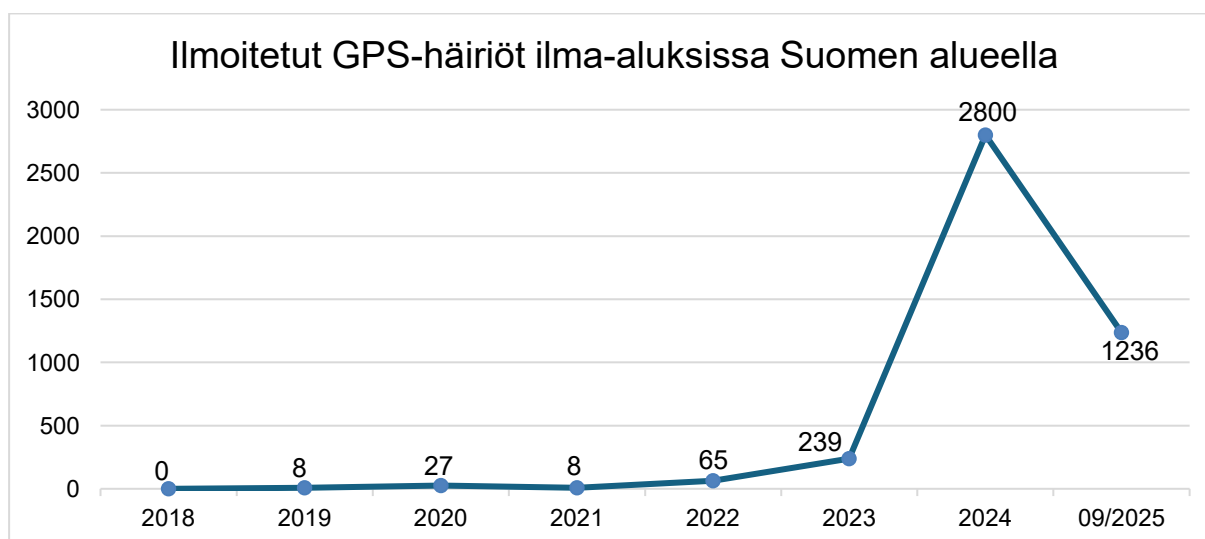
# Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GNSS-toimintaperiaate ja käyttö liikenneilmailussa</b>	<b>4</b>
2.1	GNSS-alajärjestelmät	6
2.2	GNSS:n käyttö liikenneilmailussa	8
<b>3</b>	<b>Häiriölähteet liikenneilmailun GNSS-signaalissa</b>	<b>10</b>
3.1	Tahallinen häiriö	11
3.1.1	Signaalin häirintä	11
3.1.2	Signaalin harhautus	12
3.2	Tahaton häiriö	13
3.3	Häiriöiden havaitseminen	15
<b>4</b>	<b>Liikenneilmailun toimintavarmuuden takaaminen</b>	<b>17</b>
4.1	GNSS-datan virheenkorjaus ja täydentävät tukijärjestelmät	18
4.2	Häiriönsietokyvyn kasvattaminen	20
4.3	Muut navigointilaitteet ja -menetelmät	22
<b>5</b>	<b>Pohdintaa ja yhteenveto</b>	<b>24</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>26</b>

# 1 Johdanto

GNSS (engl. Global Navigation Satellite System) tarkoittaa maailmanlaajuisista satelliittipohjaista paikannusjärjestelmää, jota käytetään navigointiin sekä tarkan ajan määrittämiseen (ICAO, 2023)<sup>1</sup>. Järjestelmä otettiin käyttöön maailmanlaajuisesti siviili-ilmailun navigointimenetelmänä 1990-luvun puolessa välissä, kun alun perin armeijoiden käyttöön suunnitellut, yhdysvaltalainen GPS- sekä venäläinen GLONASS-järjestelmä saavuttivat täyden maailmanlaajuisen kattavuuden (Teunissen & Montenbruck, 2017). GNSS on yläkäsite satelliittipaikannusjärjestelmille ja niiden lisälaitteille, joista maailmanlaajuisesti operatiivisia GPS- ja GLONASS-järjestelmien lisäksi ovat kiinalainen BeiDou ja Euroopan Unionin Galileo. GNSS:n käyttö on merkittävä apuväline lentoliikenteelle, sillä se tarjoaa globaalilla tasolla tarkan ja jatkuvat tiedon käyttäjänsä nopeudesta sekä kolmiulotteisesta sijainnista (ICAO, 2023).

GNSS:n käyttö on muodostunut nykypäivän ilmailussa niin vakiintuneeksi tavaksi navigoida, että perinteisten navigointijärjestelmien käytöstä oltiin osittain jo luopumassa. Vuoden 2022 aikana Suomessa kuitenkin havaittiin runsain määrin häiriöitä lentoliikenteen GNSS-signaalissa ja niiden määrä on kasvanut vuosittain räjähdysmäisesti, kuten kaaviosta 1 on nähtävissä. Häiriöiden määrän kasvun myötä siirtymää kohti pelkän GNSS-järjestelmän varassa navigointia on harkittu uudelleen (Traficom, 2021).



Kuva 1. Traficomille ilmoitettujen GPS-häiriöiden määrä Suomen alueen ilmailussa vuoden 2025 syyskuun loppuun mennessä. Raportoinnin kriteereitä tarkennettiin 1.5.2024 alkaen häiriöiden yleistymisen seurauksena (Traficom, 2024a, 2025a).

<sup>1</sup> ICAO, International Civil Aviation Organization

Tutkielma rajattiin käsittelemään koko lentoliikenteen sijaan kaupallista ilmakuljetusta, tarkemmin liikenneilmailua, joka käsittää kaupallisen, matkustajia, rahtia tai postia kuljettavan lentoliikenteen (Kielitoimiston sanakirja, 2024). Lisäksi tutkielma on rajattu maantieteellisesti Suomen ja EU:n alueelle, jotta tilannekuvaan voidaan pureutua konkreettisemmin.

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää, mitkä tekijät aiheuttavat häiriötä liikenneilmailun GNSS-signaaliin, millaisia vaikutuksia häiriöt aiheuttavat ja mitä vaihtoehtoisia tekniikoita ja tukijärjestelmiä GNSS-navigoinnille on saatavilla. Tavoitteena on luoda kokonaisvaltainen kuva Suomen ja EU:n alueella vallitsevasta tilanteesta häiriöiden ja liikenneilmailun toimintavarmuuden takaamisen näkökulmasta. Tämän tutkielman tutkimuskysymykset ovat:

TK 1: Mitkä tekijät aiheuttavat häiriötä liikenneilmailun GNSS-signaaliin?

TK 2: Miten liikenneilmailun toimintavarmuus taataan häiriöistä huolimatta?

Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena aihetta käsitteleviin tieteellisiin julkaisuihin, ajankohtaisiin viranomais selvityksiin sekä teknisiin raportteihin. Tieteellistä aineistoa on haettu pääasiassa IEEE Xplore- ja ScienceDirect-tietokannoista. Hakulauseina häiriötä käsittelevien julkaisujen etsinnässä käytettiin ("GNSS" AND "Radio Frequency Interference" AND "aviation"), ("GNSS" AND ("jamming" OR "spoofing")) ja ("GNSS" AND ("unintentional interference" OR "natural interference")) ja liikenneilmailun toimintavarmuuden arvioinnissa ("GNSS" AND ("augmentation systems" OR " navigational aids") AND "aviation") ja ("GNSS" AND ("jamming" OR "spoofing") AND "mitigation"). Tieteellisen aineiston rajauksessa käytettiin aikaväliä 2017–2025, sillä Beidou ja Galileo ovat tulleet vasta kyseisiin aikavälin sisällä operatiivisiksi. GNSS-häiriöt ovat muodostuneet Suomen ja EU:n alueella merkittäväksi haasteeksi vasta viime vuosien kuluessa ja myös tästä syystä tutkielmassa pyritään painottamaan tuoreita lähteitä. Viranomais selvityksiä sekä teknisiä raportteja käytettiin kohdentamaan tutkielman analysointia Suomen ja EU:n alueelle. Lisäksi teknisen taustan tueksi käytettiin Kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön (engl. International Civil Aviation Organization, ICAO) standardeja ja suosituksia. Traficom toimii Suomessa vastuuviranomaisena GNSS:n liittyvissä asioissa ja tämän takia myös Traficom in julkaisuja ja tiedotteita käytetään lähteinä. Monipuolisen lähteiden käytön tavoitteena on luoda kokonaisvaltainen kuva aihealueesta ja ajankohtaisesta tilanteesta.

Tutkielman luvussa kaksi avataan GNSS-navigoinnin teknisiä tietoja ja luodaan peruskäsitys siitä, miten kyseinen teknologia toimii liikenneilmailun näkökulmasta. Luvussa esitellään GNSS:n maailmanlaajuisesti operatiivisten alajärjestelmien teknisiä ominaisuuksia sekä paikannustarkkuutta. Luvussa käydään läpi myös millaisia käyttökohteita sekä suoritusvaatimuksia GNSS-navigoinnilla on liikenneilmailussa. Luvussa kolme puolestaan tarkastellaan GNSS-järjestelmän häiriönsietokykyä ja sitä, mitkä tekijät aiheuttavat häiriöitä liikenneilmailun navigointisignaaliin. Luvussa perehdytään siihen, miten häiriöt syntyvät ja esitellään lyhyesti, miten häiriöitä voidaan havaita. Kolmannessa luvussa vastataan ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Neljännessä luvussa käydään läpi GNSS-signaalin virheenkorjausta ja perehdytään GNSS-järjestelmää täydentäviin tukijärjestelmiin. Luvussa analysoidaan myös liikenneilmailun häiriönsietokyvyn kasvattamista sekä tutustutaan toissijaisiin navigointilaitteisiin ja -menetelmiin. Neljännessä luvussa vastataan toiseen tutkimuskysymykseen. Luvussa viisi esitellään pohdintoja satelliittipohjaisen paikannuksen tulevaisuudennäkymistä sekä häiriöiden määrän kehityssuunnasta. Viidennessä luvussa on myös yhteenveto ja johtopäätökset tutkielman tuloksista.

## 2 GNSS-toimintaperiaate ja käyttö liikenneilmailussa

GNSS-paikannus perustuu Maata noin 20 000 kilometrin korkeudella kiertävien paikannussatelliittien lähettämään tarkkaan tuloaikasignaaliin. Paikannussatelliitti sisältää atomikellon, jonka avulla satelliitti pysyy tarkassa referenssiajassa. Myös vastaanottajalaitteessa on oltava tarkka kello, jotta sijainti saadaan laskettua. Satelliitin lähettämä signaali sisältää ajan lisäksi tiedon satelliitin sijainnista sen kiertoradalla. Käyttäjän sijainnin määrittäminen tapahtuu mittaamalla aika, joka kuluu satelliitin lähettämän signaalin saapumiseen käyttäjän vastaanottimeen. Signaali kulkee optimaalisessa tilanteessa valonnopeudella ja kun tiedossa on myös etenemisaika, saadaan tulona satelliitin ja vastaanottajan välinen etäisyys. Kun vastaava signaali on saatu neljästä eri satelliitista, joiden tarkka sijainti on tiedossa, vastaanotin pystyy ratkaisemaan kolmiulotteisen sijaintinsa ja kellopoikkeaman sisäisen järjestelmän ajasta (Kaplan & Hegarty, 2017). Lentokoneet vastaanottavat navigointisignaalia vähintään kahdelta eri GNSS-alajärjestelmästä ja laskevat järjestelmän aikaeron muuttujana satelliitin ilmoittaman järjestelmäajan sijaan (ICAO, 2023).

GNSS-alajärjestelmien toiminta voidaan jakaa kolmeen segmenttiin, jotka ovat avaruus-, maa- ja käyttäjäsegmentti (Teunissen & Montenbruck, 2017). Avaruussegmentti koostuu tyypillisesti 24–31 satelliitista, jotka sijaitsevat eri kehillä Maan kiertoradalla muodostaen kunkin järjestelmän ydinryhmittymän (Kaplan & Hegarty, 2017). Satelliitit jakautuvat tasaisesti ympäri Maan kiertorataa, mikä takaa navigointipalvelun maailmanlaajuisen kattavuuden. GNSS-järjestelmissä navigointisignaalin lähettämiseen käytetään kolmea erityyppistä satelliittia, joita ovat geostationaariset (engl. Geosynchronous Earth Orbit, GEO), kaltevan geostationaarisen radan (engl. Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) sekä keskikorkean kiertoradan (engl. Medium Earth Orbit, MEO) satelliitit. Tutkielmassa käsiteltävistä GNSS-alajärjestelmistä vain BeiDou käyttää kaikkia kolmea satelliittityyppiä, muut vain MEO-tyypin satelliitteja. MEO-satelliitit mahdollistavat paikannusjärjestelmän toimimisen maailmanlaajuisesti (Teunissen & Montenbruck, 2017).

GNSS-radiosignaalin rakenne koostuu kolmesta suureesta: kantoaallostasta, näennäisetäisyydestä (engl. Pseudo Range) ja navigointiviestistä. Kantoaalto on sinimuotoinen signaali, joka kuljettaa tietoa tietyllä taajuudella sähkömagneettisena aaltona. Näennäisetäisyys tarkoittaa PRN-binäärikoodatuista (engl. Pseudo Random Noise Coded) signaaleista määritettyä etäisyyttä, jonka perusteella vastaanotin laskee signaalin etenemisajan ja oman sijaintinsa (Morales-Ferre ym., 2020). PRN-koodattujen signaalien ansioista GNSS-järjestelmä toimii

liikenneilmailussa passiivisena järjestelmänä eli satelliitti ainoastaan lähettää signaalia ja käyttäjä vain vastaanottaa sitä. Passiivisen vastaanottamisen ansiosta paikannusjärjestelmää voi samanaikaisesti käyttää rajaton määrä käyttäjiä (Kaplan & Hegarty, 2017).

Navigointiviesti sisältää puolestaan tietoa satelliitin kunnosta, rata- ja kelloparametreista ja muista mahdollisista paikannustarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä (Morales-Ferre ym., 2020).

Maasegmenttiin kuuluu satelliittien kuntoa monitoroivat ja ylläpitävät asemat, joita on sijoitettu ympäri maailmaa. Maa-asemien tehtävänä on esimerkiksi analysoida satelliittien eheyttä ja kellontarkkuutta, tarvittaessa lähettää korjausdataa tai aktivoida varasatelliitteja. Maa-asemat ovat avainasemassa satelliittien sijaintitiedon ylläpitämisessä. Maa-asemista käytetään myös GPS:n tapauksessa nimitystä kontrolliasemat (Kaplan & Hegarty, 2017; Teunissen & Montenbruck, 2017).

Käyttäjäsegmentti muodostuu kaikista paikannusjärjestelmää käyttävistä laitteista ja järjestelmistä, mikä tutkielmassa tarkoittaa lentokoneiden vastaanottimia. Käyttäjäsegmentin vastaanottimien tehtävä on prosessoida satelliiteista vastaanotetut signaalit ja laskea niiden avulla sijainti, aika ja nopeus eli PVT-tiedot (engl. Position, Velocity and Time data). Vastaanottimet sisältävät yleensä antennin, vastaanottimen RF-etuosan eli signaalia muokkaavan piirin, prosessorin, I/O-laitteen kuten näytön, ja virtalähteen. Modernit vastaanottimet pystyvät hyödyntämään useaa eri satelliittipaikannusjärjestelmää sijainnin, nopeuden sekä kellonajan määrittämiseen eli ne eivät ole rajoittuneita vain tietyn alajärjestelmän palveluihin (Kaplan & Hegarty, 2017). Monen järjestelmän rinnakkainen käyttö mahdollistaa luotettavamman ja tarkemman navigoinnin sekä parantaa palveluiden saatavuutta maailmanlaajuisesti.

Pelkät GNSS-järjestelmän paikannussatelliitit eivät kuitenkaan tarjoa tarpeeksi tarkkaa paikannustietoa, jotta niitä voitaisiin yksinään käyttää liikenneilmailun tarkkaa sijaintia vaativiin tehtäviin (Sabatini ym., 2017). Tätä varten satelliittien tueksi on kehitetty tukijärjestelmät (engl. augmentation systems), jotka voidaan jakaa satelliitti-, maa- ja lentokonepohjaisiin tukijärjestelmiin (ICAO, 2023). Järjestelmien tehtävänä on esimerkiksi seurata satelliittien signaalien laatua ja lähettää korjaavaa dataa (Teunissen & Montenbruck, 2017). Tukijärjestelmiä ja muita GNSS-järjestelmää täydentäviä teknologioita käsitellään tarkemmin luvussa neljä.

## 2.1 GNSS-alajärjestelmät

**GPS**-järjestelmän (engl. Global Positioning System) kehitys aloitettiin 1970-luvulla tarkoituksena suunnitella luotettava paikannusjärjestelmä ensisijaisesti Yhdysvaltain armeijan käyttöön. Järjestelmän saavutettua täyden operatiivisuuden vuonna 1995, se vapautettiin asteittain kansainväliseen käyttöön (Kaplan & Hegarty, 2017). GPS-järjestelmän ydinryhmittymä koostuu 24 MEO-satelliitista. Satelliitit jakautuvat neljälle Maata kiertävälle radalle, jonka ne kiertävät noin 12 tunnissa (GPS, ei pvm.).

GPS-järjestelmä lähettää paikannussignaalia L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.6 MHz) ja L5 (1176.45 MHz) kantotaajuuksilla. Jokainen satelliitti lähettää vähintään kahta PRN-koodattua signaalia. L1- ja L2-taajuuksilla lähetetään salattua P(Y)-koodia viranomais- ja armeijakäyttöön, josta käytetään nimitystä PPS eli Precise Positioning Service. L1-taajuudella lähetetään lisäksi C/A-koodia siviilikäyttöön, nimellä SPS eli Standard Positioning Service. Molemmat koodit moduloidaan kantotaajuuteen ja lähetetään käyttäjille (National Coordination Office, 2020; Teunissen & Montenbruck, 2017). GPS-järjestelmän paikannustarkkuus on 95 % ajasta keskimäärin 8 metriä horisontaalisesti ja 13 metriä vertikaalisesti ilman tukijärjestelmiä (ICAO, 2023).

Myös venäläinen **GLONASS** (ven. Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema) kehitettiin ensin maan armeijan käyttöön, mutta otettiin kansainväliseen lentoliikenteen käyttöön sen tullessa täysin operatiiviseksi vuonna 1995. Täysin vapaaseen siviilinnavigointikäyttöön järjestelmä otettiin vuonna 2007 (Teunissen & Montenbruck, 2017). GLONASS-järjestelmän ydinryhmittymä muodostuu 24 operatiivisesta satelliitista, jotka jakautuvat kolmelle Maata kiertävälle kehälle. Satelliitit sijaitsevat noin 19 000 kilometrin korkeudessa ja kiertävät Maan noin 11 tunnissa (GLONASS, ei pvm.).

Uusimmat satelliitit lähettävät siviilikäyttöön L1-taajuista signaalia, josta L1OF-tyyppi käyttää taajuusjakoista moniliittymätekniikkaa (engl. Frequency Division Multiple Access, FDMA), joka erottelee satelliittien signaalit toisistaan eri taajuuksien avulla. L1OC taas käyttää avointa koodijakokanavointisignaalia (engl. Code Division Multiple Access, CDMA), joka erottelee signaalit toisistaan yksilöllisen koodimodulaation avulla, kuten muissa alajärjestelmissä. L3-taajuudella (1202.025 MHz) myös siviilikäyttöön lähetettävä L3OC-tyypin signaali käyttää vain CDMA moduloitua signaalia (ICAO, 2023; Kaplan & Hegarty, 2017). Viranomaiskäyttöön salattua signaalia lähetetään L1- sekä L2-taajuuksilta (IAC PNT,

2020). GLONASS-järjestelmän avoimen palvelun paikannustarkkuus on 95 % ajasta keskimäärin 5 metriä horisontaalisesti ja 9 metriä vertikaalisesti (ICAO, 2023).

**BeiDou**-järjestelmän (engl. BeiDou Navigation Satellite System) kehitys aloitettiin vuonna 1994 ja kolmivaiheisen kehityspolun myötä se saavutti maailmanlaajuisen operatiivisuuden vuonna 2020, jolloin se otettiin myös kansainväliseen käyttöön. Muista järjestelmistä poiketen, BeiDou toiminnallinen ydinryhmittymä eli BDS-3 koostuu kolmesta GEO-, kolmesta IGSO- ja 24 MEO-satelliitista (Magsi ym., 2023). BeiDou tarjoaa Kiinan ja sen lähialueilla RDSS-palvelun (engl. Radiodetermination Satellite Service), joka mahdollistaa tarkemman paikannuksen, viranomaisten SMS-kommunikoin ja tarkan ajan määrittämisen geostationaaristen satelliittien avulla. RDSS mahdollistaa myös kahdensuuntaisen kommunikaation, jossa vastaanotin lähettää tietoa sijainnistaan takaisin satelliitille (Teunissen & Montenbruck, 2017). Tällaista menetelmää käytetään esimerkiksi etsintä- ja pelastusoperaatioissa. Järjestelmä tarjoaa kuitenkin muiden tapaan avoimen paikannuspalvelun kansainväliseen siviilikäyttöön sekä varmennetun ja salatun signaalin viranomaiskäyttöön (Kaplan & Hegarty, 2017).

BeiDou-järjestelmän kantotaajuudet ovat B1 (1561.098 Hz), B1C (1575.42 Hz), B2 (1207.140 Hz), B2a (1176.45 Hz) ja B3 (1268.52 Hz) (Wang & He, 2023). BeiDou-järjestelmä lähettää avoimeen siviilikäyttöön B1, B1C ja B2a kantotaajuisia signaaleja, ja ne käyttävät CDMA-metodia. Paikannustarkkuus on 95 % ajasta seitsemän päivän mittausajalla keskimäärin 9 metriä horisontaalisesti ja 15 metriä vertikaalisesti ilman tukijärjestelmiä (ICAO, 2023).

Eurooppalainen **Galileo**-järjestelmä on muista järjestelmistä poiketen täysin siviilien hallinnoima. Järjestelmän kehitys aloitettiin vuonna 2003 tarkoituksena taata EU:n huoltovarmuus ja riippumattomuus muiden maiden ensisijaisesti armeijankäyttöön suunnitelluista satelliittipaikannusjärjestelmistä (Mänttari & Vihavainen, 2021). Järjestelmän ylläpito ja jatkokehitys jakautuu kolmelle eri taholle: Euroopan komissio toimii omistajana ja rakennuttajana, Euroopan avaruusjärjestö (ESA) vastaa teknisestä suunnittelusta sekä tutkimus- ja kehitystyöstä, ja Euroopan unionin avaruusohjelmavirasto (EUSPA) huolehtii järjestelmän hallinnoinnista. Galileo-järjestelmä avattiin maailmanlaajuiseen käyttöön joulukuussa 2016, jolloin se siirtyi IOC-vaiheeseen (engl. Initial Operational Capability)(Kaplan & Hegarty, 2017; Mänttari & Vihavainen, 2021). Järjestelmän

toiminnallinen ydinryhmittymä koostuu 24 MEO-satelliitista, jotka ovat jakautuneet kolmelle kiertoradalle (European Union, 2023).

Galileo-järjestelmä lähettää navigointisignaalia taajuuksilla E1 (1575.420 MHz), E5 (1191.795 MHz), E5a (1176.450 MHz), E5b (1207.140 MHz) ja E6 (1278.750 MHz), ja se tarjoaa käyttäjilleen näillä taajuuksilla viittä erityyppistä palvelua, joita ovat avoin palvelu (OS), tarkkuuspalvelu (HAS), todennuspalvelut (OS-NMA ja CAS), maailmanlaajuisen pelastuspalvelun tuki (SAR) ja viranomaispalvelu (PRS) (European Union, 2023; Mänttari & Vihavainen, 2021).

Avoin palvelu tuottaa kaikille avoimen ja ilmaisen maailmanlaajuisen sijainti- ja aikatiedon muiden alajärjestelmien kaltaisesti. Avointa signaalia lähetetään E1 ja E5a/b taajuuksilla, jotka käyttävät CDMA-metodia. Liikenneilmailu käyttää E1 tai E5a signaalia, mikäli käytössä on yksitaajuusvastaanotin ja näiden yhdistelmää, jos käytössä on kaksitaajuusvastaanotin (European Union, 2023; ICAO, 2023). Galileo-järjestelmän avoimen signaalin paikannustarkkuus on 95 % ajasta keskimäärin 5 metriä horisontaalisesti ja 8 metriä vertikaalisesti 30 päivän mittausajalla (ICAO, 2023).

## **2.2 GNSS:n käyttö liikenneilmailussa**

GNSS-paikannusta käytetään liikenneilmailussa esimerkiksi reittisuunnistuksessa, lentokenttien lähestymisessä ja laskeutumisessa sekä lähdöissä (Traficom, 2021). GNSS-pohjainen navigointi on mahdollistanut myös lennonaikaisen ilmatilan valvonnan, jonka avulla lennonjohdolla on reaaliaikainen tieto lentokoneiden sijainnista (Teunissen & Montenbruck, 2017).

Lentoliikenteen määrän lisääntyessä muun muassa ilmatilan kapasiteetti ja lentojen tehokkuus ovat muodostuneet haasteeksi. Ratkaisuksi tähän ICAO on laatinut maailmanlaajuisen, GNSS-pohjaisia aluesuunnistusmenetelmiä (engl. Area Navigation, RNAV) ja suunnistustarkkuusvaatimuksia (engl. Required Navigation Performance, RNP) yhdenmukaistavan PBN-konseptin (engl. Performance Based Navigation). PBN:n eli suorituskykyyn perustuvan navigointikonseptin tarkoituksena on käytännössä siirtyä pois konventionaalisten navigointilaitteiden käytöstä GNSS-pohjaisen navigoinnin varaan. Tämä aiheuttaa kuitenkin sen, että kentille, joilla käytetään pelkästään GNSS-pohjaisia laitteita ei pysty laskeutumaan, jos tietyt suoritusvaatimukset eivät esimerkiksi häiriötilanteessa täyty (Traficom, 2021).

Aluesuunnistusmenetelmät ja suunnistustarkkuusvaatimukset muodostavat yhdessä navigaatioespesifikaatiot, jotka määrittävät tietyn ilmatilan navigoinnin suoritusvaatimukset. Suoritusvaatimukset liittyvät signaalin tarkkuuteen ja eheyteen sekä paikannuspalvelun jatkuvuuteen ja saatavuuteen (ICAO, 2023). Tarkkuusvaatimus määrittää rajat paikannusvirheen todennäköisyydelle. Tarkkuutta kuvataan 95 prosentin todennäköisyytenä jokaista yksittäistä otosta kohden, sillä GNSS paikannusvirheet voivat muuttua nopeallakin aikavälillä. Eheys kuvaa puolestaan järjestelmän todenmukaisuutta ja luotettavuutta. Navigointijärjestelmän on kyettävä varoittamaan käyttäjiänsä reaaliajassa havaituista virheistä (ICAO, 2023).

Paikannuspalvelun jatkuvuus tarkoittaa järjestelmän kykyä tuottaa paikannuspalvelua tietyllä tarkkuudella ilman keskeytyksiä lennon ja laskeutumisen aikana. Palvelun saatavuus taas viittaa aikaan, jolloin paikannustieto tietyllä tarkkuudella, eheydellä sekä saatavuudella on käytettävissä. Vaatimukset saatavuudelle voivat vaihdella esimerkiksi liikenteen määrän, muiden navigointimenetelmien tai maantieteellisen sijainnin mukaan (ICAO, 2023).

### 3 Häiriölähteet liikenneilmailun GNSS-signaalissa

Liikenneilmailun määrän kasvaessa vuosi vuodelta, turvallisuus on noussut yhdeksi liikenneilmailun tärkeimmistä prioriteeteista. GNSS-signaaliin pohjautuvat navigointi- ja viestintäjärjestelmät ovat olleet keskeisessä roolissa tämän edistämässä. Liikenneilmailun käyttämä GNSS-signaali kuitenkin sietää häiriöitä hyvin huonosti, mikä toisaalta tuo mukanaan omat riskinsä (Teunissen & Montenbruck, 2017). Häiriölähteiden tunnistaminen on ensiaskel kohti niihin puuttumista ja siksi myös oleellinen osa liikenneilmailun turvallisuuden kehittämistä.

Yksi syy heikolle häiriönsiedolle on signaalin alhainen teho sen saavuttua Maahan. Tämä johtuu muun muassa pitkästä välimatkasta satelliitin ja vastaanottimen välillä sekä ilmakehän rakenteesta (Steiner & Lukes, 2022; Teunissen & Montenbruck, 2017). Haavoittuvuudelle altistavat lisäksi signaalin avoin rakenne ja ennustettavat signaalin ominaisuudet. GNSS-alajärjestelmien käyttämät signaalirakenteet ja kiertoradan ominaisuudet ovat hyvin dokumentoitu ja julkisesti saatavilla, mikä mahdollistaa väärennettyjen ja harhauttavien signaalien tuottamisen hyökkäystarkoituksiin. Myös järjestelmien (pl. Galileo) avointen palveluiden autentikoinnin puute kasvattaa GNSS-järjestelmän hyökkäyspinta-alaa (Noah & Elmusrati, 2025). Häiriönsieto voi riippua myös yksittäisen lentokoneen tekniikasta ja vastaanotinarkkitehtuurista (Felix ym., 2024).

Häiriöt voivat parhaimmillaan olla lieviä ja suodatettavissa pois automaattisella korjauslaskelmalla, mutta pahimmillaan ne kasvattavat riskiä vakavaan onnettomuuteen. Häiriö navigointitiedossa voi johtaa esimerkiksi virheellisiin tai puuttuviin törmäyshälytyksiin tai lentokoneen ajautumiseen pois reitiltään, jolloin pahimmassa tapauksessa seurauksena voi olla jopa yhteentörmäys toisen koneen kanssa (Felix ym., 2025). Osa lentokentistä Suomessa on täysin riippuvaisia GNSS-pohjaisista palveluista, joten GNSS-häiriöt aiheuttavat myös rahallista sekä ajallista tappiota kun lentoja joudutaan perumaan ja kenttiä sulkemaan (Saajasto ym., 2024).

Häiriöistä aiheutuvia haittoja on useita ja niin on häiriötekijöitäkin. Häiriöt voidaan karkeasti jakaa kahteen ryhmään: tahattomiin ja tahallisiin häiriöihin. Tässä luvussa perehdytään näihin häiriötekijöihin tarkemmin ja vastataan ensimmäiseen tutkimuskysymykseen.

### 3.1 Tahallinen häiriö

Tahallisia häiriöitä kutsutaan radiotaajuushäiriöiksi ja ne voidaan jakaa edelleen kahteen ryhmään: signaalin häirintään (engl. jamming) ja harhautukseen (engl. spoofing) (Wu ym., 2020). Syyt liikenneilmailun tahallisen häirinnän taustalla ovat yleensä rikolliset tavoitteet tai toisen valtion kiusanteko (Felix ym., 2025). GNSS-signaalin tahallinen häirintä ja harhautus on kielletty EU-tasolla, ja havaitut häiriöt pyritään selvittämään ja poistamaan (Kaasalainen ym., 2021; Traficom, 2021).

#### 3.1.1 Signaalin häirintä

Signaalin häirintä perustuu alkuperäisen signaaliin peittämiseen joko kokonaan suuremman tehon signaalilla tai osittain heikommalla signaalilla, jota lähetetään samalle tai lähes samalle taajuudelle kuin alkuperäistä signaalia. Häirintähyökkäyksen vaikutukset vaihtelevat signaalin voimakkuuden ja hyökkäyksen teknillisen toteutuksen mukaan. Heikompi häirintäsignaali vääristää lasketun sijainnin ja aikatiedon tarkkuutta heikentämällä vastaanottimen signaali-koinasuhdetta (engl. signal-to-noise ratio) (Radoš ym., 2024; Saajasto ym., 2024).

Heikomman häirintäsignaalin takana voi olla esimerkiksi pienet, autoon sijoitettavat ”jammerit” jotka lentokentän lähistöllä ollessa tuottavat häiriötä GNSS-signaaliin (Saajasto ym., 2024). Voimakkaamman häirintäsignaalin tuottamiseen tarvitaan sotilastason laitteita, joilla kyetään häiritsemään signaalia suurella alueella ja estämään vastaanottimen kyky ylläpitää yhteyttä satelliitteihin. Tällöin vastaanotin ei kykene vastaanottamaan radioliikennettä ollenkaan (Kaasalainen ym., 2021; Radoš ym., 2024; Saajasto ym., 2024). Heikko häirintäsignaali kykenee häiritsemään lentokonetta sen ollessa maassa tai lähestyessä maata, kun taas voimakkaampi häirintäsignaali kykenee heikentämään tai estämään myös lennonaikaista navigointia (Morales-Ferre ym., 2020; Ostroumov & Kuzmenko, 2022).

Häirintähyökkäys voidaan toteuttaa usealla erilaisella tekniikalla, josta yleisimmät ovat kapea- ja laajakaistahäirintä sekä pulssimuotoinen ja pyyhkivä häirintä (Noah & Elmusrati, 2025). Kapea- ja laajakaistahäirinnässä lähetetään korkealla teholla häiritsevää signaalia GNSS-signaalitaajuuden päälle. Kapeakaistahäirinnässä häirintä kohdistuu vain tiettyihin taajuuksiin, kun taas laajakaista pyrkii estämään isomman siivun GNSS-taajuusalueelta (Noah & Elmusrati, 2025; Radoš ym., 2024). Pulssimuotoinen ja pyyhkivä häirintä aiheuttavat vastaanottimelle suurempaa haittaa, sillä niitä on vaikeampi tunnistaa ja suodattaa pois. Pulssimuotoisessa hyökkäyksessä häirintäsignaalia lähetetään lyhyinä sykäyksinä ja

pyyhkivässä hyökkäyksessä häiriösignaalin kantotaajuus muuttuu ajan kuluessa ja se ikään kuin pyyhkäisee taajuusalueen yli (Noah & Elmusrati, 2025; Radoš ym., 2024).

EU:n alueella liikenneilmailuun vaikuttavaa vahvaa häirintää esiintyy konfliktialueiden läheisyydessä ja Euroopan raja-alueilla. Häirintää käytetään esimerkiksi yhtenä keinona valtion kriittisten toimintojen suojaamisessa (Felix ym., 2024; Saajasto ym., 2024). Heikon tason häirintä on viime vuosina kasvanut nopeaan tahtiin käyttäjänsä sijainnin piilottavien henkilökohtaisten tietosuojalaitteiden (engl. personal privacy device, PPD) yleistyttyä. Heikon tason häirintä voi olla myös tahatonta ja aiheutua esimerkiksi viallisesta radiolaitteesta (Kaasalainen ym., 2021; Saajasto ym., 2024).

### 3.1.2 Signaalin harhautus

Signaalin harhautus on haasteellisempi toteuttaa kuin tavallinen häirintä. GNSS-vastaanottimen harhautuksessa lähetetään signaalirakenteeltaan aidonkaltaista, mutta paikka-, nopeus- tai aikatieoiltaan muokattua signaalia, jonka tarkoituksena on manipuloida häirinnän kohteena oleva vastaanotin määrittämään sijaintinsa väärään paikkaan. Häirintähyökkäyksen kaltaisesti lähetettävä harhautussignaali on teholtaan voimakkaampi kuin todenmukainen satelliitista tuleva signaali (Radoš ym., 2024; Saajasto ym., 2024). Harhautushyökkäys vaatii yksinkertaisen ”jammerin” sijaan edistyneempää laitteistoa sekä perusteellista ymmärrystä GNSS-signaalirakenteesta (Ostroumov & Kuzmenko, 2022).

Harhautushyökkäykset voidaan jaotella niiden teknisen vaativuuden mukaan neljään tasoon (Morales-Ferre ym., 2020; Noah & Elmusrati, 2025). Yksinkertaisen tason häirinnässä hyökkääjä voi esimerkiksi nauhoittaa aitoa GNSS-signaalia ja lähettää sen viiveellä kohdevastaanottimelle hämäten lähes huomaamattomasti laitteen sijaintia ja nopeutta. Keskitason harhautuksessa lähetettävä häiriösignaali voidaan generoida signaaligeneraattorilla, jolloin väärennetylle signaalille voidaan määrittää halutut parametrit (Noah & Elmusrati, 2025). Yksinkertaiset sekä keskitason harhautushyökkäykset eivät useimmiten yksinään onnistu häiritsemään liikenneilmailun lennonaikaista navigointia (Morales-Ferre ym., 2020).

Edistyneemmät harhautushyökkäykset pyrkivät huomaamattomasti ohjaamaan vastaanotinta pois sen todenmukaisesta sijainnista. Tämä onnistuu määrittämällä väärennetylle signaalille sama taajuus ja vaihe kuin aidolle signaalille. Neljäs taso kattaa järjestelmälliset ja laajemman skaalan harhautushyökkäykset, kuten tilanteet, jossa useampaa radiolähetintä hyödyntämällä

saadaan väärennettyä myös vastaanottimen kolmiulotteinen sijainti (Morales-Ferre ym., 2020; Noah & Elmusrati, 2025).

Myös harhautusta esiintyy häirintähyökkäysten tavoin konfliktialueiden läheisyydessä. Harhautus- ja häirintähyökkäyksiä käytetään usein myös tukemaan toisiaan. Varsinkin alemman tason harhautushyökkäykset vaativat ensin signaalin häirintähyökkäyksen heikentämään vastaanottimen toimintaa onnistuakseen (Wu ym., 2020).

### 3.2 Tahaton häiriö

Tahattomat häiriöt GNSS-signaaliin aiheutuvat pääasiassa luonnollisista syistä kuten ilmakehän olosuhteista ja avaruussäästä. Myös vialliset sähkölaitteet voivat aiheuttaa häiriösignaalia (Morales-Ferre ym., 2020). Vaikka tahattomiin häiriölähteisiin ei pysty puuttumaan lainsäädännöllä, niiden vaikutuksia pyritään minimoimaan mallintamalla ja seuraamalla ilmiöiden käyttäytymistä (Kaasalainen ym., 2021). Monen tahattoman häiriölähteen vaikutus liikenneilmailun GNSS-signaaliin on usein pienempi kuin tahallisen häiriölähteen, sillä tahattomat häiriölähteet esiintyvät tavallisesti vain yksittäisellä tai kapealla taajuuskaistalla (Traficom, 2021).

Yksi eniten häiriötä GNSS-signaaliin aiheuttavista tekijöistä on ilmakehän ylin osa ionosfääri. Ionosfääri johtaa hyvin sähköä, sillä se koostuu kaasumolekyyleistä, jotka ovat ionisoituneet auringon UV- ja röntgensäteilyn vaikutuksesta (Ilmatieteen laitos, ei pvm.). Tyypillisesti ionosfääri vääristää signaalia aiheuttaen etäisyysmittausvirhettä, joka voi vaihdella metreistä kymmeneen metriin riippuen signaalin taajuudesta ja varautuneiden hiukkasten määrästä (Kaasalainen ym., 2021). Ionosfäärissä esiintyy kuitenkin signaalille haitallisempi ilmiö, skintillaatio, joka aiheuttaa signaaliin amplitudiin ja vaiheeseen äkillisiä vaihteluja, jotka johtavat signaalin vaimenemiseen usealla taajuuskaistalla. Häiriön näkyy käytännössä heikentyneenä paikannustarkkuutena tai signaalin estymisenä kokonaan. Ionosfäärin ja skintillaation aiheuttamat häiriöt ovat tyypillisempiä Maan pohjois- ja etelänapojen alueella sekä päiväntasaajalla. Myös aurinkomyrskyt voivat katkaista GNSS-palveluiden saatavuuden kokonaan (Guo & Zhong, 2024; Kaasalainen ym., 2021).

Troposfääri eli ilmakehän alin osa aiheuttaa myös GNSS-signaaliin häiriötä vaikkei sen vaikutus olekaan yhtä suuri kuin ionosfäärin (Kaasalainen ym., 2021). Troposfääri aiheuttaa viivettä signaalin etenemiseen, jonka suuruus riippuu kerroksessa tapahtuvista sääilmiöistä. Normaalilla säällä troposfääri vaikutus paikannustarkkuuteen on kuitenkin minimaalinen,

mutta korkeaa paikannustarkkuutta vaativissa tilanteissa sen vaikutus on otettava huomioon (Kaasalainen ym., 2021; Ma ym., 2021).

Ionosfäärin ja troposfäärin lisäksi signaalin monitie-eteneminen (engl. multipath propagation) aiheuttaa häiriöitä signaalin kulkuun (Sabatini ym., 2017). Monitie-etenemisessä signaali heijastuu vastaanottimeen esimerkiksi lentokoneen rungon, rakennuksen seinän tai muun esteen kautta, minkä seurauksena signaalin tulee viiveellä vastaanottimeen. Tämä viive vääristää signaalin parametrejä, kuten kantoaallon vaihetta (Fang ym., 2024; Kaasalainen ym., 2021). Signaalin monitie-eteneminen häiritsee lentokoneen GNSS-navigointia erityisesti matalilla korkeuksilla lentäessä ja sen aiheuttaman paikannusvirheen suuruus riippuu ympäristön heijastuspintojen määrästä (Kaasalainen ym., 2021).

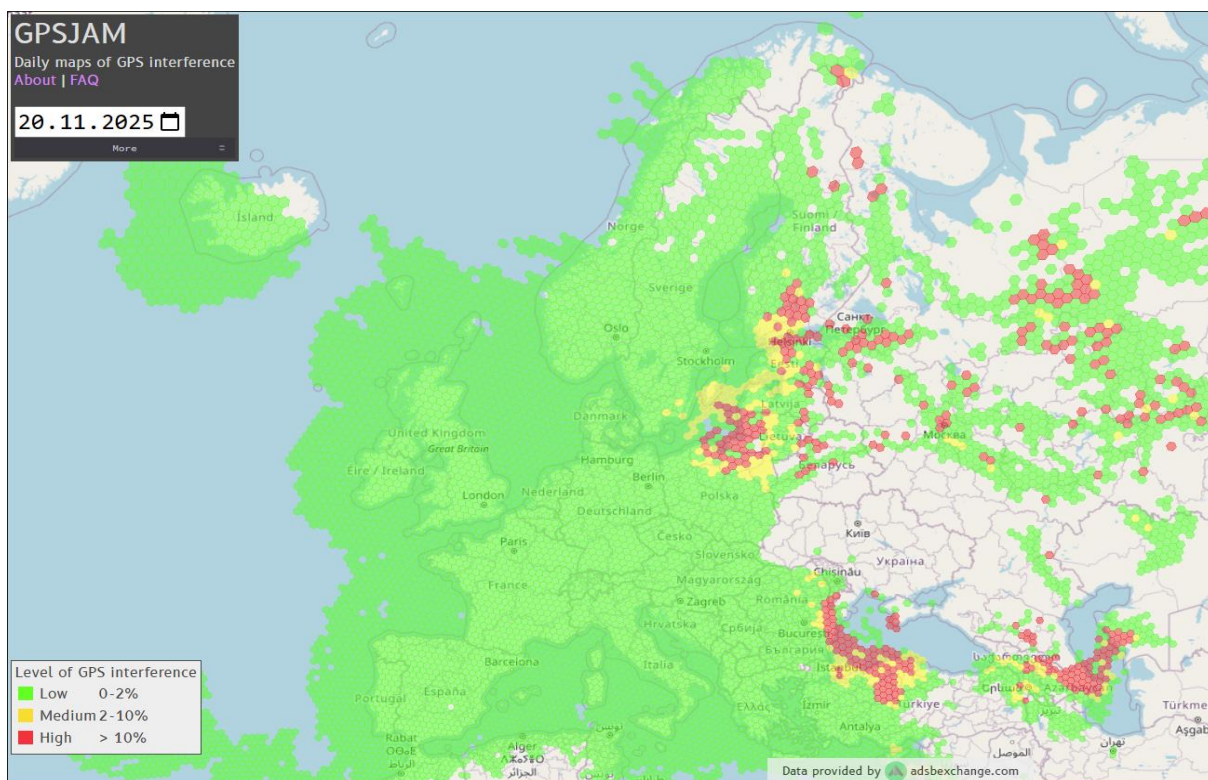
Vastaanottimessa sekä satelliitissa voi esiintyä mallinnusvirheitä, jolloin ne voivat myös itsessään toimia häiriölähteinä (Kaasalainen ym., 2021; Sabatini ym., 2017). Yksi näistä on kellovirhe. Vastaanottimen kvartsikello ei pysy epätarkkuutensa takia samassa ajassa kuin satelliitin atomikello, mikä voi johtaa lasketun sijainnin epätarkkuuteen. Myös satelliitin atomikello voi ajautua pois järjestelmän ajasta, mutta automaattisen korjausdatan lähetyksen ansiosta satelliitin kellovirheen vaikutukset ovat yleensä pienet. Toinen molempia yhdistävä häiriölähde on niiden elektronisten komponenttien kokonaisuus. Jos vastaanotin on suunniteltu huonosti, voi sen muista komponenteista aiheutuva lämpökohina heikentää signaali tarkkuutta. Satelliitin tapauksessa sen elektroninen piiri voi huonon suunnittelun takia aiheuttaa viivettä, mutta tämäkin pyritään huomioimaan korjausdatassa (Sabatini ym., 2017).

Luonnollisten syiden sekä laitevirheiden lisäksi satelliittien kiertoradat vaikuttavat signaalin tarkkuuteen. Tämä haaste esiintyy erityisesti arktisella alueella, sillä satelliittien ratojen inkliinaatiot, eli kaltevuuskulmat päiväntasaajan suhteen, eivät ole riittävän suuria kattaakseen koko arktista aluetta (Kirkko-Jaakkola ym., 2020). Arktisen alueen ilmailulle eniten haasteita aiheutuu tukijärjestelmien käyttämisestä GEO-satelliiteista, jotka eivät ole kallistuneita päiväntasaajan suhteen sijaitessaan juuri sen yläpuolella. Puuttuvan kaltevuuskulman takia nämä satelliitit joko näkyvät pienellä alueella, jolloin esimerkiksi lentokoneen siipi saattaa peittää signaalin, tai jäävät kokonaan paikallisen horisontin alapuolelle (Kirkko-Jaakkola ym., 2020). Aiemmin myös alueellisten tukijärjestelmien monitorointiasemien puute johti Pohjois-Suomessa GNSS-signaalin epätarkkuuteen, mutta tilanne on parantunut vuonna 2024 Kuusamoon rakennetun EGNOS-tukijärjestelmään kuuluvan RIMS-monitorointiaseman

myötä (Maanmittauslaitos, 2024). EGNOS:ia ja monitorointiasemia käsitellään tarkemmin neljännessä luvussa.

### 3.3 Häiriöiden havaitseminen

Suomessa GNSS-signaalin laadun valvonnasta vastaa GNSS-Finland-palvelu, joka perustuu ympäri maata sijoitettuihin FinnRef-mittausasemiin. FinnRef-mittausasemat monitoroivat reaaliajassa GNSS-alajärjestelmien signaalin laadun parametrejä kuten signaalien kantoaalto-kohinasuhdetta ja sijaintitiedon poikkeamaa aseman todelliseen sijaintiin verrattuna (Saajasto ym., 2024). Häiriön ilmetessä palvelu informoi Traficomia, joka vastaa Suomessa häiriöiden selvittämisestä ja tarvittaessa häiriölähteiden poistosta (Kaasalainen ym., 2021; Traficom, 2021). GNSS-Finland-palvelun keräämä data on avoimesti nähtävissä palvelun nettisivuilla ja sen avulla voi tarkastella häiriötilannetta eri mittausasemilla. Myös esimerkiksi GPSJAM-sivuston muodostama GPS/GNSS-häiriökartta kuvassa 2 visualisoi häiriöiden havaitsemista.



Kuva 2. GPSJAM-sivuston häiriökartta 20.11.2025. Kuvasta on nähtävissä GPS-häiriöiden määrä Suomen ja Euroopan alueella kyseisenä päivämääränä. Häiriökartta on muodostettu lentokoneiden lähettämän ADS-B-datan perusteella (GPSJAM, 2025).

GNSS-signaalin häiriölähteitä on useita ja ne voivat esiintyä yhtäaikaaisesti, mikä voi tehdä häiriöiden syyn selvittämisestä haastavaa (Radoš ym., 2024). Häiriöiden havaitsemiseen sekä paikantamiseen on kuitenkin kehitetty eri menetelmiä, jotka riippuvat käsiteltävän häiriön

ominaisuuksista (Rudnik ym., 2025). Tässä alaluvussa käsitellään neljä keskeisintä havaitsemismenetelmää.

Käytetyin signaalinkäsittelyyn perustuva menetelmä on signaalin voimakkuuden seuranta. GNSS-signaali on vastaanottoon saapuessa teholtaan hyvin heikko ja vastaanottimen AGC-osan (engl. Automatic Gain Control) tehtävänä on voimistaa vastaanotetun signaalin tehoa säätämällä vahvistusta suuremmaksi signaalin prosessointia varten. Voimakkaan häiriösignaalin seurauksena AGC säätää vahvistusta kuitenkin pienemmäksi, jolloin tason muutos voidaan tulkita häiriön ilmenemisenä (Morales-Ferre ym., 2020).

Toinen yleisesti käytössä oleva menetelmä on signaalin kantoaalto-kohinasuhteen tarkkailu. Häiriösignaali kasvattaa kohinan tehoa, jolloin myös kantoaalto-kohinasuhde kohoaa. Kantoaalto-kohinasuhteen tarkkailua voidaan käyttää erityisesti harhautushäiriön havaitsemiseen. Harhautushyökkäyksen alussa kantoaalto-kohinasuhteessa esiintyy merkittäviä vaihteluja, joista harhautushyökkäys voidaan tunnistaa. Vaihtelut aiheutuvat harhautussignaalin erivaiheisesta signaalin kantoaallostasta (Rudnik ym., 2025). Myös muita GNSS-signaalin havaintosuureita kuten Doppler-ilmiötä sekä näennäisetäisyyttä analysoimalla voidaan havaita häiriöitä GNSS-signaalissa (Rudnik ym., 2025).

GNSS-järjestelmä tarjoaa paikkatiedon lisäksi myös tiedon käyttäjänsä nopeudesta ja järjestelmän ajasta, ja myös näitä ominaisuuksia voidaan käyttää häiriön havaitsemiseen. Esimerkiksi vertaamalla laskettuja parametreja odotettuihin arvoihin, voidaan signaalista erottaa epä johdonmukaisuuksia, jotka voivat olla merkki harhautuksesta. Myös merkittävä kellon ajautuminen (engl. clock drift) ja poikkeama voivat olla seurausta harhautuksesta (Rudnik ym., 2025).

Ilmatilan valvonnassa käytettävää ADS-B-järjestelmää (engl. Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) voidaan hyödyntää myös häiriöiden havaitsemisessa. ADS-B-järjestelmä perustuu lentokoneen muille lentokoneille ja maa-asemalle lähettämään jatkuvaan sijainti- ja tunnistetietoon. Tiedonsiirto tapahtuu radiosignaalin välityksellä ja se on julkisesti avointa (Ostroumov & Kuzmenko, 2022). Koska ADS-B-järjestelmän lähettämä sijaintitieto perustuu yleensä GNSS-järjestelmän avulla määritettyyn sijaintiin, häiriön ilmetessä myös ADS-B:n tiedoissa esiintyy poikkeavuuksia. Näkyviä muutoksia on havaittavissa esimerkiksi navigoinnin ja valvonnan tarkkuudessa sekä lentoreittidatassa. Jos koneen todellinen sijainti voidaan varmistaa toisesta lähteestä, häiriö voidaan havaita myös vertaamalla todellista sijaintia ADS-B:n lähettämään sijaintiin (Chen ym., 2025).

## 4 Liikenneilmailun toimintavarmuuden takaaminen

Keskeinen kulmakivi Euroopan liikenneilmailun haasteiden selättämisessä ja toimintavarmuuden takaamisessa on Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto EASA:n (engl. European Union Aviation Safety Agency) laatima ilmailun turvallisuusohjelma, jonka pohjalta on tuotettu myös kansallinen versio Suomen ilmailun turvallisuudenhallinnasta. Suomessa turvallisuusohjelman ja siihen kuuluvien turvallisuussuunnitelman sekä turvallisuuden suorituskykytavoitteiden ja -mittareiden toteuttamisesta ja ylläpidosta vastaa Traficom ja niiden tekoon velvoittaa niin ilmailulaki, kuin EU-säädökset ja ICAO. Turvallisuusohjelma kattaa turvallisuuspolitiikan, riskienhallinnan sekä turvallisuuden varmistamisen ja edistämisen osa-alueet, ja se toimii ilmailualan viranomaisten ohjenuorana (Traficom, 2025b).

Turvallisuusohjelman liite 1 eli turvallisuussuunnitelma käsittelee lentoliikenteen turvallisuusriskejä, -toimenpiteitä ja -tavoitteita. GNSS-häiriöt on mainittu yhtenä kaupallisen lentotoiminnan turvallisuusriskinä ja toimenpiteenä ohjeistettu liikenneilmailun organisaatioita määrittämään hyväksyttävä turvallisuustaso sekä toimenpiteet sen saavuttamiseksi (Traficom, 2025c). Turvallisuusohjelman liite 2 eli suorituskykytavoitteiden ja -mittareiden osuus täydentää turvallisuussuunnitelmaa. Riskien arviointiin käytetään kolmitasoista mittaristoa, jossa tason 1 luokitus tarkoittaa vakavia vaaratilanteita tai onnettomuuksia, joita pyritään torjumaan. Taso 2 käsittää puolestaan uhkia, jotka voivat aiheuttaa välitöntä vaaraa ja taso 3 sellaisia tekijöitä, jotka voivat johtaa näiden vaaratilanteiden käynnistymiseen. GNSS-häiriöt on luokiteltu dokumentissa tasolle 3 (Traficom, 2024b).

EASA on julkaissut ilmailun turvallisuusohjelman yhteydessä virallisen turvallisuustiedotteen, jossa ohjeistetaan miten eri ilmailualan toimijoiden tulisi menetellä GNSS-häiriötilanteessa (EASA, 2024). Jo ennen lentoa lähtöä, lentoliikenteen harjoittajan tulisi varmistaa navigoinnin varajärjestelmien toiminta ja ottaa mahdolliset tiedossa olevat häiriöalueet huomioon reittisuunnittelussa. Lennonaikaisten häiriöiden ilmetessä lentoliikenteen harjoittajan tulisi pyrkiä arvioimaan häiriön aiheuttamat operatiiviset riskit ja informoida muuta miehistöä. Myös häiriön tunnistus on tärkeää. Mikäli kyseessä on tahallista häirinnästä johtuva häiriö, tulisi lentokoneen sijainti varmistaa muilla navigoinnin menetelmillä ja raportoida häiriöstä tarkasti lennonjohdolle. Harhautuksen yhteydessä

toimintamalli on sama, lisäyksenä ajan sekä lennonjohdon taajuuksien tarkempi monitorointi ja navigointitarkkuuslaskelmien käyttäminen (EASA, 2024).

Lennonjohdon tehtävä on pyrkiä keräämään mahdollisimman tarkkaa tietoa ilmenneestä häiriöstä ja viestiä siitä eteenpäin viranomaisille. Lennonjohdon tulisi myös informoida muita ilmatilan käyttäjiä esimerkiksi NOTAM-tiedotteen (engl. Notice to Airmen) eli ilmatilan vaara- tai poikkeustilatiedotteen muodossa. Myös kommunikaatio ilma-alusten kanssa ja ilmatilan valvonta on pyrittävä turvaamaan muilla keinoilla (EASA, 2024).

Jotta lentokone voisi häiriötilanteessa laskeutua turvallisesti, on lennonjohdon tarjottava tarkempaa navigointiapua ja lentokoneen käytettävä mahdollisuuksien mukaan perinteisiä maalaatteita suunnistukseen. Tässä luvussa perehdytään tarkemmin liikenneilmailun navigointia täydentäviin järjestelmiin ja teknologioihin sekä vaihtoehtoisiin navigointimenetelmiin liikenneilmailun toimintavarmuuden takaamiseksi. Luvussa vastataan toiseen tutkimuskysymykseen. Tavoitteena on muodostaa kokonaisvaltainen kuva siitä, miten liikenneilmailun turvallinen toiminta voidaan taata GNSS-häiriöistä huolimatta.

#### **4.1 GNSS-datan virheenkorjaus ja täydentävät tukijärjestelmät**

Kuten luvusta 3 on nähtävissä, GNSS-signaalit ovat hyvin häiriöalttiita. Monia häiriöitä pystytään kuitenkin mallintamaan ja niiden perusteella arvioimaan tarvittavat signaalin korjausarvot. Esimerkiksi vastaanottimen PVT-tiedon määrittämisessä käytetyissä näennäisetäisyyden ja kantoaallon vaiheen laskukaavoissa huomioidaan ionosfäärin, troposfäärin ja monitie-etenemisen aiheuttamat viiveet sekä satelliittien ja vastaanottimen kellovirheet. Myös Doppler-ilmiö otetaan huomioon laskukaavoissa (Morales-Ferre ym., 2020; Portelli ym., 2023). Ionosfäärin ja troposfäärin aiheuttamia virheitä voidaan lievittää laskuvaiheessa käyttämällä Saastamoinen-, Klobuchar- ja Galileon tapauksessa NeQuick-G-malleja. Satelliitin kellovirhe voidaan laskea sen lähettämää ratatietoa hyödyntämällä, toisen asteen polynomien avulla. Doppler-ilmiö lasketaan vastaanottimen ja satelliitin välisen liikkeen suhteena signaalin kulun aikana (Portelli ym., 2023). Osan korjausparametreista, kuten tiedon satelliitin kello- ja ratavirheistä vastaanotin saa suoraan satelliitilta, ja osan kuten Doppler-ilmiön ja oman kellovirheensä se laskee itse (Sabatini ym., 2017). Tarkemmat korjausparametrit vastaanotin saa kuitenkin täydentäviltä tukijärjestelmiltä.

Ensimmäisessä luvussa mainitut GNSS-järjestelmän tukijärjestelmät ovat liikenneilmailun navigoinnin kannalta välttämättömiä. Maa-, satelliitti- ja lentokonepohjaisista

tukijärjestelmistä liikenneilmailun näkökulmasta tärkein on satelliittipohjainen tukijärjestelmä eli SBAS (engl. Satellite Based Augmentation System). SBAS koostuu GNSS:n tavoin maa-, satelliitti- ja käyttäjäsegmenteistä. SBAS:in maasegmentti muodostuu ympäri maailmaa sijoitelluista monitorointi- ja referenssiasiemista, jotka seuraavat signaalien laatua ja paikannusvirhettä laskien erotuksen oman todellisen sijainnin ja signaalista laskettavan sijainnin välillä. Asemat tuottavat erilliset korjausparametrit muun muassa satelliitin sijaintitiedosta, kellovirheestä ja ionosfäärin aiheuttamasta viiveestä (ICAO, 2023). Tämä data lähetetään eteenpäin pääasemalle, joka todentaa korjaustiedon ja lähettää sen SBAS:in geostationaarisille satelliiteille. Nämä geostationaariset satelliitit välittävät korkean tarkkuuden signaalin lentokoneiden vastaanottimille, jonka perusteella sijainti voidaan laskea (Sabatini ym., 2017). Virheenkorjauksen lisäksi SBAS:in toinen tärkeä tehtävä on ilmoittaa käyttäjiensä reaaliajassa havaituista järjestelmäongelmista, kuten erilaisista satelliittivioista (Kaasalainen ym., 2021).

SBAS-järjestelmiä on useita ja niiden tuottama tarkennus on käytettävissä niin laajalla kuin paikallisellakin alueella. SBAS-palvelua tuottavat muun muassa yhdysvaltalainen WAAS, EU:n EGNOS, japanilainen MSAS ja intialainen GAGAN. Myös venäläistä SDCM- ja kiinalaista BDSBAS-järjestelmää kehitetään parhaillaan (ICAO, 2023).

Maapohjainen tukijärjestelmä eli GBAS (engl. Ground Based Augmentation System) koostuu vain maa- ja käyttäjäsegmenteistä. GBAS:in maasegmenttiin kuuluu tietyille alueelle kuten lentokentän lähelle sijoitetut referenssiasiemat, jotka monitoroivat paikallisesti signaalien laatua, laskevat paikannusvirheen ja muodostavat korjausviestin. Referenssiasiemien data lähetetään pääasemalle, joka lähettää korjausviestin lisäksi lähestymisinformaatiota sekä tietoa satelliittien eheydestä lentokoneiden vastaanottimille käyttäen VDB-lähetintä (engl. VHF Data Broadcast) (ICAO, 2023).

Maajärjestelmän sekä satelliittipohjaisen tukijärjestelmän lisäksi on vielä lentokoneen oma tukijärjestelmä, ABAS (engl. Aircraft Based Augmentation System). ABAS-järjestelmän tarkoitus on lähtökohtaisesti tukea muiden GNSS-pohjaisten järjestelmien PVT-tiedon määritykseen tuottamaa tietoa esimerkiksi suodattamalla ja arvioimalla virheen määrää lasketuista suureista. Lisäksi ABAS-järjestelmä monitoroi sijaintidatan eheyttä kahdella eri menetelmällä: vastaanottimen (RAIM) sekä lentokoneen (AAIM) autonomisella eheydenvalvonnalla. RAIM monitori GNSS-järjestelmästä saatavaa informaatiota, kun taas AAIM lentokoneen omia sensoreita, kuten barometristä korkeusmittaria ja

inertianavigointijärjestelmää (ICAO, 2023). Inertianavigointijärjestelmää käsitellään tarkemmin alaluvussa 4.3.

Tukijärjestelmien lisäksi GNSS-järjestelmälle on olemassa vielä kolme keskeistä paikannusta täydentävää tekniikkaa, joita ovat DGNS eli differentiaali-GNSS, RTK (engl. Real Time Kinematic) eli reaaliaikainen kinematiikka sekä PPP (engl. Precise Point Positioning) eli tarkka paikannusratkaisu (Kazmi ym., 2024; Sabatini ym., 2017).

DGNS perustuu sijainniltaan tarkasti tunnettuihin mittausasemiin, jotka monitoroivat GNSS-signaalien laatua ja laskevat korjausdataa. Korjausdataa lähetetään suoraan käyttäjille tietoverkon yli (Kazmi ym., 2024). Suomessa DGNS-palvelua tuottaa Maanmittauslaitoksen FINPOS-palvelu, johon myös alaluvussa 3.3 mainitut FinnRef-tukiasemat kuuluvat (Maanmittauslaitos, ei pvm.). FINPOS tuottaa myös RTK-palvelua ja sen tarjoaman sijaintitiedon tarkkuus on jopa senttimetreistä millimetreihin. RTK hyödyntää samoja mittausasemia kuin DGNS, mutta sen toiminta perustuu signaalin kantoaallon vaihemittauksiin (Kazmi ym., 2024; Maanmittauslaitos, ei pvm.). PPP puolestaan nojaa tukiasemien sijaan Kansainvälisen GNSS-palvelun (engl. International GNSS Service, IGS) tarjoamiin tarkkoihin satelliittien kello- ja rataparametreihin, joiden avulla vastaanotin voi laskea sijaintinsa. IGS:n tarjoama data on saatavissa internetin välityksellä (Kazmi ym., 2024).

## 4.2 Häiriönsietokyvyn kasvattaminen

Tukijärjestelmän lähettämä korjausdata ja virhelähteiden huomioiminen vastaanottimen sijainninlaskukaavassa tehoavat melko hyvin tahattomien häiriöiden käsittelyyn, mutta tahallisten häiriöiden vaikutusten lieventämiseen vaaditaan kovempia keinoja. Esimerkiksi vastaanotinteknologia on keskeisessä roolissa käyttäjätason häiriönsiedon kehittämisessä (Morales-Ferre ym., 2020).

Yksinkertainen keino on vaihtaa käytettävää taajuutta, mikäli kyseisellä taajuudella havaitaan häiriöitä. Tämä toimii monitaajuusvastaanotinta käyttäessä, mikäli häiriö koskee vain tiettyjä taajuuksia. Jos häiriö aiheutuu esimerkiksi voimakkaasta tahallisesta häirinnästä ja sitä esiintyy laajalla taajuusalueella samanaikaisesti, tämä keino ei kuitenkaan tuota tulosta (Morales-Ferre ym., 2020). Myös useamman antennin käyttäminen tai käytettävän antennin vaihtaminen voivat lievittää häiriön vaikutusta. Liikenneilmailun näkökulmasta tämä on

kuitenkin haastavaa, sillä käytettävien antennien määrä on rajallinen (Morales-Ferre ym., 2020; Noah & Elmusrati, 2025).

Toinen keino on käyttää mukautuvaa antennikeilaa, joka kykenee ohjaamaan antenniryhmän säteilykuvion tehon kohti GNSS-satelliitteja ja näin vaimentamaan häiriölähteen suunnasta tulevaa signaalia (Noah & Elmusrati, 2025). Esimerkiksi CRPA-tekniikka (engl. Controlled Reception Pattern Antennas) hyödyntää antennien mukautumista kohdistamalla nollakohdan häiriötä kohti sen suunnan ollessa tiedossa. Jos häiriön suunta ei ole tiedossa, nollakohta kohdistetaan maahan (Morales-Ferre ym., 2020). CRPA-tekniikkaa on pitkään jo hyödynnetty armeijan käyttötarkoituksissa, mutta sitä ei ole otettu vielä liikenneilmailun käyttöön johtuen korkeasta hintatasosta sekä epävarmuudesta eheyden takaamisessa (ICAO, 2025).

Häiriönsietoa voidaan kasvattaa myös signaalinkäsittelyn avulla. Antennin ja vastaanottimen RF-etuosan jälkeen seuraava osa on ADC (engl. Analog-to-Digital Converter) eli analogia-digitaalimuunnin. Suurin osa häiriönkäsittelystä tapahtuu juuri ADC:n jälkeen. Yksi häirinnän vaikutuksia vähentävä keino on käyttää erilaisia suodattimia kuten mukautuvia kaistanestosuodattimia (engl. Adaptive Notch filter). Mukautuvien kaistanestosuodattimien toiminta perustuu tiettyjen taajuusalueiden suodattamiseen pois signaalista. Niitä voidaan käyttää myös häiriöiden havaitsemisessa. Yksi yleinen kaistanestosuodatin on LMS-suodatin (engl. Least Mean Squares filter) ja se toimii esimerkiksi kapeakaistaisen häirinnän vaikutusten lieventämiseen (Morales-Ferre ym., 2020; Noah & Elmusrati, 2025).

Myös tilastollisia malleja voidaan käyttää tehokkaasti esimerkiksi harhautussignaalien tunnistamiseen ja poissulkemiseen. Yksi tällainen on suurimman todennäköisyyden arviointi, jossa pyritään tilastollisten mallien avulla arvioimaan, onko vastaanotettu signaali todenmukainen. Toinen vastaava menetelmä on yleisen todennäköisyysuhteen testaus (engl. Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT), jossa pyritään erottamaan todenmukainen ja harhautussignaali toisistaan käyttämällä todenmukaisen signaalin pohjalta tehtyä hypoteesia (Morales-Ferre ym., 2020; Noah & Elmusrati, 2025).

Vastaanotinteknologian kehittämisen lisäksi muutokset koko GNSS-järjestelmän tasolla ovat tulevaisuudessa välttämättömiä, jotta liikenneilmailun häiriönsietokykyä ja toimintavarmuutta saadaan kasvatettua (ICAO, 2025). Yksi ratkaisu on toteuttaa signaalin kryptografinen suojaus ja autentikointi esimerkiksi SBAS:n kautta. Galileo tarjoaa jo autentikoinnin mahdollisuutta avoimen palvelun käyttäjilleen, mutta se ei ole vielä ICAO:n standardoima eikä muilla alajärjestelmillä käytössä (ICAO, 2025; Morales-Ferre ym., 2020)

Toinen ratkaisu on käyttää DFMC-vastaanottimia (engl. Dual-Frequency Multi-Constellation receivers). DFMC-vastaanottimet hyödyntävät kahden eri taajuuden ja useamman eri GNSS-alajärjestelmän satelliittien signaaleja sijaintinsa määrittämiseen. ICAO on laatinut tiekartan liikenneilmailun siirtymiseksi käyttämään DFMC-vastaanottimia, mutta ne eivät ole vielä kaikkialla käytössä (ICAO, 2025; Morales-Ferre ym., 2020).

### 4.3 Muut navigointilaitteet ja -menetelmät

Aina GNSS-pohjainen navigointi ei täydentävistä järjestelmistä ja häiriönsiedon kehittämisestä huolimatta ole mahdollista, ja on käytettävä ilmailun toissijaisia navigointijärjestelmiä. Toissijaiset navigointimenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen kategoriaan. Ensimmäiseen kategoriaan kuuluvat konventionaaliset radionavigointilaitteet ja toiseen ilma-aluksen omat navigointimenetelmät. Konventionaaliset laitteet ovat apuna erityisesti lähestymistilanteissa, mutta ilma-aluksen omat laitteet tukevat myös lennonaikaista navigointia. Vaikka PBN-siirtymä ajaakin konventionaalisten radionavigaatiojärjestelmien poistoa, on osa laitteista säilytettävä GNSS-katkosten varalta (Traficom, 2021).

Konventionaaliset menetelmät ovat ICAO:n standardoimat ja niihin kuuluvat mittarilaskeutumisjärjestelmä (engl. Instrument Landing System, ILS), monisuuntamajakka (engl. VHF omnidirectional radio range, VOR), etäisyysmittausjärjestelmä (engl. distance measuring equipment, DME) ja suuntaamaton radiomajakka (engl. non-directional radio beacon, NDB) (ICAO, 2023; Morales-Ferre ym., 2020).

Siinä missä muut konventionaaliset lähestymismenetelmät tarjoavat lähestyville lentokoneille vain lateraalista ohjausta, mittarilaskeutumisjärjestelmä opastaa myös vertikaalisesti. Tämän takia sitä voidaankin käyttää lentokoneen itsenäiseen tarkkuuslähestymiseen (Traficom, 2021). Mittarilaskeutumisjärjestelmä muodostuu maalaitteista, joihin kuuluvat paikannin, liukuratalähetin ja merkkimajakka, sekä käyttäjäkomponentista eli lentokoneen vastaanottimesta. Järjestelmän lähettämän säteilykuvion avulla muodostetaan kontrollipisteistä koostuva laskeutumisrata, jonka avulla lentokone ohjataan kiitoradalle (ICAO, 2023; Ostroumov & Kuzmenko, 2022).

Myös monisuuntamajakka-järjestelmä koostuu maalaitteista sekä lentokoneen vastaanottimesta. Maalaitteet lähettävät korkeataajuisia signaalia kahdella eri modulaatiolla, joista toinen on referenssivaihemodulaatio, jota lähetetään kaikkiin suuntiin ja toinen muuttujavaiheen modulaatio, jonka vaihe riippuu suuntiman kulmasta. Vastaanotettujen

signaalien vaihe-ero on verrannollinen maa-asemasta mitattuun magneettiseen suuntakulmaan, mistä on pääteltävissä lentokoneen kompassisuunta monisuuntamajakan suhteen (ICAO, 2023; Ostroumov & Kuzmenko, 2022).

Etäisyysmittausjärjestelmää käytetään puolestaan lentokoneen sivuttaisen etäisyyden määrittämiseen järjestelmän maa-asemien pisteistä. Lentokoneen etäisyysmittauslaite lähettää kyselysignaalia pulssiparisarjana, jonka maa-asema mittauspiste vastaanottaa. Mittauspiste lähettää pienellä viiveellä takaisin vastaajasignaalin samanlaisella pulssiparisarjalla, mutta eri taajuudella. Vastaotin mittaa signaalin etenemiseen kuluneen ajan ja laskee etäisyyden mittauspisteestä. Kun vastaava etäisyys on mitattu vähintään kahdesta maa-aseman pisteestä, voidaan määrittää lentokoneen lateraalinen sijainti (ICAO, 2023; Ostroumov & Kuzmenko, 2022).

Suuntaamaton radiomajakka on vanhimpia vielä osittain käytössä olevia navigointilaitteita. Radiomajakka lähettää kaikkiin suuntiin signaalia matalilla tai keskisuurilla taajuuskaistoilla. Lentokoneiden ADF-laitteet (engl. Automatic Direction Finder) vastaanottavat tätä signaalia ja määrittävät suunnan radiomajakkaan nähden (ICAO, 2023; Teunissen & Montenbruck, 2017).

PBN-siirtymän myötä kuitenkin yhä harvemmillä kentällä on enää konventionaalisia laitteita käytettävissä. Tällöin ilma-aluksen omat navigointijärjestelmät nousevat ratkaisevaan rooliin. Lentokoneiden inertianavigointijärjestelmä on täysin riippumaton muista järjestelmistä, sillä sen toiminta perustuu kiihtyvyyssantureista ja gyroskoopeista kerättävään dataan. Tämän datan perusteella järjestelmä kykenee laskemaan nopeutensa, sijaintinsa ja suuntansa kullakin mittaushetkellä. Inertiajärjestelmän ainoa haittapuoli on sen ajautuminen pitkällä aikavälillä pois tarkasta sijainnista sensoreiden mittausvirheen takia (Kaasalainen ym., 2021).

## 5 Pohdintaa ja yhteenveto

Tämän tutkielman tavoitteena oli luoda kokonaisvaltainen tilannekuva liikenneilmailun GNSS-signaalihäiriöistä ja toimintavarmuuden takaamisesta. Tutkielman toisessa luvussa luotiin peruskäsitys GNSS-navigoinnin toimintaperiaatteesta sekä GPS-, GLONASS-, BeiDou- ja Galileo-alajärjestelmistä. Eri alajärjestelmät tukevat GNSS-järjestelmän maailmanlaajuista kokonaisuutta tarjoten avointa paikannussignaalia liikenneilmailun käyttöön useilla eri taajuuksilla. GNSS-navigoinnin tärkeyttä liikenneilmailulle kuvastaa ICAO:n alulle panema PBN-siirtymä, jossa liikenneilmailu navigointi siirtyy asteittain pois konventionaalisten navigointilaitteiden käytöstä pelkän GNSS:n varaan. Siirtymä edellyttää kuitenkin tiettyjä suoritusvaatimuksia signaalin tarkkuuteen, eheyteen, palvelun jatkuvuuteen ja saatavuuteen liittyen, jotta operointi pelkän GNSS:n avulla olisi mahdollista.

Kolmannessa luvussa perehdyttiin häiriötekijöihin ja vastattiin **ensimmäiseen tutkimuskysymykseen**. Tutkielman tuloksina saatiin, että liikenneilmailun GNSS-signaaliin aiheutuu häiriöitä tahallisen häirinnän ja harhautuksen sekä signaalin kulkuun vaikuttavien luonnonilmiöiden ja laitevikojen seurauksena. Tuloksista voidaan päätellä, että GNSS-signaali on hyvin häiriöaltista, mikä vaikuttaa liikenneilmailun operointiin heikentävästi.

Tutkielman analyysi osoitti, että tahallinen häirintä heikentää ja estää vastaanottimen kykyä vastaanottaa signaalia, johtaen alentuneeseen sijainnintarkkuuteen tai jopa navigointitiedon puuttumiseen. Tahallisen häirinnän hienovaraisempi versio, harhautus, manipuloi signaaliparametreja, jonka seurauksena vastaanotin laskee sijaintinsa väärin. Tahattomat häiriölähteet aiheuttavat puolestaan epätarkkuutta ja poikkeavuuksia signaalin laatuun. Tahattomista häiriölähteistä erityisesti ionosfääri toimii merkittävänä häiriölähteenä. Tutkielmassa käsiteltiin myös lyhyesti tyypilliset häiriöiden havaitsemiseen käytetyt menetelmät, joista keskeisimmät ovat signaalin voimakkuuden sekä kantoaalto-kohinasuhteen seuranta.

**Toiseen tutkimuskysymykseen** vastattiin neljännessä luvussa ja tuloksen saatiin, että häiriöiden vaikutuksia voidaan lieventää vastaanotinteknologian ja tukijärjestelmien avulla, ja GNSS-signaalin ollessa kokonaan pois käytöstä, voidaan liikenneilmailun toiminta taata toissijaisilla navigointilaitteilla.

Vastaanotinteknologiassa antennien asennon ja määrän muuttaminen sekä suodattimien ja algoritmien hyödyntäminen signaalinkäsittelyvaiheessa toimivat vastakeinona häiriöille.

Täydentävistä järjestelmistä erityisesti satelliittipohjainen tukijärjestelmä nousi esiin tarjotessaan korjausdataa laajallakin alueella.

Toimintavarmuuden analysointi osoitti myös, että tilanteissa, jossa GNSS-paikannus ei ole ollenkaan käytössä, voidaan liikenneilmailun toiminta taata toissijaisilla navigointilaitteilla, joita ovat konventionaaliset sekä lentokoneen omiin laitteisiin perustuvat navigointijärjestelmät. Näistä tehokkaimmiksi osoittautuivat mittarilaskeutumisjärjestelmä ja inertianavigointijärjestelmä.

Erialaisten häiriötekijöiden runsas määrä ja GNSS:n heikko häiriönsietokyky selittävät viime vuosien häiriöiden määrän nousua. Tutkielmassa tuotiin esiin, että tahallista häirintää esiintyy erityisesti konfliktialueiden lähetyksillä, mikä myös osaltaan selittää häiriömäärien kasvua poliittisen ilmapiirin kiristyessä. Vaikka GNSS-häiriöiden määrä on kasvussa, ne eivät kuitenkaan tutkielman tulosten perusteella aiheuta välitöntä vaaraa Suomen ja EU:n alueen ilmailulle.

Tutkielman tulosten perusteella GNSS-järjestelmän häiriönsietokyvyn kehittämisessä on tarvetta jatkotutkimukselle ja aktiivisille toimenpiteille. Erityisesti GNSS-järjestelmän signaalirakenteen kryptografinen suojaaminen ja Galileon jo tarjoaman signaalin autentikoinnin laajentaminen muihin alajärjestelmiin toimisivat merkittävinä keinoina harhautushyökkäysten vaikutusten lieventämiseen. Myös DFMC-vastaanottimien käyttöönotto laajalla skaalalla kasvattaisi liikenneilmailun kantokykyä ja turvallisuutta.

Teknologian nopean kehityksen myötä ja tekoälyn yleistyessä tahallinen häirintä ja harhautus muuttuvat helpommiksi toteuttaa, mikä voi tulevaisuudessa johtaa häiriömäärien kasvuun ja niistä aiheutuvien riskien vakavuusasteen nousuun. GNSS-järjestelmän päivittäminen uuden ja turvallisen tekniikan käyttöön on kuitenkin hyvin hidasta ja kallista, sillä muutos koskee satelliittien lisäksi myös kaikkia käyttäjälaitteita. Tästä huolimatta järjestelmän kehitystä on ajettava aktiivisesti eteenpäin, sillä GNSS-pohjainen navigointi on välttämättömyys liikenneilmailun nykyisen kaltaisen toiminnan turallisessa ylläpitämisessä ja takaamisessa.

## Lähteet

- Chen, M., Li, H., He, W., & Wu, R. (2025). GNSS Interference Detection and Affected Area Assessment Based on ADS-B. 2025 5th International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computing Technology (EECT), 1–9.  
<https://doi.org/10.1109/EECT64505.2025.10966997>
- EASA. (2024). *Global Navigation Satellite System Outage and Alterations Leading to Communication / Navigation / Surveillance Degradation*. European Union Aviation Safety Agency. <https://ad.easa.europa.eu/ad/2022-02R3>
- European Union. (2023). Galileo Open Service – Signal-in-space interface control document (OS SIS ICD) – Issue 2.1. Teoksessa *Publications Office of the European Union* (Numero 2.1). <https://doi.org/10.2878/39727>
- Fang, J., Zhang, L., Zhang, G., Xu, B., & Hsu, L.-T. (2024). Characterization and Validation of GNSS Multipath-Induced Doppler Measurement Error. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 61(2), 3498–3515.  
<https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3487132>
- Felux, M., Figuet, B., Lenders, V., Monstein, R., & Strohmeier, M. (2025). Navigating Turbulence: Understanding New GNSS Risks in Conflict Zones. 2025 17th *International Conference on Cyber Conflict: The Next Step (CyCon)*, 245–264.  
<https://doi.org/10.23919/CyCon65856.2025.11103718>
- Felux, M., Fol, P., Figuet, B., Waltert, , Manuel, & Olive, X. (2024). Impacts of Global Navigation Satellite System Jamming on Aviation. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 71(3). <https://doi.org/10.33012/navi.657>
- GLONASS. (ei pvm.). *About GLONASS*. Noudettu 26. lokakuuta 2025, osoitteesta [https://glonass-iac.ru/en/about\\_glonass/](https://glonass-iac.ru/en/about_glonass/)
- GPS. (ei pvm.). *Global Positioning System*. Noudettu 26. lokakuuta 2025, osoitteesta <https://www.gps.gov/gps>
- GPSJAM. (2025). *GPSJAM GPS/GNSS Interference Map*. Noudettu 20. marraskuuta 2025, osoitteesta <https://gpsjam.org/?lat=63.49760&lon=38.44325&z=3.5&date=2025-11-20>
- Guo, F., & Zhong, L. (2024). Distinguish ionospheric scintillation and multipath in GNSS signals based on machine learning. 2024 36th *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 5863–5868.  
<https://doi.org/10.1109/CCDC62350.2024.10587368>

- IAC PNT. (2020). *GLONASS Open Service Performance Standard*. [https://glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos\\_en.pdf](https://glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos_en.pdf)
- ICAO. (2023). *Annex 10 Aeronautical Telecommunications - Volume I — Radio Navigation Aids* (8. p., Vsk. 1). International Civil Aviation Organization. <https://elibrary.icao.int/product/299828>
- ICAO. (2025). *Mitigating GNSS Vulnerabilities in Aviation: Strengthening resilience and operational continuity* (108). [https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp\\_108\\_en.pdf](https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp_108_en.pdf)
- Ilmatieteen laitos. (ei pvm.). *Ionosfääri*. Noudettu 12. marraskuuta 2025, osoitteesta <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ionosfaari>
- Kaasalainen, S., Mäkelä, M., Saajasto, M., Kirkko-Jaakkola, M., & Kuusiniemi, H. (2021). *Selvitys GNSS-palvelujen tarjonnasta ja toiminnasta*. [https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/GNSS\\_selvitys\\_loppuraportti.pdf](https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/GNSS_selvitys_loppuraportti.pdf)
- Kaplan, E., & Hegarty, C. (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition* (3. p.). Artech House.
- Kazmi, D. R., Jeelani, F. A., Ahmed, U., & Abbas Naqvi, N. (2024). Evaluation of Code & Carrier Based GNSS Positioning Techniques for Positioning Accuracy Using Low Cost GNSS Receivers. *2024 14th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG)*, 96–101. <https://doi.org/10.1109/ICEENG58856.2024.10566432>
- Kielitoimiston sanakirja. (2024). *Liikenneilmailu*. <https://www.kielitoimistonsanakirja.fi/liikenneilmailu>
- Kirkko-Jaakkola, M., Leppälä, L., Ferrera, G., Honkala, S., Mäkelä, M., Kuusniemi, H., & Miettinen-Bellevergue, S. (2020). *Arktisen navigoinnin ja paikkatiedon haasteet. Käyttäjänäkökulma ja ratkaisusuosituksia*. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-576-7>
- Ma, H., Psychas, D., Xing, X., Zhao, Q., Verhagen, S., & Liu, X. (2021). Influence of the inhomogeneous troposphere on GNSS positioning and integer ambiguity resolution. *Advances in Space Research*, 67(6), 1914–1928. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.12.043>
- Maanmittauslaitos. (ei pvm.). *FINPOS-paikannuspalvelu*. Noudettu 23. marraskuuta 2025, osoitteesta <https://www.maanmittauslaitos.fi/finpos>
- Maanmittauslaitos. (2024, toukokuuta 22). *EGNOS RIMS -asemat parantavat paikannustarkkuutta ja lisäävät turvallisuutta*.

- <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/egnos-rims-asetat-parantavat-paikannustarkkuutta-ja-lisaavat-turvallisuutta>
- Magsi, H., Shah, M. A., Hussain Shah, S. H., Faiza, Hussain, A., Soomar, A. M., & Chachar, F. A. (2023). Performance Analysis and Quantification of BeiDou Navigation Satellite System (BDS-3). *2023 4th International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, 1–6.  
<https://doi.org/10.1109/iCoMET57998.2023.10099200>
- Morales-Ferre, R., Richter, P., Falletti, E., De La Fuente, A., & Lohan, E. S. (2020). A survey on coping with intentional interference in satellite navigation for manned and unmanned aircraft. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(1), 249–291.  
<https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2949178>
- Mänttari, J., & Vihavainen, T. (2021). *Satelliittinavigointijärjestelmien tehokas hyödyntäminen Suomessa. Toimenpideohjelma 2021–2025*. 63.  
<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-722-8>
- National Coordination Office. (2020). *GPS Standard Positioning Service Performance Standards & Specifications*. <https://www.gps.gov/sites/default/files/2025-07/2020-SPS-performance-standard.pdf>
- Noah, A., & Elmusrati, M. (2025). GNSS Spoofing and Jamming Mitigation: A Comprehensive Review. *2025 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA)*, 1–9.  
<https://doi.org/10.1109/ACDSA65407.2025.11165996>
- Ostroumov, I., & Kuzmenko, N. (2022). Cybersecurity Analysis of Navigation Systems in Civil Aviation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 478–483.  
<https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927038>
- Portelli, G., Angrisano, A., Cappello, G., Del Pizzo, S., Gioia, C., Troisi, S., & Gaglione, S. (2023). Enhancing navigation solution with Galileo HAS. *2023 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea: Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea)*, 176–180. <https://doi.org/10.1109/MetroSea58055.2023.10317475>
- Radoš, K., Brkić, M., & Begušić, D. (2024). Recent Advances on Jamming and Spoofing Detection in GNSS. *Sensors*, 24(13), 4210. <https://doi.org/10.3390/s24134210>
- Rudnik, P., Cuntz, M., & Meurer, M. (2025). Effectiveness of Detection Methods for GNSS Spoofing Signals in the Eastern Mediterranean Airspace: A Flight Study. *2025*

- IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 258–267.  
<https://doi.org/10.1109/PLANS61210.2025.11028279>
- Saajasto, M., Kaasalainen, S., Mäkelä, M., Bhuiyan, M. Z. H., Koivula, H., Kirkko-Jaakkola, M., & Kuusniemi, H. (2024). GNSS Signal Monitoring and Security of Supply of GNSS-Based Services. *Lecture Notes in Computer Science*, 14599, 186–207.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-62139-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-62139-0_11)
- Sabatini, R., Moore, T., & Ramasamy, S. (2017). Global navigation satellite systems performance analysis and augmentation strategies in aviation. *Progress in Aerospace Sciences*, 95, 45–98. <https://doi.org/10.1016/J.PAEROSCI.2017.10.002>
- Steiner, J., & Lukes, P. (2022). Wide-Area GPS Interference Over Europe From an Unknown Source. *New Trends in Civil Aviation, 2022-October*, 51–55.  
<https://doi.org/10.23919/NTCA55899.2022.9934554>
- Teunissen, P. J. G., & Montenbruck, O. (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems* (1. p.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>
- Traficom. (2021). *Ilmailun navigaatio- ja valvontalaitejärjestelmien strategia Suomessa 2020–2030*. <http://traficom.fi/sites/default/files/media/publication/NAVSUR%202020-2030.pdf>
- Traficom. (2024a). *Satelliittinavigoinnin häiriöiden tilannekuva 2024 Suomessa*. Noudettu 22. lokakuuta 2025, osoitteesta  
<https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/satelliittinavigoinnin-hairioiden-tilannekuva-2024-suomessa>
- Traficom. (2024b). *Suomen ilmailun turvallisuuden suorituskykytavoitteet ja -mittarit*. Noudettu 26. marraskuuta 2025, osoitteesta  
<https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/suomen-ilmailun-turvallisuusohjelma-suunnitelma-ja-suorituskykymittarit/suomen-1>
- Traficom. (2025a). *Satelliittinavigoinnin palveluiden häiriöt Suomessa*. Noudettu 22. lokakuuta 2025, osoitteesta  
<https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/satelliittinavigointipalveluiden-hairiot-suomessa>
- Traficom. (2025b). *Suomen ilmailun turvallisuusohjelma*. Noudettu 21. marraskuuta 2025, osoitteesta <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/suomen-ilmailun-turvallisuusohjelma-suunnitelma-ja-suorituskykymittarit/suomen-0>

Traficom. (2025c). *Suomen ilmailun turvallisuussuunnitelma*. Noudettu 26. marraskuuta 2025, osoitteesta <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/suomen-ilmailun-turvallisuusohjelma-suunnitelma-ja-suorituskykymittarit/suomen>

Wang, X., & He, X. (2023). Evaluation of Multisignal and Multiorbit Multipath Reflectometry of BeiDou Navigation Satellite System. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20, 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3319011>

Wu, Z., Zhang, Y., Yang, Y., Liang, C., & Liu, R. (2020). Spoofing and Anti-Spoofing Technologies of Global Navigation Satellite System: A Survey. *IEEE Access*, 8, 165444–165496. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022294>