



Jyrki Lassila

Mittausperustan laskennat ja laadunvarmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

5.1.2024

Tiivistelmä

Tekijä: Jyrki Lassila
Otsikko: Mittausperustan laskennat ja laadunvarmistus
Sivumäärä: 69 sivua
Aika: 5.1.2024

Tutkinto: Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma: Maanmittaustekniikka
Ohjaaja: Lehtori Ilkka Partonen

Insinööriyössä tutkittiin mittausperustan mittauksen jälkilaskentavaiheen laadunvarmistusmenetelmiä. Työn tavoitteena oli perehtyä mittausperustojen jälkilaskentojen taustoihin ja periaatteisiin, jotta virheiden havaitseminen sekä analysointi olisi luotettavampaa.

Tutkimuksen teoreettinen tiedonhaku tehtiin hyödyntämällä maanmittausalan sekä tilastotieteiden kirjallisuutta. Työn lähteinä käytettiin maanmittausalan kirjallisuutta, julkaisuja ja ohjeistuksia, sekä matematiikan ja tilastotietoon kirjallisuutta. Työssä perehdyttiin mittausperustan ominaisuuksiin, tasoituslaskentoihin ja virheiden etsintämenetelmiin.

Teoreettisen osuuden pohjalta tehtiin jälkilaskennat ja laadunvarmistus Inkaan liikennepaikan mittausperustan mittauksille. Jälkilaskentojen tarkistukset suoritettiin staattisille GNSS-mittauksille, takymetrilla tehdyille jonomittauksille sekä jonoaaituksille.

Insinööriyössä tutkittiin eri laadunvarmistustoimenpiteitä, kuten sulkuvirheiden tarkasteluja, vektorien pituuksien tarkasteluja, tilastollisten testien tarkastelumenetelmiä sekä eri mittausmenetelmillä suoritettujen mittauksien ristiin vertailuja. Työn perusteella voidaan todeta, että laadunvarmistustoimia tulee tehdä useissa vaiheissa jälkilaskentaa ja laadunvarmistusprosessin tulee perustua useisiin eri laadunvarmistustoimenpiteisiin.

Työn tuloksia voidaan hyödyntää muissa mittausperustahankkeissa. Insinööriyön tulosten perusteella päivitettiin Taratest Oy:n laatukäsikirja mittausperustamittauksen osalta.

Avainsanat: mittausperusta, runkomittaus, tasoituslaskenta, laadunvarmistus

Abstract

Author: Jyrki Lassila
Title: Quality Assurance of Control-point Network
Number of Pages: 69 pages
Date: 5 January 2024

Degree: Master of Engineering
Degree Programme: Land Surveying
Supervisor: Ilkka Partonen, Senior Lecturer

The purpose of the thesis was to study post-processing and adjustments of the control-point networks and the background and principles of adjustments and control-point network tests in order to ensure the reliability of the detection and analysis of errors.

The theoretical research for the thesis was made by studying of land surveying and statistics. Sample quality assurance for the final year project was performed for the control-point network measurements at the Inkoo traffic location.

The master's thesis established that quality assurance of a control-point network should be based on several quality assurance methods. Errors of control-point networks must be searched for before and after the network adjustments. The final conclusions about quality of the control-point networks is to be based on the results of the network adjustment.

This thesis discussed various quality assurance methods. Quality assurance procedures of this thesis can also be used in other similar projects. The thesis can be used as an information guide about the control-point networks of and network adjustments.

Keywords: control-point, control-point network, network adjustment, quality assurance

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Mittausperusta	2
2.1	Tausta ja tarkoitus	2
2.2	Kiintopisteet	2
2.3	Mittausperustan hierarkia	3
3	Kiintopisteiden mittaus EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmässä	4
3.1	Vaatimukset ja ohjeistukset	4
3.2	Mittausmenetelmät	5
3.2.1	Kolmiomittaus	5
3.2.2	Jonomittaus	6
3.2.3	Staattinen GNSS-mittaus	8
3.2.4	Reaaliaikainen GNSS-mittaus	10
3.2.5	Jonovaaitus	11
3.2.6	Trigonometrinen korkeuden määrittäminen	14
4	Mittausten korjaukset	16
4.1	Havaintojen esikäsittely	16
4.2	Prismavakio	16
4.3	Sääkorjaukset	17
4.4	Mittakaavakorjaukset	18
4.5	Etäisyysmittausten projektiokorjaus	20
4.6	Refraktio ja maan kaarevuus	23
5	Mittausten virheet	27
5.1	Virheiden luokittelu	27
5.2	Virheiden tarkastelu	29
5.3	Sisäinen ja ulkoinen tarkkuus	37
6	Tasointuslaskennat	39
6.1	Tausta	39
6.2	Jonotasointus	39

6.3	Redundanssi	39
6.4	Pienimmän neliösumman menetelmä	40
7	Tilastolliset tarkistusmenetelmät	45
7.1	Tausta	45
7.2	F-testi	45
7.3	x ² -testi	46
7.4	W-testi	47
7.5	T-testi	48
8	Inkoon liikennepaikan mittausperusta	49
8.1	Peruskiintopisteiden staattisten GNSS-mittausten jälkilaskenta	49
8.2	Käyttökiintopisteiden takymetrimittauksen jälkilaskenta	56
8.3	Jonovaaituksen jälkilaskenta	62
9	Yhteenveto	66
	Lähteet	68

Lyhenteet ja käsitteet

EUREF-FIN

Suomessa käytetty realisaatio eurooppalaisesta ETRS89-datumista.

Normaalijakauma:

Satunnaisvirheiden jakauman tilastomatemattinen malli.

Pienimmän neliösumma menetelmä:

Tilastomatemattinen estimointimenetelmä, jota käytetään tasoituslaskennassa.

ppm: *Parts per million* eli suomeksi miljoonasosa. Käytetään matkaan verrannollisten virheiden yhteydessä.

Reduktio: Havaintoon tehtävä korjaus.

Redundanssi:

Ylimääritys tai toiste.

Refraktio:

Tähtäyssäteen taipuminen ilmakehässä.

Residuaali:

Jäännösvirhe.

Virhe-ellipsi:

Kuvaa pisteen tai havainnon virheen tai hajonnan suuruutta ja suuntaa.

1 Johdanto

Insinööriyön tarkoituksena on perehtyä mittausperustojen jälkilaskentojen taustoihin ja periaatteisiin ja tehdä näiden pohjalta Inkoon liikennepaikan mittausperustan jälkilaskennoille tarkistuslaskennat. Työn tavoitteena on löytää toimivia laadunvarmistustoimenpiteitä, joiden avulla virheiden havaitseminen sekä laadun analysointi olisi luotettavampaa. Työstä rajataan pois mittausperustahankkeiden maastomittausten aikaiset laadunvarmistustoimenpiteet, jotta voidaan keskittyä syvällisemmin jälkilaskentavaiheen laadunvarmistustoimenpiteisiin.

Taratest Oy toimii tämän opinnäytetyön toimeksiantajana. Taratest Oy on geotekniikan ja ympäristötutkimuksen asiantuntija yritys, joka tarjoaa palveluita infran, talorakentamisen ja teollisuuden tarpeisiin. Insinööriyön pohjalta tullaan päivittämään Taratest Oy:n laatukäsikirja mittausperustamittausten osalta.

Mittausperustahankkeet voidaan jakaa suunnitteluvaiheeseen, rakentamisvaiheeseen, maastomittausvaiheeseen sekä jälkilaskentavaiheesta. Laadunvarmistuksia suoritetaan koko mittausperustahankkeen ajan mutta erityisesti jälkilaskentavaiheessa, jolloin mittaukset yhdistetään ja niistä muodostetaan yhteinen mittausperusta.

Insinööriyössä perehdytään yleisellä tasolla mittausperustoihin, niiden rakenteeseen sekä eri mittausmenetelmiin. Työssä tutkitaan syvällisemmin mittaus-ten ja havaintojen korjauksia, virheiden luokitteluja ja tarkasteluja, tasoituslaskentaja sekä tilastomatemattisia tarkastusmenettelyjä ja niiden laskentakavaoja. Teoriaosuuden jälkeen suoritetaan Inkoon liikennepaikan mittausperustan jälkilaskentavaiheen laadunvarmistus ja mittaustulosten arvioinnit. Työssä käytettäviä laadunvarmistustoimenpiteitä voidaan hyödyntää muissa vastaavissa hankkeissa.

2 Mittausperusta

2.1 Tausta ja tarkoitus

Mittausperusta on kiintopisteistä muodostuva verkko, jolla on tarkoitus sitoa maastossa tehtävät mittaukset käytettävään taso- ja korkeusjärjestelmään. Mittausperusta on runkopisteverkko, joka muodostuu alueelle rakennetuista pysyvistä kiintopisteistä. Mittausperusta on yleensä sidottu valtakunnalliseen koordinaattijärjestelmään, mutta kohteeseen voidaan rakentaa myös omaan koordinaatistonsa. Esimerkiksi tehdasalueilla saattaa olla oma koordinaatisto eli erilliskoordinaatisto, joka ei ole sidottu valtakunnalliseen koordinaatistoon. Alueellinen mittausperusta sidotaan kiintopistemittausten avulla valtakunnallisiin koordinaatti- ja korkeusjärjestelmiin. Kiintopistemittauksia voidaan kutsua myös runkomittauksiksi. (1, s. 12–13.)

2.2 Kiintopisteet

Mittausperustasta käytetään myös termejä kiintopisteverkko, runkoverkko tai kolmioverkko. Mittausperusta koostuu yhdistetyistä taso- ja korkeuskiintopisteistä, jotka on sidottu toisiinsa geodeettisten mittausten avulla. Mittausperustan kiintopisteitä käytetään alueella tapahtuvien mittausten lähtöpisteinä eli mittaukset tullaan sitomaan alueella olevaan mittausperustaan. Mittausperustan tulee kattaa koko mitattava alue siten, että mittausperustan uloimmat pisteet ovat alueen ulkopuolella. (1, s. 12–13; 2.)

Kiintopisteet ovat maastossa olevia kiinteitä pisteitä, joille on määritetty tasokoordinaatit ja korkeus runkomittausten avulla. Kiintopisteet on rakennettu kiinteään alustaan metallipultilla, -putkella tai -tangolla. Kiintopisteiden tulee olla yksiselitteisiä, liikkumattomia ja kestäviä. Mittausperustan kiintopisteitä ei mitata yksittäisinä pisteinä vaan suurempana kokonaisuutena, jolloin mittausperustan kiintopisteet ovat keskenään homogeenisiä. Homogeenisessä verkossa on hyvä sisäinen tarkkuus, eli kiintopisteiden väliset tarkkuudet ovat hyviä. (3, s. 4–5.)

2.3 Mittausperustan hierarkia

Mittausperustoissa on hierarkkinen rakenne, jossa on eri luokissa olevia kiintopisteitä. EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmään tehtävien mittausperustojen kiintopisteet lajitellaan E1–E6-luokkiin. Kiintopisteille määritetään aina X-, Y- ja Z-koordinaatit. E1–E2-luokkien kiintopisteet ovat valtakunnallisia peruskiintopisteitä ja E3–E6-luokkien kiintopisteet ovat paikallisia kiintopisteitä. Paikalliset kiintopisteet voidaan jakaa vielä peruskiintopisteisiin (E3–E4 -luokat) ja käyttökiintopisteisiin (E5–E6 -luokat). (3, s. 4–8.)

Valtakunnalliset E1–E2 luokan kiintopisteet voivat olla passiivisia tai aktiivisia. Passiivisella kiintopisteellä tarkoitetaan kiintopistettä, joka on maastoon rakennettu fyysinen piste. Aktiiviset kiintopisteet ovat kiinteästi asennettuja tukiasemia, jotka keräävät havaintoja jatkuvasti. Myös aktiiviset kiintopisteet on rakennettu kiinteään rakenteeseen, mutta pisteen päälle on kiinnitetty GNSS-vastaanotin erilaisten masto- ja pilarirakennelmien avulla. (3, s. 7–8.)

Paikalliset E3- ja E4-luokkien peruskiintopisteet määrittävät kuntien koordinaattijärjestelmän rungon sekä toimivat E5–E6 -luokkien käyttökiintopisteiden mitausten lähtöpisteinä. Paikallista peruskiintopisteverkkoa tihennetään E5–E6-luokkien käyttökiintopisteillä. E5-luokan käyttöpisteet ovat ylemmän ja tarkemman luokan käyttökiintopisteitä, jotka toimivat tarkempien kartoitusmittausten lähtöpisteinä. E6-luokan käyttökiintopisteet ovat epätarkempia käyttöpisteinä, ja ne on tarkoitettu muun muassa muunnetuille pisteille. (3, s. 7–8.)

3 Kiintopisteiden mittaus EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmässä

3.1 Vaatimukset ja ohjeistukset

Runkomittausten eli kiintopistemittausten avulla muodostetaan haluttuun kohteeseen mittausperusta. Kiintopistemittaukset ovat tarkkoja mittauksia, joten niiden mittauksia säädellään ohjeistuksien avulla. EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmässä tehtäviä mittauksia ohjeistavat Liikenneviraston ohje 18/2017 (4) sekä Julkisen hallinnon suositus JHS184 (3).

Mittausperustan mittauksille määritetään aina lähtöpisteet. Lähtöpisteet ovat koordinaateiltaan tunnettuja pisteitä, joihin mittausperustan mittaukset sidotaan. Mittausperustoissa on hierarkkinen rakenne. Kiintopisteiden tarkkuusvaatimukset ovat tiukemmat ylemmissä hierarkialuokissa kuin alemmissä hierarkialuokissa. Mittausperustan mittausten lähtöpisteiden tulee olla aina vähintään yhtä luokkaa ylempi kuin mitattavien kiintopisteiden hierarkialuokka. Lähtöpisteiden tulee sijaita mittausalueen ulkopuolella, eli lähtöpisteistä muodostuvan verkon tulee kattaa sisäänsä uudet kiintopisteet. (3, s. 9.)

Uusi mittausperusta tulee liittää homogeenisesti yhteen olemassa olevan mittausperustan tai olemassa olevien kiintopisteiden kanssa. Tämä varmistetaan ottamalla mittauksiin mukaan kontrollikiintopisteitä mitattavalta alueelta. Kontrollikiintopisteet ovat koordinaateiltaan tunnettuja kiintopisteitä. Ne ovat hierarkkisesti samaa luokkaa kuin mitattavat kiintopisteet, ja ne sijaitsevat mittausalueella. Mittausten ja tasoituslaskentojen jälkeen tarkastellaan kontrollikiintopisteiden uuden määrittelyn koordinaatteja tunnettuihin koordinaatteihin. Uuden mittausperustan todetaan olevan yhteensopiva vanhan mittausperustan kanssa, mikäli kontrollikiintopisteiden uuden määrittelyn koordinaatit eivät poikkea tunnetuista koordinaateista enemmän kuin ohjeistuksissa määritetyt raja-arvot. Kontrollikiintopisteille ei määritetä uusia koordinaatteja, vaan tunnetut koordinaatit jäävän voimaan. (3, s. 14.)

3.2 Mittausmenetelmät

Eri hierarkialuokan pisteille on omat mittaus- ja tarkkuusvaatimuksensa sekä vaatimukset eri mittausmenetelmille. Staattinen GNSS-mittaus on yleinen tasokoordinaattien mittausmenetelmä, jolla tehdään tarkimman tasokoordinaattien määrytykset. Staattista GNSS-mittausta käyttäen tasokoordinaatit voidaan määrittää kaikille eri hierarkialuokille. Takymetrimittaus on yleinen mittausmenetelmä käyttökiintopisteiden tasokoordinaattien mittauksille. Reaaliaikaista GNSS-mittausta voidaan käyttää tietyin ehdoin käyttökiintopisteiden tasokoordinaattien määrytykseen. Taulukossa 1 on esitetty eri hierarkialuokille sallitut mittausmenetelmät. (3, s. 14.)

Taulukko 1. Tasokoordinaattien mittausmenetelmät EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmässä (3, s. 14).

Mittausmenetelmä	E1–E2	E3–E4	E5–E6
Staattinen GNSS	x	x	x
Reaaliaikainen GNSS			x
Takymetrimittaukset			x

Alemman luokan peruskiintopisteiden ja käyttökiintopisteiden korkeuden määrytykset suoritetaan jonoaaituksena tai tietyin ehdoin trigonometrisenä korkeuden määrytyksenä takymetrillä tai staattisena GNSS-mittauksena. (4, s. 14–15)

3.2.1 Kolmiomittaus

Kolmiomittaus on perinteinen mittausmenetelmä, jonka avulla on määritetty Maan muotoa, ja luotu koordinaattijärjestelmiä. Perinteinen kolmiomittaustekniikka oli käytössä ennen satelliittipohjaisten mittauksia 1980-luvulle asti. Perinteinen kolmiomittaus koostuu kolmesta eri mittausvaiheesta, kulmien mittaamisesta, perusviivan mittaamisesta ja tähtitieteellisistä mittauksista. Kolmiomittaus perustuu geometriseen tosiasiaan, jossa kolmion kahden tunnetun kulman ja

yhden tunnetun sivun avulla voidaan määrittää kahden muun sivun pituudet kulmahavainnoista laskemalla. (5.)

Kolmion kulmien mittaaminen suoritetaan havaitsemalla jokaiselta kolmiopisteiltä kulmahavainnot muihin pisteeltä näkyviin kolmiopisteisiin. Perinteisissä kolmimittauksissa kolmiopiste sijoitettiin usein korkealle paikalle, ja sen päälle rakennettiin kolmiomittaustorni. Kolmion yhden sivun pituuden mittausta kutsutaan perusviivan mittaamiseksi. Perusviivan mittauksia on suoritettu mittatangoilla tai langoilla. Perusviiva siirretään suurennosverkon avulla kolmion sivunpituudeksi. Tähtitieteellisten paikanmäärityksen avulla kolmioverkko pystytään orientoimaan oikeaan paikkaan ja asentoon Maan pinnalle. Tähtitieteellinen paikanmääritys perustuu taivaankappaleen ja horisontin välisen eron mittaamiseen. (5; 1, s.329–330.)

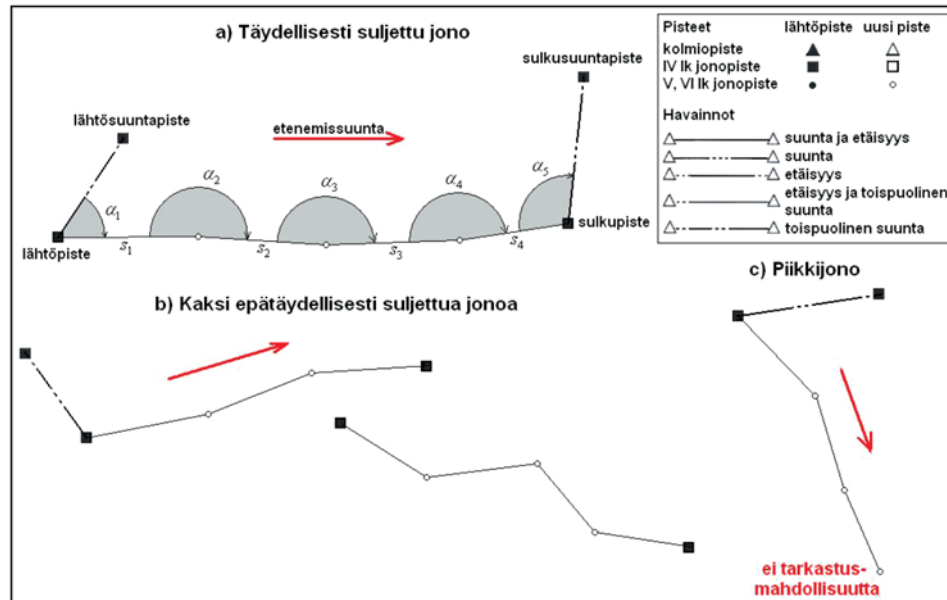
Kolmiomittausta voidaan tehdä myös takymetrilla. Takymetrilla tehtävä kolmiomittausmenetelmä vastaa perinteistä kolmiomittausta, mutta erillistä kolmion sivun pituuden mittausta ei tarvitse tehdä, koska takymetrilla voidaan mitata myös etäisyyksiä. Takymetrilla tehtäviä kolmimittauksia hyödynnetään muun muassa rakennustyömaiden mittaperustan rakentamiseen. (1, s. 329–330.)

3.2.2 Jonomittaus

Jonomittaus on mittausmenetelmä, jossa koordinaatteja kuljetetaan tunnetulta pisteeltä toiselle. Jonomittauksen jonoa kutsutaan monikulmiojonoksi. Pisteeltä toiseen kulkevan murtoviivan taitepisteissä suoritetaan mittauksia kulma- ja etäisyshavainnoin. Jonomittaus perustuu säteittäisen mittauksen periaatteisiin ja mittaukset suoritetaan yleisimmin takymetrilla. Ennen takymetreja jonomittauksi tehtiin teodoliitin ja erillisen etäisyysmittarin avulla. Jonomittausta käytetään usein tasokoordinaattien määrittäykseen, mutta menetelmän avulla voidaan määrittää myös korkeuksia. (3, s. 21.)

Jonomittauksen lähtöpisteinä käytetään tunnettuja ylemmän hierarkia luokan kiintopisteitä. Jonomittaus voi olla täydellisesti suljettu jono, epätäydellisesti

suljettu jono tai piikkijono (kuva 1). Runkomittaukset suositellaan tehtäväksi täydellisesti suljettuna jonona, jolloin jonossa on lähtöpiste, lähtösuuntapiste, sulkupiste ja sulkusuuntapiste. (1, s. 349–350.)

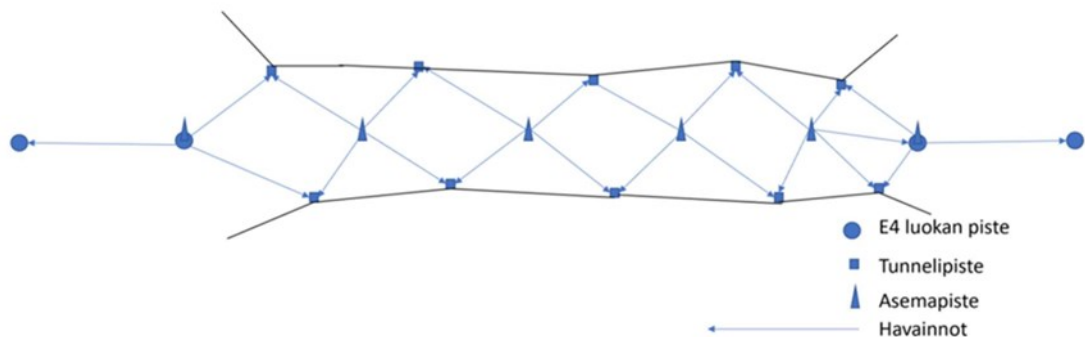


Kuva 1. Jonomittauksien mahdollisia rakenteita (1, s. 349).

Täydellisessä liitoksessa liitossuunnat havaitaan jonon molemmissa päissä. Täydellisesti suljetun jonon sulkua kutsutaan täydelliseksi liitokseksi. Täydellisesti suljetun jonon laatua voidaan tarkastella koordinaatti- sekä kulmasuuntavirheiden avulla. Jonon sulkeminen täydellisenä liitoksena on luotettavin tapa sulkea jono. Epätäydellisesti suljetussa jonossa käytetään kahta tai kolmea tunnettua kiintopistettä. Epätäydellisesti suljetun jonon toisessa päässä on tunnettu kiintopiste, ja jonon toisessa päässä yksi tai kaksi tunnettua kiintopistettä. Epätäydellisesti suljettu jono eroaa täydellisesti jonosta siten, että epätäydellisesti suljetun jonon liitos on tehty koordinaattiliitoksena ilman liitospisteellä tehtäviä kulmahavaintoja vähintään toisessa päässä jonoa. Epätäydellisesti suljetun jonon laatua voidaan tarkastella koordinaattisulkuvirheen avulla. Epätäydellisen jonon laatua ei pystytä tarkastamaan kulmasuuntavirheen avulla, koska jonon toisessa päässä ei mitata liitoshavaintoa. Koordinaattiliitosta ei suositella tehtäväksi kiintopisteiden mittauksissa kuin erityisistä syistä. Piikkijonoksi kutsutaan jonomittauksia, joiden loppupäässä ei ole tunnettu kiintopisteitä. Tämän takia

piikkijonoja ei pystytä sulkemaan eikä mittausten virheiden tarkastaminen ja laadunvarmistus ole mahdollista. Piikkijonoja ei tule käyttää kiintopistemittauksissa. (1, s. 349–350.)

Jonon uusien pisteiden mittaukset voidaan tehdä myös sidottuna verkkona eli monikulmijonoja tai jonoverkkona. Jonoverkossa uusien kiintopisteiden mittaukset tehdään vapailta asemapisteiltä suunta- ja etäisyyshavainnoilla. Jonoverkon rakenne (kuva 2) on nimensä mukaisesti verkkomainen, ja verkon jokainen määritettävä piste havaintaan vähintään kahdelta eri kojeasemalta. (3, s. 22.)



Kuva 2. Jonoverkon rakenne.

Jonoverkon lähtö ja sulkeminen tapahtuvat samalla tavalla kuin perinteisen monikulmiojonon. Jonoverkon lähtö- ja sulkupisteinä toimivat ylempään luokan kiintopisteet. Jonoverkkoja käytetään, kun kojeen asentaminen määritettävällä kiintopisteelle ei ole mahdollista kohteita ovat esimerkiksi tunnelit tai ratahankkeet, joissa käyttöpisteet on rakennettu sähköistuspylväiden perustuksiin. (4, s. 13)

3.2.3 Staattinen GNSS-mittaus

Staattinen GNSS-mittaus on satelliittipaikannukseen perustuva mittaustekniikka. Staattista mittausta käytetään yleisesti kiintopisteiden tasokoordinaattien määrittämiseen, mutta sen avulla voidaan määrittää tietyin ehdoin myös pisteiden korkeuksia. Staattisella mittauksella mitataan kolmioverkon vektoreiden pituuksia ja kulmia sekä määritellään pisteiden välisiä koordinaattieroja.

Staattinen GNSS-mittaus perustuu paikannussignaalin kantoaallon vaiheen havaitsemiseen. Staattiset GPS-mittaukset korvasivat perinteiset kolmiomittaukset 1980- ja 1990-luvuilla. Perinteisen kolmiomittauksen ja staattisen kolmiomittaukset verkot muistuttavat rakenteeltaan toisiaan. (1, s. 329–330.)

Staattista mittausta voidaan käyttää E1–E4-luokkien peruskiintopisteiden mittauksiin tai E5–E6-luokan käyttökiintopisteiden mittauksiin. Mittausten lähtöpisteinä käytetään aktiivisia tai passiivisia ylemmän luokan kiintopisteitä. Mittauksissa tulee käyttää aina vähintään kolmea lähtöpistettä, ja uloimpien lähtöpisteiden tulee sulkea mitattava alue sisäänsä. Staattiset GNSS-mittaukset suoritetaan verkkomaisesti, ja havaintojen keruu tapahtuu sessioittain eli havaintojaksoittain tai mittausjaksoittain. Havaintojakson aikana kerätään samanaikaisia havaintoa usealla satelliitivastaanottimella sekä tunnetuilta pisteiltä että tuntemattomilta pisteiltä. Havaintojaksojen pituudet eli havaintoajat vaihtelevat riippuen uusien mitattavien pisteiden kiintopisteluoikasta ja pisimmän vektorin pituudesta. Havaintoajan voi määrittellä interpoloimalla havaintoajan muille kuin taulukossa 2 esitetyille vektorin pituuksille. (3, s. 9–12.)

Taulukko 2. Mittausjaksojen pituudet eri hierarkialuokissa (3, s. 15).

Vektorin pituus	E1	E2	E3	E4	E5	E6
10 km	-	2 h	1 h	1 h	30 min	30 min
30 km	8 h	6 h	2,5 h	1,5 h	30 min	30 min
50 km	15 h	9 h	4,5 h	2,5 h	1 h	30 min
100 km	19 h	13 h	8 h	5 h	3 h	2 h
> 100 km	24 h	24 h	-	-	-	-

Staattisissa mittauksissa mittalaitteet ovat paikoillaan koko havaintojakson, ja mittauspisteiden koordinaatit määritetään jälkilaskennan avulla. Mittaushavaintojen jälkilaskenta suoritetaan laskentaohjelmistolla. Jälkilaskennassa erillisistä havaintojaksoista muodostetaan verkko ja jälkilaskennan lopputuloksena määritetään uusille kiintopisteille sekä kontrollikiintopisteille koordinaatit. Staattisen

mittauksen verkko muodostuu, kun havaintojaksot yhdistetään. Verkko koostuu sulkeutuvista kuvioista eli silmukoista. (3, s. 9–12.)

3.2.4 Reaaliaikainen GNSS-mittaus

Reaaliaikainen GNSS-mittaus eli RTK-mittaus on vaihehavaintoihin perustuva GNSS-mittausmenetelmä. RTK-mittaus on yleinen mittausmenetelmä mittaus- ja kartoitustehtäviin, mutta voidaan käyttää tietyin ehdoin myös käyttökiintopisteiden mittauksiin.

Perinteisessä RTK-mittauksessa tunnetulla kiintopisteellä sijaitsee vertailuvastaaanotin eli tukiasema, joka lähettää mittaamansa havainnot paikantavalle vastaanottimelle. Paikantava vastaanotin laskee alkutuntemattomat ja muut sijainnin määrittämiseen liittyvät suureet reaaliajassa. Verkko-RTK-mittaus eroaa perinteisestä RTK-mittauksesta hyödyntämällä tukiaseman sijasta tukiasemaverkkoa. Tukiasemaverkon avulla voidaan mallintaa tarkemmin ilmakehän virheitä, ja korjata ionosfäärin sekä troposfääriin liittyviä virheitä. RTK-mittauksella tuotettu mittausperusta ei ole rakenteeltaan verkkomainen, koska kiintopisteiden väleille ei muodostu vektoreita. Tämän takia RTK-mittauksella tuotetun mittaperustan homogeenisuus ei ole samaa luokkaa kuin staattisella mittauksella tai jonomittauksella tuotetun mittaperustan. (1, s. 319–320.)

Reaaliaikaista GNSS-mittausta saa käyttää vain pieniin hankkeisiin tilaajan suostumuksella. Reaaliaikaista GNSS-mittausta voidaan käyttää E5–E6-hierarkialuokkien käyttökiintopisteiden tasokoordinaattien mittaamiseen. Alle 500 metrin etäisyydellä toisistaan olevien käyttöpisteiden suhteellinen tarkkuus ei ole riittävä, ilman vierekkäisten pisteiden välisen vektoreiden mittaamista. RTK-mittauksia ei voida tehdä verkkomaisesti, joten vierekkäisten pisteiden välisen vektorin mittaaminen ei ole mahdollista. Tämän takia RTK-mittauksella mitattavien käyttöpisteiden väliset etäisyydet tulee olla vähintään 500 metriä. (3, s. 12–13.)

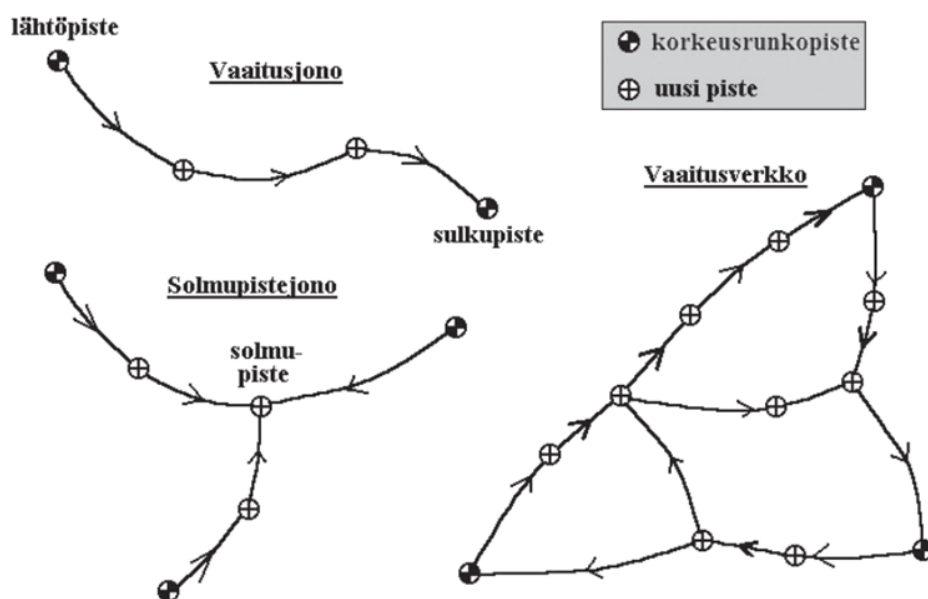
Ennen ja jälkeen mittausten tulee mitata testipiste laitteen toimivuuden varmistukseksi. Testipisteenä voidaan käyttää mitattavan pisteen luokkaista tai ylemmän luokan kiintopistettä. Testipisteen mittauksen tarkkuusvaatimukset ovat samat kuin kontrollikiintopisteellä. RTK-mittausten ohessa mitataan vähintään yksi kontrollikiintopiste, mikäli mittausalueelta löytyy saman luokan piste. Reaaliaikaiset GNSS-mittaukset tulee suorittaa peräkkäisinä mittauksina, joista muodostetaan mittaussarjoja. E5-luokassa tulee mitata kaksi mittaus sarjaa, ja E6-luokassa yksi mittaussarja riittää. Mittaussarja tulee koostua 5 erillisestä mittauksesta, ja yksi mittaus koostuu 5–15 epookkihavainnosta. Mittausten välissä tulee suorittaa uusi alustus, ja mittaussarjojen välissä tulee pitää tauko vähintään 45 minuutin tauko. Lopulliset kiintopisteen koordinaatit lasketaan sarjojen keskiarvolla. E6-luokan pisteille riittää yksi mittaussarja, ja koordinaatit lasketaan mittausten keskiarvona. Perinteistä RTK-mittausta ja verkko-RTK-mittausta koskevat samat vaatimukset. (3, s. 12–13.)

3.2.5 Jonovaaitus

Kiintopisteiden korkeuden määrittäminen voidaan tehdä jonovaaituksena vaaituskojeella, takymetrillä trigonometrisesti, satelliittimittauksin staattisella GNSS-mittauksella tai RTK-mittauksella. Mittausmenetelmän valintaan vaikuttavat mitattavien kiintopisteiden hierarkialuokka ja mittaus kohteen ympäristö. Vaaitus on yleisin kiintopisteiden korkeusmittausmenetelmä, ja kaikki tarkimmat korkeudenmittaukset suoritetaan vaaitsemalla.

Vaaitus on pelkästään korkeuden määrittämiseen käytetty perinteinen mittausmenetelmä, joka perustuu pisteiden välisen korkeuseron mittaamiseen. Vaaituskojeella ei varsinaisesti mitata korkeuksia, vaan korkeuksia määritellään korkeuseroja mittaamalla. Vaaituksissa mitataan eteen- ja taaksehavaintoja sekä tarvittaessa sivuhavaintoja pisteellä olevaan lattaan vaakasuoralla tähtäystasolla, joka muodostetaan tasaamalla vaaituskoje. Vaaituskojeen eteen- ja taaksehavaintojen mittaaminen tarkoittaa latan korkeuslukemien mittaamista edelliselle pisteelle sekä seuraavalle pisteelle. Korkeudet määritellään taakse- ja

eteenhavaintojen erotuksesta. Vaaitukset voidaan tehdä vaaitusjonona, solmupistejonona tai vaaitusverkkona kuvan 3 mukaisesti. (1, s. 219–220.)



Kuva 3. Vaaituksen rakenteellisia muotoja (1, s. 223).

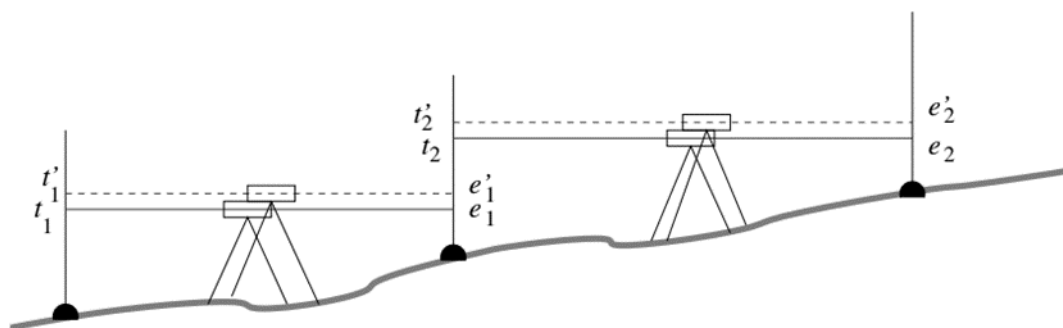
Jonovaaitus on näistä yleisin menetelmä. Jonovaaituksessa vaaitusjono kulkee lähtöpisteeltä mitattavien kiintopisteiden läpi sulkupisteelle. Vaaitusjonon voi tehdä myös rinnakkaisina jonoina, joilla on vähintään yksi yhteinen solmu. Jonovaaituksessa lähtöpisteinä tulee käyttää valtakunnallisia ylemmän luokan korkeuskiintopisteitä tai kunnallisia ylemmän luokan korkeuskiintopisteitä. Lähtö- ja sulkupisteen tulee olla eri pisteitä, ja niiden korkeudet tulee olla vaaittuja. Eteen- ja taaksehavaintojen tähtäysetäisyyksien ero ei saa olla yli 20 metriä, eikä yli 100 metrin havaintoja saa mitata. (1, s. 223; 4, s. 14.)

Jonovaaituksen tarkkuutta tarkastellaan korkeussulkuvirhetarkastelun avulla. Suurin sallittu sulkuvirhe saa olla 10 ppm, eli kilometrin matkalla sulkuvirhettä saa olla maksimissaan 1 senttimetri. Jonovaaitusten tasoitus suoritetaan jonotasoituksena, jolloin virhe tasataan tasaisesti jonovaaituksen matkalle. (4, s. 14.)

Kaikista luotettavin vaaituksen rakenne on vaaitusverkko. Siinä vaaitukset muodostavat verkkomaisen rakenteen. Verkkomainen rakenne sisältää lenkkejä ja

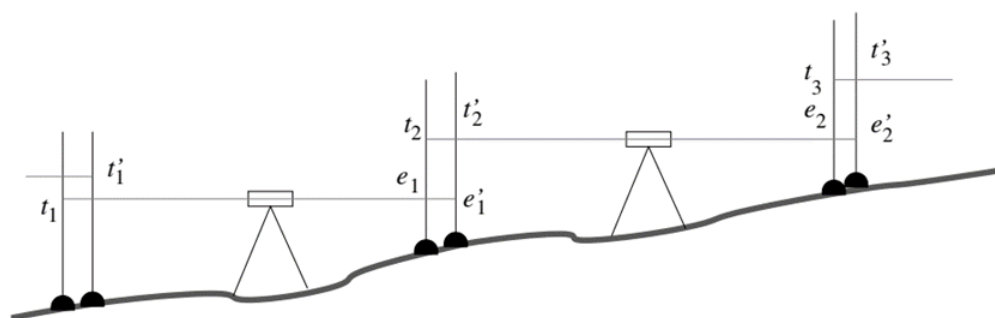
solmupisteitä, jonka ansiosta mittauksille saadaan ylimääritystä. Ylimäärityksen ansiosta vaaitukselle voidaan tehdä monipuolisempaa ja luotettavampaa laadunvarmistusta ja virheiden tasoitus voidaan suorittaa jonotasoituksen sijaan pienimmän neliösumman menetelmällä. (1, s. 223.)

Yksittäisellä jonolla ei ole ylimääritystä, joten se kontrolloi havaintoja huonosti. Mittausten luotettavuutta voidaan lisätä mittaamalla vaaitukset rinnakkaiset jonot kahdella vaaituskojeella tai kahdella vaaituslatalla. Kahdella kojeella suoritettavassa jonossa mitataan havainnot molemmilla kojeilla samoille latan sijainneille kuvan 4 mukaisesti. (6, s. 43–45.)



Kuva 4. Vaaitus kahdella kojeella (6, s. 45).

Kahdella latalla muodostettavassa jonossa mitataan yhdellä kojeella havainnot eteen ja taakse kahdelle latalle. Seuraavalta kojeasemalta otetaan havainnot taakse molemmille latoille, jotka mitataan edelliseltä asemalta eteenhavaintona kuvan 5 mukaisesti. (6, s. 45.)

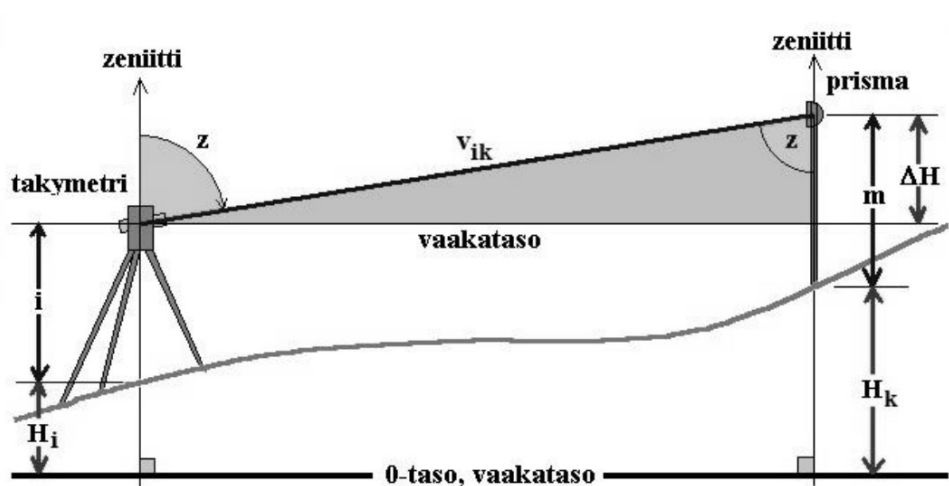


Kuva 5. Vaaitus kahdella latalla (6, s. 45).

Rinnakkaisia jonoja voidaan käyttää kaikkein tarkimmissa vaaituksissa. Rinnakkaisilla vaaitusjonoilla saadaan jokaiselle kojeasemalle kaksi korkeuseroa ja eteen- ja taakse havaintoja. Tämän ansiosta mittauksille on mahdollista laskea varianssit tai keskiarvot. (6, s. 44)

3.2.6 Trigonometrinen korkeuden määrittäminen

Trigonometrinen korkeudenmittaus takymetrilla tehtävä korkeuden määrittäminen menetelmä, jossa mittauspisteen korkeus määritetään pystykulman ja etäisyyden avulla. Takymetrilla mitataan prisman ja kojeen välinen vinoetäisyys sekä pystykulma mittauspisteellä olevaan prismaan. Pystykulman ja vinoetäisyyden avulla voidaan määrittää mittauspisteen korkeus (kuva 6). (1, s. 204.)



Kuva 6. Trigonometrisen korkeuden määrittäminen periaate (7, s. 60).

Mitattavan pisteen korkeus saadaan laskettua yhtälön 1 mukaisesti, kun mittauksen avulla on saatu tietoon pystykulma ja mitattu vinomatka. Tämän lisäksi laskentaan tarvitaan asemapisteen korkeus, takymetrin vaaka-akselin korkeus sekä prisman tähyskorkeus. (7, s. 60.)

$$H_k = H_i + v_{ik} \cos z + i - m \quad (1)$$

H_k on mitattavan pisteen korkeus

H_i on takymetrin korkeusasema

V_{ik} mitattu vinomatka

z on pystykulma

i on takymetrin vaaka-akselin korkeus

m on prisman tähyskorkeus.

Trigonometrinen korkeuden määrittäminen on luotettava ainoastaan alle 200 metrin etäisyyksillä maan kaarevuuden ja tähtäyssäteiden taittumisen eli refraktion vuoksi. Trigonometrisessä korkeuden määrittämisessä refraktio määritetään refraktiokertoimen avulla. Refraktiokerroin on maan kaarevuus säteen ja mittaus-säteiden suhde. Trigonometristä korkeudenmäärittästä voidaan käyttää, mikäli vaaituksen toteutus ei ole työturvallisuusnäkökohdat huomioon ottaen mahdollista. Mittauksissa käytettävän takymetrin kulmanmittauksen tarkkuuden on oltava vähintään 0,5 milligoonia. (4, s.14; 7, s. 60.)

4 Mittausten korjaukset

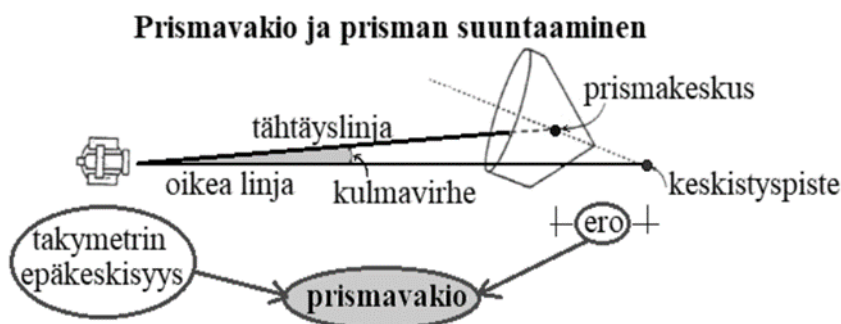
4.1 Havaintojen esikäsittely

Kun mittaukset on suoritettu maastossa, mittaustuloksille tehdään havaintojen esikäsittely. Esikäsittelyllä on tarkoitus havaita ja poistaa mahdollisia systemaattisia virheitä ja arvioida alustavasti havaintojen tarkkuus. Havaintojen esikäsittely tehdään ennen tasoituslaskentaa. Näitä esikäsittelyvaiheessa havaintoihin tehtäviä korjauksia kutsutaan reduktioksi. Reduktio voidaan jakaa fysikaalisiin ja geometrisiin reduktioihin. Fysikaalisia reduktioita ovat lämpötilakorjaus ja ilmanpaineen korjaus. Geometrisiä reduktioita ovat muun muassa Maan pallon muotoon sekä karttaprojektioon liittyvät korjaukset sekä prismavakio. Karttaprojektioon liittyviä korjauksia kutsutaan projektiokorjauksiksi. (7, s. 153.)

Reduktiot voivat kohdistusta etäisyyksiin, korkeuksiin tai kulmiin sekä suuntiin. Maan muoto aiheuttaa korjauksia etäisyyksiin, korkeuksiin sekä kulmiin sekä suuntiin. Etäisyyksien ja kulmien korjaus on kuitenkin merkittävä vasta, kun tärkeitä etäisyydet ovat useita kilometrejä. Prismavakio ja säätilakorjaus aiheuttavat redukointia etäisyyksiin. (7, s. 155.)

4.2 Prismavakio

Prismavakioksi kutsutaan takymetrimittauksiin tehtävää korjausta, joissa mitaussivun toisessa päässä oleva heijastin on prisma. Takymetrin etäisyysmittauksen aloituskohta tai prisman heijastinkohta eivät välttämättä sijaitse kojeiden pystyakselille, minkä vuoksi ne ovat epäkeskisiä mittausten kannalta. Epäkeskisyyttä korjataan, ja tätä korjausta kutsutaan prismavakioksi. Prisman särämät muodostavat prismakeskuksen, johon mittaukset kohdistetaan. Prismavakion suuruuteen vaikuttavat prismakeskuksen ja keskituspisteen ero (kuva 7). (1, s. 330–331.)



Kuva 7. Prismavakion määrittäminen (7, s. 153).

Prismavakion suuruuteen vaikuttaa myös käytettävän mittauslaitteen epäkeskisyyttä, joten mittauslaitteen vaihtuessa tulee myös tarkistaa prismavakio. Väärällä prismavakiolla tehtyihin mittauksiin voi kohdistua useiden senttimetrin suuruinen systemaattinen virhe. Prismavakionmuutokset tehdään mittauksiin yleensä jo mitausten aikana automaattisesti. Prismavakiota on kuitenkin mahdollista muuttaa myös jälkikäsittelevaiheessa, esimerkiksi mittauslaitevalmistajien omilla ohjelmistoilla. (7, s. 153.)

4.3 Säätökorjaukset

Ilman paine ja lämpötila vaikuttavat takymetrimittauksen mitaustilanteen kanta-aallon eli valon etenemiseen. Tätä varten mittauksiin tehdään säätökorjaus. Takymetrimittauksiin on suositeltavaa tehdä aina säätökorjaus. Säätökorjaus voidaan asettaa suoraan mittauslaitteeseen, mutta sen voi tarvittaessa tehdä myös mitausten jälkikäsittelevaiheessa. Korjaukseen asetetaan mitaustilanteen ja mitaustilanteen mukainen lämpötila, ilmanpaine ja kosteus. Mittauslaitteet käyttävät ilmanpaineen yksikkönä millibaaria (mbar), hehtopascalia (hPa) tai elohopeamillimetriä (mmHg). Kaavassa 2 on esitetty ilmanpaineen yksiköiden muunnoskaava. (1, s. 333.)

$$1000\text{mbar} = 1000\text{hPa} = 750\text{mmHg} \quad (2)$$

Normaali ilmanpaine on merenpinnan tasolla 1013,3 millibaaria, ja Maan pinnan läheisissä ilmakerroksissa 8 metrin nousu tarkoittaa noin millibaarin vähennystä

ilmanpaineessa. Säätikorjaus asetetaan suhteellisenä korjauksena ppm eli parts per million -arvona. Esimerkiksi säätikorjauksen ollessa +10 ppm tehdään 100 metrin matkalle korjaus lisäämällä matkaan 1 mm. Sääkorjauksen suhteellinen arvo voi olla positiivinen tai negatiivinen. Sääkorjauksen arvot ovat negatiivisia, kun ilman lämpötila on matala ja ilmanpaineen korkeus korkea. Kaavassa 3 on esitetty lämpötilan ja ilmanpaineen muutoksien vaikutukset säätilauskorjauksiin. (1, s. 333–334.)

$$\begin{cases} \text{Lämpötila} + 1 \text{ } ^\circ\text{C} & \rightarrow \sim + 1 \text{ ppm} \\ \text{Ilmanpaine} + 5 \text{ mbar} & \rightarrow \sim + 1 \text{ ppm} \end{cases} \quad (3)$$

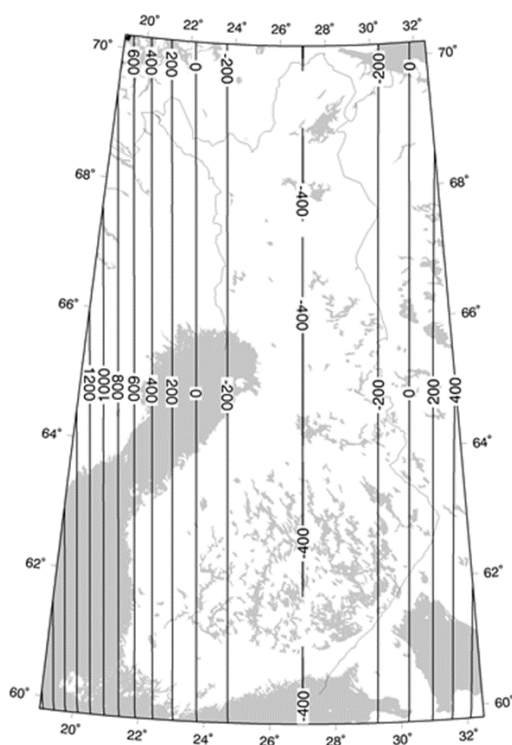
4.4 Mittakaavakorjaukset

Vuonna 2007 Euroopan komissio hyväksyi direktiivin Euroopan yhteisön paikkatietoinfrastruktuurin INSPIRE-direktiivin perustamisesta. INSPIRE-direktiivin asetus 1089/2010 määrää paikkatietojen jakelussa käytettäväksi ETRS89-järjestelmää. Asetus sisältää myös määräyksen ETRS89:n kanssa käytettävistä koordinaatistoista. JHS 196-ohjeistus suosittelee tekemään paikkatiedon tuotannon EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmissä. EUREF-FIN ei siis ole yksittäinen koordinaattijärjestelmä, vaan EUREF-koordinaattijärjestelmiksi kutsutaan kaikkia koordinaattijärjestelmiä, joiden geodeettinen datumi on EUREF-FIN. Koko Suomen alueen kattava ETRS-TM35FIN -tasokoordinaattijärjestelmä sekä paikallisissa mittauksissa käytettävä ETRS-GK_n-tasokoordinaattijärjestelmä ovat Suomessa käytettäviä EUREF-FIN-järjestelmän mukaisia koordinaattijärjestelmiä. (8, s. 1, 5.)

Tasokoordinaatistoihin liittyy mittakaava korjauksia, ja niiden suuruudet riippuvat etäisyydestä keskimeridiaaliin. ETRS-GK_n -koordinaattijärjestelmä perustuu Mercatorin projektioon, joka on sivuava lieriöprojektiio. Sivuvavassa lieriöprojektiio on lieriön muotoinen kuvataso, joka sivuaa maapallon pintaa pitkin. ETRS-GK_n jakautuu Suomessa kolmeentoista projekti- ja koordinaattikaistaan, joiden keskimeridiaalit ovat tasa-asteita. Suomessa keskimeridiaalien itäkoordinaattien asetteluvut ovat asteen välein välillä 19°–31°. ETRS-GK_n-tasokoordinaattijärjestelmän mittakaavakorjaus kasvaa, kun etäisyys

keskimeridiaalista kasvaa. Valtakunnallinen ETRS-TM35FIN-tasokoordinaattijärjestelmä perustuu UTM-projektioon, joka on leikkaava lieriöprojektiio. Leikkaavassa lieriöprojektiiossa lieriö leikkaa maapallon pinnan.

ETRS-TM35FIN-tasokoordinaattijärjestelmän karttaprojektion keskimeridiaali on 27 astetta. ETRS-TM35FIN-tasokoordinaattijärjestelmän korjaukset ovat manteleella välillä -400ppm ... $+700\text{ppm}$, ja Ahvenanmaalla suurimmillaan $+1700\text{ppm}$. Mittakaavakorjauksen arvo $+700\text{ppm}$ tarkoittaa 70 mm:n vaikutusta 100 metrin matkaan maastossa. ETRS-TMFIN -tasokoordinaattijärjestelmän keskimeridiaalilla mittakaavakorjaus on -400 ppm (kuva 8). (7, s. 99, 8.)



Kuva 8. ETRS-TM35FIN-järjestelmän mittakaavakorjaukset ppm-arvoina (8).

ETRS-GK_n-koordinaattijärjestelmässä mittakaavakorjaus on keskimeridiaalilla nolla, ja se kasvaa siirryttäessä kauemmaksi keskimeridiaalista (taulukko 3).

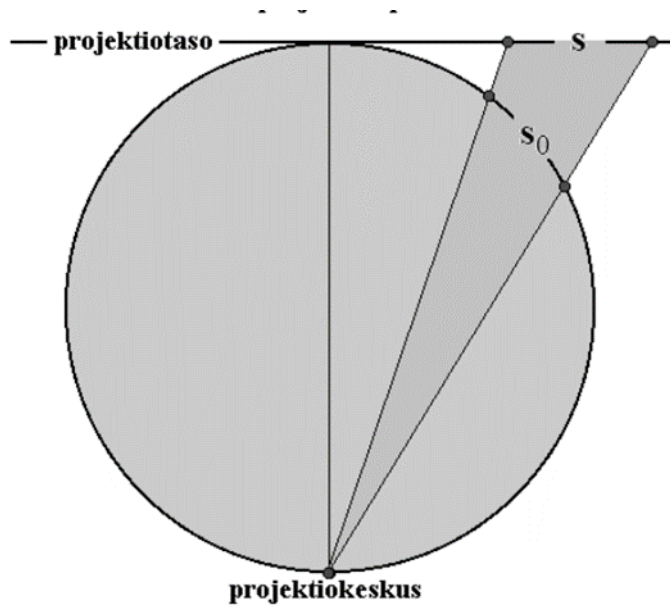
Taulukko 3. Mittakaava korjaukset eri etäisyyksillä keskimeridiaalista ETRS-GK_n-koordinaattijärjestelmissä (8).

Etäisyys keski-meridiaanista (km)	Mittakaavakorjaus (ppm)	Korjaus 100 metrin matkalla (mm)
0	0	0
10	1	0
25	8	1
50	31	3
75	69	7
100	122	12
150	275	28
180	397	38
200	490	49
250	765	77
300	1103	110
400	1962	196
500	3070	307

ETRS-GK_n sisältää kolmetoista projektikaistaa. Paikallisesti mittaukset suositellaan tehtäväksi ETRS-GK_n-koordinaattijärjestelmissä, jotta etäisyydet keskimeridiaaliin eivät pääse kasvamaan suuriksi. (8.)

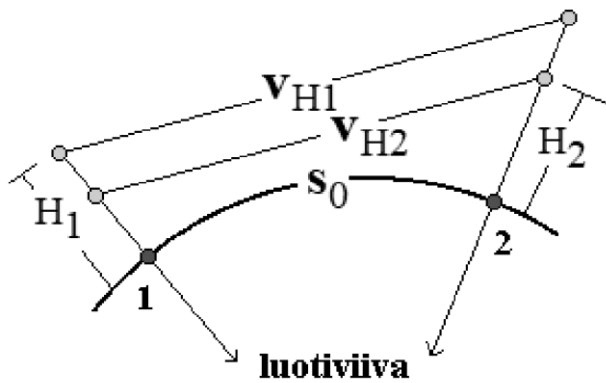
4.5 Etäisyysmittausten projektiokorjaus

Maan pallonmuotoisuus johdosta maapallon pintaa pitkin mitattu matka ei ole sama kuin vastaava matka projektion pinnalla, koska mittaushavainnot tehdään kolmiulotteisen maapallon pinnalla (s_0), ja laskennat suoritetaan projektitasolla (s) (kuva 9). (7, s. 155.)



Kuva 9. Maan pallomuotoisuuden vaikutus etäisyyden mittaukseen (7, s. 155).

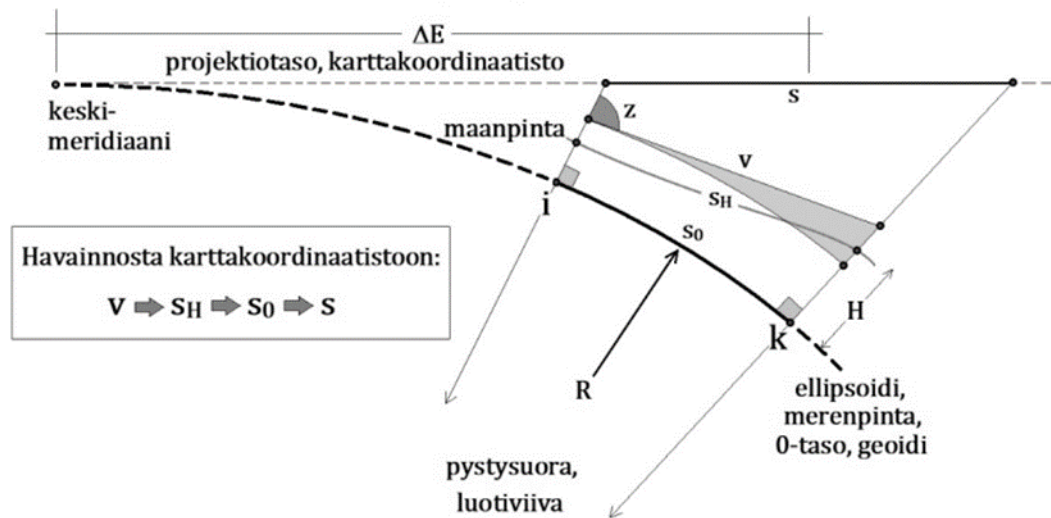
Pisteiden väliseen etäisyyteen vaikuttaa myös mittauspaikan korkeus (H) (kuva 10). Laskennoissa käytetään yleensä mittauspaikan keskimääräistä korkeutta.



Kuva 10. Mittauskohteen korkeuden vaikutus etäisyydsmittaukseen (7, s. 155).

Mittaushavaintojen muuntaminen karttakoordinaatistoon on kolmiosainen toimitus, jossa ensiksi prismavakio ja sääkorjattu pisteiden välinen vinoetäisyys (v) muunnetaan pystykulman (z) avulla vaakamatkaksi havaintopaikan korkeustasolla (S_H). Havaintopaikan korkeustason vaakamatka muunnetaan

vaakamatkaksi ellipsoidin pinnalle, josta se muunnetaan vielä vaakamatkaksi karttakoordinaatistoon (kuva 11). (7, s. 155.)



Kuva 11. Etäisyysmittausten reduktiot (7, s. 156).

Mittaushavainnot voidaan muuntaa karttakoordinaatistoon, kun tiedetään mitauspaikan korkeus ja etäisyys keskimeridiaanista. Ensimmäiseksi lasketaan vaakamatka havaintopaikan korkeustasolla (4) vinoetäisyyden ja pystykulman avulla. (7, s. 156.)

$$s_H = v \sin z \quad (4)$$

s_H on vaakamatka havaintopaikan korkeustasolla

v on sääkorjattu vinoetäisyys

z on pystykulma.

Seuraavaksi lasketaan vaakamatka ellipsoidin pinnalla (5) Maan kaarevuussäteen, mitauspaikan keskimääräisen korkeuden ja havaintopaikan korkeustason vaakamatkan avulla. (7, s. 156.)

$$S_0 = \frac{RS_H}{R+H} \quad (5)$$

s_0 on vaakamatka ellipsoidin pinnalla

R on Maan kaarevuussäde

s_H on vaakamatka havaintopaikan korkeustasolla

H on mittauspaikan keskimääräinen korkeus.

Vaakamatka karttakoordinaatistossa (6) saadaan laskettua karttaprojektion mittakaavakerroimen, maan kaarevuussäteen, vaakamatkalla ellipsoidin pinnalla sekä mittauspaikan etäisyydellä keskimeridiaalista. (7, s. 156.)

$$s = m_0 = \left(1 + \frac{\Delta E^2}{2R^2}\right)s_0 \quad (6)$$

s on vaakamatka karttakoordinaatistossa

m_0 on karttaprojektion mittakaavakerroin keskimeridiaalilla

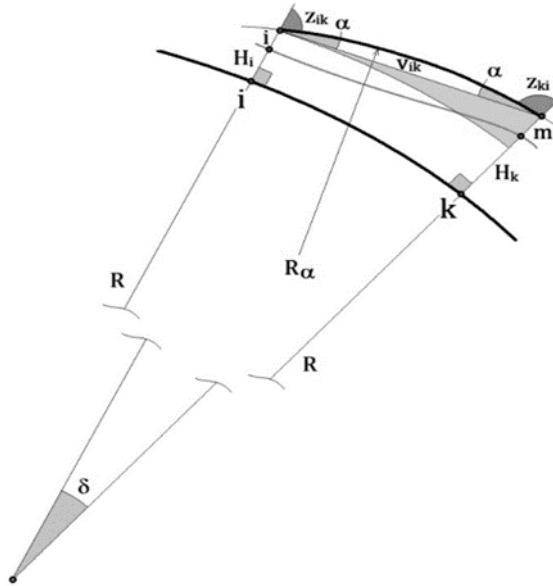
E on mittauspaikan keskimääräinen etäisyys keskimeridiaanista

R on Maan kaarevuussäde

s_0 on vaakamatka ellipsoidin pinnalla.

4.6 Refraktio ja maan kaarevuus

Refraktio tarkoittaa aaltoliikkeen suunnan muuttumista kahden eri faasin eli olo-
muodonalueen rajapinnassa. Refraktio vaihtelee sääolosuhteiden ja mittaus-
ajankohdan mukaan. Refraktin vaikutuksesta valo ei etene ilmakehässä suora-
viivaisesti, vaan sen etenemisreitti kaareva viiva (kuva 12). (6, s. 49.)



Kuva 12. Maan kaarevuuden vaikutus korkeuden mittaukseen (7, s. 156).

Refraktio ja maan kaarevuus aiheuttavat mittauksiin huomattavia systemaattisia virheitä trigonometrisessä korkeuden määrittämisessä. Refraktio huomioidaan yleensä refraktiokertoimen avulla. Maan kaarevuuden merkitys on korkeudenmittauksen kannalta refraktiota suurempi, joten tavanomaisissa mittauksissa voidaan käyttää keskimääräiseen arvioon perustuvaa refraktiokerrointa $k=0.13$. Refraktiokerrointa $k=0.13$ perustuu malli-ilmakehään, ja tällöin kaarevuussäde on noin 7.5-kertainen Maan kaarevuuteen nähden. Refraktiokertoimen laskemiseen tarvitaan tähtäyssäteiden kaarevuussäde. Tähtäyssäteiden kaarevuussäde saadaan laskettua, kun tietään vinoetäisyys asemapisteeltä tähtäyspisteeseen sekä refraktiokulma radiaaneina. (7). (7, s. 157.)

$$R_{\alpha} = \frac{v_{ik}}{2\alpha} \quad (7)$$

R_{α} on tähtäyssäteiden kaarevuussäde

v_{ik} on vinoetäisyys asemapisteeltä tähtäyspisteeseen

α on refraktiokulma.

Refraktiokerroin on Maan kaarevuussäteen ja tähtäyssäteen suhde (8). (7, s. 157.)

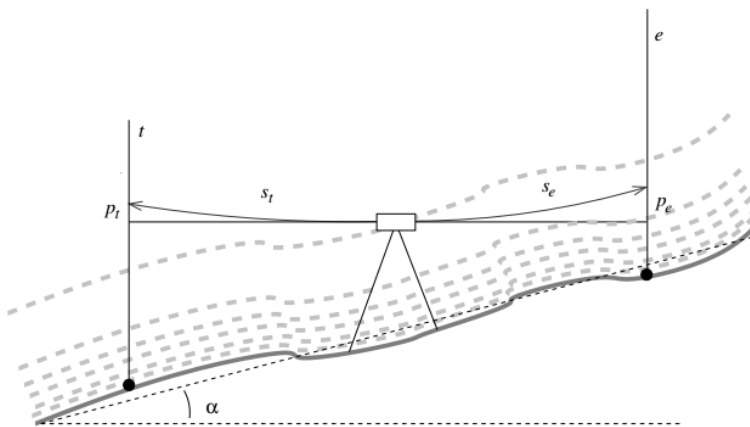
$$k = \frac{R}{R_{\alpha}} \quad (8)$$

k on refraktiokerroin

R on kaarevuussäde

R_{α} on tähtäyssäteen kaarevuussäde.

Refraktio vaikuttaa myös vaaituksiin. Refraktion mallintaminen on erittäin haastavaa, joten pelkkä refraktiokorjauksen määrittäminen ei ole mahdollista. Tämän takia vaaitusten refraktiovaikutusta kontrolloidaan vaaituksien matkatasapainolla sekä riittävän korkeilla tähtäyksillä. Tähtäyksien tulisi olla vähintään 50 cm maan pinnan yläpuolella, jolloin refraktion vaikutus on pienempää. Matkatasapainolla tarkoitetaan eteen- ja taakse havaintojen erotuksen tasapainoa. Vaaituksissa on pyrittävä siihen, että eteen- ja taaksehavainnot ovat yhtä pitkiä. Mäkisessä maastossa yhtä pitkät havaintoetäisyydetkään eivät poista refraktion vaikutusta, koska ylämäkeen otettu havainto on lähempänä maan pintaa kuin alamäkeen otettu havainto (kuva 13). (6, s. 42.)



Kuva 13. Refraktion vaikutus vaaitushavaintoihin mäkisessä maastossa (6, s.41).

Mäkisessä maastossa eteen- ja taaksehavaintoihin vaikuttavat eri suuruiset refraktiot. Tämän takia mäkiä vaaitusreittejä olisi syytä välttää, mikäli se on mahdollista. (6, s. 42.)

5 Mittausten virheet

5.1 Virheiden luokittelu

Realistinen lähtökohta on, että kaikkiin mittauksiin liittyy epävarmuutta, ja mitaustulokset ovat aina jossakin määrin virheellisiä. Havainnon virhe on havaintoarvon ja havaintosuureen todellinen arvon erotus. Mittauksen havaintosuureen todellinen arvo on kuitenkin tuntematon, ja tämän takia todellinen virheen suuruus voidaan vain arvioida. Jotta mittausten virheiden arviointi on mahdollista, tulee mittaukset toteuttaa niin, että mittaukseen sisältyvien ristiriitojen tarkastelu on mahdollista. Mittauksissa tulee suorittaa havaintojen toistamista eli ylimäärittystä, jotta virheiden arviointi on mahdollista. Virheiden arviointia voidaan tehdä tarkastelemalla havaintojen vaihtelua ja tilastomatemattisia testejä sekä sulkuja jäännösvirhetarkastelun avulla. (1, s. 34; 2.)

Perinteinen luokittelu jakaa virheet karkeisiin virheisiin, systemaattisiin virheisiin ja satunnaisiin virheisiin. Virheiden luokittelun ansiosta virheiden hallinta ja käsittely on mahdollista niiden luonteenomaisten ominaisuuksien mukaan. Mittauksissa pyritään aina tilanteeseen, jossa olisi jäljellä vain satunnaisia virheitä. Virheet voidaan luokitella myös tyyppiluokittain, jotka ovat ihmisistä, kojeista ja olosuhteista johtuvat virheet. (1, s. 35; 2.)

5.1.1 Karkeat virheet

Karkeat virheet ovat luonteeltaan inhimillisiä virheitä ja erehdyksiä, tai ne johtuvat mittauskojeesta tai mittausolosuhteista. Karkeita virheitä ovat muun muassa kojelaitteen mekaaniset ja elektroniset virheet, tähtäysvirheet sekä kirjausvirheet. Karkeat virheet ovat yleensä yksittäisiä virheitä, ja ne pyritään havaitsemaan mahdollisimman hyvissä ajoin. Esimerkiksi havainnon suuri poikkeama muiden havaintojen keskiarvosta voi merkitä karkeaa virhettä. Laskentavaiheessa karkeita virheitä pyritään paikantaa tilastomatemattisten testimenetelmien avulla. Karkeat virheet pyritään havaitsemaan sekä poistamaan tasoituslaskennasta. (2; 7, s. 129–130.)

5.1.2 Systemaattiset virheet

Systemaattinen virhe on havaintojoukkoon kohdistuva virhetyyppi, joka vääristää havaintoja samaan suuntaan. Systemaattinen virhe pysyy samana, kun mittaukset toistetaan samassa olosuhteessa. Systemaattinen virhe voi myös vaihdella säännönmukaisesti olosuhteiden vaihtuessa. Yleisiä syitä systemaattisille virheille ovat kojevirheet tai virheelliset mittaus- tai laskentamenetelmät. Esimerkiksi väärä prismavakio, säätökorjausten puuttuminen tai mittalaitteen kalibrointivirheet voivat aiheuttaa systemaattisen virheen. Myös Maan kaarevuus ja refraktio voivat aiheuttaa pitkillä matkoilla mittauksiin systemaattisen virheen.

Systemaattiset virheet voidaan jakaa vielä pysyviin virheisiin, yksipuolisiin virheisiin, persoonallisiin virheisiin ja periodisiin virheisiin. Systemaattisia virheitä pyritään ennaltaehkäisemään mittalaitteiden kalibroinneilla sekä käyttämällä luotettavia mittaus- ja laskentamenetelmiä. Systemaattiset virheet pyritään paikantamaan ja poistamaan ennen laskentoja. Systemaattiset virheet saattavat myös synnyttää normaalijakauman, mikäli mittaukseen kohdistuu useampia eritavoin vaikuttavia systemaattisia virheitä. (2; 7, s. 129.)

5.1.3 Satunnaiset virheet

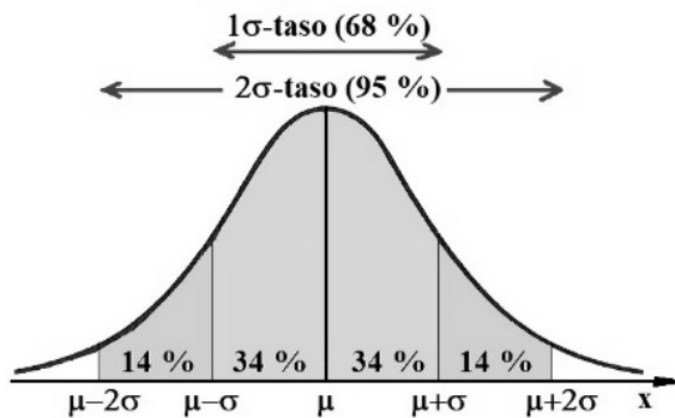
Satunnaiset virheet ovat tilastollisesti riippumattomia sekä toisistaan, että tunnetuista ulkopuolisista tekijöistä. Satunnaisille virheille ei ole yksiselitteistä määrittävää syytä. Satunnaisia virheitä voidaan kutsua myös hajontavirheeksi tai tilastolliseksi virheeksi. Ne siis ovat kuin systemaattisten virheiden vastakohta. Satunnaisille virheille tyypillisiä on havaintojen vaihtelut ja seuraavien havaintojen ennustamattomuus. Satunnaisten virheiden matemaattisena ideaalimuotona on normaalijakauma. Satunnaiset virheet voidaan eliminoida ylimäärityksellä, jolloin negatiiviset ja positiiviset arvot kumoavat toisensa. Mittauksissa pyritään siihen, että havaintoihin vaikuttavat vain satunnaiset virheet. Tasoituslaskennassa on oletettava, että havaintoihin vaikuttaa vain satunnaisia virheitä. (2; 7, s. 129.)

5.2 Virheiden tarkastelu

5.2.1 Normaalijakauma

Normaalijakauma on satunnaisvirheiden jakauman tilastomatemattinen malli. Normaalijakaumaa voidaan kutsua myös gaussin jakaumaksi, ja sen kuvaajaa gaussin käyräksi. Monet reaali maailman satunnaismuuttujat noudattavat likimain normaalijakaumaa. Mittauksien tarkkuuksien arvioinnit perustuvat oletukseen, että mittaukset sisältävät vain normaalijakautuneita satunnaisia virheitä. Normaalijakauma on kokeellisesti testattu olevan hyvin soveltuva erityyppisten mittaussarjojen antamien tulosten jakaumalle. Normaalijakauma voidaan tulkita todennäköisyystiheudeksi. Normaalijakauman tiheysfunktio on matemaattinen malli, joka kuvaa mittausten toistoissa ilmenevää vaihtelua. Tiheysfunktion avulla virhearvioihin voidaan liittää täsmälliset todennäköisyydet. Normaalijakauman tiheysfunktion kuvaaja on symmetrinen keskiarvon (μ) suhteen. (2; 7, s. 129–130.)

Mittausten tarkkuudet ilmoitetaan yleensä käyttäen sigmatasoja. Sigmatasot määrittyvät luottamusvälien todennäköisyyksien mukaan. Sigmatasojen symbolina käytetään kreikkalaisten aakkosten pientä sigmaa (σ), koska havaintoarvot ajatellaan teoreettisiksi. Yleensä arvioitu virhe ilmoitetaan keskihajontana eli 1σ -tasolla, jolloin virheen arvioon liittyvä todennäköisyys on 68,27 prosenttia. Keskihajonta kuvaa havaintojen vaihtelun eli satunnaisten virheiden keskimääräisen suuruuden. Virhe voidaan myös ilmoittaa 2σ -tasolla, jolloin virheen arvion todennäköisyys on 95,45 prosenttia eli kaksi kertaa keskihajonta. 3σ -tasolla virheen arvioin todennäköisyys on 99,73 prosenttia (kuva 14). (7, s. 131–132.)



Kuva 14. Normaalijakauma ja sigmatasot (7, s. 131).

Kriittisten arvojen avulla rajataan todennäköisyyttä vastaava luottamusväli. Kriittiset arvot esitetään normitetun satunnaissuureen avulla (taulukko 4). Mikäli satunnaissuure on jakautunut keskiarvonsa ympärille, käytetään jakaumaa, jossa keskiarvo(μ) on nolla ja keskihajonta(σ) on yksi. (7, s. 131.)

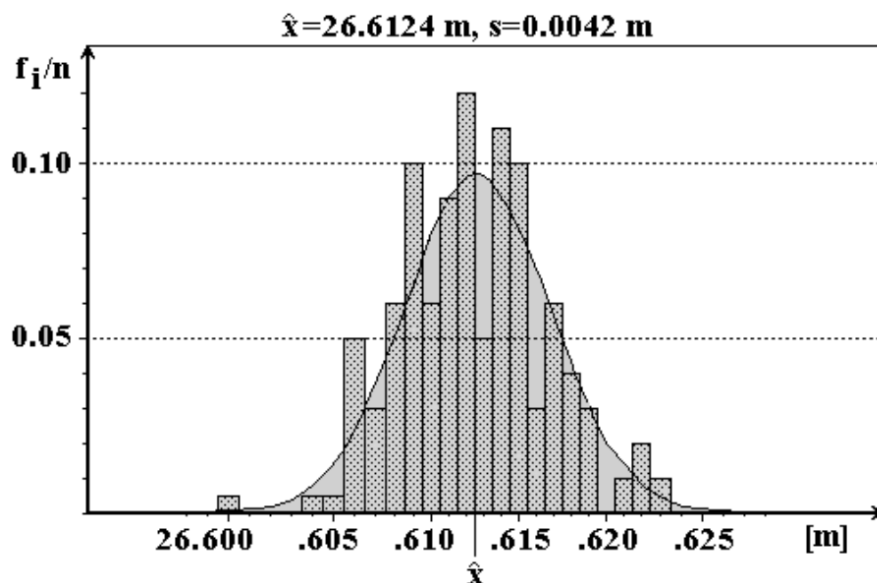
Taulukko 4. Normitetun normaalijakauman μ (0) σ (1) kriittisiä arvoja ja vastaavia todennäköisyyksiä (7, s. 132).

Kriittinen arvo	Todennäköisyys	Kriittinen arvo	Todennäköisyys
-3.300	0.0005	+0.500	0.6915
-3.100	0.0010	+1.000	0.8413
-3.000	0.0013	+1.645	0.9500
-2.575	0.0050	+1.960	0.9750
-2.375	0.0100	+2.000	0.9772
-2.000	0.0228	+2.375	0.9900
-1.960	0.0250	+2.575	0.9950
-1.645	0.0500	+3.000	0.9987
-1.000	0.1587	+3.100	0.9990
-0.500	0.3085	+3.300	0.9995

Mittausten jäännösvirheiden perusteella arvioidaan karkean virheen mahdollisuutta. Usein noin kolmekertaa keskihajontaa suurempia jäännösvirheitä pidetään epäilyttävänä, koska niiden todennäköisyys normaalijakaumassa on vain 0,26 % (7, s. 131.)

5.2.2 Keskihajonta

Keskihajonta eli keskivirhe on arvio satunnaisten virheiden suuruudesta. Havaintojen keskivirhe on aina tarkempi kuin yksittäinen havainto, koska normaalijakautuneet satunnaiset virheet kompensoivat toisiaan. Mittausta voidaan siis tarkentaa toistamalla havaintoja. Havaintosarjan keskihajonta voidaan esittää histogrammin avulla. Histogrammi on tilastotieteissä yleisesti käytetty diagrammi tilastollisesti luokitelluille aineistoille. Mittauksissa käytetään yleisesti kuvan 15 mukaista pylväsdiagrammia, joissa pylväät ovat tasalevyisiä. (7, s. 132.)



Kuva 15. Havaintosarjan histogrammi ja siihen sovitettu normaalijakauma (7. s.133).

Histogrammissa voi olla myös erilevyisiä pylväitä, jolloin pylvään pinta-ala kertoo luokan prosenttiosuuden. Pylväsdiagrammin pylvään korko kertoo, kuinka monta havaintoa osuu kullekin lukuarvolla tai arvovälille. Tyypillisesti suurin osa

havainnoista keskittyy lähelle keskiarvoa. Normaalijakauma tulee sovittaa havaintosarjan histogrammiin laskemalla havaintosuureet oikealle arvolle ja keskihajonnalle. Havaintoarvot ilmoitetaan usein ℓ_n -merkeillä, jossa n on niiden lukumäärä. Mittaustulos saadaan laskettua havaintojen keskiarvona (9). (7, 132–133.)

$$\hat{x} = \frac{\sum \ell_i}{n} \quad (9)$$

\hat{x} on havaintojen keskiarvo
 n on havaintojen lukumäärä
 ℓ_i on havaintoarvo.

Havaintojen jäännösvirheet lasketaan keskiarvon perusteella (10). (7, 132.)

$$v_i = \ell_i - \hat{x} \quad (10)$$

v_i on havainnon jäännösvirhe
 ℓ_i on havaintoarvo
 \hat{x} on havaintojen keskiarvo

Havaintosarjan keskihajonta lasketaan jäännösvirheen perusteella (11). (7, 132–133.)

$$s = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (11)$$

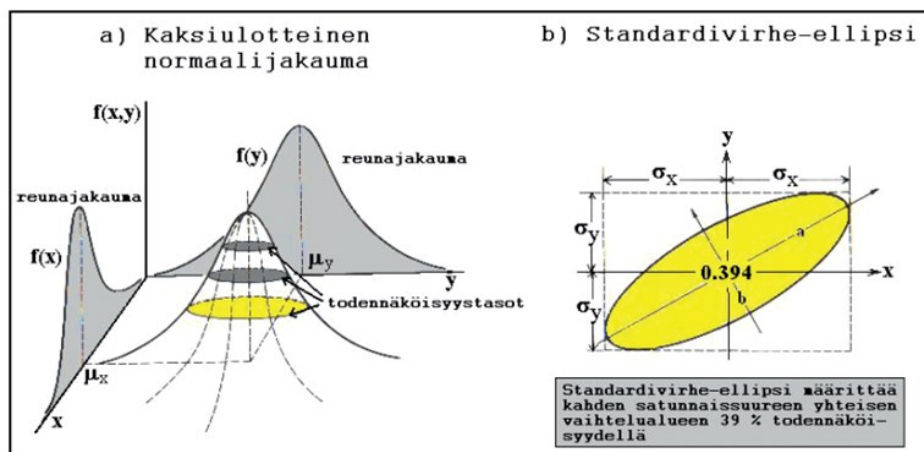
s on havaintosarjan keskiarvo
 v_i on havaintojen jäännösvirhe
 n on havaintojen lukumäärä.

Varianssi on satunnaismuuttujien hajontaa kuvaava termi. Se kuvaa sitä, kuinka paljon keskimäärin havaintojen neliöidyt poikkeamat poikkeavat keskiarvosta. Muun muassa stokastista mallia voidaan esittää varianssien avulla. Kovarianssi

on satunnaismuuttujien riippuvuutta kuvaava termi. Se kuvaa riippuvuutta, joka nähdään muuttujien poikkeamissa keskiarvoissa. (9, s. 194.)

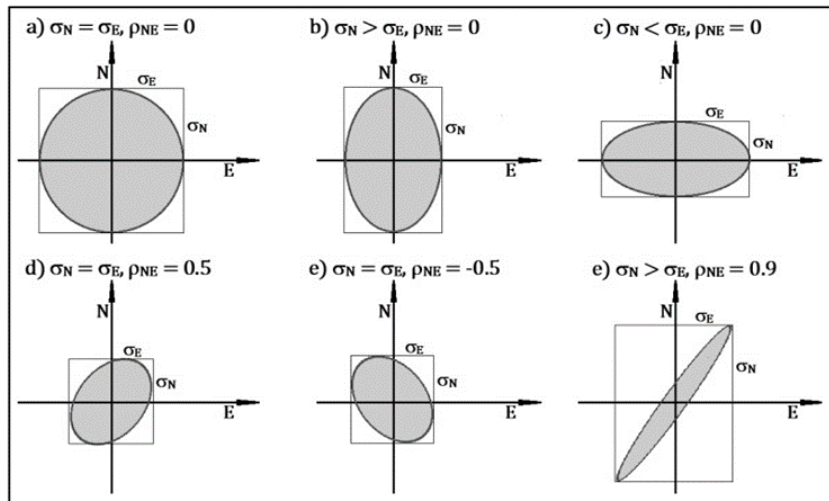
5.2.3 Virhe-ellipsi

Ellipsi on niiden pisteiden joukko, joiden kahdesta polttopisteestä laskettujen etäisyyksien summa on vakio. (1, s. 394). Virhe-ellipsin avulla voidaan kuvata mittaushavaintojen vaihtelua. Virhe-ellipsin muoto ja koko määräytyvät havaintojen hajonnan perusteella. Maan mittauksissa sijaintitarkkuutta tarkastellaan yleensä tasosijaintia (x , y) ja korkeutta (z) erikseen. Keskihajonnan avulla voidaan tarkastella havainnon x - tai y -tarkkuuksia erikseen. Virhe-ellipsin avulla voidaan kuvata x - sekä y -virheitä samanaikaisesti. Maan mittauksissa käytetään kahdenlaisia virhe-ellipsejä, absoluuttisia virhe-ellipsejä ja suhteellisia virhe-ellipsejä. Standardivirhe-ellipsi on virhe-ellipsi, joka esittää havainnon sijainnin 39 prosentin todennäköisyydellä. Standardivirhe-ellipsi (kuva 16) asettuu suorakaitteen sisään, joka muodostuu koordinaattien keskihavaintojen perusteella. (7, s. 134–135.)



Kuva 16. Standardi virhe-ellipsin muodostuminen (1, s. 40).

Virhe-ellipsin koko määräytyy keskihajontojen perusteella. Virhe-ellipsin suunta ja litteys määräytyvät korrelaatiokerroimen ja keskihajontojen perusteella. Korrelaatiokerroin (kuva 17) ilmaisee keskihajontojen korrelaation arvoalueella $(-1, +1)$. (7, s. 137.)



Kuva 17. Korrelaatiokerroimen ja keskihajontojen suhteen vaikutus virhe-ellipsin suuntaan ja muotoon (7, s. 137).

Lähes pyöreän muotoisen virhe-ellipsin korrelaatiokerroin on lähes 0. Lähes pyöreitä virhe-ellipsejä voidaan pitää virheominaisuuksiltaan tasalaatuisina. Voimakkaasti litistyneet ja suuntautuneet virhe-ellipsit esittävät, että mittauksissa on tarkkuudeltaan vaihtelevia, ja niiden korrelaatiokerroimet ovat lähellä arvoa 1 tai -1 . σ_n ja σ_e ovat koordinaattien keskihajonnat ja ρ_{ne} on satunnaissuureiden yhteisjakauman korrelaatiokerroin. (7, s. 137–138.)

5.2.4 Absoluuttinen ja suhteellinen virhe-ellipsi

Absoluuttisella virhe-ellipsillä tarkoitetaan mitatun pisteen koordinaattitarkkuutta. Absoluuttinen virhe-ellipsi kuvataan pisteen päälle, ja siitä ilmenee arvioidun virheen suuruus ja suunta. Absoluuttinen virhe-ellipsi lasketaan koordinaattien variansseista ja niiden välisistä kovariansseista. Takymetrilla tehtävien säteittäisten mittausten virheitä voidaan tarkastella ja kuvata pitkittäis- ja poikittaisvirheinä. Pitkittäisvirhe on sama kuin etäisyyssmittausten keskihajonta, ja se vaikuttaa tähtäyssuunnassa. Poikittaisvirhe vaikuttaa tähtäyssädettä vastaan kohtisuorassa. (7, s. 182–183.)

Suhteellinen virhe-ellipsi kuvaa mitattujen pisteiden arvioidut virheet lähtöpisteisiin nähden. Suhteellinen virhe-ellipsi kuvaa koordinaattierojen tarkkuutta, ja

sitä voidaankin kutsua koordinaattierojen virhe-ellipsiksi. Toisin kuin absoluuttinen virhe-ellipsi, suhteellinen virhe-ellipsi kuvataan pistevälin puoleen väliin. Suhteellinen virhe-ellipsi johdetaan absoluuttisista virhe-ellipseistä virheiden kasaantumissääntöjen mukaisesti. Suhteellinen virhe-ellipsi voi olla pieni, vaikka absoluuttinen virhe-ellipsi olisikin suuri. Suhteellinen virhe-ellipsi on pieni, mikäli pisteillä on paljon yhteisiä virheitä, vaikka absoluuttiset virhe-ellipsit olisivat suuria. (7, s. 182–183.)

5.2.5 Sulkuvirhe

Sulkuvirhe on mitatun arvon ja oikeana pidetyn arvon erotus. Sulkuvirhe saadaan laskettua vain, kun mittaus suljetaan eli lopetetaan pisteelle, jonka koordinaatit tunnetaan. Ilman mittausten sulkemista kaikki mittausten aikana tulleet virheet kasaantuisivat viimeiselle pistevälille. Myöskään mittausten laadunkontrollointi jälkikäteen ole mahdollista ilman mittausten sulkemista. Mittausten sulkuvirheiden tarkastelu on menetelmä, jolla voidaan arvioida mittausten virhettä. Sulkuvirheet voidaan jaotella koordinaattisulkuvirheisiin, pistesulkuvirheisiin, korkeussulkuvirheisiin ja suuntasulkuvirheisiin. (1, s. 225, 352.)

Koordinaattisulkuvirhe on mitatun koordinaatin ja todellisen koordinaatin erotus (12). Koordinaattisulkuvirhe voidaan laskea y-akselin mukaan tai x-akselin mukaan. (1, s. 352.)

$$\begin{cases} W_x = x' - x \\ W_y = y' - y \end{cases} \quad (12)$$

W_x on x-koordinaatin sulkuvirhe

W_y on y-koordinaatin sulkuvirhe

x' on mitattu x-koordinaatti

y' on mitattu y-koordinaatti

x on todellinen x-koordinaatti

y on todellinen y-koordinaatti

Pistesulkuvirhe (W_p) on koordinaattisulkuvirheiden yhdistelmä (13). (1, s. 352.)

$$w_p = \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (13)$$

w_p on pistesulkuvirhe

W_x on x-koordinaatin sulkuvirhe

W_y on y-koordinaatin sulkuvirhe

Korkeussulkuvirhe lasketaan vastaavasti mitatun korkeuden ja todellisen korkeuden erotukselle (14). (1, s. 352.)

$$w_h = h' - h \quad (14)$$

w_h on korkeussulkuvirhe

h' on mitattu korkeus

h on todellinen korkeus.

Suuntasulkuvirhe eli kulmasulkuvirhe on kulmahavaintojen summan ja oikean arvon erotus. Kulmasulkuvirhetarkastelu on yleinen tapa tarkistaa takymetrillä tehtävän jonomittauksen tarkkuutta. Takymetrin jonomittauksen kulmasulkuvirhe saadaan laskettua vain, kun lähtöpisteiden liitokset tehdään täydellisinä liitoksina. Suuntasulkuvirhetarkastelua käytetään erityisesti jonomittaukset lähtöpisteiden tarkistukseen. Suuntasulkuvirhe on mitatun sulkusuunnan ja todellisen sulkusuunnan erotus (15). (1, s. 352.)

$$w_t = t' - t \quad (15)$$

w_t on suuntasulkuvirhe

t' on mitattu sulkusuunta

t on todellinen sulkusuunta.

Suhteellinen tarkkuus lasketaan arvioidun sulkuvirheen ja pistevälin pituuden avulla (16). (1, s. 352.)

$$r = \frac{w}{L} \quad (16)$$

r on suhteellinen tarkkuus

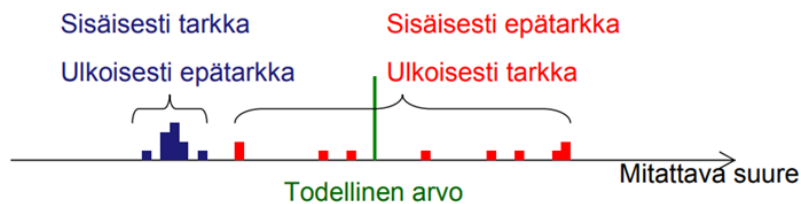
w on sulkuvirhe

L on pistevälin pituus.

Suhteellinen tarkkuus esitetään usein ppm-arvona. Ppm kertoo kuinka monta miljoonasosaa arvioitu virhe on matkasta. Mittausohjeet JHS184 (3) ja Liikenneviraston mittausohje lo18/2017 (4) ohjeistavat raja-arvot suhteellisille pistesulkuvirheille sekä korkeussulkuvirheille.

5.3 Sisäinen ja ulkoinen tarkkuus

Virheen ja tarkkuuden suhde on kääntäen verrannollinen, eli tarkkuus on virheiden arvioitu suuruus. Tarkkuus voidaan jakaa sisäiseen tarkkuuteen ja ulkoiseen tarkkuuteen. Sisäinen ja ulkoinen tarkkuus eivät ole suoraan riippuvaisia toisistaan. Mittaus voi olla sisäisesti tarkka ja ulkoisesti epätarkka, jos havaintojen hajonta on pientä, mutta kaikkiin mittauksiin vaikuttaa jokin sama systemaattinen virhe (kuva 18). (2; 10.)



Kuva 18. Sisäinen ja ulkoinen tarkkuus (10).

Ulkoinen tarkkuus kuvaa mittausten oikeellisuutta koordinaatistossa ja sisäinen tarkkuus kuvaa havaintojen tarkkuutta suhteessa toisiin mittauksiin. Ulkoisesti tarkassa mittauksessa mitatut pisteet ovat lähellä todellisia arvoja. Sisäisellä tarkkuudella tarkoitetaan havaintojen tarkkuutta suhteessa toisiinsa. Sisäinen

tarkkuus kuvaa havaintojen keskinäistä yhteensopivuutta eli hajontaa. Sisäisesti tarkassa mittauksessa havaintojen hajonta on pientä. Mittausten sisäinen tarkkuus on hyvä, jos se sisältää vain satunnaisvirheitä ja havaintojen hajonta on pientä. Mittausten sisäinen tarkkuus kuvaa mittausten yhteensopivuutta. Sisäinen virhe esitetään usein ppm-arvona jakamalla suhteellisen virhe-ellipsin isoakselin puolikas pistevälin pituudella. (2; 10.)

6 Tasoituslaskennat

6.1 Tausta

Tasoituslaskenta on mittaus- ja kartoitustekniikassa käytetty laskenta, johon on käytetty pienimmän neliösumman menetelmää. Nimitys tasoituslaskenta juontuu siitä, että laskennassa jaetaan eli tasoitetaan havaintojen virheet uudelleen. Tasoituslaskennan tarkoitus on laskea tuntemattomille sellaiset arvot, jotka perustuvat tasapuolisesti kaikkiin mittauksiin. Esimerkiksi tasoittamattoman jonomittauksen virheet kasvavat mittauksista etenemissuunnassa, koska sitä rasittavat kaikki mittauksen virheet. (11, s. 9–10.)

6.2 Jonotasoitus

Jonotasoitusta käytetään yksittäisten jonomittausten tai -vaaitusten tasoitukseen. Jonotasoituksessa sulkuvirhe jaetaan kojeasemien lukumäärien suhteessa, tai matkan suhteessa mitatuille pisteille. Tasoituksessa siis virhe ei poistu, vaan se jaetaan, eli tasataan. Jonotasoituksessa oletetaan, että virhe on koko matkan aikana kasautunut virhe, ja että lähtöpisteet ovat virheettömiä. Jonotasoitusta käytetään yleisimmin jonovaaituksissa. Jonovaaituksessa tehdään harvoin ylimääritystä, jota ilman pienimmän neliösumman menetelmää ei pystytä käyttämään. (1, s. 226.)

6.3 Redundanssi

Redundanssi tarkoittaa ylimääritystä tai toistetta. Maan mittauksissa redundanssilla tarkoitetaan ylimääräisiä havaintoja, jotka tuotetaan toistamalla mittauksia. Ylimääritys ei siis ole välttämätöntä mittaustuloksien aikaan saamiseksi, mutta se on välttämätön mittausten laadun- ja tarkkuudenvarmistus toimenpide. Ilman ylimääritystä mittausten tarkkuuden ja virheiden kontrollointi on heikkoa. Kaikki Maan mittauksissa käytetyt tasoituslaskentamenetelmät vaativat redundanssia. (7, s. 180.)

Mittaukset voidaan jakaa havaintojen ylimäärän eli redundanssin mukaan määrättömään mittaukseen, määräiseen mittaukseen ja ylimääritettyyn mittaukseen. Määrättömässä mittauksessa kaikkia mittaukseen tarvittavia havaintoja ei olla suoritettu, joten suureiden laskenta ei ole mahdollista. Määräisessä mittauksessa riippumattomia määritysytälöitä on yhtä monta kuin määritettäviä suureita. Määräisellä mittauksella on siis vain yksi mahdollinen ratkaisu. Maan mittauksessa ylimääritystä on kahdenlaista, havaintojen toistoon liittyvää ylimääritystä sekä mittauksen rakenteeseen liittyvää ylimääritystä. (7. s. 195–196.)

6.4 Pienimmän neliösumman menetelmä

Pienimmän neliösumman menetelmä on geodeettisen ja mittausteknillisen laskennan perusmenetelmä. Se on tilastomatemattinen estimointimenetelmä, jota on käytetty yli kaksisataa vuotta mittausten laskennassa. Estimoinnissa tarvitaan differentiaalilaskentaa, matriiseja ja tilastomatemattisia testejä. Termi pienimmän neliösumman menetelmä on saanut alkunsa menetelmän minimointitehtävästä, jossa ratkaistaan tuntemattomia minimoimalla funktio, joka on residuaalien neliöiden summa. Suomessa menetelmä tuli käyttöön viimeistään venäläisskandinaavisen astemittauksen yhteydessä vuosina 1830–1851. Pienimmän neliösumman menetelmää käytetään Maan mittauksiin, joissa on tehty ylimääritystä eli redundanssia. Ylimääritetyissä mittauksissa mittaushavaintoja on enemmän kuin määritettävien suureiden laskenta vaatii. Pienimmän neliösumman laskennassa ei poisteta virheitä, vaan muutetaan niiden jakaumaa painotuksien avulla. Havainnon paino on kääntäen verrannollinen havainnon varianssiin. (6, s. 83; 7, s. 191.)

Pienimmän neliösumman menetelmä tuottaa hyvin perusteltuja mittaustuloksia virhe- ja tarkkuusarvioineen. Menetelmässä ratkaistaan tuntemattomien suureiden lisäksi jäännösvirheet eli residuaalit tai näennäiset virheet. Laskennassa tuntemattomat ja havaintojen residuaalit ratkaistaan minimoimalla jäännösvirheiden painotettu neliösumma. Residuaali, eli jäännösvirhe määritelleen vähentämällä suureen laskettu arvo havaintoarvosta. (7, s. 192.)

Jos tasoituksessa on useita erilaisia havaintosuureita, voidaan tutkia myös standardisoituja residuaaleja. Standardisoitu residuaali on havainnon residuaali jaettuna residuaalin keskivirheellä (17). Poikkeava havaintona voidaan pitää havaintoa, jonka standardisoitu jäännösvirhe on itseisarvoltaan suurempi kuin 2.8. (3.)

$$v_{std} = \frac{v}{\sigma_v} \quad (17)$$

v_{std} on standardisoitu residuaali

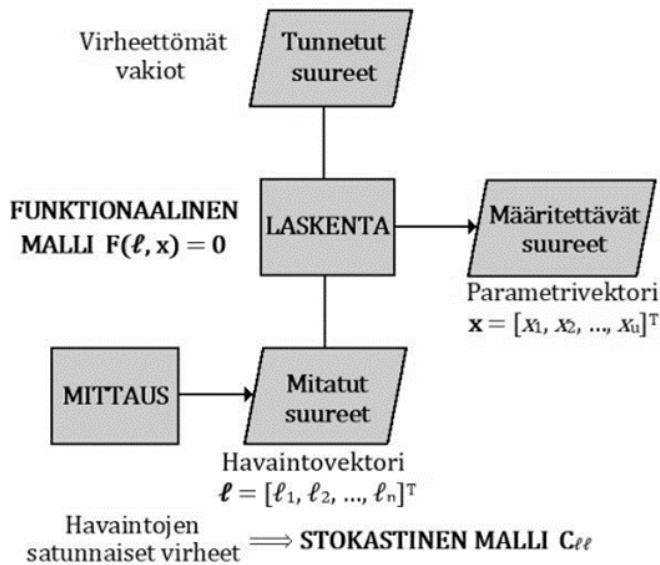
v on havainnon residuaali

σ_v on residuaalin keskivirhe.

Laskutoimituksessa havaintojen ja parametrien avulla luodaan funktionaalinen malli ja havaintojen virhetarkastelujen avulla luodaan stokastinen malli. Näiden sekä likiarvojen avulla saadaan monien laskutoimitusten kautta tasoitetut tulokset sekä tulosten tarkkuusluvut. (7, s. 192.)

6.4.1 Matemaattinen malli

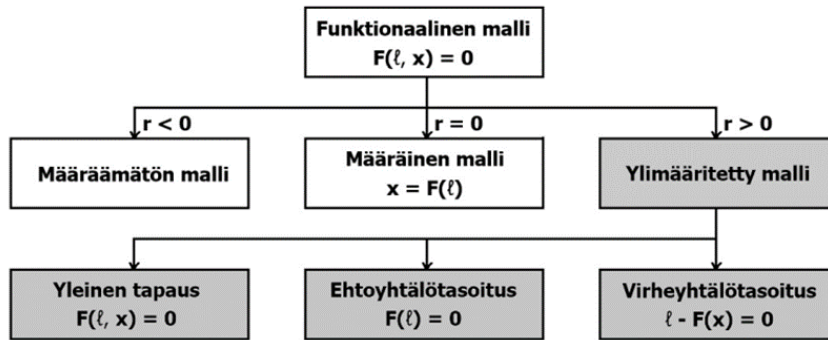
Mittauksista muodostetaan matemaattinen esitys tai menetelmä, jonka avulla voidaan kuvata muuttujien välisiä suhteita. Matemaattisia malleja on erityyppisiä. Mittauksessa käytetty matemaattinen malli (kuva 19) muodostuu funktionaalisesta ja stokastisesta mallista. (7, s. 179.)



Kuva 19. Mittauksen matemaattinen malli (7, s. 179).

Stokastinen malli esittää havaintojen satunnaiset virheet eli kääntäen havaintojen oletetun tarkkuuden varianssien avulla. Funktionaalinen malli esittää mittauksessa esiintyvien tunnettujen suureiden, mitattujen suureiden eli havaintojen ja määritettävien suureiden eli parametrien välille oletetut geometriset tai muut riippuvuudet. (7, s. 178.)

Mittausten funktionaalisen mallit voidaan jakaa rakenteellisen ylimäärityksen perusteella määrällisiin, määräisiin ja ylimääritettyihin tapauksiin. Ylimääritetty mittaukset ovat tasoituslaskennan tapauksia, ja ne voidaan jakaa edelleen funktionaalisen mallin perusteella kolmeen tapaukseen; yleinen tapaus, ehtoyhtälötasoitus ja virheyhtälötasoitus (kuva 20). (7, s. 197.)

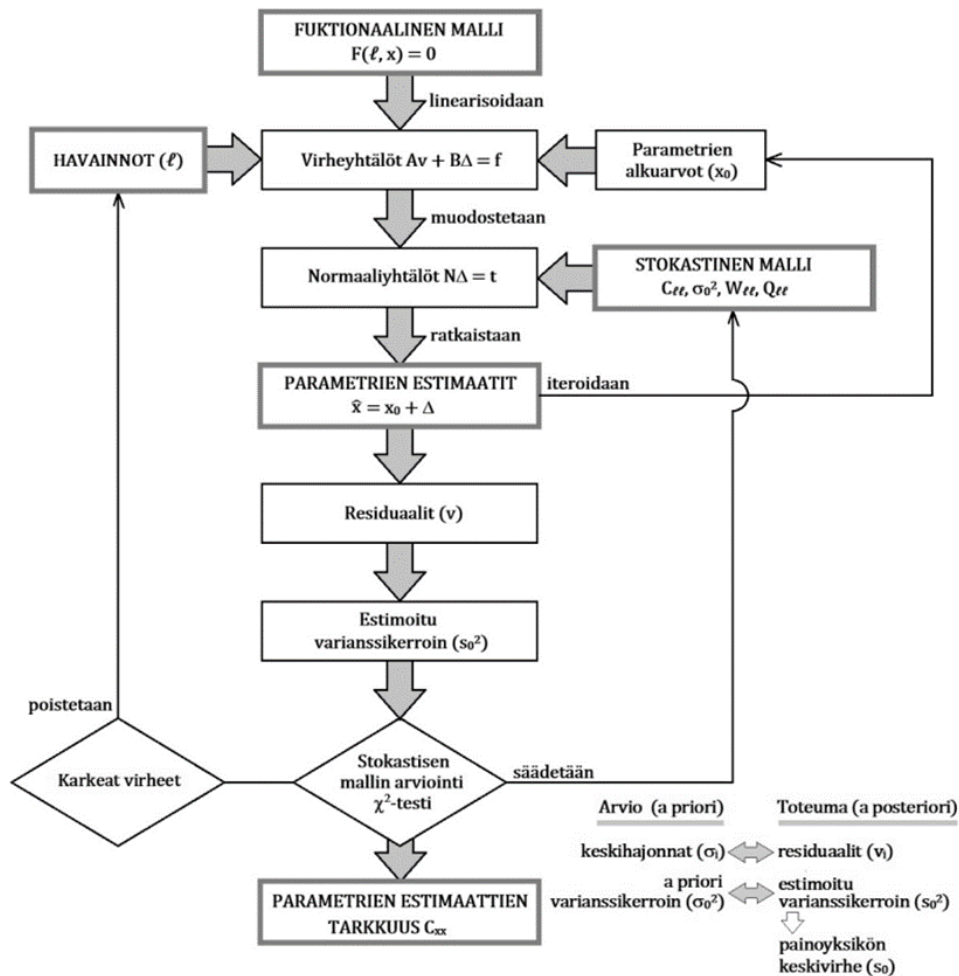


Kuva 20. Funktionaalisen mallin jaotteleminen (7, s.197).

Ehtoyhtälötasoitus ja virheyhtälötasoitus ovat funktionaalisen mallin perusratkaisut. Maan mittauksissa ja koordinaattimuotoisissa mittausten laskennassa yleisin tapaus on virheyhtälötasoitus. Virheyhtälötasoituksella käsitellään havaintojen ja määritettävien suureiden eli parametrien välisiä riippuvuuksia. Ehtoyhtälötasoituksessa tasoituksessa sisältää vain havaintoja eli se ei sisällä parametrejä. (7 s. 197.)

6.4.2 Laskutoimitusprosessi

Pienimmän neliö summan määritelmään kuuluu useita eri laskutoimitusvaiheita. Laskennat tuloksena saadaan mittausten residuaalit ja määritettyjen suureiden tarkkuus (kuva 21).



Kuva 21. Pienimmän neliösumman ratkaisun vaiheet (7, s. 203).

Mittaukselle luodaan funktionaalinen malli. Funktionaalinen malli muodostetaan havaintojen ja parametrien avulla. Linearisoimalla funktionaalinen malli saadaan virheyhtälöt. Virheyhtälöistä muodostetaan normaaliyhtälöt, ja normaaliyhtälöstä ratkaistaan parametrien parannukset. Parametrien estimaatit saadaan muodostettua, kun alkuarvoihin lisätään parametrien alkuarvojen parannukset. Parametrien estimaattien jälkeen lasketaan residuaalit ja määritettyjen suureiden tarkkuus. (7, s. 202–203.)

7 Tilastolliset tarkistusmenetelmät

7.1 Tausta

Tilastomatemattisten testien tulokset ovat yksi menetelmä, jolla perusteellaan mittausten laatua tasoituslaskennan jälkeen. Mittaustulosten arviointeihin sovelletaan yleisesti tilastotieteissä käytettyjä tilastollisia varianssianalyyskejä, kuten f-testi, t-testi, w-testi ja khiin-neliötesti. Tilastolliset testaukset suoritetaan jälkilaskentaohjelmistoilla tasoituslaskennan jälkeen. Testeillä pyritään perustelemaan mittausten luotettavuutta, mutta testejä voidaan myös hyödyntää virheiden paikantamiseen. Testien omaisuuspiirteeseen kuuluu usein erilaisten matemaattisten ja stokastisten mallien tai merkittävyydstasojen ja kriittisten arvojen määrittäminen ennen laskentaa.

7.2 F-testi

F-testi on testisuure, jota käytetään muun muassa varianssianalyysissä. Varianssianalyysissä tarkastellaan selittävien muuttujien ryhmäkeskiarvoja. Varianssianalyysillä analysoidaan selittävän muuttujan keskiarvoja selittävän muuttujan eri luokissa. Analyysin lähtöoletuksena eli nollahypoteesina on, että luokkien keskiarvot ovat yhtä suuret. Nollahypoteesi hylätään, mikäli selitettävän muuttujan keskiarvojen välillä on eroja selitettävän muuttujan eri luokissa. (11, s. 448.)

Mittausohjelmissa F-testiä kutsutaan kokonaismallin testiksi, koska se testaa annettuja matemaattisia ja stokastisia malleja yleisesti. F-arvo määritellään jakamalla posterio varianssitekijä priori varianssitekijällä (18). (13, s. 356.)

$$F = \frac{s^2}{\alpha^2} \quad (18)$$

F on F-arvo

s^2 on posterio varianssitekijä

α^2 on priori varianssitekijä.

Posteriorio varianssi on johdettu lasketuista residuaaleista ja redundansseista. Varianssisuhde on hyväksytty, kun se on lähellä arvo 1.00. Tällöin havaintovirhe ja jäännösvirhe ovat sopivassa suhteessa toisiinsa nähden. F-testi ollessa alle 1.00 arvioitu havaintovirhe on suurempi kuin jäännösvirhe. F-testin antama tieto eli nollahypotenuusan hylkääminen tai hyväksyminen ei ole spesifistä. Siksi, jos nollahypotenuusa hylätään, on syytä tarkastella syitä hylkäämiselle. F-testin nollahypotenuusan hylkäämiselle on kolme pääsyitä, Karkeat virheet, vääränlainen matemaattinen malli tai vääränlainen stokastinen malli. F-testi ei kuitenkaan itsessään kerro syytä hylkäämiselle, vaan se on tehtävä muiden testien avulla, esimerkiksi w-testin avulla. (13, s. 356.)

7.3 χ^2 -testi

χ^2 -testi eli khiin-neliötesti on tilastollinen testi, jolla tarkastellaan, onko kahden luokkamuuttujan välillä riippumattomuutta. Khiin neliötestillä ei siis voida selvittää minkä suuntainen riippuvuus on. Testissä verrattavista suureista muodostetaan ristintaulukko. Ristiintaulukoinnilla (taulukko 5) kuvataan kahden muuttujan luokkien jakautumista. (9, s. 224.)

Taulukko 5. Ristiintaulukointi.

	Kyllä	Ei	Yhteensä
Ryhmä 1	100	30	130
Ryhmä 2	50	20	70
Yhteensä	150	50	200

Ristiintaulukoinnin avulla lasketaan odotetut frekvenssit. Ristiintaulukoinnissa voidaan käyttää prosenttilukemia, mutta itse khiin neliötestauksessa käytetään aina lukumääriä. Odotettu frekvenssi lasketaan jakamalla rivien ja sarakkeiden reunajakaumien tulo havaintojen määrällä. Odotettujen ja havaittujen

frekvenssien avulla lasketaan khii toiseen-testisuure. Tämän jälkeen selvitetään, onko mitattu testisuure tilastollisesti merkittävä. Jokaisesta solusta lasketaan ristiintaulukon solu ja niistä lasketaan odotetun frekvenssin ja havaitun frekvenssin ero, joka korotetaan neliöön, ja saatu tulos jaetaan frekvenssi arvolla. Koko ristiintaulukon χ^2 -luku saadaan laskemalla yhteen kaikki solukohtaiset arvot (19). (9, s. 224–225.)

$$\chi^2 = \frac{(O_1 - E_1)^2}{E_1} + \frac{(O_2 - E_2)^2}{E_2} + \dots \quad (19)$$

χ^2 on ristiintaulukon χ^2 -luku

O on odotettu frekvenssi

E on havaittu frekvenssi.

Tasoituskenttäohjelmistoissa χ^2 -testissä, nollahypoteesinä toimii oletus, että tasoituksesta saatu painoyksikön varianssi on sama kuin painoyksikön varianssi ennen tasoitusta. Nollahypoteesin hylkäys johtuu siitä, onko havaintojen joukossa poikkeavia havaintoja tai onko havaintojen keskinäinen painotus oikein. (3.)

7.4 W-testi

W-testi menetelmä on tilastollinen testi, jolla pyritään havaitsemaan yksittäisiä karkeita virheitä. W-testi on suunniteltu testaamaan havaintojen ja kontrollien välisiä jakautumiseroja kategorisille muuttujajoukoille. W-testi on yksiulotteinen testi, joka tarkistaa hypoteesin, joka olettaa, että on vain yksi virheellinen havainto kerrallaan. W-testiä voidaan tehdä yksittäisten havaintojen suuntiin, matkoihin, zenittikulmiin, atsimuuttiin tai korkeuseroihin. W-testi ei testaa havaintoja kaksi- tai kolmiulotteisesti. (13, s. 357–358.)

F-testi on kokomallin testi, eikä sen herkkyys riitä havaitsemaan yksittäisiä virheitä. F-testi ei myöskään kerro syytä hylkäämiselle. W-testillä pyritään havaitsemaan yksittäisiä karkeita virheitä, joita ei pystytä havaitsemaan F-testillä. W-testi perustuu oletukseen, että vain yhdessä havainnossa on epäiltävä

poikkeama ja muut havainnot pitävät paikkaansa. W -testi voidaan tehdä mittauksen kaikille havaintoryhmille. Tätä prosessia voidaan kutsua englanninkielisellä termillä data snooping. W -testille annetaan merkittävyytason arvo (α_0). Merkittävyytaso $\alpha_0=0,001$ tarkoittaa yhtä väärää hylkäämistä jokaista 1000:tta havaintoa kohden. Geodeettisissa mittauksissa käytetään yleensä kriittisiä arvoja väliltä $\alpha_0=0,001-0,05$. Merkittävyytason perusteella määräytyy kriittinen arvo w_{rit} (taulukko 6). (13, s. 357–358.)

Taulukko 6. Kriittinen arvo ja merkittävyytaso (13, s. 358).

Merkittävyytaso (α_0)	0.001	0.010	0.050
Kriittinen arvo (W -test)	3.29	2.58	1.96

W -testi hylätään, kun W -testin tulos on suurempi kuin kriittinen arvo W_{rit} . Matalan kriittisen arvon valinta johtaa korkeampaan merkittävyytsoon ja saattaa siten aiheuttaa kelvollisten havaintojen hylkäämisiä.

7.5 T-testi

W -testi on yksiulotteinen testi, jolla voidaan testata vektoreiden DX -, DY ja DZ komponentteja vain erikseen. Vektoreiden DX , DY ja DZ komponentteja voidaan kuitenkin tarkastella yhdessä T -testin avulla. T -testi on määrällinen keskiarvojen tilastollinen testi, jolla voidaan tutkia kaksi- tai kolmiulotteisesti. Testin edellytyksenä on, että havainnoissa on vain satunnaisia virheitä, jotka ovat normaalijakautuneita. T -testejä voidaan jakaa yhden otoksen t -testiin ja kahden otoksen t -testiin. Yhden otoksen t -testillä selvitetään yhden luvun ja perusjoukon välisiä eroja. Kahden otoksen t -testillä selvitetään kahden itsenäisen perusjoukon keskiarvojen välisiä eroja. (9, s. 228.)

T -testi toteutetaan neljässä vaiheessa. Ensinnäkin lasketaan t -tunnusluku perusjoukkojen keskiarvojen, keskihajontojen ja havaintojen lukumäärän perusteella. Seuraavaksi lasketaan vapaussuhde perusjoukkojen havaintojen lukumäärien perusteella. Vapaussuhteen laskemisen jälkeen määritetään t -testillä oma

kriittinen arvo. Lopuksi vielä verrataan t-tunnusluvun itseisarvoa kriittiseen arvoon. T-testillä voidaan testata esimerkiksi vektoreita kokonaisuutena. T-testillä voidaan testata esimerkiksi vektoreiden havaintopointteja, jotka johtuvat yksittäisen pisteen pohjoista- tai itäkoordinaatin karkeasta virheestä. (13, s. 358–359.)

8 Inkoon liikennepaikan mittausperusta

Tässä luvussa käsitellään sitä, kuinka Inkoon liikennepaikan mittausperustan laskentojen laadunvarmistus on toteutettu. Kohteen laadunvarmistusprosessia voidaan hyödyntää myös muissa vastaavissa kohteissa. Inkoon liikennepaikalle rakennettiin ja mitattiin uusi mittausperusta tulevia maastomittauksia varten. Maastoon rakennettiin neljä E4-hierarkialuokan peruskiintopistettä sekä yhdeksän E5-luokan käyttökiintopistettä. Peruskiintopisteiden tasokoordinaatit mitattiin staattisella GNSS-mittauksella ja käyttökiintopisteet jonomittauksena takymetrillä. Korkeuden määrittäminen suoritettiin jonovaahtauksella. Mittausperustan rakentamisessa, mittauksissa ja laskennoissa noudatettiin Julkisen hallinnon suositusta JHS184 (3) ja Liikenneviraston ohjetta 18/2017 (4).

8.1 Peruskiintopisteiden staattisten GNSS-mittausten jälkilaskenta

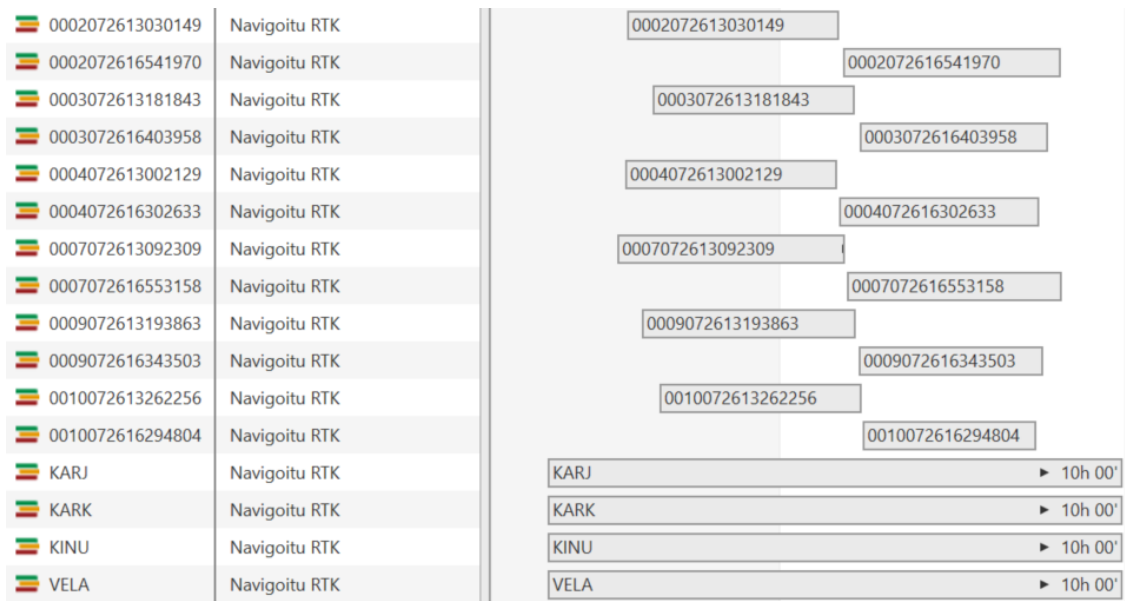
Staattisten GNSS mittausten jälkilaskennan tarkoitus on ratkaista vektorit ja tasoiittaa verkko pienimmän neliösumman virheyhtälötasoitukseksi. Tasoituksen tuloksena saadaan uusille kiintopisteille koordinaatit sekä tulokset verkon laadusta ja luotettavuudesta. Jälkilaskennat suoritetaan siihen soveltuvalla laskentaohjelmistolla. Staattisen GNSS-mittauksen jälkilaskenta-prosessi koostuu havaintojaksottaisesta vektoreiden ja verkon tasoituksesta, koko verkon vapaasta verkkotasoituksesta ja koko verkon kiinteästä verkkotasoituksesta. (2; 3, s. 11–12.)

Inkoon liikennepaikan mittaukset suoritettiin kahdella havaintojaksolla ja kuudella vastaanottimella. Satelliittivastaanottimia oli kaikilla neljällä uudella E4-luokan kiintopisteellä, lähtöpisteellä 06M6082 ja kontrollikiintopisteellä 06M6080.

Mittausten lähtöpisteinä toimivat E2-luokan HxGN Smartnet tukiasemat KARJ, KINU, VELA ja maanmittauslaitoksen passiivinen E3-luokan kiintopiste 06M6082. Jälkilaskennat suoritettiin Leica Infinity -ohjelmistolla.

8.1.1 Havaintojaksottainen verkon tarkistus ja laadunvarmistus

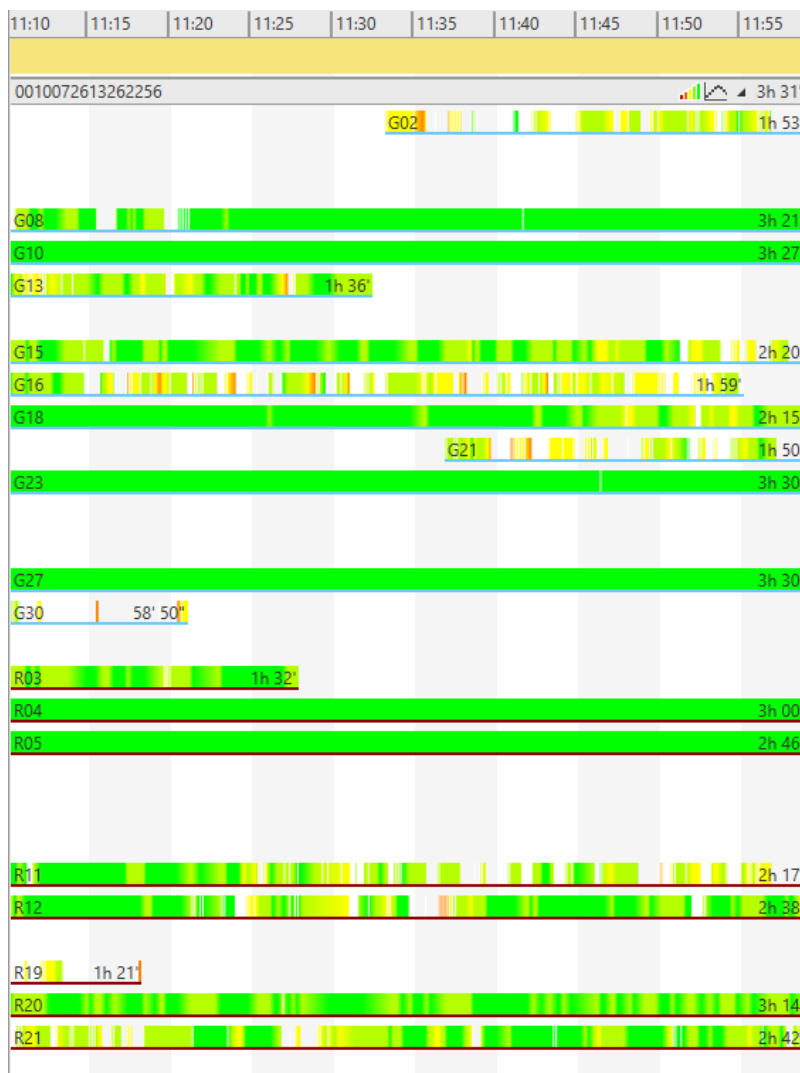
Staattisille GNSS-mittauksille suoritetaan päivittäin sessiokohtainen vektorilasenta. Ennen laskentaa tarkistetaan mittauksen karkeat virheet sekä säädetään mittauksien korjaukset. Mittausdatoista tarkistetaan, että vastaanottimien antennityypit, antennikorkeudet ja vastaanottimien katkaisukulma ovat oikeita. Sessiokohtaisia mittauksista varmistetaan myös, että havaintojen keruussa alkutuntemattomat ovat ratkenneet ja että havaintojakson pituus on vaatimuksien mukainen. Inkoon liikennepaikan mittauksissa oli kaksi havaintosessiota, ja molemmat havaintosessiot suoritettiin samana päivänä. Kuvassa 22 on esitetty staattisen GNSS-mittauksen havaintojaksot.



Kuva 22. Staattisen GNSS-mittauksen havaintoaikojen tarkastelu.

Havainnoista ensimmäisenä tarkasteltiin, että havaintoajat ovat riittäviä, ja varmistettiin, että aktiivisten tukiasemien havaintotiedostot ovat saatavilla luotausajankohdille. Tämän jälkeen tarkastettiin vielä alkutuntemattomien ratkaisut.

Tavoitteena on geodeettiset vektorit eli FIX-ratkaisut, joissa alkutuntemattomat ratkeavat kokonaislukuina. Leica Infinity -ohjelmistolla voidaan tarkastella ja poistaa huonoa mittausdataa satelliiteittain. Satelliittien huonoja havaintojaksoja voidaan etsiä GNSS-intervallit-ikkunasta SNR- eli Signal to Noise -arvon perusteella. Jokaisen satelliittivastaanottimen data tarkasteltiin yksitellen GNSS-intervallit ikkunasta. GNSS-intervallit-ikkunassa vihreä on hyvää dataa ja oranssi ja punainen ovat huonoa dataa tai signaalikatkoja SNR-arvon perusteella (kuva 23).



Kuva 23. Kiintopisteen 7170 toisen havintosession havaintodatojen tarkastelu.

Inkoon liikennepaikan mittausten datat ovat pääosin hyviä. Huonoja dataa löytyi ainoastaan kiintopisteen 7170 mittausdatoissa. Huonoja dataa oli molemmissa havaintojaksoissa kiintopisteellä 7170, joten kiintopiste on selvästi sijoitettu vähän peitteisemmälle sijainnille. Huonot datat poistettiin laskennasta.

Päivittäisen vektorilaskennan yhteydessä tulee myös varmistaa, että ohjelmistossa on valittu oikeat satelliittiantennien mallit sekä antennin epäkeskisyyksi eli dimensiot antennin reunasta vaihekeskipisteeseen. Inkoon staattisen GNSS-mittaukset suoritettiin Leica-merkkisillä satelliittiantenneilla, joten antennien tyyppi- ja ominaisuustiedot ovat saataville suoraan Leica Infinity ohjelmistosta. JHS184-ohjeistus ohjeistaakin käyttämään antennityyppisiä, jotka ovat laskentaohjelmiston tuntemia (3, s. 9.). Tässä vaiheessa mittaushavainnoille asetettiin myös oikeat antennikorkeudet, jotka ovat kirjattu mittausten suoritusten aikana havaintokirjaan.

Leica Infinity ohjelmistolla voidaan tarkastella myös tasoittamattomien vektoreiden silmukkavirheitä. Ohjelmisto tekee silmukka-analyysin automaattisesti kaikille verkon silmukoille. Silmukkavirheitä voidaan tarkastella Lenkit ja sulkuvirheet -raportista. Silmukan eli lenkin tarkkuutta voidaan arvioida absoluuttisena sulkuvirheenä, suhteellisena sulkuvirheenä tai w-testin avulla (kuva 24).

Lenkit ja sulkuvirheet -raportti				
Lenkki 11				
Mistä	Mihin	ΔX [m]	ΔY [m]	
6920 (26.07.2023 13:00:12)	06M6080 (26.07.2023 13:02:42)	-103,3126	2 713,4662	
6920 (26.07.2023 16:30:22)	06M6080 (26.07.2023 13:02:42)	-103,3174	2 713,4620	
Keskiarvo		-103,3150	2 713,4641	
06M6080 (26.07.2023 13:02:52)	7150 (26.07.2023 09:37:12)	1 078,1696	-4 384,9619	
06M6080 (26.07.2023 16:34:32)	7150 (26.07.2023 13:22:22)	1 078,1605	-4 384,9663	
Keskiarvo		1 078,1650	-4 384,9641	
7150 (26.07.2023 09:37:12)	6920 (26.07.2023 13:00:12)	-974,8526	1 671,4945	
7150 (26.07.2023 13:22:22)	6920 (26.07.2023 16:30:22)	-974,8413	1 671,5013	
Keskiarvo		-974,8470	1 671,4979	
WGS84 Karteesinen		X	Y	Z
Sulkuvirhe		0,0031 m	-0,0020 m	0,0059 m
W-testi		0,69	-0,45	1,33
Paikallinen Tasokoordinaatio		Pohjoinen	Itä	Korkeus
Sulkuvirhe		0,0012 m	-0,0031 m	0,0061 m
W-testi		0,28	-0,69	1,37
Sulkuvirhe		Pituus	PPM	Suhde
0,0070 m		9 250,6497 m	0,8	1/1327111

Kuva 24. Lenkit ja sulkuvirheet -raportti.

Inkoon liikennepaikan mittausperustan silmukkatarkastelujen suurin suhteellinen sulkuvirhe oli 0,8 ppm. JHS 184 ohjeistuksen raja-arvo pistesulkuvirheelle E4-hierarkialuokassa on 75 millimetriä (3, s. 17). Sulkuvirhetarkasteluista ei löytynyt yhtään raja-arvoja ylittävää pistesulkuvirhettä, joka olisi edellyttänyt tarkempaa selvitystä.

8.1.2 Vapaa verkkotasointus

Tasointuslaskennan toisessa vaiheessa kaikki havaintojaksot yhdistetään yhdeksi verkoksi. Yhdistämällä verkot yhdeksi verkoksi varmistetaan eri havaintojaksojen yhteensopivuus. Tätä vaihetta kutsutaan vapaan verkon tasointukseksi, koska verkkoa ei kiinnitetä lähtöpisteisiin. Vapaan verkon tasointuslaskenta tehdään, jotta saadaan arvio sisäisen tarkkuuden luotettavuudesta. Vapaan verkon tasointuksen tuloksena saadaan kiintopisteiden alustavat koordinaatit, niiden kovarianssimatriisi sekä vektoreiden jäännösvirheet, painotusyksiköt ja painoyksikköjen keskivirheet.

Tässä vaiheessa pyritään etsimään, paikallistamaan sekä poistamaan karkeit virheitä. Ensin verkolle suoritetaan tasointuslaskenta, jonka jälkeen tehdään tulosten arviointi. Huonot vektorit etsitään ja poistetaan, jonka jälkeen aiempi tasointus poistetaan ja verkolle suoritetaan uusi tasointuslaskenta. Tätä toistetaan, kunnes kaikki huonot vektorit on paikallistettu ja poistettu. Huonoja ja toistomittattuja vektoreita voidaan tarkastella ja paikallistaa yksitellen manuaalisesti tai Leica Infinity ohjelmiston w- tai t-testien avulla, jolloin ohjelma korostaa etsii ja korostaa automaattisesti huonot vektorit.

Tasointuksen tuloksia tarkastellaan vapaan verkon verkkotasointusraportista. Tuloksia voidaan arvioida tarkastelemalla tarkastella tarkemmin tasoitettuja vektoreita, niiden jäännösvirheitä sekä tilastollisia testejä. Jäännösvirheitä voidaan tarkastella absoluuttisina virheinä, suhteellisina virheinä tai tilastollisina w- tai t-testeinä. W-testillä pystytään tarkastamaan vektoreita komponenteittain, ja havainnoimaan, onko virheen suunta x-, y- vai z-suuntainen. T-testillä pystytään tarkastelemaan vektorin virhettä kaksi- tai kolmiulotteisena.

Huonojen vektoreiden etsiminen aloitettiin tarkastelemalla toistomitattujen vektoreiden pituuksia keskenään. JHS184-ohjeistuksen mukaan suurin sallittu ero kahteen kertaa havaittujen vektoreiden välillä saa olla enintään 75 millimetriä (3, s. 7). Yksikään toistomitatuista vektoreista ei ylittänyt 20 millimetrin eroa. 75 millimetriä on kuitenkin melko suuri raja-arvo, eikä ota huomioon suhteellista tarkkuutta, joten huonojen vektoreiden etsimistä jatkettiin tarkastelemalla havaintotestejä.

T-testin avulla paikallistettiin kaksi huonoa vektoria laskennasta. Nämä olivat toistomitattuja vektoreita, joista toinen säilytettiin edelleen laskennoissa. Tämän jälkeen tarkasteltiin kantavektoreiden residuaaleja. Kantavektoreiden suurin absoluuttinen jäännösvirhe oli 0,0305 metriä. Tämän vektorin pituus oli 24,2 kilometriä, eli suhteellinen jäännösvirhe on vain 1,3 ppm. Suurin suhteellinen jäännösvirhe oli 33 ppm, joka oli vektorissa 7150–7170. Ainakin osittain suuri suhteellinen jäännösvirhe selittyy vektorin pituudella, joka on vain 153 metriä. Vektorin absoluuttinen virhe on kuitenkin vain 0,0051 metriä. Tämä vektori oli myös toistomitattu, joten tämäkin vektori poistettiin laskennasta.

Huonojen toistomitattujen vektoreiden poistojen ja uusien verkkotasoitusten jälkeen koko verkon F-testi oli 1,05 ja pisteen tasoituslaskennan pistekohtaiset keskihajonnat olivat suurimmillaan 3,8 millimetriä. Vapaan verkon tasoituslaskenta todettiin onnistuneeksi, ja tulokset tallennettiin kontrolliksi kiinnitetyn verkon tasoitukselle.

8.1.3 Kiinnitetty verkkotasointus

Tasoituslaskennan viimeisessä vaiheessa yhdistetty verkko kiinnitetään lähtöpisteiden avulla koordinaatistoon. Tätä vaihetta kutsutaan kiinteän, kiinnitetyn, lukitun tai kytketyn verkon tasoitukseksi. Kiinnitetyn tasoituslaskennan tuloksena saadaan kiintopisteiden lopulliset koordinaatit. Kiinnitetyn verkkotasoituksen jälkeen on syytä tarkastella lähtöpisteiden toimivuutta, mikäli vapaan verkon tasoitustulokset ovat hyviä mutta kiinteän verkon tasoitustulokset eivät.

Inkoon liikennepaikan lähtöpisteinä toimivat E2-luokan HxGN Smartnet tukiasemat KARJ, KINU, VELA ja Maanmittauslaitoksen passiivinen E3-luokan kiintopiste 06M6082. Lähtöpisteille syötetään niiden todelliset koordinaatit, niiden koordinaatit lukitaan ja verkolle suoritetaan tasoituslaskenta. Kiinnitetyn verkko-tasoituksen tuloksia arvioitiin koko verkkoa tarkastelevalla f-testillä, kontrollikiintopistevertailulla sekä vertaamalla kiinnitetyn verkon tasoituksen tuloksia vapaan verkon tasoituksen tuloksiin.

Tasoituslaskennan tuloksia voidaan tarkastella verkkotasoiusraportista. Verkkotasoiusraportista tarkastettiin ensimmäiseksi koko verkon laatua tarkastelevaa f-testiä. F-testin tulos on kiinnitetyn verkkotasoituksen jälkeen 1,05. Tämä on riittävä tulos, kun ottaa huomioon, että muut testitulokset ovat olleet hyviä.

Verkon laatua voidaan arvioida myös tarkastelemalla virhe-ellipsejä. Pistekoh-taisia vihreitä voidaan tarkkailla absoluuttisilla virhe-ellipseillä. Kiintopisteiden absoluuttiset virhe-ellipsit olivat kaikilla pisteillä neljä millimetriä isoakselin ja pikku akselin puolikkaalla. Pisteiden välisiä virheitä havainnollistavat suhteelliset virhe-ellipsit olivat enimmillään neljä millimetriä isoakselin puolikkaalla ja neljä-millimetriä pikkuakselin puolikkaalla. Virhe-ellipsitarkastelun tulokset ovat hyviä ja kertovat verkon laadusta.

Tämän jälkeen verrattiin kiinnitetyn ja vapaan verkkotasoituksen koordinaatteja keskenään. JHS184-ohjeistuksen raja-arvo näiden välisille koordinaattieroille saa olla korkeintaan 25 millimetriä (3, s. 17). Näiden välillä oli enintään 0,3 millimetriä, joten tulokset alittivat onnistuneesti nämä toleranssit.

Kontrollikiintopistetarkastelu on menetelmä, jolla varmistetaan mittausten ulkoi-nen tarkkuus sekä uuden verkon liittyminen homogeenisesti oleviin kiintopisteisiin. Inkoon liikennepaikan mittausperustan staattisissa mittauksissa oli mukana yksi kontrollikiintopiste. Kontrollikiintopiste mitattiin ja laskettiin samoilla mene-telmillä kuin uudet peruskiintopisteet. JHS184-ohjeistus ohjeistaa kontrollikiinto-pisteiden tasokoordinaateille raja-arvoksi 33 millimetriä (3, s. 18). Kiintopisteen

06M6080 koordinaattien ja uuden määrittelyn koordinaatti erot olivat 2 millimetriä (taulukko 7).

Taulukko 7. Staattisen mittaukset kontrollikiintopistevertilu.

Pistenumero	MML koordinaatit		Tasoitettut koordinaatit		Erotus (mm)		
	x	y	x	y	x	y	xy
06M6080	6660210.256	24500078.443	6660 210.254	24500 078.444	2	1	2

Kontrollikiintopisteen koordinaattierotukset olivat pohjoiskoordinaatissa yhden millimetrin ja eteläkoordinaatissa kaksi millimetriä. Kontrollikiintopisteen koordinaattierot alittivat onnistuneesti kontrollikiintopisteiden raja-arvon, joten tämänkin tarkastelun osalta staattisten mittausten voidaan todeta onnistuneen.

Inkoon liikennepaikan peruspisteiden staattiset GNSS-mittaukset täyttävät kaikki JHS184 (3) ja Liikenneviraston mittausohje lo18/2017 (4) ohjeistuksien vaatimukset sekä alittavat kaikki vaaditut raja-arvot. Ohjeistuksessa ei ole määritetty tilastollisille testeille raja-arvoja, mutta niidenkin tulokset olivat hyviä. Näiden perusteella mittaukset ja laskennat voitiin todeta onnistuneeksi ja laskentojen tulokset voitiin tallentaa.

8.2 Käyttökiintopisteiden takymetrimittauksen jälkilaskenta

Takymetrillä tehtäviä jonomittauksia voidaan tasoittaa jonotasoituksena tai verkotasoituksena. Jonotasoitusta voidaan käyttää vain yksittäisille jonoille, eikä sitä voida käyttää jonoverkoille. Takymetrimittausten jälkilaskennat koostuvat korjausten asettamisesta ja havaintojen tarkastelusta, jonon muodostamisesta sekä jonon tai verkon tasoituksesta. Tasoitusten tuloksena kiintopisteille saadaan uudet koordinaatit sekä arvioidut virheet ja tulokset tasoituksen laadusta.

Inkoon liikennepaikalle rakennettiin ja mitattiin uusia E5-hierarkialuokan kiintopisteitä yhteensä yhdeksän kappaletta. Käyttökiintopisteet rakennettiin

sähköratapylvään pultteihin, jonka ei päälle ei ollut mahdollista pystyttää takymetria. Tämän takia jonomittaus suoritettiin jonoverkkona vapailta asemapistä suunta- ja etäisyyshavainnoilla pisteeseen kiinnitettyyn prismaan. Jokainen käyttökiintopiste mitattiin vähintään kahdelta eri kojeasemalta. Alueelle tehtiin yksi jonomittaus. Jonomittauksen lähtöpisteinä toimivat staattisella mittauksella mitatut peruskiintopisteet 6920, 6950, 7150 ja 7170. Jonomittaus suoritettiin täydellisesti suljettuna jonona. Käyttökiintopisteiden tasokoordinaattien mittauksissa ei ollut mukana kontrollikiintopisteitä, koska alueella ei ollut vanhoja kiintopisteitä.

8.2.1 Korjausten asettaminen ja havaintojen tarkastelu

Jonomittauksen jälkilaskennat suoritettiin Leica Infinity -ohjelmistolla. Ensimmäisenä vaiheessa suoritettiin takymetrimittausten korjausten asettaminen ja tarkastaminen. Tässä vaiheessa varmistettiin oikeat prismakorkeudet, prismava-kiot ja säätilakorjaukset. Jonomittaukset suoritettiin ennen jonovaaituksia, joten lähtöpisteille vaihdettiin myös oikeat vaaitut korkeudet.

Tässä vaiheessa etsittiin myös vääriä prismakorkeuksia pisteiden laaturaporttia tarkastelemalla. Raportti ilmoittaa korkeusvirhettä, mikäli eri kojeasemilta mitatuissa korkeuksissa on ristiriitaa. Mittauksista havaittiin yksi väärä prismakorkeus pisteiden laaturaporttia tarkastelemalla. Väärä prismakorkeus voidaan havainta kuvasta 25, jossa havaintojen korkeuksien residuaalit ovat esitetty punaisella korostuksella.

Pistenumero	Pohjoinen [m]	Itä [m]	Ortom. korkeus [m]	Pohjoinen [m]	KH Itä [m]	Korkeus [m]	Koodi	Koodiryhmä	Koodin attribuutit	Pvm/Aika
70-4E	6 660 888,3179	24 496 885,7587	16,1636	0,0003	0,0001	0,0001	-	-	-	27.07.2023 11:26:18
Käytä	Lähde	Asema	Pvm/Aika	3D KL [m]	ΔSij. [m]	ΔKorkeus [m]	ΔSij. & korkeus [m]	Pohjoinen [m]	Itä [m]	Ortom. korkeus [m]
Auto	3D	AP4	27.07.2023 11:16:39	0,0023	0,0013	-0,0009	0,0016	6 660 888,3192	24 496 885,7588	16,1645
Auto	3D	AP3	27.07.2023 10:48:30	0,0025	0,0029	0,2983	0,2983	6 660 888,3196	24 496 885,7610	15,8653
Auto	3D	AP4	27.07.2023 11:13:17	0,0023	0,0011	0,0007	0,0013	6 660 888,3189	24 496 885,7583	16,1628
Auto	3D	AP3	27.07.2023 10:48:45	0,0025	0,0031	0,3008	0,3009	6 660 888,3201	24 496 885,7609	15,8627
Auto	3D	AP4	27.07.2023 11:18:49	0,0023	0,0005	0,0012	0,0013	6 660 888,3184	24 496 885,7587	16,1624
Auto	3D	AP3	27.07.2023 10:51:01	0,0025	0,0031	0,3000	0,3000	6 660 888,3201	24 496 885,7609	15,8636
Auto	3D	AP4	27.07.2023 11:21:56	0,0023	0,0002	-0,0015	0,0015	6 660 888,3180	24 496 885,7589	16,1650
Auto	3D	AP3	27.07.2023 10:49:16	0,0025	0,0029	0,3001	0,3001	6 660 888,3173	24 496 885,7616	15,8635
Auto	3D	AP3	27.07.2023 10:41:27	0,0025	0,0042	0,2979	0,2980	6 660 888,3218	24 496 885,7603	15,8656
Auto	3D	AP4	27.07.2023 11:17:07	0,0023	0,0010	0,0001	0,0010	6 660 888,3189	24 496 885,7586	16,1634
Auto	3D	AP4	27.07.2023 11:14:02	0,0023	0,0013	0,0000	0,0013	6 660 888,3192	24 496 885,7583	16,1636
Auto	3D	AP3	27.07.2023 10:39:59	0,0025	0,0029	0,2990	0,2990	6 660 888,3199	24 496 885,7609	15,8646
Auto	3D	AP3	27.07.2023 10:42:40	0,0025	0,0025	0,2963	0,2963	6 660 888,3189	24 496 885,7611	15,8672

Kuva 25. Pisteiden laaturaportti.

Pisteiden laaturaportista voidaan havaita, että kiintopisteen 70-4E korkeus on asemapisteeiltä AP4 mitattuna noin 30 senttimetriä ylempänä kuin asemapisteeiltä AP3. Ensimmäisenä tarkasteluun tuli väärä prismakorkeuden asettaminen toisen asemapisteen mittauksiin, koska mittauksissa käytettävän prismasauvan jatko-osan osa on 30 senttimetriä pitkä. Prismakorkeuksia tarkastellessa huomataan, että molemmilta asemilta mittaukset ovat suoritettu prismakorkeudella 10 senttimetriä. Tästä voidaan päätellä, että AP4 -kojeasemalta mitatun havainnon prismakorkeuden kuuluisi olla 10 senttimetrin sijaan 40 senttimetriä. Varmistus tähän haettiin tarkastelemalla käyttökiintopisteen 70-4E vaaittua korkeutta. Käyttökiintopisteen 70-4E vaaittu korkeus on 15,877, josta voidaan todeta päätelmä oikeaksi. Nämä prismakorkeudet korjattiin oikeiksi.

Mittausten korjausten asettamisen jälkeen tarkistettiin ja poistettiin huonoja havaintoja laskennasta. Huonoja havaintoja paikallistettiin havaintosarjan havaintojen residuaalien tarkisteluilla. Havaintosarjan havaintojen välisille kulma- ja matkaresiduaaleille voidaan asettaa raja-arvot, jotka korostavat kaikki havainnot, jotka ylittävät raja-arvot (kuva 26).

Havainnot		Matkat						
Asemointi	Pvm/Aika	Taaksetätäys						
▶ ✓ 6950	27.07.2023 09:11:36	6920						
▶ ✓ A1	27.07.2023 09:48:17	6950						
▶ ✓ A2	27.07.2023 10:01:56	A1						
▶ ⚠ A3	27.07.2023 10:33:28	A2						
Käytä	Tähtys	I/II-asento	Hz - Raaka [gon]	V [gon]	Vinomatka [m]	Residuaali - Hz [gon]	Residuaali - V [gon]	Residuaali - Vinomatka [m]
▶		BS A2	70,6920	100,0548	137,4800	-	-	-
<input checked="" type="checkbox"/>		A2	70,6928	100,0525	137,4802	0,0008	-0,0023	0,0002
<input checked="" type="checkbox"/>		A2	270,6922	299,9455	137,4802	0,0002	-0,0003	0,0002
<input checked="" type="checkbox"/>		A2	70,6911	100,0533	137,4802	-0,0009	-0,0014	0,0002
<input checked="" type="checkbox"/>		A2	270,6924	299,9445	137,4795	0,0004	0,0007	-0,0005
<input checked="" type="checkbox"/>		A2	70,6916	100,0543	137,4792	-0,0004	-0,0004	-0,0008
<input checked="" type="checkbox"/>		A2	270,6918	299,9449	137,4795	-0,0002	0,0003	-0,0005
<input type="checkbox"/>		A2	70,6915	100,0540	137,4792	-0,0005	-0,0005	-0,0005

Käytä toleransseja

Toleranssit - Residuaalit	
Hz	0,0020 gon
V	0,0020 gon
Vinomatka	0,0100 m

Kuva 26. Havaintojen residuaalien tarkastelu.

Mittauksista löytyi muutamia huonoja havaintoja, jotka poistettiin laskennasta. Mittaukset suoritettiin vähintään viidellä havaintosarjalla, joten raja-arvot ovat mahdollista asettaa tarkemmiksi ja havaintoja on mahdollista poistaa enemmänkin. Tässä vaiheessa myös tarkasteltiin peruskiintopisteiden välisiä havaintoja ja verrattiin niitä staattisen GNSS-mittauksen tuloksiin (taulukko 8).

Taulukko 8. Eri mittausmenetelmällä mitattujen vektoreiden vertailu.

Pisteväli	Vektorin pituus takymetrimittauksena (keskiarvo)	Vektorin pituus Staattinen GNSS-mittauksena (tasoituksen jälkeen)	Residuaali (m)
6920–6960	253,0839	253,0818	0,002
7150–7170	153,3135	153,3107	0,003

Peruspisteiden välisten vektoreiden tarkastelussa matkaresiduaalit ovat 2–3 millimetriä. Nämä ovat luotettavat lukemat, jotka kertovat myös peruskiintopisteiden tasokoordinaattien laadusta.

8.2.2 Jonomittauksen muodostaminen

Korjausten asettamisen jälkeen tarkistettiin tasoittamattoman jonon pistesulkuvirhe. Pistesulkuvirheellä saadaan karkea arvio siitä, onko jonomittaus onnistunut. Pistesulkuvirheen saa näkyviin jo heti jonomittausta suljettaessa, mutta sitä on syytä tarkastella myös karkeiden virheiden tarkastelun jälkeenkin. Mittauksiin sisältyy usein huonoja havaintoja, vääriä antennikorkeuksia tai prismavakioita, jotka vaikuttavat tasoittamattaan pistesulkuvirheeseen tai matka- ja kulmasulkuvirheisiin. JHS184-ohjeistuksen tasoittamaton pistesulkuvirheen kontrolliarvo on ilmoitettu suhteellisena virheenä. Taulukossa 9 on esitetty tasoittamattomien havaintojen kontrolliarvot käyttökiintopisteiden tasokoordinaattien mittauksissa takymetrillä (3, s. 22).

Taulukko 9. Tasoittamattomien havaintojen kontrolliarvot käyttökiintopisteiden tasokoordinaattien mittauksissa takymetrillä (3, s. 22).

Takymetri mittausten jälkilaskenta	E5	E6
Pistesulkuvirhe, enintään (tasoittamattomat havainnot), L on jonon pituus (km)	45*L mm	90*L mm

Jonon pituus oli noin kaksi kilometriä, joten sallittu pistesulkuvirhe on 90 millimetriä. Jonomittauksen pistesulkuvirhe on itäsuunnassa 7 millimetriä ja pohjoissuunnassa 76 millimetriä. Pistesulkuvirhe alittaa vaaditun sulkuvirheen, mutta pistesulkuvirhe pohjoissuuntaisen pistesulkuvirhe on huomattava, ja se vaatii lisätarkastelua (kuva 27).

Jonomittauksen tarkkuus ennen tasoitusta			
Alun asema	6950	Sulkuvirhepiste	7150
Lopun asema	7150	Itä	-0,0068 m ✓
Kokonaispituus (6950 - 7150)	2 062,3335 m	Pohjoinen	-0,0760 m ✓
1D-tarkkuus	1/442053 ✓	Korkeus	0,0047 m ✓
2D-tarkkuus	1/27033 ✓	Virheen pituus	0,0763 m
Laskettu mittakaava	1,000004755273	Virheen suunta	5,7178 gon
Alun atsimuutti	39,3995 gon	Lopun atsimuutti	246,7884 gon
<input type="checkbox"/> Käytä alun atsimuuttia	39,3995 gon	<input type="checkbox"/> Käytä lopun atsimuuttia	246,7884 gon
Valitse menetelmä sulkuvirheen jakamiseen			
Kulman sulkuvirhe			
Maks. virhe	0,0160 gon Laskettu	0,0060 gon ✓	Ei kulman jakoa
Pituuden sulkuvirhe			
Maks. virhe	4,5413 m Laskettu	-0,0084 m ✓	
Korkeuden sulkuvirhe			
Maks. virhe	0,0100 m Laskettu	0,0047 m ✓	Ei jakoa

Kuva 27. Jonomittauksen tarkkuus ennen tasoitusta.

Inkoon liikennepaikan mittausperustan käyttökiintopisteet mitattiin jonoverkkona vapailta asemapisteitä suunta- ja etäisyshavainnoilla pisteeseen kiinnitettyyn prismaan. Tämän johdosta Leica Infinity -ohjelmistolla tasoituslaskenta suoritetaan kahdessa vaiheessa. Tässä ensimmäisessä vaiheessa havainnoista muodostettiin jonomittaus, mutta laskennassa ei suoriteta tasoitusta. Tasoituslaskenta suoritetaan pienimmän neliösumman verkkotasoituksena vasta jonomittauksen laskennan jälkeen, jolloin tasoitus kohdistuu myös mitattuihin käyttökiintopisteisiin.

8.2.3 Pienimmän neliösumman verkkotasoitus

Takymetrimittauksisten tasoituslaskenta suoritetaan pienimmän nelisumman virheyhtälötasoituksena, kun jonon rakenne on verkkomainen. Tasoituksen tuloksena saadaan lopulliset koordinaatit sekä tasoituslaskennan tulokset. Tasoituslaskennan jälkeen tulisi ensimmäisenä tarkistaa verkkotasoituksen F-testi. F-testillä voidaan tarkastella koko verkon laatua. F-testin tulos yleensä paranee sitä mukaan, kun huonoja havaintoja poistetaan.

W-testi on tasoituslaskennan jälkeen tärkein työkalu, jolla voidaan etsiä huonoja havaintoja. W-testillä pystytään tarkastelemaan havaintojen matka- ja kulmavirheitä. Huonojen havaintojen poistamisen jälkeen vanha tasoitus poistetaan, ja

verkolle suoritetaan tasoituslaskenta. Tätä jatketaan, kunnes kaikki huonot havainnot ovat poistettu.

Inkoon aseman tasoituslaskennan f-testin tulos oli 0,71. Tämän jälkeen vielä tarkistettiin havaintojen w-testejä. Huonot havainnot oli paikallistettu laskennan aiemmassa vaiheessa, eikä enää tässä vaiheessa löytynyt uusia huonoja havaintoja.

Mittaukset on suoritettu JHS184-ohjeen (3) ja Liikenneviraston mittausohjeen lo18/2017 (4) ohjeistuksen mukaisesti ja alittavat kaikki vaaditut raja-arvot. Lisäksi tilastolliset testit olivat riittävän hyviä. Näiden takia mittaukset ja laskennat voidaan todeta onnistuneeksi ja tasoituksen tulokset voidaan tallentaa.

8.3 Jonovaaituksen jälkilaskenta

Jonovaaitusten tasoitus suoritetaan jonotasoituksena. Jonotasoituksella pyritään tasaamaan vaaituksen virhe tasaisesti vaaitusmatkalle. Yksinkertaisen jonovaaituksen tasoitusmenetelmä on jonotasoitus, jossa jonon aikana kertyneet virheet tasamaan matkan mukaan vaaitusjonolle. Jonotasoituksessa on oletama, että virhe on kertynyt tasaisesti vaaitusjonon edetessä ja että vaaituksessa käytettävät lähtöpisteet ovat virheettömiä.

Jonovaaitusten jälkilaskenta on yksikertaisempi prosessi kuin takymetrilla tehtävien jonomittausten tai staattisten GNSS-mittausten jälkilaskentaprosessit, koska yleisesti jonovaaituksissa ei tule ylimääritystä. Vaaitusten laaduntarkituksessa tulee tarkistaa ainakin vaaitusjonon sulkuvirhe, vaaitusjonon matkatasapaino havaintokirjan tarkastelu.

Inkoon aseman kiintopisteiden korkeudet määritettiin jonovaaituksena digitaalisella vaaituskojeella ja viivakoodilatalla. Korkeuden määritykset suoritettiin yhdellä vaaitusjonolla. Vaaitusjonon lähtöpisteinä toimivat Maanmittauslaitoksen E1–E3 luokan n2000-korkeusjärjelmän korkeuskiintopisteet 2206 ja 62403.

8.3.1 Jonon muodostaminen

Vaaituksien havainnoista tulee ensimmäisenä muodostaa yhtenäinen jono, joka kulkee lähtöpisteeltä sulkupisteelle. Inkoon liikennepaikan mittaukset suoritettiin yhtenäisenä jonoa, eikä jonoa tarvinnut enää katkoa tai liittää useammasta jonosta. Tässä vaiheessa kuitenkin varmistettiin, että lähtöpisteillä on oikeat korkeudet, sekä numeroitiin määritettävät kiintopisteet. Jonon muodostamisen jälkeen suoritetaan tasoituslaskenta.

8.3.2 Jonotasoitus

Vaaituksien tasoitus suoritettiin jonotasoituksena. Vaaituksista laadittiin vaaitusraportti, joka sisältää havaintokirjan vaaituksista sekä vaaituksen ja tasoitusten tulokset. Leica Infinity ohjelmistolla on mahdollista asettaa myös halutut toleranssit tuplahavaintojen erotuksille, asemaeroille, enimmäistähtäysetäisyyksille ja vähimmäismaavaralle. Tässä raportissa käytettiin toleransseina ohjelman oletusarvoja, jotka on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Vaaitusraportin havaintotoleranssit.

Tuplahavaintojen tarkastus	0,001 metriä
Asemaerot	0,001 metriä
Enimmäistähtäysetäisyys	100 metriä
Vähimmäismaavara	0,5 metriä

Vaaituksessa oli yhdeksän havaintoa, joissa havainnon vähimmäismaavara alitui. Näille alituksille syynä oli suuret korkeuserot rataluiskissa ei haastavat maasto-olosuhteet. Näin läheltä maanpintaa kulkevia havaintoja olisi syytä välttää, vaikka näitä ei suoraan missään ohjeistuksessa kielletäkään. Vaaitusjonon kokonaissulku virhe oli kuitenkin niin pieni, että nämä alitukset eivät aiheuta jatkotoimenpiteitä.

Tärkein työkalu jonovaaitusten laadunvarmistuksessa on suhteellinen sulkuvirhetarkastelu. Kohteen vaaitusjonon pituus oli 4,76 kilometriä, ja sulkuvirhe oli 5,5 millimetriä, joten suhteellinen tarkkuus on 0,15 ppm. Liikenneviraston ohjeen Lo18/2017 raja-arvo vaaitusjonon suhteelliselle sulkuvirheelle on 10 ppm, joten tällä tarkastelulla voidaan vaaitusjono todeta onnistuneeksi (4, s. 18).

8.3.3 Jonovaaitusten tulosten muiden mittausmenetelmien tuloksiin.

Vaaituskojeilla ei ole mahdollista mitata tasosijainteja, joten myöskään vaaitun pisteen tasosijaintia ei pystytä varmistamaan jälkikäteen. Tämän takia vaaitusten aikainen pisteiden numerointi erittäin tärkeää. On mahdollista, että pisteet numeroidaan vaaituksen aikana väärin, jolloin myös vaaituksen tuloksista poimitaan väärä korkeus. Väärästä sijainnista mitattujen pisteiden korkeuksien karkeat virheet ovat mahdollista havaita vertaamalla vaaitustuloksia muiden mittausmenetelmien korkeudenmäärittäytuloksiin (taulukko 11).

Taulukko 11. Eri mittausmenetelmillä mitattujen korkeuksien vertailu.

Pistenumero	Vaaittu korkeus	Jonomittauksen korkeus	Staattisen GNSS-mittauksen korkeus	Residuaali (m)
69-12E	15,730	15,740		0,010
70-4E	15,877	15,882		0,005
70-14E	16,333	16,357		0,024
70-25E	16,729	16,761		0,032
71-4P	17,085	17,119		0,034
71-8E	17,342	17,380		0,038
71-12E	17,611	17,650		0,039
6991	16,662	16,673		0,011
70337	16,572	16,591		0,019
6920	19,220		19,247	0,027
6950	18,761		18,768	0,007
7150	19,059		19,079	0,020
7170	28,803		28,795	-0,008

Vaaituksen korkeudet verrattuna muihin jonomittauksen ja staattisen GNSS-mittauksen korkeuksiin ovat 5 millimetrin ja 39 millimetrin välillä. Nämä arvot kertovat, ettei tälläkään tarkastelulla ole mitään suurempaa karkeaa virhettä. Suuremmat, yli 30 millimetrin korkeuserot, eivät ole yllättäviä, sillä mittaukset suoritettiin kesällä, jolloin väreily aiheuttaa etenkin pystysuuntaan hajontaa. Mittaukset ja laskennat olisi suoritettu eri toleransseilla, mikäli vaaitus ei olisi ollut mahdollista vaan pisteiden korkeudet olisi pitänyt määritellä trigonometrisella korkeuden määrittelyllä. Tällöin mittauksia olisi suoritettu vielä suuremmalla määrällä havaintosarjoja ja tasoituslaskentavaiheessa olisi tarkasteltu havaintojen pystysuuntaisia hajontoja tarkemmalla suodattimella.

Mittaukset on suoritettu JHS184-ohjeen (3) ja Liikenneviraston mittausohjeen 1018/2017 (4) ohjeistuksen mukaisesti, ja ne ylittävät kaikki vaaditut raja-arvot, joten mittaukset ja laskennat voidaan todeta onnistuneeksi ja korkeuden määrittelyn tulokset voidaan tallentaa.

9 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli perehtyä mittausperustojen jälkilaskentojen taustoihin ja periaatteisiin ja tehdä näiden pohjalta Inkoon liikennepaikan mittausperustalle tarkistuslaskennat. Työn tavoitteena oli löytää toimivia laadunvarmistustoimenpiteitä, joiden avulla virheiden havaitseminen sekä laadun analysointi olisi luotettavampaa. Työstä rajattiin pois mittausperustahankkeiden maastomittausten aikaiset laadunvarmistustoimenpiteet. Tämä mahdollisti laskentavaiheen laadunvarmistustoimenpiteiden syvällisemmän ja perusteellisemmän tarkastelun.

Insinööriyössä tutkittiin yleisellä tasolla mittausperustojen eli kiintopisteverkkojen ominaisuuksia sekä eri mittausmenetelmiä, joilla mittausperustamittauksia suoritetaan. Työssä ei tarkasteltu tarkemmin mittausvaiheen laadunvarmistustoimenpiteitä. Työssä perehdyttiin myös yleisimpiin mittausperustojen ohjeistuksiin sekä niiden sisältämiin vaatimuksiin.

Insinööriyössä tutkittiin syvällisemmin mittausten ja havaintojen korjauksia, virheiden luokitteluja ja tarkasteluja, tasoituslaskentoja sekä tilastomatemattisia tarkastusmenettelyjä. Työssä perehdyttiin myös virheiden, tasoituslaskentojen sekä tilastollisten testien laskentakaavoihin. Työssä hyödynnettiin kuvia, taulukoita sekä laskentakaavoja havainnollistamaan eri muuttujien vaikutusta mittausten lopputuloksiin.

Teoriaosuuden pohjalta Inkoon aseman mittausperustan jälkilaskennoille suoritettiin tarkistuslaskennat, joilla varmistettiin mittausperustan laatu. Tarkistuslaskennat suoritettiin staattisille GNSS-mittauksille, takymetrilla tehdyille jonoverkkomittauksille ja jonovaaituksille. Jälkilaskennat suoritettiin Leica Infinity -ohjelmistolla.

Tarkistuslaskennat sisälsivät mittausten korjausten asettamiset sekä tasoituslaskennat ja tulosten arvioinnit. Laadunvarmistustoimenpiteitä suoritettiin ennen tasoituslaskentaa, tasoituslaskennan yhteydessä sekä tasoituslaskentojen jälkeen. Käytettäviä laadunvarmistustoimenpiteitä olivat sulkuvirheiden tarkastelut,

vektorien pituuksien tarkastelut, tilastollisten testien tulosten tarkastelut sekä eri mittausmenetelmillä suoritettujen mittaustulosten ristiin vertailut.

Mittauksista löydettiin yksi antennikorkeusvirhe, joka korjattiin oikeaksi. Mittauksista löydettiin myös muutamia huonoja havaintoja ja vektoreita, jotka poistettiin laskennoista. Virheiden ja huonojen havaintojen poistamisen jälkeen suoritettiin aina uusi tasoituslaskenta. Tasoituslaskentojen lopputuloksena saatiin lopulliset koordinaatit sekä arviot mittausperustan laadusta. Useiden eri laadunvarmistustoimenpiteiden perusteella mittaukset todettiin onnistuneeksi ja mittausperustan laatu todettiin hyväksi.

Insinööriyön johtopäätöksenä voidaan todeta, että mittausperustan laadunvarmistusprosessin tulee perustua eri vaiheissa tehtäviin useisiin eri laadunvarmistustoimenpiteisiin. Työssä käytettyjä laadunvarmistustoimenpiteitä voidaan hyödyntää muissa mittausperustahankkeissa.

Lähteet

- 1 Laurila, Pasi. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Verkkoaineisto. Rovaniemen ammattikorkeakoulu. <http://virtual.ramk.fi/Tuotantolat/eJulkaisu_Mittaus%20ja%20kartoitustekniikka_Laurila.pdf>. Luettu 20.3.2023.
- 2 Kråknäs, Pasi. 2022. Mittausperustan luominen. Opintomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 3 JHS 184 Kiintopistemittaus EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmässä. 2012. Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunta.
- 4 Tie- ja ratahankkeiden maastotiedot mittausohje, Liikenneviraston ohjeita 18/2017. 2017. Verkkoaineisto. Liikennevirasto. <https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-18_maastotiedot_mittausohje_web.pdf>. 4.4.2017. Luettu 20.3.2023.
- 5 Kolmiomittaustekniikka. 2023. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/tietoa-maanmittauslaitoksesta/teemat/struven-keiju/kolmiomittaustekniikka>>. Luettu 3.3.2023.
- 6 Vermeer, Martin. 2015. Käytännön geodesia Maa-6.2222. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto. <<https://users.aalto.fi/~mvermeer/kayt.pdf>>. 12.2.2015. Luettu 10.1.2023.
- 7 Laurila, Pasi. 2020. Maan mittauksia. Helsinki: BoD – Books on Demand.
- 8 JHS 196 EUREF-FIN -järjestelmän mukaiset koordinaatit Suomessa. 2016. Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunta.
- 9 Karjalainen, Leila. 2015. Tilastotieteen perusteet. Ristiina. Pii-kirjat.
- 10 Astala, Kari & Piironen, Petteri. 2009. Mittaaminen, mittausvirheet, tarkkuus, perusstatistiikka. Verkkoaineisto. <<https://prujut.files.wordpress.com/2009/10/m1.pdf>>. 6.10.2009. Luettu 20.1.2022.
- 11 Hirvonen, R.A. 1965. Tasoituslasku. Helsinki. Teknillisten tieteiden akatemia.
- 12 Mellin, Ilkka. 2006. Tilastotieteelliset menetelmät. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto. <<http://math.tkk.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Varanal.pdf>> Luettu 2.3.2023.

