

OLEMASSA OLEVIENTEN RAKENNUSTEN JA RAKENTEIDEN
KUNTOISUUSVALVONNAN SEURANTAMITTAUKSET JA
MITTAUSTARKKUUS

Palvelukuvauksen näkökulmasta

Lindroos Joni

Opinnäytetyö
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

2021

Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Joni Lindroos	Vuosi	2021
Ohjaaja(t)	Teuvo Heimonen		
Toimeksiantaja	X Oy		
Työn nimi	Olemassa olevien rakennusten ja rakenteiden kuntoisuusvalvonnan seurantamittaukset ja mittaustarkkuus		
Sivu- ja liitesivumäärä	54 + 1		

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli X Oy:n toimeksiantona selvittää tarkkuustasoa, jolla yrityksessä rakennusten seurantamittaukset toteutetaan. Tämä vaati perusteluiksi virheiden ja virhelähteiden tarkastelun. Lisäksi selvitettiin seurantamittauksiin liittyviä käsitteitä sekä rakennusten seurantamittauksiin soveltuvien geodeettisten mittausmenetelmien periaatteita. Teemana läpi koko raportin oli palvelukuvauksen näkökulma, joka kuvaa hierarkkisesti koko kuntoisuusvalvontaprosessin.

Tutkimuksen teoreettinen tiedonhaku tehtiin hyödyntämällä alan kirjallisuutta, sähköisiä lähteitä sekä toimeksiantajayrityksen asiantuntijalausuntoja. Teoreettista substanssia on lavennettu omilla kokemuksilla ja havainnoilla käytännön mittaustoiminnassa.

Opinnäytetyö toimii kattavana kokonaisuutena rakennusten seurantamittausten parissa työskenteleville. Lisäksi se antaa X Oy:n sidosryhmille käsityksen yrityksen kuntoisuusvalvontaprosessin kulusta ja tarkkuusvaatimuksista.

Avainsanat Seurantamittaus, kuntoisuusvalvonta, johtopäätöstarkkuus, mittavirhe, virhelähde, tarkkavaaitus

Degree Programme in Land Surveying
Bachelor of Engineering

Author	Joni Lindroos	Year	2021
Supervisor	Teuvo Heimonen		
Commissioned by	X Oy		
Subject of thesis	Follow-up Measurements and Measuring Accuracy of Condition Monitoring in Current Buildings and Structures		
Number of pages	54 + 1		

The aim of this thesis was to clarify the level of accuracy of the follow-up measurements made by X Oy. The thesis study was commissioned by X Oy.

The theoretical information retrieval report was made by studying relevant literature, electronic sources and X's expert statements. Theoretical substance was expanded by using the author's personal experiences and observations made while measuring. Errors and error sources in measurements were analyzed.

The thesis works as a comprehensive ensemble for those who work with building follow-up measurements and for X's stakeholders. It gives an idea of the company's condition monitoring process and accuracy requirements. The theme throughout the whole thesis project was the aspect of service description, which explains the whole condition monitoring process hierarchically.

Key words

Follow-up measurement, condition monitoring, conclusion accuracy, measuring error, error source, precision levelling

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	SEURANTAMITTAUKSET JA MONITOROINTI	8
2.1	Siirtymämittaukset	8
2.2	Muodonmuutosmittaukset.....	8
2.3	Seurantamittaukset.....	9
2.3.1	Monitorointi.....	10
2.3.2	Monitorointimittausten tarkkuusvaatimus	11
3	EPÄVARMUUSTEKIJÄT PROSESSIN KULUN ARVIOINNISSA	13
3.1	Mittausten ajoittaminen	13
3.2	Seurantajakson pituus	13
3.3	Mittapisteiden luotettavuus	14
4	MITTAUSTARKKUUS	15
4.1	Sisäinen ja ulkoinen tarkkuus	15
4.2	Johtopäätöstarkkuus.....	16
5	VIRHEET JA EPÄVARMUUS	18
5.1	Virhelähteet.....	18
5.2	Virhetyypit.....	18
5.3	Mittauksen häiriötekijät	20
5.4	Hyvä mittaustapa	20
6	MITTAUKSEN SULKEMINEN JA TASOITUSLASKENTA.....	22
6.1	Mittauksen sulkeminen	22
6.2	Tasoituslaskenta	22
7	MITTAUSMENETELMÄT JA TARKKUUSALUEET	24
7.1	Yleistä	24
7.2	Takymetri	24
7.2.1	Takymetrin pääosat.....	25
7.2.2	Keskistys ja tasaus.....	25
7.2.3	Orientointi tunnetulle pisteelle	26
7.2.4	Orientointi vapaalle asemapisteelle.....	27
7.2.5	Takymetrin tarkkuus	28

Koulutusalan nimi
Koulutusala
Koulutus

7.2.6	Etäisyystarkkuus	28
7.2.7	Kulmatarkkuus.....	29
7.2.8	Prismat	30
7.2.9	Takymetri seurantamittausten kontekstissa	31
7.3	Tarkkavaaitus	32
7.3.1	Vaaitus yleisesti.....	32
7.3.2	Vaaituksen periaate.....	32
7.3.3	Vaaitusmenetelmät.....	33
7.3.4	Vaaituksen tarkkuus	34
7.3.5	Vaaituksen sulkeminen ja tasoitus	34
7.3.6	Tarkkavaaituksen määritelmä	35
7.3.7	Tarkkavaaitus seurantamittausten kontekstissa	36
7.3.8	Vaaituksen virhelähteitä käytännössä	37
7.3.9	Vaaituksen satunnaiset virheet	38
7.3.10	Vaaituksen systemaattiset virheet.....	39
7.3.11	Vaaituksen karkeat virheet.....	39
7.3.12	Kalibrointi	40
7.4	Satelliittimittaus.....	41
7.4.1	Yleistä	41
7.4.2	Satelliittimittauksen mittaustavat	42
7.4.3	DOP-luvut ja tarkkuus	43
7.4.4	Häiriötekijät	44
7.4.5	Satelliittimittaukset seurantamittausten kontekstissa.....	44
8	ESIMERKKIKIINTEISTÖ	45
8.1	Tausta.....	45
8.2	Kohdekiinteistö	45
8.3	Tutkimustoimenpiteet.....	46
8.3.1	Arkistosiselvitys.....	46
8.3.2	Yleispiirteinen katselmus.....	46
8.4	Toimenpide-ehdotukset	46

Koulutusalan nimi
Koulutusala
Koulutus

8.5	Mittaukset ja olosuhdekatselmus	47
8.6	Perustusrakenteiden toimivuus.....	48
9	KOHDEPISTEVERKON RAKENTAMINEN KÄYTÄNNÖSSÄ	49
9.1	Mittapisteiden asennus	49
9.2	Korkeuden määrittäminen mittapisteille	50
10	POHDINTA	52
	LÄHTEET.....	53
	LIITTEET	54

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan olemassa olevien rakennusten ja rakenteiden kuntoisuusvalvonnan yhteydessä suoritettavien seurantamittausten tulokulmasta mittausten tarkkuusvaatimuksia ja virhelähteitä. Työ on osa laajempaa palvelukuvauksen kokonaisuutta, jossa selvitetään muodonmuutosten, seurantamittausten ja monitoroinnin käsitteet prosessihierarkkisesti. Tarkastelussa ensisijaisina ovat painumatyyppisiin seurantamittauksiin soveltuvat geodeettiset mitausmenetelmät ja niiden virhelähteet. Ydinkysymyksinä ovat mitä, miksi, miten ja milloin mitataan.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii X Oy. Opinnäytetyön toteuttamiseen saatiin mahdollisuus samalla, kun opinnäytteen kirjoittaja aloitti yrityksessä kiinteistöjen seurantamittaustehtävissä.

Kiinteistöjen kuntoisuusvalvonnalla on yhteiskunnallisesti merkittävä funktio, sillä kiinteistöihin on sidottu merkittävä varallisuus. Myös kiinteistöjen perustusten ja rakenteiden korjauksiin liittyvät kustannukset muodostuvat taloyhtiöille usein merkittäviksi. Pahimmillaan perustusten tila eskaloituu niin vakavaksi, että syntyy rakennuksen akuutti sortumariski. Päätösten tueksi tarvitaan parametreja, joiden perusteella korjauspäätökset tehdään. Näitä parametreja tuotetaan kulloiseenkin tapaukseen optimoiduilla mittauksilla sekä muilla menetelmillä, joilla perustusten vaurioaste sekä prosessin kulku ja nopeus saadaan selville.

Tämän opinnäytetyön aihe on mielenkiintoinen haaste perehtyä syvällisemmin mittaustarkkuuden sekä virhelähteiden käsitteeseen ja substanssiin sekä mitaustulosten tulkintaan ja niistä luotaviin johtopäätöksiin rakennusten kuntoisuusvalvonnan tulokulmasta.

2 SEURANTAMITTAUKSET JA MONITOROINTI

2.1 Siirtymämittaukset

Siirtymämittausmenetelmät voidaan jakaa geodeettisiin menetelmiin, jotka mitaavat siirtymiä maan pinnalta, sekä geoteknisiin menetelmiin, joilla mitataan maan sisäisiä siirtymiä.

2.2 Muodonmuutosmittaukset

Esimerkiksi rakentamisen ja rakennusten yhteydessä esiintyviä tilanteita, joissa rakenteissa syntyy kuormitusolosuhteissa muodonmuutoksia. Tällaisten deformaatioiden määrittäminen ajan funktiona edellyttää jatkuvaa havainnointia, joka on yleensä liian kallista. Tästä syystä mittaukset rajoitetaan tiettyyn ajalliseen sykliin, jonka frekvenssi riippuu muutoksen nopeudesta. Deformaatiomittaukset palvelevat ensisijaisesti vaaratilanteiden ehkäisemiseksi sekä tutkimuksessa ja oikeudellisten kysymysten selvittämisessä, joissa kaikissa tapauksissa huomio on kiinnitettävä erityisesti luotettavuuteen ja mittausten todistusvoimaan. (Salmenperä 2002, 4.)

Deformaatiomittaukset ovat yleensä pitkällä aikavälillä tapahtuvia mittauksia, joilla pyritään geodeettisten ja geoteknisten metodien avulla selvittämään esimerkiksi kohteen taso- tai korkeussijainnissa tapahtuvat muutokset. Ne jaetaan toisinaan staattisiin, kvasistaattisiin, kinemaattisiin ja dynaamisiin mittauksiin. Staattisessa mittauksessa on yksi mittaustapahtuma, jossa todetaan esimerkiksi kohteen muoto ja verrataan sitä esimerkiksi teoreettiseen muotoon. Kvasistaattisessa mittauksessa on kaksi mittausajankohtaa. Tutkittavana asiana on näiden ajankohtien välillä tapahtunut muutos. Kinemaattisessa mittauksessa on useita mittausajankohtia, ja mittauksen matemaattisessa mallissa on mukana alkuparametri. Dynaamisessa mittausmallissa on lisäksi mukana myös muodonmuutoksia aiheuttavat voimat. (Salmenperä 2002, 4.)

Muodonmuutosmittausten todistusvoima ja myös käytettävä tulkinta riippuu muodonmuutosten suuruuden ja mittaustarkkuuden suhteesta. Jos informaatioteoreettisesti ajatellaan odotettavissa oleva liike signaaliksi ja mittausrvirhe, jota karakterisoi esimerkiksi koordinaattikeskivirhe, kohinaksi, pitää signaali-kohinasuhteen olla mahdollisimman suuri. Jos tämä suhde on suuruusluokkaa 10, ei mittaustulosten tulkinnassa todennäköisesti ole ongelmaa. Pienemmillä suhdeluilla tulkinta vaikeutuu ja kovinkaan pitkälle vieviä johtopäätöksiä ei voida esittää. Mittausrvirheen tulisi olla korkeintaan yksi kymmenesosa odotettavissa olevasta liikkeestä. Tämän vuoksi mittaustavaksi ja laitteistoksi tulisi aina valita tarkin käytettävissä olevista. (Salmenperä 2002, 65; Suomen Geoteknillinen yhdistys 2017, 20.)

2.3 Seurantamittaukset

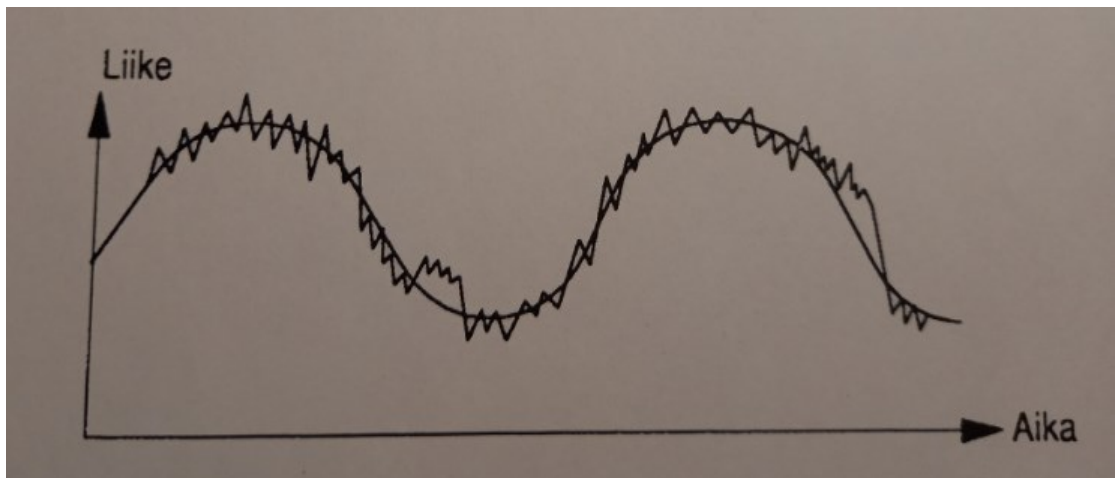
Seurantamittaus käsitteenä on kiinteistöjen kontekstissa laajempi käsite. Se saattaa sisältää deformaatiomittausten lisäksi mahdollisesti myös muita rakenteiden olosuhteiden seurantamittauksia, kuten perustusten olosuhteiden seuranta. Seurantamittausten lähtökohtaisena tavoitteena on selvittää prosessin kulku ja nopeus.

Mittausten luotettavuuden kannalta on tärkeää, että mittaukset suoritetaan mahdollisuuksien mukaan aina samalla tavalla. Tämä tarkoittaa, että pyritään joka mittauskerralla käyttämään esimerkiksi samoja kojeasemia ja -korkeuksia sekä samaa kalustoa ja mittaajia, jolloin mittaustulokset on mahdollisimman koherenttia ja täten myös johtopäätöstarkkuuden luotettavuus on mahdollisimman hyvä. Kun seurantamittaus suoritetaan aina mahdollisimman samalla tavalla, on ainoa muuttuva tekijä kohteen liike.

Seurantamittausmenetelmän valinnassa merkittävä tekijä on odotettavissa olevan liikkeen sekä muutoksen nopeus ja suuruus. Mittaustarkkuuden on siten oltava suurempi kuin muutoksen. Kohteessa mahdollisesti tapahtuvat liikkeet ja muut haitalliset tapahtumat tulee arvioida, koska käytettävät mittausmenetelmät valitaan mittaamaan näitä liikkeitä. Seurantamittausten tarkkuusvaatimukset riippuvat kohteen odotettavissa olevan liikkeen suuruudesta. Mittausmenetelmän

virhemarginaalin on oltava pienempi kuin odotettavissa oleva liike, jotta liike voidaan kyseisellä metodilla havaita, kuten edellisen kappaleen signaali-/kohinasuhteessa todettiin.

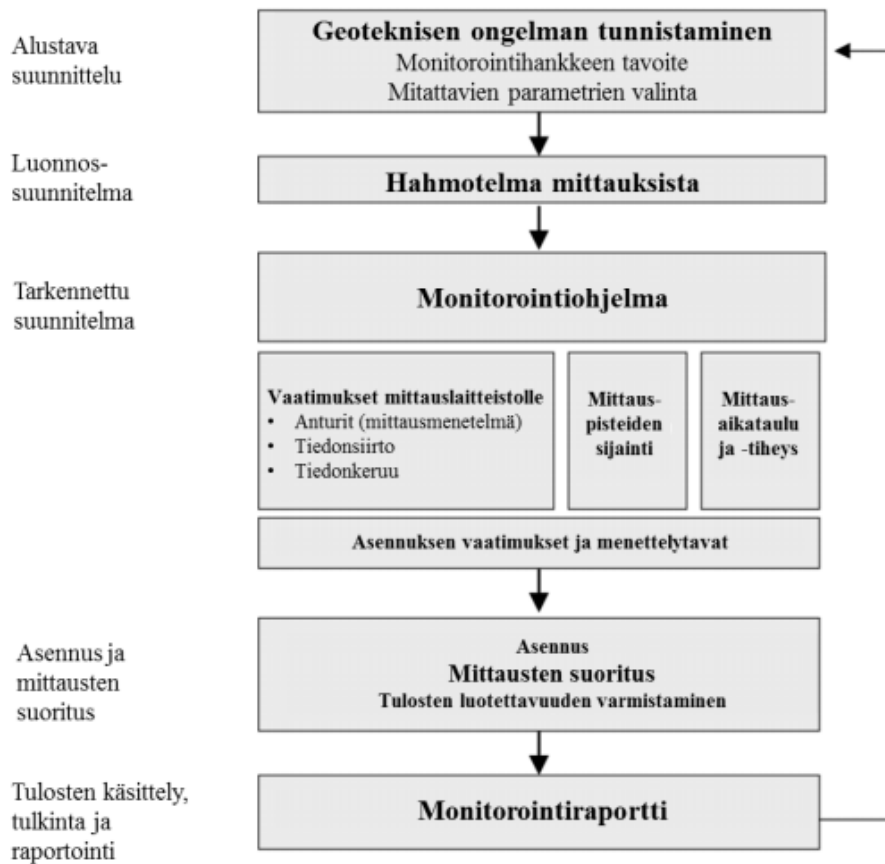
Yksinkertaisimmassa tapauksessa oletetaan muodonmuutoksen olevan tasaista liikettä. Tosiasiassa tapahtuu toisinaan äkillisiä muutoksia (Kuvio 1), joskin tapahtuman lopulliseen päättymiseen saattaa kulua paljon aikaa. Plastisten muodonmuutosten ohella ovat mahdollisia myös elastiset muutokset. (Salmenperä 2002, 6.)



Kuvio 1. Liike voi olla pitkäperiodista, johon liittyy lyhytaikaista satunnaisliikettä (Salmenperä 2002, 6)

2.3.1 Monitorointi

Monitoroinnilla tarkoitetaan kokonaisuutta, joka käsittää seurantamittausten suunnittelun, mittausmenetelmän valinnan, mittaukset sekä niistä saatujen tulosten analysoinnin. Monitorointiohjelman laatiminen alkaa tavoitteiden määrittämisellä ja nykytilanteen kartoituksella. Ohessa on havainnollistettu yleisellä tasolla monitorointiohjelman vaiheet (Kuvio 2).



Kuvio 2. Monitorointiprojektin vaiheet (Bäcklund 2013, 16)

Kuvan taulukon vaiheita iteroidaan, kunnes jokainen vaihe ja menetelmä on saatu optimoitua kulloiseenkin projektiin. Esimerkiksi toinen vaihe, hahmotelma mittauksista, tarkentuu kulloisenkin monitorointiprojektin tarkkuusvaatimusten määrittämisen. Alustavan suunnittelun yhteydessä kohteen kannalta kriittiset parametrit ja niiden muutosten sallitut suuruudet tulee määrittää. Parametreja mitattaessa tulee huomioida, mitataanko muutoksen syytä vai seurausta tai molempia. (Bäcklund 2013, 16.)

2.3.2 Monitorointimittausten tarkkuusvaatimus

Monitorointimittausten tarkkuusvaatimukset riippuvat odotettavissa olevan liikkeen suuruudesta. Jos kohdepisteiden liikettä merkitään $D_i, i = 1 \dots m$, mittauksessa m on kohdepistettä ja määrittelyn hajonta σ_i . Tällöin yleisen käsityksen mukaan pitää olla voimassa määrittelyn hajonta-arvo

$$\sigma_i \leq 0,04D_i.$$

(1)

Mittausepävarmuuden tulee olla korkeintaan 4 prosenttia muodonmuutoksen suuruudesta. Tämä on tarkkuus, joka olisi suositeltava tavoitetta. Jos tähän tarkkuuteen ei päästä, kasvaa mittausten tulkinnanvaraisuus. Tällöin otetaan käyttöön yhdistettyä hajontaa, joka sisältää sekä sisäisen että ulkoisen hajonnan. Mittauksen kokonaisepävarmuus saadaan käyttämällä laajennuskerrointa k kertomana

$$U_i = k * \sigma_i \quad (2)$$

Kertoimelle k annetaan rakennusmittauksissa yleensä arvo 2,5, joka merkitsee todennäköisyyden kasvamista arvosta 68 prosenttia arvoon 99 prosenttia. Tällöin saadaan epävarmuudeksi

$$U_i \leq 0,1 D_i \quad (3)$$

Nyt mittausepävarmuuden tulee olla korkeintaan 10 prosenttia deformaation suuruudesta.

Tärkeää kaikissa tarkkuusarvioinneissa on "kriittinen deformaatio" D_{kr} . Se tarkoittaa deformaatiota, joka aiheuttaisi vakavia seuraamuksia, mikäli se sekoittuisi mittausvirheisiin eikä näin ollen paljastuisi. Jotta tältä vältytään, on epäyhtälön

$$\sigma_i \leq 0,2 D_{kr} \quad (U_i \leq 0,5 D_{kr}) \quad (4)$$

oltava voimassa. Mikäli tätä ei kyetä täyttämään, on toimeksiantajalle tehtävä selväksi odotettavissa olevat vaikeudet. (Salmenperä 2002, 14; Turkki 2015, 10.)

3 EPÄVARMUUSTEKIJÄT PROSESSIN KULUN ARVIOINNISSA

3.1 Mittausten ajoittaminen

Kiinteistöjen painumamittausten mittausajankohdilla on merkittävä vaikutus mitausten luotettavuuteen ja niistä tehtäviin johtopäätöksiin. Esimerkiksi roudan aiheuttama muutos saattaa tuottaa virheellisiä johtopäätöksiä. Tämän vuoksi mitaukset pitäisi mahdollisuuksien mukaan ajoittaa roudan vaikutusajan ulkopuolelle. Tämä ei useinkaan ole käytännössä mahdollista.

Toinen esimerkki maaperään mahdollisesti vaikuttavasta tekijästä on puiden juuristojen vaikutusintensiivisyys ja -laajuus. Suurten lehtipuiden juuristot imevät maaperästä vettä ja kutistavat ympäröivää maaperää.

Edellä mainitut esimerkkeinä ovat tekijöitä, joiden vaikutukset pitää ymmärtää ja ottaa huomioon seurantamittauksia tehtäessä, jotta johtopäätökset ovat luotettavia.

3.2 Seurantajakson pituus

Miniminä seurantamittauksille voidaan pitää yleisesti vuoden mittausjaksoa. Tätä lyhyemmän mittausjakson perusteella ei kyetä tekemään luotettavia johtopäätöksiä. Mittauksia tulee suorittaa riittävä määrä kalenterivuoden aikana.

Tyypillisesti kiinteistöjen seurantamittauksia tehdään useita vuosia kestävinä toimeksiantoina. Monitorointikohteet ovat usein kohteita, joissa muodonmuutokset tapahtuvat hitaasti. Tällöin myös mittauksia suoritetaan pitkällä aikavälillä. Tällöin vaarana on esimerkiksi, että aikaisemmin käytetty mittalaite rikkoutuu tai kojeiden tekniikassa tapahtunut kehitys houkuttelee muuttamaan menetelmää. Tällöin tulisi kuitenkin järjestää vaihto siten, että muodostuisi siirtymävaihe, jolloin mitaukset suoritettaisiin sekä uudella että vanhalla menetelmällä. Näin voidaan selvittää mittausmenetelmien välinen mahdollinen systemaattinen ero. (Salmenperä 2002, 8.)

3.3 Mittapisteiden luotettavuus

Kuten lähtöpisteiden eli kiintopisteiden, tulee seurattavien eli kohdepisteiden olla vakaasti kiinni kohteessa. Maanmittauslaitoksen julkaisema kaavoitusmittausohje määrittää, että kiintopisteiden tulee olla rakenteeltaan yksikäsitteisiä, liikkumattomia ja kestäviä. Kiintopisteitä rakentaessa pitää varmistaa, että ne sijaitsevat vajoaman ulkopuolella.

Tasokiintopisteen merkinä voi olla metalliputki, -tanko tai pultti. Korkeuskiintopisteen merkinä on pyöristetty pultti. Yhdistetyn taso- ja korkeuskiintopisteen merkinä on pyöristetty pultti, jossa on keskitysmerkki (Maanmittauslaitos 2003, 9). Ohessa on kallioon kiinnitetty korkeuskiintopiste, joka on näkyvöitetty punaisella maalilla (Kuvio 3).



Kuvio 3. Kaupungin korkeuskiintopiste

Seurantapisteet tulee geometrisesti sijoittaa kohteeseen siten, että niiden mahdollinen liike kuvaa kohteen liikettä mahdollisimman tarkasti ja kattavasti. Niiden määrä riippuu kohteen muodosta sekä suuruudeltaan ja suunnaltaan vaihtelevista muodonmuutoksista. Pisteitä tulisi olla niin tiheässä, että kahden pisteen välillä deformaatio on suunnaltaan ja suuruudeltaan yhtäläinen. (Salmenperä 2002, 12.) Jos seurattavassa rakennuksessa tai rakenteessa on esimerkiksi niin sanottu saumakohta eli liikuntasäily tai merkittävä halkeama, on asianmukaista sijoittaa mittapisteet sauman molemmin puolin, jotta saadaan osien suhteelliset liikkeet selville.

4 MITTAUSTARKKUUS

Kaikki mittaukset ovat lähtökohtaisesti virheellisiä, eli absoluuttisen tarkka mitaus on käsitteenä melko absurdi. Virheen määritelmä kaavana on

$$e_i = l_i - \mu, \quad (5)$$

jossa e_i on havainnon virhe, l_i havaintoarvo ja μ suureen oikea arvo. Virheen määrittävä kaava on ongelmallinen, koska kaavaan sisältyy havaintosuureen oikea arvo. Sitä ei tunneta, sillä muuten mitaus olisi tarpeeton, joten mittauksen virheitä voidaan vain arvioida. (Laurila 2020, 128.)

Jos esimerkiksi kaksi eri mittaajaa suorittaa saman mittauksen samalla kalustolla ja samoissa olosuhteissa, melko suurella todennäköisyydellä he eivät tule päätyämään täsmälleen samaan lopputulokseen (Laurila 2020, 128). Kyse on siitä, mitä virheitä ja kuinka paljon niitä lopulliseen mittaustulokseen kumuloituu. Lopputuloksen kannalta pyritään mahdollisimman parhaaseen arvioon kitkemällä karkeat virheet, minimoimalla systemaattiset virheet sekä estimoimalla satunnaiset virheet tilastomatematisilla menetelmillä.

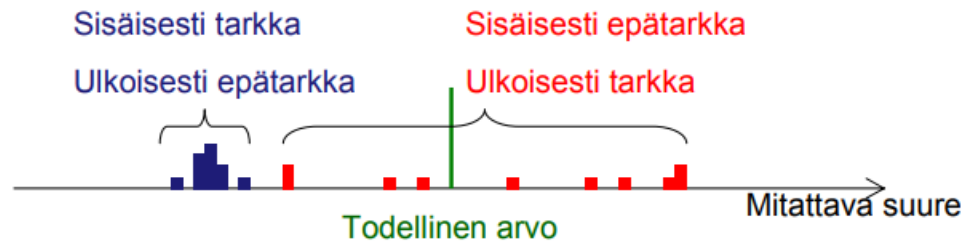
Mittaustarkkuudesta ei voida puhua vain laitevalmistajien ilmoittamista optimaalisissa olosuhteissa saavutettavista maksimitarkkuuksista. Mittaustarkkuus on monitahoinen käsite, joka koostuu useista tekijöistä.

4.1 Sisäinen ja ulkoinen tarkkuus

Mittaustulosten tarkkuutta arvioitaessa täytyy pitää erillään sisäinen ja ulkoinen tarkkuus. Hajonta mittaa sisäistä tarkkuutta, ja hyvän sisäisen tarkkuuden tunnuslukuna pidetään pientä hajontaa.

Mittauksia toistamalla saadaan mittaustulosten joukko. Sisäinen tarkkuus muodostuu tämän joukon toistotarkkuuksien satunnaisvirheiden perusteella. Näiden satunnaisien virheiden oletetaan olevan normaalisti jakautuneita, joten mittauksen sisäinen tarkkuus esitetään yleisesti keskihajontana. Keskihajonta kertoo, miten keskittyneitä havainnot ovat eli miten kaukana havainnot keskimäärin ovat keskiarvosta. Tarkkuus voidaan ajatella virheiden arvioituna suuruutena.

Ulkoinen tarkkuus ilmaisee, kuinka lähellä todellista arvoa ollaan eli miten suuren vääristymän suurin paljastumatta jäänyt karkea virhe voi aiheuttaa lopputulokseen. Ulkoisesti tarkan mittauksen tulos on lähellä mitattavan suureen todellista eli oikeana pidettyä arvoa (Kuvio 4).



Kuvio 4. Sisäinen ja ulkoinen tarkkuus (Mittausprujut 2007, 2)

4.2 Johtopäätöstarkkuus

Johtopäätöstarkkuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä kokonaisuutta, joka vaatii ammattitaitoa ja laajaa näkemystä aiheesta. Se ei ole ainoastaan yksittäisten mitausten suoritteena saatu lukemataarkkuus, joka vaihtelee ajallisesti olosuhteiden sekä muiden vaikuttavien tekijöiden mukaan.

Johtopäätöstarkkuus on jollakin aikavälillä yksittäisistä mittaustuloksista muodostettu analysoitu tulkinta. Se on kokonaisuus, jossa otetaan huomioon myös mitattavan kohteen, ympäristön sekä vallitsevien olosuhteiden tekijät. Johtopäätöksiä luodessa pitää luoda myös ennusteita. Kyseessä on ekstrapolointimenetelmä. Huomioon otettava asia on myös esimerkiksi mittaustulosten tasoituslaskennan jälkeiset lukujen pyöristyksestä aiheutuvat muutokset.

Ohessa olevassa kuviossa 5 on esimerkkinä tarkkavaaituskojeen luoma tuloste suoritettusta jonovaaituksesta. Esimerkin tarkkavaaituskoje antaa tulokset millimetrin sadasosan 10^{-5} m tarkkuustasolla. Asiakkaan tulosteisiin ja muihin asiakirjoihin esimerkiksi painumamittaukset ilmoitetaan yleensä millimetrin tarkkuustasolla 10^{-3} m, joten lukujen pyöristykset aiheuttavat myös pientä edestakaista vaihtelua.

5 VIRHEET JA EPÄVARMUUS

5.1 Virhelähteet

Virheet eivät muodostu ainoastaan mittausteknisistä tekijöistä, vaan virhetekijät kumuloituvat jo mahdollisesti virheellisistä lähtötiedoista sekä olosuhteiden vaikutuksesta mittaukseen.

Virheiden ja mittaustarkkuuden suuruuden ja laadun arviointi on olennainen osa kaikessa mittaustoiminnassa. Virheitä voidaan hallita menetelmillä, joissa tietyt kokoiset virheet voidaan havaita ja poistaa havaintoaineistosta, sekä ei-huomatujen ja ei-poistettujen virheiden vaikutus lopputulokseen voidaan arvioida ja minimoida.

Mittaustyölle määritetään ennen aloitusta tarkkuusvaatimukset, joiden perusteella optimoidaan työn toteutuminen haluttuun tarkkuuteen. Mittauksissa pyritään tilanteeseen, jossa havainnoissa on vain satunnaisia virheitä. Tässä tarkoituksessa systemaattiset virheet pyritään määrittämään ja poistamaan havainnoista havaintolaitteiden kalibroinnin, havaintoihin tehtävien korjausten ja havaintotekniikan keinoin. Karkeat virheet puolestaan pyritään havaitsemaan mittauksia suoritettaessa tai viimeistään laskennassa. Virheellisiksi epäillyt havainnot hylätään ja tarvittaessa uusitaan. Jäljelle jäävät satunnaiset virheet. (Laurila 2012, 36.)

5.2 Virhetyypit

Mittaus- ja reduktioprosessista tulevat virheet voidaan jakaa seuraaviin kategorioihin:

- **Satunnaiset virheet**, sisäinen epävarmuus. Edustavat mittausprosessin sisäistä, luonnollista epätarkkuutta. Satunnaisia virheitä hallitaan tilastomatematiikan keinoilla. Satunnaiset virheet ilmenevät havaintojen vaihteluna mittauksista toistettaessa, vaikka mittausolosuhteet tai -ajankohta eivät vaihtelisi. Satunnaisille virheille ei ole löydettävissä erityistä syytä. Ne vaikuttavat kaikkiin havaintoihin tavalla, jota ei voi täsmällisesti ennustaa. Satunnaisuutta luonnehtii tapahtumien jonkinasteinen

ennustamattomuus. Aikaisemmin tehdyn havainnon perusteella ei voida ennustaa seuraavaa havaintoa täsmällisesti. Yleensä oletetaan, että satunnaiset virheet ovat normaalijakautuneita, eli havaintoja toistettaessa havainnot jakautuvat Gaussin käyrän mukaisesti. (Vermeer 2019, 29.) Kun havaintoja toistetaan, saadaan laskettua havaintojen keskiarvon keskihajonta

$$S_x = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

jossa

S_x on keskiarvon keskihajonta

s on havintosarjan keskihajonta

n on havaintojen lukumäärä (Laurila 2012, 37-38).

Keskiarvon keskihajonta on siis mittaustuloksen arvioitu tarkkuus, kun tulos lasketaan useiden havaintojen keskiarvona. Keskiarvo on aina tarkempi kuin yksittäiset mittaushavainnot. Liitteessä 1 on esitetty Excel - taulukkolaskentana vaiheittain keskihajonnan laskuesimerkki. Kahdeksalle mittapisteelle on kullekin mitattu viisi korkeushavaintoa. Havainnoista on laskettu keskiarvot, joista on johdettu jäännösvirheet. Tämän jälkeen jäännösvirheet on neliöity, sekä laskettu sarjan keskihajonnat ja keskiarvojen keskihajonnat. Lopulta voidaan esittää mittaustulokset keskiarvon ja keskihajonnan avulla, jossa virheiden arvioitu suuruus esitetään 68 prosentin todennäköisyydellä.

- **Systemaattiset virheet**, ulkoinen epävarmuus. Kutsutaan myös säännölliseksi virheeksi. Virhe on järjestelmällisesti aina yhtä suuri ja saman suuntainen. Kyseinen virhe aiheutuu yleensä mittalaitteesta tai joistain ulkoisista tekijöistä. Systemaattinen virhe aiheuttaa poikkeaman suureen todellisen arvon ja otoksesta lasketun keskiarvon välille. Systemaattiselle virheelle on yleensä aina löydettävissä jokin syy, joka

vaikuttaa kaikkiin havaintoihin tai tiettyyn ryhmään havaintoja. (Vermeer 2019, 29)

- **Karkeat virheet** aiheutuvat yleensä inhimillisistä erehdyksistä tai laiteviasta. Ne ilmaantuvat satunnaisesti, eikä niitä voida kuvata tilastollisen jakauman avulla. Karkeita virheitä pyritään eliminoimaan tilastollisen testauksen avulla. (Vermeer 2019, 29.)

5.3 Mittauksen häiriötekijät

Mittaukseen vaikuttavat ulkoiset ja sisäiset häiriötekijät. Sisäiset häiriötekijät ovat kojeiden omien komponenttien toiminnasta syntyviä, yleensä sähköisiä tekijöitä, eli kyse on kojeen komponenttien sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta. Ulkoiset häiriötekijät koostuvat luonnollisista ja keinotekoisista tekijöistä. Luonnollisia tekijöitä ovat erilaiset fysikaaliset ilmiöt, kuten aurinko, ilmakehä, ilmasto, valo, hiukkaspilvet ja kosminen säteily. Keinotekoiset häiriötekijät ovat tietoliikenteen aiheuttamia. Luonnollisten häiriötekijöiden huomioon ottaminen on mittaajan vastuulla. Keinotekoisien häiriötekijöiden vaikutusta pyritään hallitsemaan suojaamalla ja eristämällä kojeiden herkimmät osat. (Jäppinen 2003, 34.)

5.4 Hyvä mittaustapa

Kaikissa mittauksissa on mukana virheitä. Mittausten virhelähteitä on monia, mutta niitä pystytään kontrolloimaan eri menetelmillä. Laadukkaiden mittausten perustana ovat laadukkaat ja oikein mittaavat mittalaitteet. Mittalaitteiden oikea mittaustulos voidaan varmistaa kalibroinnilla ja laitteiden säännöllisillä tarkastuksilla.

Manuaalisissa mittauksissa suurin virhelähde on mittaaja. Vaikka mittalaite mit-taisi oikein, huolimaton tai ammattitaidoton mittaaja ei saa oikeita tuloksia ai-kaiseksi. Ammattitaito saavutetaan kokemuksen ja koulutuksen myötä ja huoli-mattomuusvirheitä pystytään karsimaan säännöllisillä mittausrutiineilla. Kaikkiin mittauksiin tulisi sisällyttää jonkinlainen tarkastus, jolla kyetään toteamaan mitat-tujen arvojen oikeellisuus, esimerkkinä mittauksen sulkeminen. Virheitä voidaan välttää hyvällä mittaustavalla. (Suomen Geoteknillinen yhdistys 2017, 30.)

Hyvällä mittaustavalla tarkoitetaan, että mittauksen suorittaa ammattitaitoinen ja kokenut mittaaja kalibroidulla kojeella käytännössä hyväksi havaittuja mittausmenetelmiä ja mittaustekniikkaa käyttäen. Hyvään mittaustapaan kuuluu myös mitausten toistettavuus ja jäljitettävyys. Nämä saavutetaan tarkalla dokumentoinnilla. Sen turvin kuka tahansa koulutettu mittaaja pystyy suorittamaan mittaukset samoin kuin edellisellä kerralla tehty. Suositeltavaa kuitenkin on, että monitorointimittauksen suorittaa sama henkilö nollamittauksesta aina viimeiseen seuranta-kertaan asti. Tällöin varmistutaan mitausten samanlainen suoritus kerrasta toiseen. (Suomen Geoteknillinen yhdistys 2017, 30.)

6 MITTAUKSEN SULKEMINEN JA TASOITUSLASKENTA

6.1 Mittauksen sulkeminen

Mittauksen sulkeminen on tapa hallita ja kontrolloida virheitä. Kun mittaus suljetaan, mittaustulos tarkastetaan jonkin tunnetun pisteen tai suureen avulla. Sulkemisen avulla saadaan määritettyä sulkuvirhe, joka on suureen mitatun arvon ja oikeana pidetyn arvon erotus. Erityisesti jonomuotoisissa runkomittauksissa, jonoavaituksessa ja jonomittauksessa puhutaan sulkuvirheestä, kun arvioidaan mittausten tarkkuutta. (Laurila 2012, 41.)

Jotta sulkuvirheen perusteella voidaan arvioida mittauksen laatua, tulee sulkuvirheelle löytyä ohjearvoja, joiden perusteella johtopäätökset tehdään. Suomessa noudatetaan esimerkiksi tavanomaisissa korkeusrunkomittauksissa yleensä kaavoitusmittausohjeita. Kaavoitusmittausohjeissa annetut tarkkuuden raja-arvot perustuvat suhteelliseen tarkkuuteen, joka on arvioidun virheen suhde pistevälin pituuteen. (Laurila 2012, 41.)

Suhteellinen tarkkuus on pieni laaduton suhdeluku, jonka yksikkö on ppm (parts per million) $1\text{ppm} = 10^{-6}$. Se kertoo, kuinka monta miljoonasosaa matkasta arvioitu virhe on. Sulkuvirhettä vastaava suhteellinen tarkkuus saadaan kaavasta,

$$r = \frac{W_H}{L}, \quad (7)$$

jossa r on suhteellinen tarkkuus, W_H korkeussulkuvirhe ja L jonon pituus. (Laurila 2012, 225.)

6.2 Tasoituslaskenta

Yksikäsitteisessä tapauksessa havaintoja ja määritettäviä parametrejä on yhtä monta. Tuntemattomat saavat yksikäsitteisen ratkaisun, mutta esimerkiksi karkeat virheet eivät paljastu. Määritetyille parametreille kyetään laskemaan keskijonot ja mahdolliset kovarianssit mittauksen rakenteen ja havaintojen arvioidujen tarkkuuksien perusteella. Mittauksen tarkkuus voi olla hyvä, mutta sen luotettavuus huono. Karkeat virheet eivät paljastu, ja niillä voi olla oleellinen vaikutus lopputulokseen. (Salmenperä 2001, 23.)

Tasoituksessa havainnot sovitetaan yhteen. Pienimmän neliösumman tasoitus on yleisimmin geodesiassa käytettävä menetelmä. Se on tilastomatemattinen optimointimenetelmä, jolla ratkaistaan tuntemattomat parametrit siten, että jäänvirheiden neliöiden summa on minimissään (Kallio 1998, 6). Mittauksissa havaitaan kulmia ja etäisyyksiä, joiden avulla koordinaatit lasketaan. Havaintoja tehdään käytännössä enemmän kuin minimissään tarvitaan, eli mittaus on ylimääräi-tetty. Tätä kutsutaan redundanssiksi. Näiden ylimääräisten havaintojen perusteella kyetään selvittämään karkeat virheet sekä ratkaisemaan tarvittavat suureet luotettavammin. Pienimmän neliösumman estimaatit ovat suurimman todennäköisyyden estimaatteja, kun havainnot ovat riippumattomia ja normaalisti jakautuneita. (Räsänen 1994, 33.)

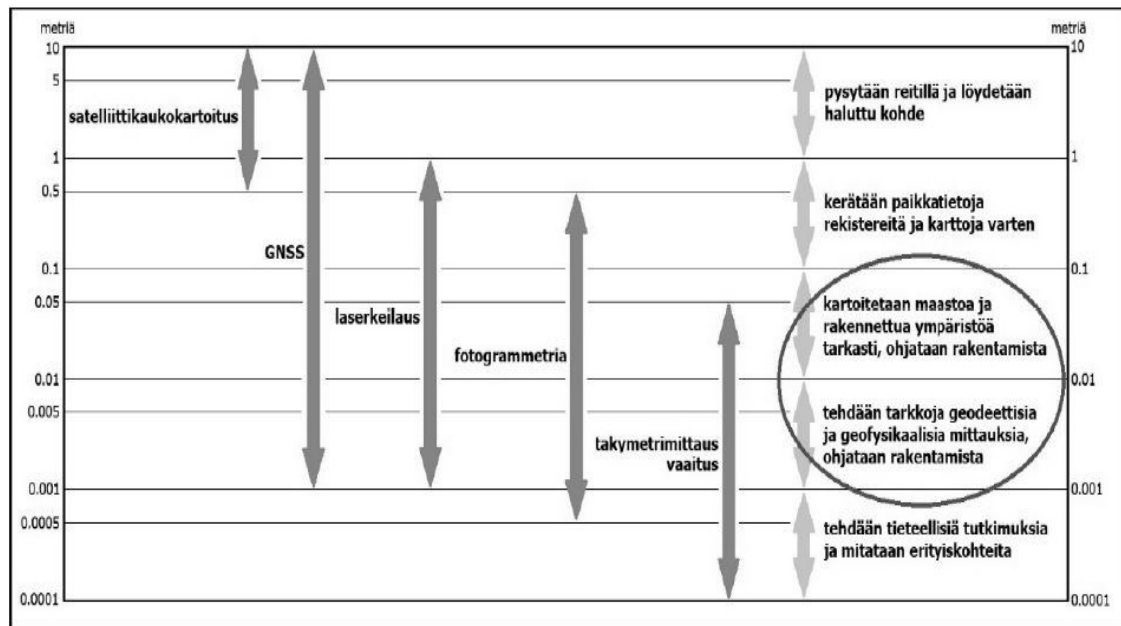
Vaikka tasoituskennassa sanotaan korjattavan havaintoja, korjaaminen ei poista mittauksen virheitä. Virheet vain jaetaan uudella tavalla eli tasataan. (Laurila 2012, 227.)

7 MITTAUSMENETELMÄT JA TARKKUUSALUEET

7.1 Yleistä

Sijaintimittauksia tehdään monin eri menetelmin. Satelliittipaikannus (GNSS), laserkeilaus, fotogrammetria, takymetrimittaus ja vaaitus ovat Maan mittaajien menetelmiä. Yleisimmin Maan mittauksissa pitää päästä tarkkuustasolle 0,001–0,1 metriä. Tällä tarkkuustasolla tehdään geodeettisia ja geofysikaalisia mittauksia, kartoitetaan maastoa ja rakennettua ympäristöä tarkasti sekä ohjataan rakentamista.

Ohessa on esitetty eri menetelmien tarkkuusalueita ja käyttökohteita. Maan mittaajat toimivat yleensä ympäröidyllä alueella (Kuvio 6). Huomioi erityisesti GNSS mittausten laaja tarkkuusalue. (Laurila 2020, 127.)



Kuvio 6. Mittausmenetelmien tarkkuusalueita (Laurila 2020, 127)

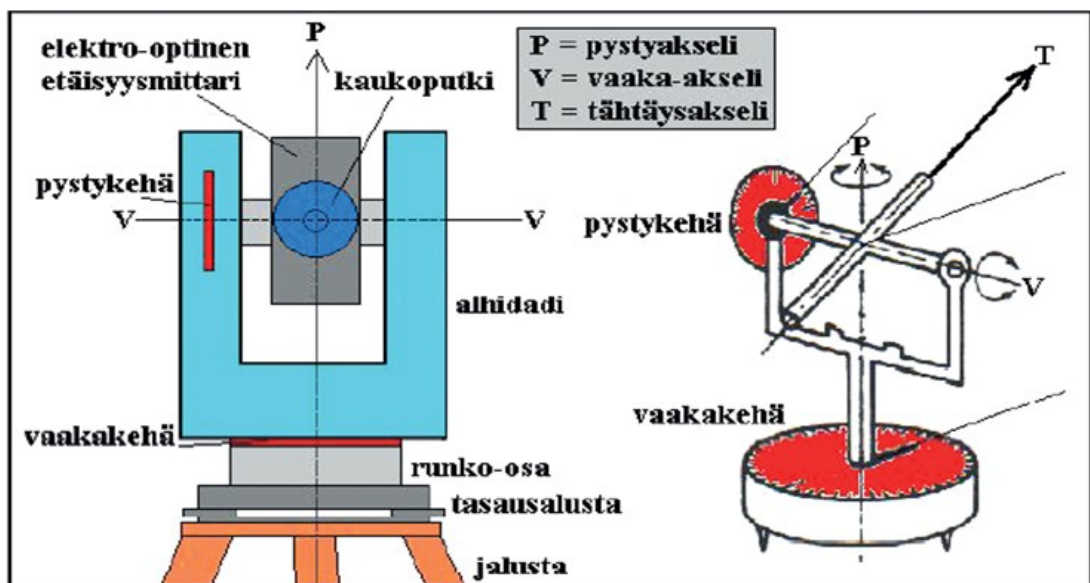
7.2 Takymetri

Takymetri on elektro-optinen kulman- ja etäisyydenmittauskoje, jolla mitataan pysty- ja vaakakulmia sekä etäisyyksiä. Näistä havainnoista voidaan laskea koordinaatteja, korkeuksia ja muita suureita. Mittaustulokset tallennetaan sähköisesti. Se on satelliittimittauksen ohella tärkein mittaus- ja kartoitustekniikassa nykyisin

käytettävistä kojeista. Nykyaikaiset takymetrit syntyivät yhdistämällä teodoliitti ja elektro-optinen etäisyysmittari. Vuosien myötä kojeet ovat kehittyneet automatisoiduiksi mittausroboteiksi. Aikanaan takymetrimittaus on ollut kahden mittajaan työtä, mutta nykyaikaisilla kojeilla yksi mittaja voi tehdä useimmat työt. (Laurila 2012, 238.)

7.2.1 Takymetrin pääosat

Takymetrin rakenteelliset pääosat ovat tasausalusta, runko-osa, alhidadi, mitauskaukoputki ja elektro-optinen etäisyysmittari (Kuvio 7). Takymetrissä on myös erilaisia tasaimia, kuten rasiatasain, putkitasain ja elektroniset tasaimet eli kompensattorit, jalkaruuvit, joiden avulla koje asetetaan vaakasuoraan, optinen luoti kojeen keskistystä varten ja liikeruuvit kojeen suuntaamista varten. (Laurila 2012, 239.)



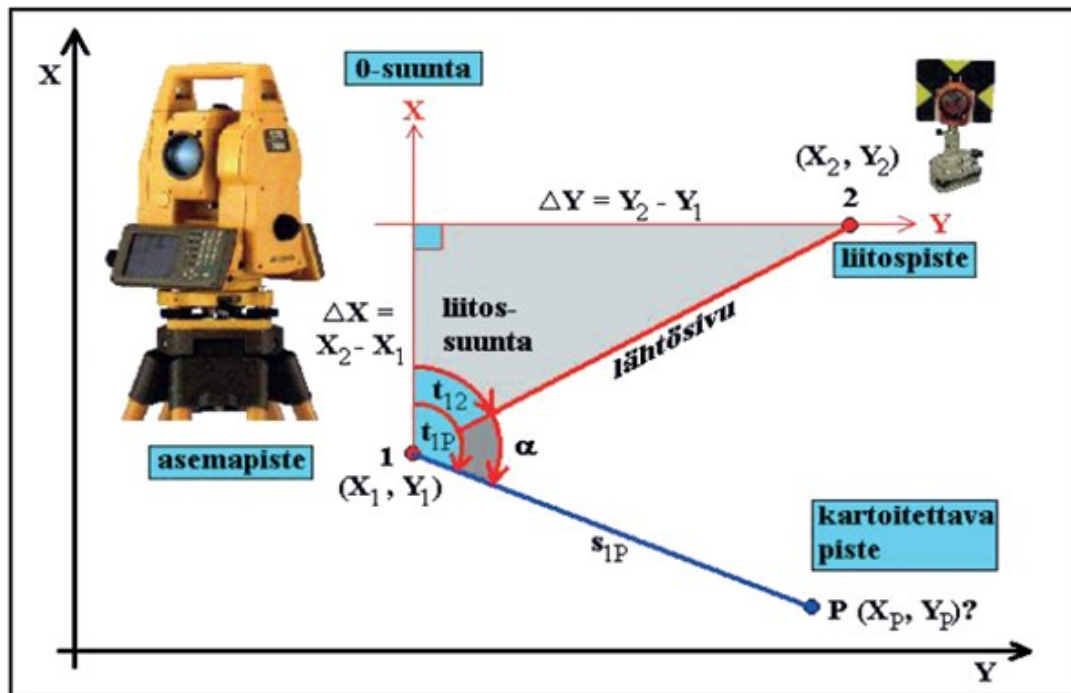
Kuvio 7. Takymetrin pääosat ja akselit (Laurila 2012, 239)

7.2.2 Keskistys ja tasaus

Takymetrillä tehtävien mittausten aloitustoimenpiteitä ovat kojeen tähyksen keskistys ja tasaus mittauspisteille, koje- ja tähyskorkeuksien mittaaminen ja kojeen orientointi koordinaatistoon ja korkeusjärjestelmään. Näiden toimenpiteiden jälkeen takymetrillä voidaan tehdä kulmien ja etäisyyksien mittauksia ja orientoinnin jälkeen sijaintimittauksia mittausta paikan koordinaatistossa ja korkeusjärjestelmässä. (Laurila 2012, 252.)

7.2.3 Orientointi tunnetulle pisteelle

Orientointi tarkoittaa mittauspaikan koordinaatiston ja korkeustason määrittelyä. Tämä on edellytys koordinaattimuotoisten mittausten tekemiselle. Koordinaatisto voidaan määrittellä, jos mittauspaikalla on vähintään kaksi tasorunkopistettä. Pistettä, jolle takymetri pystytetään, kutsutaan asemapisteksi. Toinen tunnettu piste on liitospiste, jolle pystytetään tähys. Orientoinnin jälkeen takymetrin vaakakehältä voidaan havaita tähtäyssuuntia, jotka ovat koordinaatiston pohjoissuunnasta mitattuja suuntakulmia. Suuntakulmia ja etäisyyksiä mittaamalla voidaan edelleen määrittää kartoitettavien pisteiden sijainti. (Laurila 2012, 258.) Kuvio 8 havainnollistaa tunnetulle pisteelle orientointia.



Kuvio 8. Takymetrin orientointi tunnetulle pisteelle (Laurila 2012, 258)

Matemaattisesti orientoinnissa on kyse suuntakulman laskemisesta, eli geodeettisesta käänteistehtävästä

$$\begin{cases} \Delta X = X_2 - X_1 \\ \Delta Y = Y_2 - Y_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$t_{12} = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right), \quad (9)$$

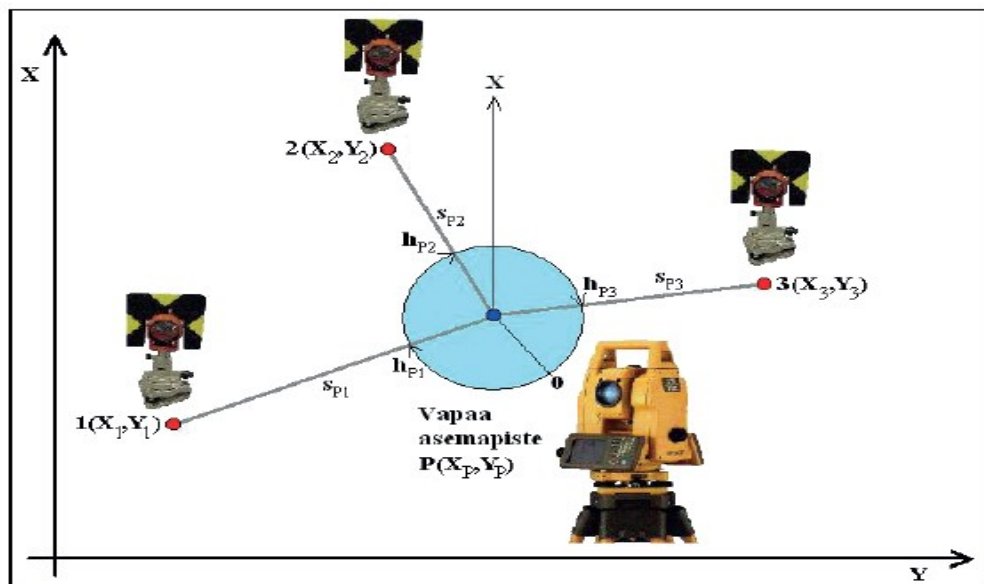
jossa t_{12} on liitossuunta pisteeltä 1 pisteelle 2, X_1 ja Y_1 ovat asemapisteen koordinaatit, X_2 ja Y_2 ovat liitospisteen koordinaatit, ΔX on X-koordinaattien erotus ja ΔY on Y-koordinaattien erotus. (Laurila 2012, 258.)

Mittauspaikan korkeustason määrittelyyn riittää, että tunnetaan asemapisteen korkeus ja kojekorkeus. Jos asemapisteen korkeutta ei tunneta, voidaan korkeus siirtää kojeeseen joltakin lähistöllä olevalta korkeuspisteeltä. (Laurila 2012, 258.)

Kun takymetri on orientoitu, voidaan sillä mitata kohteiden koordinaatteja säteittäisellä mittauksella. Matemaattisesti kyse on geodeettisesta päätehtävästä. (Laurila 2012, 259.)

7.2.4 Orientointi vapaalle asemapisteelle

Käytännöllisyyden vuoksi nykyään suositetaan pääasiassa orientointia vapaalle asemapisteelle (Kuvio 9). Vapaa asemapiste tarkoittaa tilannetta, jossa takymetri pystytetään sijainniltaan tuntemattomaan paikkaan, josta tehdään havainnot koordinaateiltaan tunnettuihin liitospisteisiin.



Kuvio 9. Vapaan asemapisteen määrittämisen periaate (Laurila 2012, 260)

Vapaan asemapisteen koordinaatit voidaan laskea, kun mitataan etäisyydet vähintään kahteen liitospisteeseen tai tähtäyssuunnat vähintään kolmeen liitospisteeseen. Tunnettujen liitospisteiden etäisyys- ja kulmahavaintojen perusteella takymetri kykenee määrittämään oman sijaintinsa.

7.2.5 Takymetrin tarkkuus

Takymetrillä mitataan etäisyyksiä sekä vaaka- ja pystykulmia. Takymetri pyörii sekä vaaka- että pystyakselin ympäri, joten sillä voidaan mitata kahdessa eri kojeasennossa. Takymetri on 1-asennossa, kun vaakasuoran tähtäyksen pystykehälukema on 100 gon, ja 2-asennossa, kun vaakasuoran tähtäyksen pystykehälukema on 300 gon. Takymetrin normaali mittausasento on 1-asento. Vaativissa mittauksissa kulmahavainnot tehdään molemmissa kojeasennossa. (Laurila 2012, 244–245.)

7.2.6 Etäisyystarkkuus

Takymetrin etäisyydenmittaustapaa kutsutaan elektro-optiseksi etäisyydenmittaukseksi. Elektro-optisen etäisyydenmittauksen tarkkuus on tyypillisesti 1–3 millimetriä. Laitevalmistajat antavat tarkkuuden muodossa:

$$a \text{ mm} + b \text{ ppm}, \quad (10)$$

jossa a on tarkkuuden matkasta riippumaton osa ja b tarkkuuden matkasta riippuva osa, jonka yksikkö on ppm, $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$.

Matkasta riippumattomat virheet a liittyvät vaihe-eromittaukseen sekä kojeen ja prisman nollapistevirheisiin. Matkasta riippuvat virheet b liittyvät sääkorjaukseen ja mittaustaajuuden vaihteluihin. Tarkkuus ilmaisee todennäköisten virheiden arvioitun suuruuden. Kun oletetaan, että osavirheet kuvaavat satunnaisia virheitä, on etäisyshavainnon arvioitu virhe satunnaisten virheiden yhdistämissäännön perusteella,

$$\sigma_S = \left(a^2 + (bL)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

jossa σ_S on mitatun etäisyyden arvioitu keskihajonta, a tarkkuuden matkasta riippumaton osa ja L mitattu matka. (Laurila 2012, 237–251.)

Takymetrillä tehtävien mittausten tarkkuuteen vaikuttavat kojeen tekniset ominaisuudet, keskistys, sääolosuhteet, havaintojen toisto ja koordinaattijärjestelmän huomiointi. Havaintokojeen ilmoitettua tarkkuutta ei ole mahdollista saavuttaa, jos mittausolosuhteisiin liittyviä korjauksia eli reduktioita ei tehdä. (Laurila, 2012, 330.)

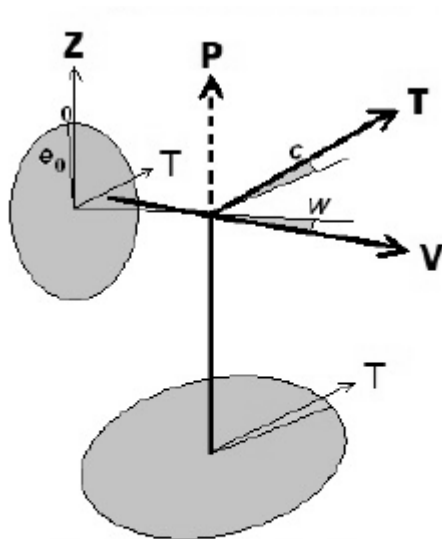
Yleisesti takymetrimittausten tarkkuuteen vaikuttavat takymetrin sisäisten virheiden lisäksi ulkoiset tekijät, kuten ilman väräily ja mittalaitteen tärinä esimerkiksi lähellä olevista työkoneista. Koska takymetrit ovat optisia mittalaitteita voi myös sakea sumu tai lumisade estää mittausten toteuttamisen pitkällä havaintoetäisyyksillä. (Suomen Geoteknillinen yhdistys 2017, 18.)

7.2.7 Kulmatarkkuus

Takymetriä tyypillinen kulmamittauksen erotuskyky on 0,0001 gon. Vaakasuuntien ja pystykulmien tarkkuuteen vaikuttavat mittauskojeen kulmanlukujärjestelmän tarkkuus, kojeen rakenteelliset tekijät, havaintojen suoritustekniikka ja havaitsija. Tarkkuuteen vaikuttavia rakenteellisia tekijöitä ovat kojeen akseli- ja epäkeskisyysvirheet. Jotta kulmamittauskoje toimii rakenteensa puolesta virheettömästi, tulee seuraavien ehtojen täyttyä:

- Pystyakselin tulee olla kojeen tasauksen jälkeen pystysuorassa.
- Vaaka-akselin on oltava kohtisuorassa pystyakselia vastaan.
- Tähtäysakselin on oltava kohtisuorassa vaaka-akselia vastaan.
- Kaikkien akselien tulee leikata samassa pisteessä.
- Pystyakselin tulee kulkea vaakakehän keskipisteen kautta.
- Vaaka-akselin tulee kulkea pystykehä keskipisteen kautta. (Laurila 2020, 147.)

Jos vaaka-akseli ei ole kohtisuorassa pystyakselia vastaan, on kojeessa tappikaltevuusvirhe (W). Jos tähtäysakseli ei ole kohtisuorassa vaaka-akselia vastaan, on kojeessa kollimaatiovirhe (c). Jos akselit eivät leikkaa samassa pisteessä tai ne eivät kulje jakokehien keskipiteiden kautta, on kojeessa erilaisia epäkeskisyydevirheitä. Vain pystykulmamittauksessa vaikuttava rakenteellinen virhe on pystykehän nollapistevirhe eli indeksivirhe (e_0) (Kuvio 10). Akseli- ja epäkeskisyydevirheet ovat systemaattisia virheitä. (Laurila 2020, 147.)



T = tähtäysakseli
V = vaaka-akseli
P = pystyakseli
Z = zeniitti

Kuvio 10. Takymetrin akselivirheet (Laurila 2020, 147)

7.2.8 Prismat

Takymetrimittausten tarkkuuteen vaikuttaa merkittävästi käytettävä prisma. Prismojen tarkkuudet vaihtelevat kuten kojeiden. Prismoille on omat käyttötarkoituksensa. Esimerkiksi kartoitusmittauksiin soveltuva prisma ei sovellu tarkkoihin seurantamittauksiin. Mittauksen suorittajan on oltava huolellinen, että prismavaihtimet ovat oikein. Huolellisuustarve korostuu, jos samassa yhteydessä käytetään erityyppisiä prismoja.

7.2.9 Takymetri seurantamittausten kontekstissa

Seurantamittausten yhteydessä takymetrillä saadaan määritettyä mahdolliset siirtymät sekä tasossa että korkeuden osalta maanpäällisissä kohteissa eli x-, y- ja z-suunnissa. Korkeustarkkuuden osalta takymetri ei yllä kuitenkaan tarkkavaaituksen tasolle, joten suurta tarkkuutta vaativissa kohteissa korkeus vaaitaan erikseen. Esimerkiksi pihojen painumamittauksiin takymetrillä saavutettava tarkkuustaso on yleensä riittävä. Myös julkisivuvaaitukset voidaan yleensä suorittaa takymetrillä.

Kuvassa vasemmalla on takymetrin DR-toiminnolla eli prismattomalla mittauksella kartoitettu kallion ulottuvuuksia. DR-mittauksella mittaus tapahtuu suoraan kohteen pinnasta. Kuvassa näkyvä punainen täplä on kohdistuslaser, jonka avulla mittauspiste voidaan helpommin paikantaa. Kuva on otettu takymetrin omalla kameralla mittaushetkellä. DR-mittaus on yleisesti hieman epätarkempi kuin normaali prismametodilla toteutettu mittaus. Kuvassa oikealla on tilanne kyseiseltä kohteelta (Kuvio 11).

Nykyaikaiset takymetrit toimivat myös keilaimina. Keilauksessa mitataan automaattisesti ja nopeasti etäisyyksiä ja suuntia mittaushetkeen. Mittausten perusteella saadaan muodostettua kohteesta kolmiulotteinen pistepilvi, jonka avulla voidaan tutkia ja mallintaa kohdetta yksityiskohtaisesti. Jos takymetrissä on kamera, voidaan pistepilvestä mitata mallinnetuilta pinnoilta valokuvan perusteella koordinaatteja. (Laurila 2020, 143–144.)



Kuvio 11. Vasemmalla laserpiste kalliossa, oikealla tilannekuva kohteelta

7.3 Tarkkavaaitus

7.3.1 Vaaitus yleisesti

Vaaitus on perinteinen ja yksinkertainen korkeudenmittausmenetelmä, jota on käytetty mittauksissa satoja vuosia. Nykyisin korkeuksia mitataan vaaituksen lisäksi muun muassa takymetrillä trigonometrisesti sekä satelliittimittauksin. Tarkimmat korkeudenmittaukset tehdään kuitenkin edelleen vaaitsemalla.

Kohteen korkeussijainti esitetään korkeuden avulla. Korkeus on kohteen kohtisuora etäisyys sovitusta vertailupinnasta. Vertailupinnan sijasta puhutaan yleensä vertailutasosta tai nollatasosta, mutta kyseessä ei ole matemaattinen taso. Yleensä vertailupintana on merenpinnan taso ja sen ajateltu jatke mantoireiden alla. Näin määriteltyä vertailupintaa kutsutaan geoidiksi, ja sen suhteen mitatut korkeudet ovat ortometrisiä korkeuksia. (Laurila 2012, 204.)

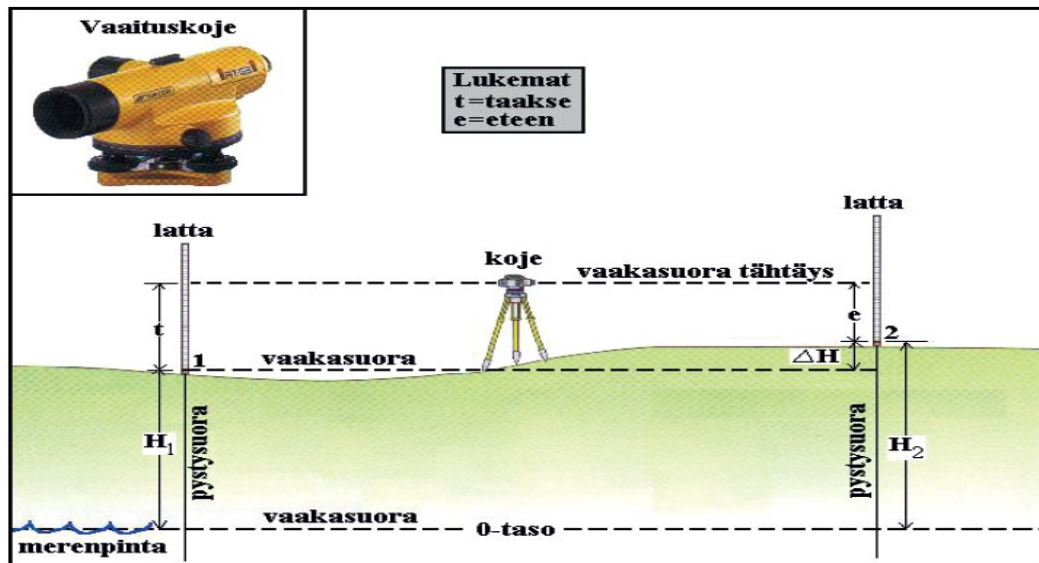
Korkeuksia ei mitata suoraan, vaan ne määritetään välillisesti korkeuseroja mitaamalla. Kun mittausalueella on korkeuslähtöpisteitä, saadaan muiden pisteiden korkeudet lisäämällä mitatut korkeuserot tunnettuihin korkeuksiin. Vaaitus on pelkästään korkeudenmittaukseen tarkoitettu mittausmenetelmä. Vaaituskojeella muodostetaan vaakasuora tähtäystaso, jonka suhteen korkeuserot mitataan la-taksi kutsuttua mitta-asteikkoa käyttämällä. (Laurila 2012, 203–204.)

7.3.2 Vaaituksen periaate

Siirtymä lasketaan kiintopisteen ja mittauspisteen korkeuseron muutoksesta. Korkeusero lasketaan taakse- ja eteen-lukemien erotuksena kaavalla

$$\Delta H_{12} = t - e, \tag{12}$$

jossa ΔH_{12} on pisteen 2 korkeusero pisteen 1 suhteen, t taakselukema pisteelle 1 ja e eteenlukema pisteelle 2 (Kuvio 12).



Kuvio 12. Vaaituksen periaate (Laurila 2012, 206)

Pisteen korkeus on pystysuora etäisyys sovitusta vertailupinnasta, joka on yleensä tietyn ajankohdan merenpinnan keskivedenkorkeus. Kun korkeusero mitataan korkeudeltaan tunnetun korkeusrunkopisteen suhteen, voidaan uuden pisteen korkeus laskea runkopisteen määrittämästä 0-tasosta kaavalla

$$H_2 = H_1 + (t - e) = H_1 + \Delta H_{12} \quad (13)$$

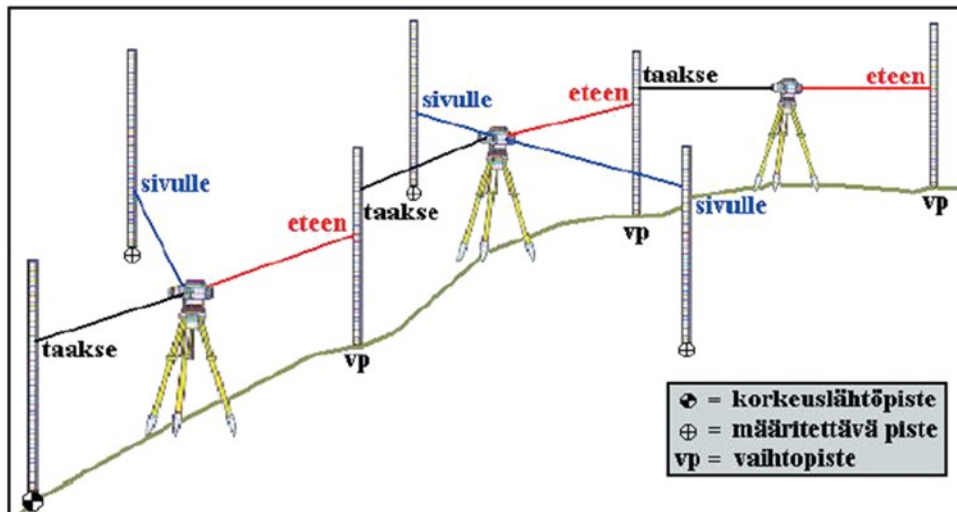
jossa H_1 on korkeusrunkopisteen korkeus, H_2 määritettävän pisteen korkeus, ΔH_{12} pisteen 2 korkeusero pisteen 1 suhteen, t taakselukema pisteelle 1 ja e eteenlukema pisteelle 2. (Laurila 2012, 206.)

7.3.3 Vaaitusmenetelmät

Tarkoituksen mukaan vaaitus voidaan jakaa linjavaaituksiin eli jonovaaitus, pintaavaaituksiin ja teknillisiin vaaituksiin. Näistä linjavaaitus on yleisesti rakennusten seurantamittauksissa käytetty menetelmä.

Jonovaaituksessa mittausta viedään eteenpäin vaihtopisteiden kautta lähtien joltakin tunnetulta korkeuskiintopisteeltä. Vaihtopisteet ovat maaston pisteitä, joille ei määritetä korkeutta, mutta niitä tarvitaan latta-alustoina, jotta korkeutta voidaan siirtää eteenpäin.

Jonovaaituksen yhteydessä voidaan eteen- ja taaksetähtäyksiä lisäksi tehdä myös sivulletähtäyksiä. Kaikilla kojeasemasta tehdyillä sivulletähtäyksillä on sama taaksetähtäys. Sivulletähtäys eroaa eteentähtäyksestä siinä, että sivulletähtäyksellä ei viedä korkeutta eteenpäin vaan sillä määritetään vain jonkin pisteen korkeus. (Laurila 2012, 220.) Ohessa on havainnollistettu jonovaaituksen periaate (Kuvio 13).



Kuvio 13. Jonovaaitus, jossa on sivulletähtäyksiä (Laurila 2012, 220)

7.3.4 Vaaituksen tarkkuus

Vaaitsemalla mitatun korkeuseron tarkkuus voidaan esittää muodossa

$$\sigma_{\Delta H} = \sigma_{km} \sqrt{L}, \quad (14)$$

jossa $\sigma_{\Delta H}$ on mitatun korkeuseron keskihajonta, σ_{km} kilometrikeskivirhe ja L matka kilometreinä. Keskihajonta ilmoittaa tarkkuuden eli mittauksen satunnaisien virheiden arvioidun suuruuden 68 prosentin todennäköisyydellä. Kilometrikeskivirhe kuvaa yhden kilometrin vaaituksen keskihajontaa. (Laurila 2012, 212.) Kyseinen tarkkuus karakterisoi mittalaitteen aiheuttamaa mittausepävarmuutta.

7.3.5 Vaaituksen sulkeminen ja tasoitus

Tarkkuuden ja kontrollin vuoksi vaaitus on aina suljettava. Esimerkiksi jono-vaaitus tarkistetaan sulkemalla mittaus. Jono aloitetaan tunnetulta korkeuskiinto-

pisteeltä ja päätetään toiselle tunnetulle korkeuskiintopisteelle, jota kutsutaan sulkupisteeksi. Sulkupisteen havaitun ja tunnetun korkeuden erotus on jonon korkeussulkuvirhe

$$W_H = H_{havaittu} - H_{tunnettu}, \quad (15)$$

jossa W_H on korkeussulkuvirhe, $H_{havaittu}$ on sulkupisteen havaittu arvo ja $H_{tunnettu}$ sulkupisteen tunnettu, oikeana pidetty arvo. Sulkuvirhettä vastaava suhteellinen tarkkuus lasketaan kaavasta

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

jossa r on suhteellinen tarkkuus, W_H korkeussulkuvirhe ja L vaaitusjonon pituus. Suhteellinen tarkkuus saadaan, kun arvioitu virhe suhteutetaan matkaan. (Laurila 2012, 225.) Kaavasta nähdään, että matkan kasvaessa suhteellinen tarkkuus pienenee, eli ne ovat kääntäen verrannollisia.

Vaaituksessa oletetaan, että jonon lähtö- ja sulkupisteiden korkeudet ovat virheettömiä. Lisäksi oletetaan, että vaaituksen virheet ovat verrannollisia vaaitun matkan pituuteen ja sulkuvirhe on koko matkan aikana kasautunut virhe. Jos vaaitus etenee kiintopisteeltä toiselle, on tarpeellista suorittaa vain yksinkertainen jonotasoitus, jossa sulkuvirhe jaetaan tasan jokaiselle havaitulle korkeuserolle tai verrannollisesti tähtäysten pituuteen. (Laurila 2012, 226.) Jos esimerkiksi korkeussulkuvirhe W_H on $-1,9$ millimetriä ja kojeasemia viisi, saadaan esimerkkinä kolmannen kojeaseman korjaus:

$$\frac{3}{5} * 1,9 \text{ mm} = +1,14 \text{ mm}. \quad (17)$$

7.3.6 Tarkkavaaituksen määritelmä

Tarkkavaaituksella tarkoitetaan vaaitusmenetelmää, jolla on mahdollista päästä alle 0,5 millimetrin keskihajontaan yhden kilometrin edestakaisessa vaaituksessa. Tarkkavaaitus eroaa tavanomaisesta vaaituksesta vaaituskojeiden ja la-

tan rakenteen sekä havaintomenetelmien perusteella. Tarkkavaaituksessa käytettävässä latassa viivajaotus on merkitty invarteräksestä tehtyyn nauhaan, koska kyseisen materiaalin lämpölaajenemiskerroin on pieni (Laurila 2012, 215).

Nykyään tarkkavaaituskojeet ovat pääosin digitaalisia. Se poikkeaa perinteisestä vaaituskojeesta siinä, että se lukee lattalukeman ja tallentaa havainnot automaattisesti kojeen muistiin. Digitaalinen vaaituskoje nopeuttaa korkeudenmittausprosessia. Mittaajan ei tarvitse kirjata havaintoja ja laskea korkeuseroja manuaalisesti, sillä koje suorittaa tämän automaattisesti.

7.3.7 Tarkkavaaitus seurantamittausten kontekstissa

Seurantamittaukset rakennusten yhteydessä ovat pääsääntöisesti painumamittauksia, jolloin optimaalisin menetelmä on tarkkavaaitus. Seurantamittauksissa mitattaville pisteille siirretään korkeus samoin kuin normaalissa vaaituksessa. Seurantamittauksissa tärkeintä on kuitenkin liikkeen eli muutoksen mittaaminen, joten korkeusjärjestelmällä ei ole mittauksen kannalta merkitystä. Erona niin sanottuun normaaliin vaaitukseen on, ettei lähtöpisteen korkeuden tarvitse välttämättä olla sidottu valtakunnalliseen korkeusjärjestelmään.

Käytännössä lähtöpisteet kannattaa mahdollisuuksien mukaan pyrkiä sitomaan tunnettuun korkeusjärjestelmään, jotta niitä voi tarvittaessa hyödyntää myös muissa mittauksissa. Mittausten laadunvarmistamiseksi on hyvä rakentaa useita lähtöpisteitä ja suunnitella niiden paikat niin, etteivät ne esimerkiksi tuhoudu rakennustöiden aikana. (Suomen Geoteknillinen yhdistys 2017, 22.)

Kiintopisteverkkoa voidaan laajentaa tuomalla tunnetulta korkeuspisteeltä korkeus perustamalla oma kiintopiste esimerkiksi kallioon tai painumattomaksi varmistetun rakennuksen yhteyteen. Näin saadaan lyhennettyä vaaitusmatkoja ja sitä kautta pienennettyä sulkuvirhettä, joka on verrannollinen vaaittuun matkaan.

Rakennusten korkeusseurannan yhteydessä suoritettava vaaitus tapahtuu yleensä vaaitusjonona, jossa suoritetaan välihavaintoja. Tyypillisesti alku- ja lähtöpiste ovat samat, eli kyseessä on lenkkimäinen rakenne. Tässä heikkoutena on, että ei synny redundanssia eli ylimääritystä. Esimerkiksi verkkomaisessa rakenteessa ylimääritystä syntyy geometrian vuoksi automaattisesti.

Ylimääritys saadaan kaavasta

$$R = n - u, \tag{18}$$

jossa

R on redundanssi

n on havaintopisteiden määrä

u on laskettavien parametrien määrä (Hakala 2016, 37).

7.3.8 Vaaituksen virhelähteitä käytännössä

Tarkkavaaituksessa käytetään nykyisin pääosin digitaalisia kojeita, joissa lattana on viivakoodilatta, josta koje lukee havainnon automaattisesti. Täten mahdollinen virheellinen havainto tai tulkinta lattalukemasta on eliminoitu. Tärkeää on, että lattamies pitää latan pystysuorassa rasiatasaimen avulla mittaustapahtuman ajan, koska pienin ja oikea lukema saadaan pystysuorasta latasta.

Sääolosuhteet vaikuttavat mittaukseen. Esimerkiksi vesisade ja kirkas auringonpaiste ja ilmiön mukanaan tuomat varjot latassa saattavat estää mittauksen kokonaan. Näihin auttaa yleensä latan kuivaaminen ja kääntäminen eri kohtauskulmaan valon suhteen. Hämärässä mitattaessa mittaustapahtuma kestää kauemmin kuin optimaalisemmassa valaistuksessa. Kojе suorittaa yhdessä mittaustapahtumassa useamman mittauksen ja ilmoittaa liian suuresta keskihajonnasta, jos ei saada tarpeeksi yhdenmukaisia tuloksia. Liian hämärässä koje ei suorita mittausta ollenkaan ja tarvitaan lisävalaistusta lattaan kohdistettavaksi.

Kojeet ovat myös itsetasaavia, eli manuaalisesti tehdään vain karkea taseus, ja kojeessa oleva kompensattori tasaa kojeen painovoiman avulla. Tällä ominaisuudella saadaan myös yksi mahdollinen virhelähde eliminoitua. Latta-alustana käytettävä kilpikonna, jota käytetään vaihtopisteiden alustana, tulee pyrkiä asemoimaan kovalle, painumattomalle ja tasaiselle alustalle.

Asfaloitu alusta on paras vaihtoehto. Kilpikonna pitää kyetä asettamaan vakaasti siten, että se ei pääse liikahtamaan yhtään mittaustapahtuman aikana. Vaihtopisteillä on hyvä käyttää tukikeppejä latan vakauttamiseen (Kuvio 14.) etenkin, jos käytössä on pitkä latta, johon tuuli vaikuttaa voimakkaasti. Myös koje pitää pyrkiä pystyttämään mahdollisimman kovalle alustalle, joten vaaitusreitit ja koje-asetat on hyvä suunnitella etukäteen.



Kuvio 14. Latan tuenta vaihtopisteellä

Kojeen kippaamisella tarkoitetaan tähtäyksen kallistumista kohtisuorasta. Vaaituskojeen tähtäysakselin kaltevuus aiheuttaa lattalukemaan etäisyyteen suoraan verrannollisen virheen. Tämä saadaan eliminoitua valitsemalla taakse- ja eteen-tähtäykset saman pituisiksi.

Nykyajan tarkkavaaituskojeet ovat pitkälle automatisoituja, jolloin saadaan virhelähteitä eliminoitua tehokkaasti mittauksista. Todellisuudessa aina on kuitenkin tekijöitä, joita ei pystytä eliminoimaan. Tällaisia ovat esimerkiksi liikenteen aiheuttama värinä/värähtely, lämpötilamuutokset ja muut sääilmiöt. Niiden mahdollinen vaikutus mittaustuloksiin pitää ymmärtää ja ottaa huomioon tulosten analysoinnissa.

7.3.9 Vaaituksen satunnaiset virheet

Kohdistukseen liittyvät tekijät:

- väreily/huojunta, ehkäisykeinona mittaaminen pilvisinä päivinä tai mitausten suorittaminen aamulla ja illalla

- kuplan vaeltaminen, esimerkiksi pehmeä asfaltti kuumalla ilmalla kolmijalan alla.
- latan/kilpikongan vajoaminen, epäpuhtaudet latan pohjalevyssä
- pohjalevyn kuluminen johtaa epätasaisuuteen
- eripitkät tähtäykset

Ilmakehän eli refraktion vaikutus:

- käytännössä tarkka korjaus ei ole mahdollista. Siksi valitaan yhtä pitkät tähtäykset. (Vermeer 2015, 41.)

7.3.10 Vaaituksen systemaattiset virheet

Ilmakehän aiheuttama:

- Tähtäys aina vähintään 0,5 metriä maan pinnan yläpuolella. Lämpötilagradienttien, etenkin pystygradientti, oltava mahdollisimman pieniä.
- Lämpötilan vaikutus kojeisiin. Kojeen annettava adaptoitua ympäröivään lämpötilaan noin minuutin jokaista Celsiusasteen lämpötilaeroa kohden. (Vermeer 2015, 41–42.)

7.3.11 Vaaituksen karkeat virheet

Karkeat virheet pyritään paljastamaan ja välttämään hyvää mittaustapaa noudattamalla. Ne pitäisi eliminoida jo mittausvaiheessa. Laskentavaiheeseen päätyneet karkeat virheet paljastetaan tilastollisella testaamisella (Hakala 2016, 15).

Vaaituksella on tekniikkana huono redundanssi, eli se kontrolloi havaintoja huonosti. Siksi tarkoissa ja tuotannollisesti tärkeissä mittauksissa on tehtävä sidos kahteen toisistaan riippumattomaan lähtöpisteeseen. (Vermeer 2015, 42.)

7.3.12 Kalibrointi

Kalibroinnilla tarkoitetaan mittalaitteen antamien arvojen oikeellisuuden testausta. Se on vertausmittausta, jossa määritetään, paljonko mittakojeen antamat arvot poikkeavat vertausuudesta. Sillä saadaan selville systemaattiset virheet ja satunnaisten virheiden aiheuttama hajonnan arvo. Kalibroinnissa on kyse mitausten laadunvalvonnasta ja siihen liittyvän hyvän mittaustavan noudattamisesta. (Laurila 2012, 364.)

Kalibrointitavat voidaan jakaa määrittyskalibrointiin ja seurantakalibrointiin. Määrittyskalibroinnin suorittaa tähän valtuudet omaava henkilö laboratorio-olosuhteissa. Siinä varmistetaan, että kojeen tarkkuus on määräysten ja laitevalmistajan antamien tietojen mukainen. Seurantakalibrointi eli kenttäkalibrointi on toimi, jonka mittaaja voi tehdä itse. Siinä ei määritetä kojevirheiden arvoja vaan ainoastaan seurataan, pysyvätkö kojeen ominaisuudet ja mittaustulokset samoina kuin ne olivat edeltävässä määrittyskalibroinnissa.

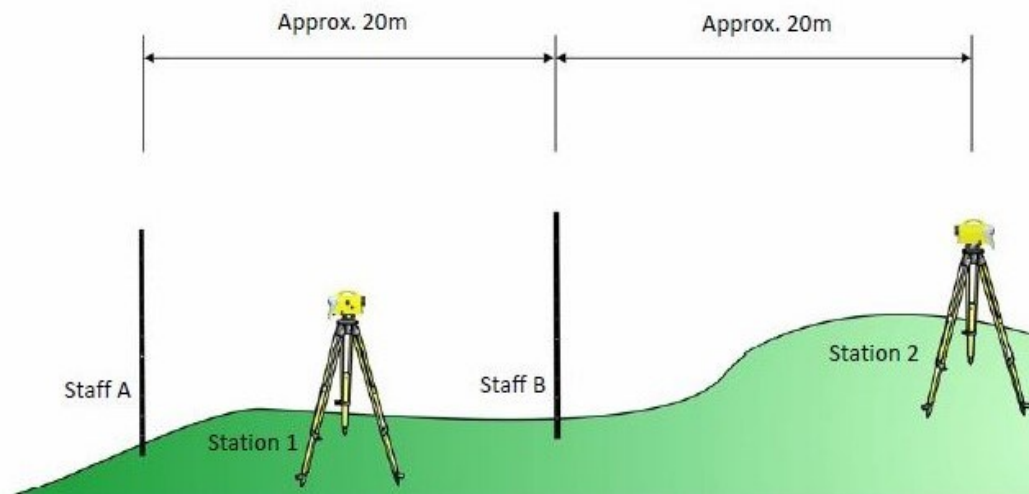
Esimerkkinä hyväksi havaitusta kenttäkalibroinnista on Trimble DiNi 0.3:ssa oleva Kukkamäen metodi, jonka periaate on ohessa (Kuvio 15). Molemmilta kojeasemilta otetaan eteen- ja taakse-lukemat molempiin lattoihin. Molemmista kojeasemista Δh_1 ja Δh_2 mitattujen korkeuserojen tulisi olla yhtä suuria.

Tähtäysakselin kaltevuusvirhe v on tämän perusteella:

$$v = \frac{\Delta h_2 - \Delta h_1}{2}, \quad (19)$$

jossa Δh_2 on korkeuden 2 muutos ja Δh_1 korkeuden 1 muutos.

Mahdollinen kaltevuusvirhe saadaan poistettua viivaristikkoa säätämällä. Säätämiseen ei kannata ryhtyä, jos virhe on pienempi kuin 1 mm/s, jossa s on tarkastuksessa käytetty lyhin tähtäysmatka. (Laurila 2012, 371.)



Kuvio 15. Kenttäkalibroinnin periaate (Trimble DiNi user guide)

7.4 Satelliittimittaus

7.4.1 Yleistä

Satelliittipaikannus mainitaan puhekielessä usein suppeasti vain GPS-paikannukseksi (Global Positioning System). Todellisuudessa pitäisi puhua GNSS-paikannuksesta (Global Navigation Satellite System). GNSS kattaa eri maiden ylläpitämien paikannusjärjestelmien muodostamaa kokonaisuutta. (Laurila 2012, 289.) Ohessa on esitettyä GNSS-satelliittigeometria Turussa 22.4.2021 kello 9–15. Tarkastelujakson aikana käytettävissä on keskimäärin 40 satelliittia 124 aktiivisesta (Kuvio 16).

Lähellä horisonttia olevien satelliittien signaalit ovat muita häiriöisempiä, minkä vuoksi asetetaan katkaisukulma 10° – 15° . Satelliittien ratojen vuoksi pohjois- ja etelänapojen suunnissa on satelliittitaivaassa aukko (Laurila 2020, 251).



Kuvio 16. GNSS-satelliittigeometria Turussa 22.4.2021

Satelliittipaikannuksessa havaitaan satelliittien lähettämiä signaaleja. Niiden avulla paikantimella mitataan etäisyyksiä satelliitteihin ja/tai muihin paikantimiin. ja etäisyyksien perusteella lasketaan paikantimen sijainti. Perushavainnot ovat joko koodihavainnot tai vaihehavainnot. Näissä raakahavainnoissa on vielä jäljellä systemaattista virhettä, jotka pyritään laskennassa korjaamaan (Laurila 2020, 253).

7.4.2 Satelliittimittauksen mittaustavat

Perusmittaustavat ovat absoluuttinen ja suhteellinen paikannus. Absoluuttisessa paikannuksessa mitataan yhdellä paikantimella, esimerkiksi navigaattorilla. Suhteellisessa paikannuksessa on mukana vähintään yksi vertailuvastaanotin ja paikantava vastaanotin. Absoluuttinen paikannus voi olla koodipaikannusta (GNSS) tai tarkkaa pistepaikannusta (PPP). Suhteellinen paikannus puolestaan voi olla differentiaalista koodipaikannusta (DGNS) tai kantoaaltopaikannusta. Mittaustapa voi olla myös kinemaattinen tai staattinen ja reaaliaikainen tai jälkilaskentaan perustuva. (Laurila 2020, 254.)

Maanmittauksessa käytetään yleisesti kantoaaltopaikannusta, koska se on tarkin mittaustapa. kantoaaltopaikannuksessa on vähintään kaksi samanaikaisesti toimivaa havaintolaitetta, joista toinen on vertailu- ja toinen paikantava vastaanotin.

Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus eli RTK-mittaus on Maan mittaajien yleisimmin käyttämä kantoaaltopaikannuksen mittaustapa. Perinteisessä RTK-mittauksessa tarvitaan tunnetulla pisteellä sijaitseva vertailuvastaanotin eli tukiasema. (Saatavilla on myös kaupallisia tukiasemapalveluja, jotka tarjoavat VRS-palvelua, joka laskee virtuaalisen tukiaseman mittaustapaan läheisyyteen. Virtuaalinen tukiasema on laskennallinen piste, joka lasketaan erikseen jokaiselle mittaajalle. (Laurila 2020, 256, 258.)

7.4.3 DOP-luvut ja tarkkuus

Laskennallisesti satelliittigeometrian vaikutus mittaustarkkuuteen esitetään DOP-lukujen (Dilution of Precision) avulla. Tällä tarkoitetaan tarkkuuden heikentymistä. DOP-luvut ovat teoreettisia paikannustarkkuutta määrittäviä lukuja. Niihin vaikuttaa vain satelliittien sijainti havaintopisteen suhteen. Muilla havainto-olosuhteilla ei ole vaikutusta. Tärkeimmät DOP-luvut ovat

- HDOP, tasosijainnin epävarmuus
- VDOP, korkeussijainnin epävarmuus
- PDOP, paikannuksen, eli 3D-sijainnin epävarmuus. (Laurila 2020, 260.)

Näistä PDOP-arvo on yleisimmin käytetty, koska se kuvaa sekä taso- että korkeussijaintia. DOP-arvo on kääntäen verrannollinen, eli mitä pienempi se on, sitä suotuisampi on satelliittigeometria kyseisellä hetkellä.

DOP-luvuille ei ole määritetty absoluuttisia raja-arvoja, mutta alle viiden arvoilla tilanne on yleensä hyvä.

Satelliittimittauksen tarkkuutta voidaan parantaa kasvattamalla havaintoaikaa. (Laurila 2020, 260.)

7.4.4 Häiriötekijät

Eri kerroksista muodostuva ilmakehä toimii paikannussignaalin väliaineena. Sähkömagneettisen säteilyn käyttäytyminen riippuu tämän väliaineen ominaisuuksista.

Koodipaikannuksessa hallitseva virhelähde on ionosfäärin aiheuttamat häiriöt paikannussignaaliin. Differentiaalisessa paikannuksessa hallitseva virhelähde on monitieheijastukset, jotka ovat mittauspaikkakohtaisia virheitä. (Laurila 2020, 259.)

7.4.5 Satelliittimittaukset seurantamittausten kontekstissa

Satelliittimittaukseen perustuvaa seurantaa ei rakennusten mittausten yhteydessä juuri tehdä menetelmän heikomman korkeustarkkuuden vuoksi. RTK-mittaus soveltuu paremmin lähinnä inventointityyppisiin kartoitustehtäviin.

Lisäksi takymetrimittausten yhteydessä vapaalle asemapisteele orientoidessa liitospisteet usein määritetään satelliittimittauksin. Vaikka takymetrimittauksilla saavutetaan hyvä tarkkuustaso, lähtöpisteet luodaan satelliittimittausmenetelmällä, joka kumuloituu koko mittaukseen. Tällä ei ole merkitystä suhteelliseen mittaukseen, mutta absoluuttisessa sijainninmäärittäyksessä sillä on merkitystä.

8 ESIMERKKIKIIINTEISTÖ

8.1 Tausta

Esimerkkitapaukseksi valittiin projekti, joka on toteutunut kokonaisuudessaan kaikkine vaiheineen alkuselvityksistä perustusten vahvistamiseen saakka. Opin- näytetyön suhteen tämä ei ole ajallisesti mahdollista, koska seurantamittauksia tehdään yleisesti vähintään kuukausia, jotta saadaan kokonaiskäsitys tilanteesta. Projektin kulku on kuvattu dokumenttien ja tiedonantojen avulla. Prosessikuvaus pääkohdiltaan on yleispätevä ja muodostaa kuvan eri vaiheista. Lopuksi esite- tään kohdepisteverkon rakentaminen seurattavalle kohteelle.

8.2 Kohdekiinteistö

Kiinteistön asukkailta oli tullut tietoon visuaalisia havaintoja rakenteellisista muu- toksista, esimerkiksi halkeamia asuntojen seinissä ja katoissa sekä ikkunoiden avaaminen/sulkeminen oli vaikeutunut. Ohessa on halkeamia kiinteistön kellariti- lojen rakenteista (Kuvio 17).



Kuvio 17. Halkeamia kohdekiinteistön rakenteissa

Mittausteknisestä näkökulmasta tämä esimerkki käsittää tarkkavaaitusmenetelmällä suoritettua painumaseurannan sekä julkisivuvaaituksen. Prosessissa on käytetty myös muita rakenteiden ja niiden olosuhteiden seurannassa tyypillisiä menetelmiä, kuten orsivesimittauksia ja kipsisiltaseurantaa.

Toimeksiannon aluksi on selvitetty rakennusten perustusrakenteiden geoteknistä toimivuutta sekä paalujen olosuhteita arkistotietojen sekä yleisten selvitysten perusteella. Näiden perusteella tehtiin alustava arvio rakennuksen perustus- ja runkorakenteiden kuntoisuudesta.

8.3 Tutkimustoimenpiteet

8.3.1 Arkistoselvitys

Vuodelta 1954 olevien rakennesuunnitelmien perusteella kohdekiinteistö on rakennettu vuosina 1954–1955. Se on perustettu puupaaluilla kantavan pohjakerrostuman varaan. Lähtökohtaisesti nämä tukipaalut ovat painumattomia. Puupaalujen yläpäiden korkeusasemat tunnetaan. Rakennuksen läheisyydessä kaivettujen putkijohtokaivantojen sijainneista, kaivu-urien tasoista tai savikerroksen paksuudesta ei ole tietoa.

8.3.2 Yleispiirteinen katselmus

Yleispiirteisen olosuhdekatselmuksen perusteella tehtiin seuraavat havainnot: Rakennuksen julkisivurakenteissa ei ole havaittu suuria diagonaalihalkeamia. Rakennuksen vierustäytöt ovat voimakkaasti painuneet ja rakennuksessa on julkisivussa suurehko halkeama.

8.4 Toimenpide-ehdotukset

Rakennuksen perustusrakenteiden toimivuuteen liittyvät epävarmuustekijät selvitetään seuraavilla toimenpiteillä:

- Rakennukseen asennetaan orsiveden havaintoputket.

- Rakennuksen julkisivurakenteiden vaakasuoruus mitataan ja putkijohtojen korkeusasemat kaivoissa vaaitaan.
- Perustusrakenteiden korkeusasemat tarkistetaan kairausten avulla.
- Laajennetaan arkistoseelvitystä selvittämällä esimerkiksi viemäreiden kaivu-urat.
- Arvioidaan puupaalujen olosuhteet tehtyjen selvitysten perusteella.
- Laaditaan raportti, joka sisältää tilanneanalyysin, toimenpideehdotukset ja perustusrakenteiden elinkaariarvion.
- Lisäksi käynnistetään rakennuksen painumaseuranta asentamalla kahdeksan tarkkavaaituspistettä.
- Rakennukseen asennettiin myös kipsisiltoja halkeamatarkkailun tehostamiseksi rakenteellisesti kriittisiin kohtiin.

8.5 Mittaukset ja olosuhdekatselmus

Rakennuksen julkisivun ulkoverhouksen alapintojen korkeustasot vaaittiin. Mittausten perusteella saatiin tietoon seuraavaa:

- Rakennuksen koillisen sivustan julkisivurakenteet ovat kaltevia kaakosta luoteeseen, kaltevuus on 70 millimetriä 32 metrin matkalla, eli kaltevuus on 2,2 millimetriä metriltä.
- Rakennuksen lounaisen sivustan julkisivurakenteet ovat kaltevia kaakosta luoteeseen, kaltevuus on 40 millimetriä 21 metrin matkalla, eli kaltevuus on 1,9 millimetriä metriltä.
- Suurin korkeusero julkisivurakenteissa on 70 millimetriä.
- Tarkkavaaitusten perusteella rakennuksen runkorakenne on painunut pohjoisesta kulmasta 4 millimetriä ja läntisestä kulmasta 2–3 millimetriä kolmen kuukauden aikavälillä. Runkorakenteen

painumakäyttäytyminen on epätasaista, mikä on rakenteille haitallista.

Rakennuksen pohjoisen kulmauksen alueella on vaaittu myös kellaritilojen holvirakenteiden kaltevuus. Mittausten perusteella holvirakenteet ovat kaltevia lounaasta koilliseen 15 millimetriä kolmen metrin matkalla, eli kaltevuus on 5,0 millimetriä metriltä. Lisäksi runkorakenteiden katselmuksen perusteella kyseisen alueen runkorakenteissa on kaltevuuksia ja diagonaalihalkeamia.

8.6 Perustusrakenteiden toimivuus

Rakennuksen alalla on suuri määrä puupaaluja, joiden puristuslujuuskapasiteetti on merkittävästi alentunut. Pahimmin vaurioituneet paalut ovat tällä hetkellä murtotilassa. Todennäköistä on, että rakennuksen alalla myös parempikuntoisten paalujen rakenteet ovat tällä hetkellä lähestymässä mekaanista murtotilaa.

Vaaitusten perusteella rakennus painuu tällä hetkellä epätasaisesti. Suurimmillaan painumisnopeus on pohjoisen kulmauksen alueella, jossa painumisnopeus on 14 millimetriä vuodessa, joten rakennuksen perustusrakenteiden toimintamekanismin laaja-alaisen pettämisen riski on suuri. Täten runkorakenteiden ehjänä pysymisen välttämätön edellytys on ensi tilassa suoritettava perustusten vahvistaminen.

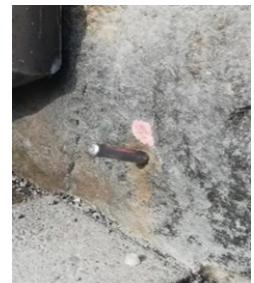
9 KOHDEPISTEVERKON RAKENTAMINEN KÄYTÄNNÖSSÄ

9.1 Mittapisteiden asennus

Vaaituspisteet sijoitetaan kantavan runkorakenteen rakenteellisesti kriittisiin kohtiin. Lisäksi, kuten aiemmin mainittiin, jos rakenteissa on niin sanottu liikunta-
sauma tai halkeama, on tärkeää asentaa mittauspisteet sauman molemmin puolin, jotta eri osioiden suhteelliset muutokset saadaan selville.

Lyöntiankkureille porataan rakennuksen sokkeliin reikä, johon ne ankkuroidaan tukevasti. Reikä pyritään poraamaan hieman laskevasti viistoon (Kuvio 18) oikealla. Näin mittauskohta on aina yksiselitteisesti sama piste. Kun ankkuri on tukevasti kiinnitetty, siihen voidaan kiinnittää vaaituspultti. Ankkurissa on kierteet (Kuvio 18) vasemmalla, johon pultti kiinnitetään aina mittaushetkeksi. Tässä on etuna, että pultit eivät ole koko ajan alttiina mahdollisille vaurioille

Vaaituspultteja on eripituisia ja -kokoisella kierteellä varustettuna (Kuvio 18) keskellä. Tämän vuoksi on tärkeää, että kohdekortissa on dokumentoitu tarkasti tiedot pulttityyppien, mittapisteiden sijaintien ja lähtökorkeuksien osalta. Jos mittaus suoritetaan väärän pituisella pultilla, on tulos virheellinen, koska pultti on asemoitu kuvan mukaiseen kulmaan. Tämän vuoksi jokainen mittaustulos on jo kentällä mitattaessa hyvä varmistaa ja arvioida sen oikeellisuus jo mittaushetkellä, jotta mittaus voidaan tarvittaessa uusida. Oikeellisuutta voi arvioida vertaamalla mittaustulosta edellisiin mittauksiin ja pohtimalla sen realistisuutta suhteessa kokonaisuuteen.



Kuvio 18. Lyöntiankkurit, vaaituspultit ja pultti kiinnitettynä

KORKEUSHAVAINNOT

Työnumero ja tilaaja	...						
Katuosoite	...						
Asennuspvm ja työn suorittaja	19.4.2021 EM/JL						
Lähtöpisteen + korkeus	Kp 119 +20,084						
Korkeusjärjestelmä	N2000						
Huomautuksia							
Piste	Korkeudet ja päivämäärät						
	19.4.2021						
1	+20,342						
2	+20,518						
3	+20,585						
4	+20,617						
5	+20,648						
6	+20,593						
7	+20,208						
8	+20,200						
9	+20,022						
10	+19,887						
11	+19,859						

Kuvio 20. Kiinteistön korkeushavaintojen kohdekortti

10 POHDINTA

Opinnäytetyön ydinsisältönä olivat seurantamittaukset ja mittaustarkkuus. Työn aihealue muodostui laajaksi, koska voidakseen selittää jonkin asian, pitää se usein pohjustaa jollain toisella. Tämä muodostui myös haasteeksi, mutta näitä käsitteitä haluttiin selvittää perusteellisesti, koska on tärkeä ymmärtää prosessi-hierarkkisesti kaikkien osa-alueiden substanssi. Työ tehtiin pääasiassa kirjallisuuslähteitä käyttämällä. Seurantamittausten ja monitoroinnin aihealueesta ei ole varsinkaan suomenkielistä tietoa laajalti.

Mittavirheiden ja -lähteiden yhteydessä tehtiin tietoinen valinta. Vaikka kyseessä on matemaattinen aihealue, palvelukuvauksen näkökulmasta perusteltiin asioita enemmän sanallisesti kuin matemaattisilla menetelmillä, vaikka muutama kaava on mukana.

Läpi koko opinnäytetyön kulkee teemana palvelukuvaus, joka havainnollistaa, miten ja millä menetelmillä sekä vaatimustasolla X Oy:ssä kiinteistöjen kuntoisuusvalvonnan yhteydessä suoritettavat seurantamittaukset tehdään. Kaikki nämä edellä mainitut tekijät toimivat perustana mittaustulosten luotettavuudelle ja niistä kumuloitavaan johtopäätöstarkkuuteen.

Esimerkkitapaus osoittaa, miten seurantamittaukset toimivat menetelmänä, jonka perusteella tehdään merkittäviä johtopäätöksiä. Tämän vuoksi on tärkeää, että mittaustulokset ovat luotettavia. Vaikka esimerkikiinteistössä oli nähtävissä visuaalisia indikaatioita perustusten ongelmista, painumamittausten ja muiden olosuhdeselvitysten perusteella ongelma tarkentui ja sen vakavuusaste sekä prosessin kulku ja nopeus kyettiin arvioimaan.

Jos mittaustarkkuuteen ja virhelähteiden syntyymiseen vaikuttavia asioita ei ymmärrä ja osaa ottaa huomioon, ei voida uskottavasti ja luotettavasti puhua mittaustarkkuudesta puhumattakaan luotettavista analyyseistä ja johtopäätöksistä, jotka ovat olennaisimmat seikat esimerkiksi seurannan tilaajan eli asiakkaan näkökulmasta.

LÄHTEET

Hakala, J. 2016. Geodeettisten runkoverkkojen hallinnasta. Geopixel Oy. Luentomateriaali.

Bäcklund, J. 2013. Geotekninen monitorointi Suomessa. Aalto-yliopisto. Diplomityö.

Jäppinen, K. 2003. Automaatio on hyvä renki, mutta huono isäntä. Maankäyttö 1 / 2003. Viitattu 12.4.2021. http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk103/mk103_179_jappinen.pdf.

Kallio, U, 1998. Tasoituslasku. Helsinki: Otatieto.

Laurila P. 2009. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulu.

Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. 4. uudistettu painos. Jyväskylä: Kopijyvä Oy.

Laurila, P. 2020. Maan mittauksia. Helsinki: BoD.

Maanmittauslaitos 2003. Kaavoitusmittausohjeet. Viitattu 19.4.2021. https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/old/kaavoitusmittausohjeet_2003_0.pdf.

Mittaus prujut. Helsingin yliopisto. Viitattu 22.4.2021. <https://prujut.files.wordpress.com/2009/10/m1.pdf>.

Räsänen, T. 1994. Geodeettisten runkoverkkojen laskentamenetelmät ja laskentaohjelmien testaus. Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö.

Salmenperä, H. 2001. Virheteorian ja tasoituslaskun alkeet. Tampere: TTK.

Salmenperä, H. 2002. Valvonta- ja muodonmuutosmittaukset. Tampere: TTK.

Suomen Geoteknillinen Yhdistys 2017, Geoteknisen mittaamisen ja monitoroinnin olennaiset käsitteet ja periaatteet. Monitorointitoimikunta.

Trimble GNSS Planning Online. Viitattu 15.4.2021. <https://www.gnssplanning.com/#!/settings>.

Turkki, H. 2015. Geoteknisen mittaamisen ja monitoroinnin olennaiset käsitteet ja periaatteet. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Maanmittaustekniikka. Insinöörityö.

Vermeer, M. 2015, Käytännön geodesia. Viitattu 24.2.2021. <https://users.aalto.fi/~mvermeer/kayt.pdf>.

Vermeer, M. 2019, Geodesia: kaiken perusta. Aalto-yliopisto.

LIITTEET

Liite 1. Keskihajonnan laskuesimerkki

Liite 1

Keskihajonnan laskuesimerkki Excel -taulukkolaskennalla toteutettuna

Piste	Havainnot (m)					Keskiarvot
	Havainto 1	Havainto 2	Havainto 3	Havainto 4	Havainto 5	
1	8,064	8,063	8,063	8,062	8,061	8,063
2	8,395	8,395	8,395	8,394	8,394	8,395
3	8,582	8,581	8,583	8,581	8,580	8,581
4	8,891	8,890	8,891	8,890	8,892	8,891
5	8,989	8,989	8,990	8,989	8,991	8,990
6	8,861	8,861	8,862	8,861	8,860	8,861
7	8,637	8,636	8,638	8,635	8,634	8,636
8	8,486	8,486	8,485	8,484	8,483	8,485

Havainto 1	Jäännösvirheet				Jäännösvirheiden neliö $\sum V_i^2$	Sarjan keskihajonta (s)	Keskiarvon keskihajonta	Mittaustulokset/epävarmuudet 1 σ -tasolla (68% tod.näk.)
Havainto 1	Havainto 2	Havainto 3	Havainto 4	Havainto 5				
0,0014	0,0004	0,0004	-0,0006	-0,0016	5,20E-06	1,14E-03	5,10E-04	Piste 1: $8,063 \pm 0,51 \cdot 10^{-3} \text{m}$
0,0004	0,0004	0,0004	-0,0006	-0,0006	1,20E-06	5,48E-04	2,45E-04	Piste 2: $8,395 \pm 0,25 \cdot 10^{-3} \text{m}$
0,0006	-0,0004	0,0016	-0,0004	-0,0014	5,20E-06	1,14E-03	5,10E-04	Piste 3: $8,581 \pm 0,51 \cdot 10^{-3} \text{m}$
0,0002	-0,0008	0,0002	-0,001	0,0012	2,80E-06	8,37E-04	3,74E-04	Piste 4: $8,891 \pm 0,37 \cdot 10^{-3} \text{m}$
-0,0006	-0,0006	0,0004	-0,0006	0,0014	3,20E-06	8,94E-04	4,00E-04	Piste 5: $8,990 \pm 0,40 \cdot 10^{-3} \text{m}$
0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	-0,0010	2,00E-06	7,07E-04	3,16E-04	Piste 6: $8,861 \pm 0,32 \cdot 10^{-3} \text{m}$
0,0010	0,0000	0,0020	-0,0010	-0,0020	1,00E-05	1,58E-03	7,07E-04	Piste 7: $8,636 \pm 0,71 \cdot 10^{-3} \text{m}$
0,0012	0,0012	0,0002	-0,0008	-0,0018	6,80E-06	1,30E-03	5,83E-04	Piste 8: $8,485 \pm 0,59 \cdot 10^{-3} \text{m}$