

LÄMPÖVÄREILYN VAIKUTUS MITTAUSETÄISYYKSIIN
JA -TARKKUUKSIIN RADAN KUNNOSSAPITOMITTAUK-
SISSA

Juha Martikainen

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

Vuosi 2017

Tekniikan ja liikenteen ala
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Juha Martikainen	Vuosi	2017
Ohjaaja	Pasi Laurila		
Toimeksiantaja	Destia Rail Oy		
Työn nimi	Lämpöväreilyn vaikutus mittausetäisyyksiin ja tarkkuuksiin radan kunnossapitomittauksissa		
Sivu- ja liitesivumäärä	36 + 10		

Lähtökohtana tämän opinnäytetyön tekemiselle oli tarve selvittää tarkemmin lämpöväreilyn vaikutusta radan kunnossapitomittauksiin. Lämpöväreily on kesäisin lähes päivittäinen ilmiö, joka vaikuttaa mittausten luotettavuuteen. Työn tavoitteena oli selvittää mahdolliset mittausetäisyydet tietyissä lämpötiloissa, sekä tutkia vaikutusta korkeudensiirron tuloksiin. Työn tuloksia hyödynnettäisiin Destia Rail Oy:n radan kunnossapitomittauksissa. Tulosten myötä virheiden mahdollisuutta saataisiin minimoitua ja mittausten laatua parannettua.

Ongelmana ja haasteena oli aikaansaada neutraalit tutkimusolosuhteet, jotka vastaisivat mahdollisimman monia lämpöväreilyä aiheuttavia mittausolosuhteita rataympäristössä. Tutkimusmenetelmänä käytettiin normaalia radan kunnossapidon mittaustilannetta vastaavaa mittaussuoritusta. Mittauksia toistettiin useissa eri lämpötilassa samoilla periaatteilla. Lähtötietoina käytettiin käytännön mittauksista saatuja kokemuksia, joiden mukaan määriteltiin työtavat ja rajat työn suorittamiselle.

Työssä myös pohdittiin mittaukseen vaikuttavia tekijöitä ja niiden merkitystä mittaustuloksiin. Johtopäätöksinä saatiin selville suositeltavat mittausetäisyydet eri mittaustavoille.

Avainsanat

Lämpöväreily, radan kunnossapitomittaus, takymetri

Technology, Communication and
Transport
Degree Programme in Land Sur-
veying
Bachelor of Engineering

Author	Juha Martikainen	Year	2017
Supervisor	Pasi Laurila		
Commissioned by	Destia Rail Oy		
Subject of thesis	Affects of Thermal Radiation to Measurement Dis- tances and Reliability of Maintenance Measurement in the Railway Network Areas		
Number of pages	36 + 10		

The purpose of this thesis was to study how thermal radiation affects the maintenance measurement of the railway network areas. Thermal radiation is a daily phenomenon, especially during the summer time. Thermal radiation affects the reliability of the measurements. The goal of the thesis was to find out the possible measurement distances to be used at certain temperatures. In addition, the objective was to research the effect on the results of height transfer. The results of this thesis will be used in Destia Rail Oy's maintenance measurements. With the results, the measure errors could then be minimized and the improve the quality of the measurement.

It was challenging to create neutral research conditions which would be similar to the conditions in the railway environment. The research method used was based on the normal maintenance measurement in the railway conditions. The Measurements were conducted and repeated at different temperatures using the same principles. The Initial data was based on the practical experience of the author, which affected the research methods and the limitations of this thesis.

The thesis discussed the factors affecting the railway measurement and how they affect the reliability of the measurement results. As a conclusion, the recommended measurement distances for the different measurement methods were found out.

Key words thermal radiation, total station,
maintenance measurement of the railway network

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	KUNNOSSAPITOMITTAUKSEN PERIAATE	6
2.1	Rataverkon kunnan tarkkailu ja ylläpito.....	6
2.2	Maastotyöt	7
2.3	Toimistotyöt	8
2.4	Tarkkuudet ja vaatimukset	11
3	TARKKUUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	14
3.1	Mittausperusta	14
3.2	Refraktio	14
3.3	Lämpöväreily	16
3.4	Muut korjaukset ja virheet	16
3.5	Prismavakio	17
3.6	Säätikorjaus	17
4	MITTALAITTEIDEN KALIBROINTI	18
5	MITTALAITTEIDEN TARKKUUDET	19
6	LÄMPÖVÄREILYN VAIKUTUKSEN MITTAAMINEN.....	21
6.1	Mittaustulokset.....	23
6.2	Vaikutus korkeuden siirtoon.....	26
6.3	Yhteenveto.....	28
7	POHDINTAA.....	29
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	31
	LÄHTEET	33
	LIITTEET.....	35

1 JOHDANTO

Suomen vaihtelevat sääolosuhteet sekä muuttuvat vuodenaajat luovat haastavat olosuhteet rataverkoston kunnossapidolle. Tekniikan ja infrastruktuurin kehittyessä syntyy painetta raideverkoston kunnan ylläpitämiseksi ja parantamiseksi muun muassa junien kulkunopeuksien kasvamisen johdosta. Tämä luo haasteita radan kunnossapitomittausten osalta. Liikennevirasto vastaa Suomen rautatieverkostosta ja on määrittänyt ratatekniset ohjeet, jotka sisältävät tekniset ohjeet ja normit, joiden mukaan toimia. Tämän opinnäytetyön tarkoitus on käsitellä radan kunnossapitomittauksiin vaikuttavia mittausteknisiä haasteita sekä tutkia rataympäristössä esiintyvän ilman lämpöväreilyn vaikutusta mittaustarkkuuksiin ja etäisyyksiin takymetrillä mitattaessa. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, kuinka mittauksen häiriötekijät voidaan ottaa huomioon sekä saada Destia Rail Oy:n käyttöön mittaussuositukset mittaustilastoista ja etäisyyksistä.

2 KUNNOSSAPITOMITTAUKSEN PERIAATE

2.1 Rataverkon kunnan tarkkailu ja ylläpito

Liikennevirasto ylläpitää Suomen rataverkkoa. Suomen rataverkko on jaettu nykyisin 11 kunnossapitoalueeseen. Liikennevirasto kilpailuttaa alueiden kunnossapidon. Destia Rail Oy vastaa kuuden alueen kunnossapidosta. Kunnossapitosopimukset ovat viisivuotisia sopimuksia kahden vuoden optioilla. Ratojen geometrista kuntoa tarkkaillaan radantarkastusvaunulla, joka muun muassa havaitsee äkilliset vaaka- ja korkeusmuutokset. Tämä antaa pohjan työn laadun seurantaan sekä vastaavasti korjausta vaativien kohteiden paikantamiseen. Virhepaikkojen lisäksi kunnossapitoalueen sopimuksessa saatetaan määrätä myös viiden vuoden sopimusaikana suoritettavaksi läpituenta alueelle. Tämä koskee yleensä jatkuvakisko raiteisia rataosia. Pääsääntöisesti tukemisia suoritetaan kolmostason radalla ja sitä korkeammilla kunnossapitotason rataosuuksilla. Kunnossapitotasosta riippuen radan tarkastusajoja tehdään 2–6 kertaa vuodessa. Vuosittain näiden ajojen perusteella tehdään yhteenvetoraportteja kunnossapito- ja korjausinvestointitarpeiden arvioimista varten. (Liikennevirasto, 2015.) Tarkastustarve ja -taajuus kunnossapitoalueittain on merkittynä taulukkoon 1.

Taulukko 1. Pää- ja sivuraiteiden tarkastustarve ja -taajuus kunnossapitotasoin Suomea rataverkolla (Liikennevirasto 2015, 15)

Kunnossapitotaso	Raiteet	Mittaus raiteentarkastusvaunulla, krt/vuosi	Tarkastus liikkuvasta kalustosta, krt/vuosi	Kävelytarkastus krt/vuosi	Vaihdetarkastus krt/vuosi
1AA		6, väli ≤ 3 kk	6, raiteentarkastusajojen puolivälissä	2-3	4
1A		6, väli ≤ 3 kk	6, raiteentarkastusajojen puolivälissä	2	4
1		3	6, raiteentarkastusajojen puolivälissä	1-2	4
2		2	6, väli ≤ 2 kk	1-2	2-4
3		2	6, väli ≤ 2 kk	1-2	2-4
4	Pääraiteet	2	3, vähintään 6 kk välein veturista	1-2	2-4
	Sivuraiteet	1	3		
	Sn 80 raiteenvaihtopaikat				
5	Pääraiteet	2	2, tarpeen mukaan, vähintään 6 kk välein veturista	1-2	1
	Sivuraiteet	1 krt / 3 vuotta	1, mittaresiinalla tai vastaavalla		
	Sn 35 raiteenvaihtopaikat				
6	Pääraiteet	2	2, tarpeen mukaan, vähintään 6 kk välein veturista	1-2	1
	Sivuraiteet	1 krt / 3 vuotta	1, mittaresiinalla tai vastaavalla		
	Kuormaus- ja seisontaraiteet	Sovitaan erikseen			

2.2 Maastotyöt

Kunnossapitomittauksissa ideana on mitata raiteen sijainti ja verrata sitä geometriaan eli raiteen suunniteltuun sijaintiin. Geometria on sidottu mittausperustaan, eli mittapistejonoon, joka mahdollistaa takymetrin orientoinnin koordinaatistoon. Tavoite on saada korjattua sijainti geometrian suunniteltuun sijaintiin, mutta läheskään aina tämä ei ole mahdollista. Tällaisissa tapauksissa radan muoto pyritään korjaamaan mahdollisimman suoraksi ja tasaiseksi geometriasta välittämättä.

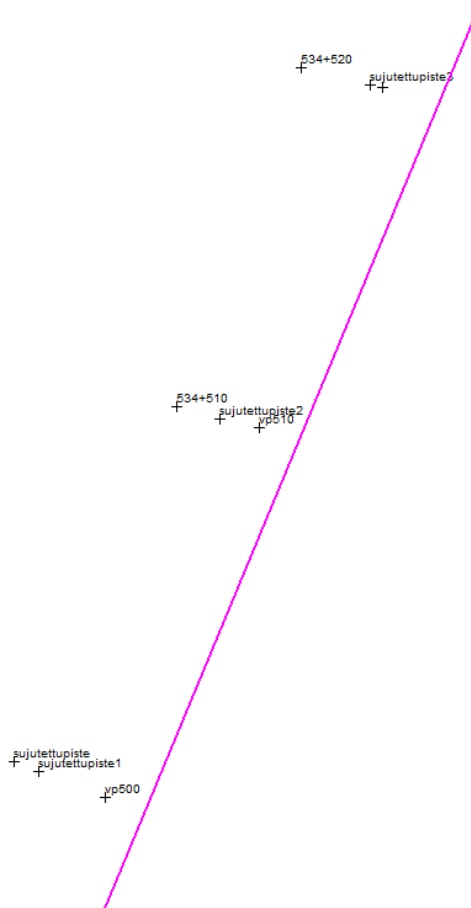
Mittaussuoritus alkaa navigoimalla oikealle mittauspaikalle. Mittausta ja korjausta vaativista paikoista on tehty mittaussuunnitelma, jossa on ilmoitettu kohteiden sijainti ratakilometrijärjestelmän avulla. Mittauslaitteena käytettävä takymetri orientoidaan hyväksi katsottuun paikkaan mittausperustan mittapisteiden avulla.

Mittapisteiden pisteväli on normaalisti 300–400 metriä ja mitattavan osuuden pituus sadoista metreistä useampiin kilometreihin. Tämä tarkoittaa sitä, että kojeasemaa joudutaan vaihtamaan ja takymetri orientoimaan useamman kerran. Toimiva mittausperusta mahdollistaa kuitenkin mittauksen sujuvan liittämisen yhteen. Mittaushavainto otetaan suorilla yleensä 20 metrin välein kulkusuuntaan

nähdessä oikean kiskon selän päältä. Kaarteissa havaintoja otetaan 10 metrin välein. Mittaus suoritetaan aina sisäkiskon puolelta, ottaen kuitenkin kallistus havaintoja ulommasta kiskosta yleisesti 50–100 metrin välein, riippuen kaaren pituudesta. Mittaukset suoritetaan aina kasvavaan ratakilometrin suuntaan. Tämän lisäksi tarvittaessa tiheämmin mitataan vaihteet, tasoristeykset, sillat, rummut ja mahdolliset suuret vaaka- tai pystygeometrian virhepaikat, jossa tiheämmästä mittauksesta katsotaan olevan hyötyä. Vaihteissa mitattava kisko on aina suorranpuoleinen eli ehjä kisko. Myös geometrian vaakataitteen eli siirtymäkaaren aloitus- ja lopetuspaikat ovat tärkeitä mitata. Kaikki mitatut kohdat merkitään liidulla kiskon sisäpintaan tukemiskonetta varten. Erityisesti siirtymäkaarien aloitus- ja lopetuskohdat ovat tärkeitä merkitä.

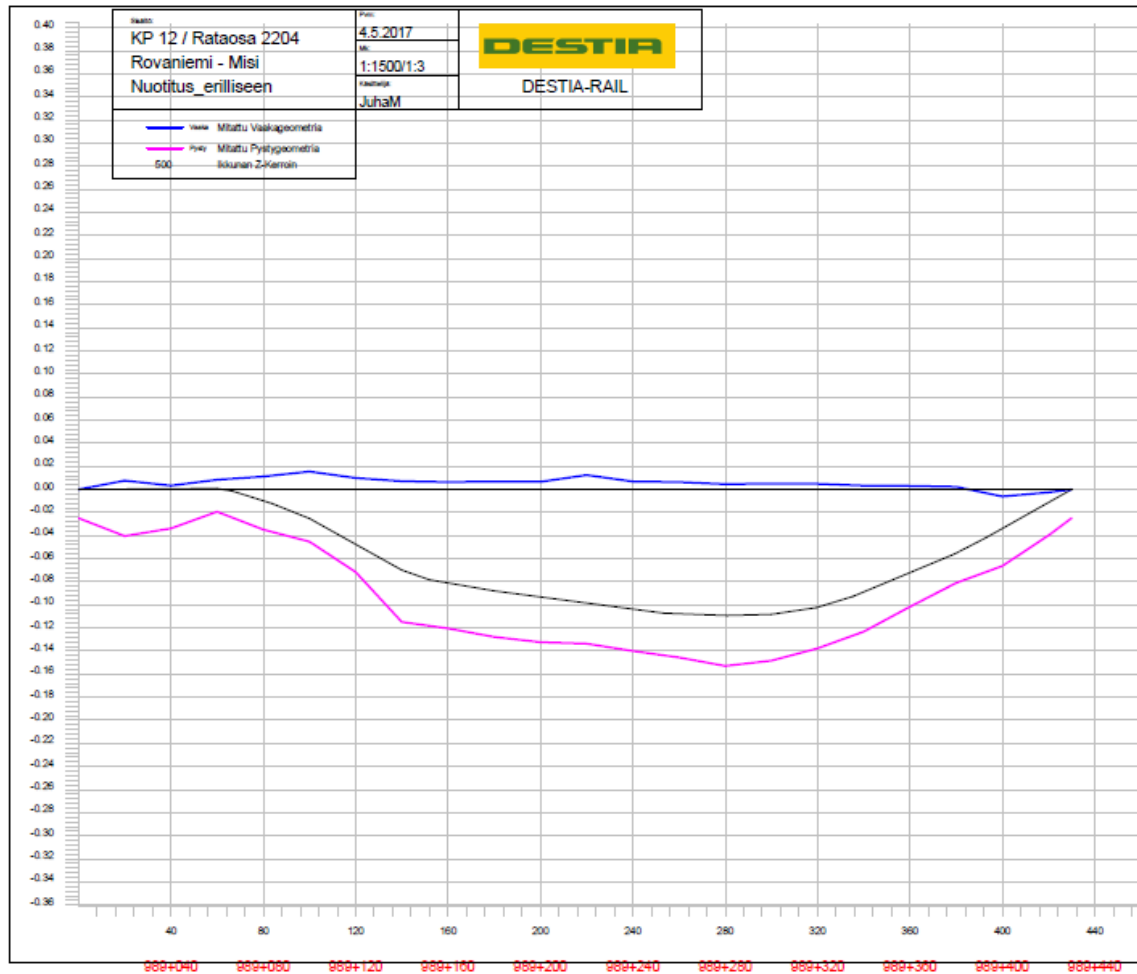
2.3 Toimistotyöt

Mittausdatan editointi tehdään 3D-Win-ohjelmalla. Radalla mitattu data koostuu pisteistä jotka sisältävät XYZ-koordinaatit. Mittaustiedostot puretaan takymetrin tallentimelta esimerkiksi GT-formaatissa tietokoneelle. Tiedostosta poistetaan turhat pisteet, kuten asemapisteet ja apupisteet. Mikäli mitattu osuus on ollut pitempi kuin yksi mittausperustan pisteväli, on mittaus jouduttu suorittamaan useammalla orientoinnilla. Tällöin on todennäköistä, että eri orientoinneista mitatut osuudet joudutaan yhdistämään sujuttamalla. Mittauksen tarkkuuteen vaikuttavista seikoista johtuen mittausten päät saattavat erota toisistaan joitakin millijä tai maksimissaan senttejä, jolloin sujuttamalla, eli laskemassa tasoitus, saadaan mittaustiedostosta yksi yhtenäinen pistejono. Sujuttamisessa vanha mittaus tuodaan kiinni uuteen mittaukseen laskemalla kahden millimetrin tasoitus kymmentä metriä kohden. Tätä toistetaan niin kauan kunnes vanha mittaus on saatu vastaamaan uuden mittauksen arvoja vaihtopisteillä. Esimerkki sujuttamisesta on havainnollistettu 3D-Win-ohjelman kuvaan (kuvio 1).



Kuvio 1. Esimerkki sujuttamisesta 3D-Win-ohjelmassa

Varsinaista työvaihetta kutsutaan nuotittamiseksi. 3D-Win-ohjelman nuotitus-toiminnossa pystytään tarkastelemaan radan geometriaa ja mitattuja pisteitä. Toiminto näyttää erikseen vaaka- ja pystygeometrian, josta pystytään vertailemaan ja tarkkailemaan radan sijainnin korjausta vaativia paikkoja. Koko mitatulle alueelle tehdään ohjelmassa oletusviiva, jonka mukaisesti radan haluttaisiin menevän. Tämän vaiheen raameina ovat minimi ja maksimi siirrot, joiden mukaan rataa on mahdollista siirtää yhdellä tukemisella. Tämä haarukka on yleisesti ottaen 20 mm–45 mm pystysuunnassa nostoa sekä vaakasuunnassa maksimissaan 30 mm siirtoa. Näiden arvojen sanelemana oletusviivasta pyritään tekemään mahdollisimman suora ja tasainen. Ohjelma laskee koko mittauksen matkalle nostot ja siirrot, eli sen kuinka paljon lähtötilanteesta pitää siirtää raidetta, jotta päästään haluttuun sijaintiin.



Kuvio 2. Esimerkki nuotitustoiminnolla tehdystä nuotituskuvasta

Tämä tieto lähetetään sekä sähköisenä tiedostona että lomakkeena tukemiskoneelle. Saamansa tiedon mukaan tukemiskone tukee radan haluttuun kohtaan. Tukemiskone nostaa kiskoja hydraulisesti ylöspäin ja puristaa hakuilla sepeliä ratapölliin alle, jolloin rataa saadaan nostettua ja samalla tarvittaessa siirrettyä sivuille.



Kuvio 3. Tukemiskone tukemassa vaihdetta radan rakentamisprojektilla

2.4 Tarkkuudet ja vaatimukset

Suomen rataverkon laatua tarkkailee liikennevirasto. Se on asettanut myös laatuvaatimukset rataverkoston kunnolle. Tätä varten liikennevirasto on määrittänyt ratatekniset ohjeet, jotka sisältävät tekniset ohjeet ja normit, joita noudattaa ja joiden mukaan toimia. Ratatekniset ohjeet sisältävät kaikkiaan 21 eri osa-aluetta. Kunnossapitomittausten ja tukemisen laadun kriteerejä on määriteltä RATO-13 ohjeessa, joka käsittelee radan tarkastusta.

Raiteen asennon virheet vaikuttavat negatiivisesti junan kulkuun ja matkustusmukavuuteen. Pahimmillaan virheet voivat aiheuttaa vaarallisen suuria rasituksia rataa ja kalustoon, sekä pahimmillaan jopa suistumisvaaran. Rataverkon kuoritus ja käyttöaste vaihtelevat suuresti eri rataosilla. Tämän takia rataverkostolle on määriteltä kunnossapitotasoa. Tasoa on kaikkiaan kahdeksan. Kartta Suomen pääratojen kunnossapitotasosta on esitelty liitteessä 1. Vilkkaasti liikennöidyiltä, korkea nopeuksellisilta rataosilta vaaditaan huomattavasti korkeampia laatuvaatimuksia kuin harvaan liikennöidyiltä rataosilta. 1AA-kunnossapitotaso on korkein kunnossapitotaso, jossa sallitut virhemarginaalit ovat pienimpiä.

Virheluokissa korkeinta luokkaa kutsutaan tähtivirhe- luokaksi. Tämän luokan virheet vaativat yleensä välitöntä korjaamista. Ratossa eli ratateknisissä ohjeissa on määritely, että ”Mikäli mainitut arvot ylitetään, tilanne on korjattava kunnossapitotoimin junaturvallisuus, tyydyttävä junan kulku, kohtuulliset kunnossapitokustannukset ja resurssit huomioon ottaen (RATO13, luku 13.8.2)”. (Liikennevirasto 2010.)

Suurimmat sallitut poikkeamat on esitelty seuraavissa taulukoissa 2,3 ja 4.

Taulukko 2. Korkeuspoikkeamien (KPO5,KPV5) raja-arvot (mm), tulostuskanta 5 metriä (Liikennevirasto 2004)

Virheluokka	Kunnossapitotaso							
	1AA	1A	1	2	3	4	5	6
C	2	2	3	4	5	6	7	8
D	4	4	5	6	7	8	9	10
★	7	7	8	9	10	12	13	14

Taulukko 3. Nuolikorkeuspoikkeamien (NKO20, NKV20) raja-arvot (mm), mittakanta 20 metriä. (Liikennevirasto 2004)

Virheluokka	Kunnossapitotaso							
	1AA	1A	1	2	3	4	5	6
C	4	4	5	7	8	10	13	17
D	6	6	7	9	10	14	21	28
★	9	9	10	12	14	19	25	36

Yllä olevien taulukkojen vasen sarake kertoo virheluokan. Virheluokat ovat C, D ja tähtiluokan virhe. Tähtiluokan virhe on virheistä suurin ja se vaatii välittömiä toimenpiteitä. Ylin rivi kertoo rataosan kunnossapito tason. Mitä korkeampi kunnossapito rataosalla on, sitä pienempiä sallitut virheet ovat. Ensimmäinen taulukko kuvaa korkeuspoikkeamaa eli pystysuuntaisten poikkeamien raja-arvoja.

Arvot ovat raja-arvoja 5 metrin matkalla tapahtuvalle maksimi muutokselle. Alempi taulukko kuvaa samoja raja-arvoja nuolikorkeuspoikkeamien eli sivuttaisuunnassa olevien virheiden osalta. Nuolikorkeuspoikkeamien osalta virhe arvot on esitetty 20 metrin matkalla tapahtuville muutoksille.

Taulukko 4. Raiteen aseman suurimmat sallitut poikkeamat liikenteen käytössä olevalle raiteelle. (Liikennevirasto 2004)

Suurin sallittu nopeus V_{max} [km/h]	Sivupoikkeama [mm]		Korkeuspoikkeama [mm]	
	Jk-raide	Lk-/Pk-raide	Jk-raide	Lk-/Pk-raide
$120 < V_{max} \leq 220$	± 50		+50, -150	
$V_{max} \leq 120$	± 80	± 120	+80, -200	+100,-250

Taulukko raiteen aseman suurimmista sallituista poikkeamista kuvaa millimetreinä suurinta sallittua sivu- ja korkeuspoikkeamaa raiteen suunniteltuun geometriaan nähden. V_{max} -arvot tarkoittavat suurimpia sallittuja nopeuksia rataosuuksilla. Ylempi rivi kuvaa rataosaa, jonka maksiminopeudet ovat 120 km/h ja 220 km/h välillä. Alempi rivi kuvaa rataosia, joissa maksiminopeudet ovat korkeintaan 120 km/h. Jk-raide tarkoittaa jatkuvakiskoraidetta ja Lk-/Pk-raide lyhytkiskoraidetta. Kaksi saraketta ovat tyhjiä, koska kaikki Suomen rataosat, joissa maksiminopeudet ovat yli 120 km/h, ovat jatkuvakiskoraidetta. Suuret poikkeamat raiteen todellisessa asemassa voivat aiheuttaa vakavia riskejä ja ongelmia. Raiteen geometrisen muodon vääristyminen saattaa aiheuttaa hallitsemattomia kiskojännityksiä jatkuvakiskoraiteilla. Samoin ongelmia saattaa esiintyä sähköradan ajolankojen sijainnin ja säätövarojen suhteen. Samalla myös etäisyys muihin rata-alueella sijaitseviin kohteisiin, kuten laitureihin, saattaa muuttua, sekä ATU eli aukean tilan ulottuma saattaa käydä ahtaaksi. (Liikennevirasto 2010.)

3 TARKKUUUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

3.1 Mittausperusta

Laadukkaiden mittaustulosten eli tarkkojen havaintojen saamiseksi mittausperustan merkitys korostuu. ”Luotettavalla mittausperustalla luodaan geodeettinen runko (koordinaatisto) kaikille ratateknisille mittauksille ja kartoituksille. Raiteen laatuvaatimusten saavuttaminen, varsinkin nopean liikenteen radoilla, edellyttää mittausteknisesti vakaata mittausperustaa.” (Liikennevirasto 2010)

Mittausperusta tarkoittaa ratamittauksissa pistejonoa, joka on tehty rataverkon koordinaatistoon sitomista varten. Mittapisteet sijaitsevat yleensä 300–500 metrin välein. Jokaiselle pisteelle on annettu tarkat taso- ja korkeustiedot eli koordinaatit. Mittausperustan tulisi toimia niin, että saman havaintopisteen koordinaatit heittäisivät korkeintaan muutamia millijä, kun mitataan havainto eri pisteistä orientoiduilta kojeasemilta. Uusilla mittausperustoilla tähän tavoitteeseen päästään. Vanhemmissa mittausperustoissa esiintyy kuitenkin usein virheitä pisteiden toimivuuden suhteen. Tähän syynä on esimerkiksi routa, joka saattaa nostella ja liikutella maahan tehtyjä mittapisteitä. Joskus pisteet joutuvat myös ilkeivallan kohteeksi tai huomaamatta rikkoutuneiksi esimerkiksi radan lumitöitä tehdessä. Alle 30 millimetrin erot vaihtopisteellä ovat vielä ääritapauksissa sujutettavissa, mutta sitä suuremmissa virheissä voidaan puhua siitä, että mittausperusta ei toimi kyseisessä paikassa. Orientointivirheistä voi yleensä päätellä paljon mittausperustan kunnosta. Useimmissa paikoissa yksittäisen pisteen puuttuminen tai rikkinäisyys ei estä vielä mittauksen suorittamista. Mikäli kuitenkin useampi piste on käyttökeltoton, alkaa luotettava mittauksen suorittaminen olla haasteellista. Tämän takia mittausperustan toimivuus on ensiarvoisen tärkeää.

3.2 Refraktio

Refraktio tarkoittaa tähtäyssäteen taipumista ilmakehässä. Takymetrimittauksista puhuttaessa refraktiolla tarkoitetaan takymetrin lasersäteen taipumista kojeen ja prisman välillä. Valon eteneminen muodostaa ilmakehässä kaarevan viivan. Maan kaarevuus ja refraktio aiheuttavat systemaattisen virheen, joka voidaan ottaa laskennassa huomioon. Takymetrissa tämä virhe otetaan huomioon käyttäen refraktiokerrointa, jona käytetään yleisesti arvoa $k = 0.13$. Refraktiokerroin trigonometrisen korkeusmittauksen yhteydessä saadaan maan- ja tähtäyssäteiden kaarevuussäteiden suhteesta.

$$k = \frac{R}{R_{\alpha}} \quad (1)$$

missä

k	on	refraktiokerroin
R	on	maan kaarevuussäde
R_{α}	on	tähtäyssäteiden kaarevuussäde.

Tämän arvon käyttö perustuu malli-ilmakehään. Ilman taitekerroin riippuu ilman tiheydestä. Tämä taas riippuu paineesta, lämpötilasta, sekä osittain kosteudesta. Valon taittuminen voidaan esittää Snellin lain mukaisesti. Snellin lain mukaan

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (2)$$

missä

α_1	on	tulokulma,
n_1	on	aineen 1 taitekerroin
α_2	on	taitekulma
n_2	on	aineen 2 taitekerroin.

Tässä tapauksessa aine 1 ja aine 2 ovat eri lämpöisiä ilmakerroksia. Ilman taitekerroin vaihtelee ilman lämpötilan mukaan, vaikkakin taitekertoimen vaihtelu on verrattain pientä. Vaikka refraktio vaihtelee sääolosuhteiden ja mittausajankohdan mukaan, voidaan refraction keskimääräistä arvoa pitää riittävän tarkkana

verrattuna maan kaarevuuden vaikutukseen. (Laurila 2012, 337–338; Lehto, Havukainen, Maalampi, Leskinen 2012, 86–88)

3.3 Lämpöväreily

Lämpöväreily on optinen ilmiö, joka syntyy, kun valo taittuu kylmän ja lämpimän ilman rajapinnasta. Valo taittuu, koska valonnopeus muuttuu ilman optisen tiheyden mukaan. Mittaussäteen kulku on siis laskennallisesti ennustettavissa niin kauan kuin väliaineen eli ilman taitekerroin pysyy vakiona. Kun taitekerroin muuttuu, muuttuu myös säteen suunta. Tämän seurauksena syntyy lämpöväreilyksi kutsuttu ilmiö. Lämpöväreily on siis toisin sanoen kangastus. Kangastus jaetaan kahteen osa-alueeseen; yläpuoliseen ja alapuoliseen kangastukseen riippuen siitä, miten päin kylmä ja lämmin ilmamassa on. Lämpöväreilyssä on kyseessä alapuolisen kangastuksen erikoistapaus, jolloin alempana oleva lämmin ilma sekoittuu yläpuolella olevaan kylmään ilmaan. Auringon lämmittäessä maaperää, saattaa maan lämpötila kohota reilusti ilman lämpötilaa korkeammaksi, jolloin kyseisen ilmiön syntyminen on mahdollista. Väreilyn seurauksena valo taittuu ennalta arvaamattomasti, jolloin mittauksen tarkkuus heikkenee mittausmatkan kasvaessa koneen ja prisman välillä. Rataympäristössä lämpöväreily on yleistä, koska rata-alue on aina avointa aluetta, jonka pinta on sepeliä. Kivi materiaalina kerää ja säilyttää hyvin lämpöä, joka on auringon vaikutuksesta siihen varastoitunut. Runsas väreily voidaan havaita paljaalla silmällä. Mitä pidempi matka prisman ja kojeen välillä on, sitä suuremmin lämpöväreily alkaa vaikuttamaan mittaukseen. Takymetrin kaukoputken läpi tarkkailtaessa lämpöväreilyn huomaa väreilevänä ilmana. Prisma saattaa näyttää leijuvan irti prismausavasta ja käsin kohdistaminen prismaan on hankalaa. Kuumalla kelillä kauas mitattaessa takymetri voi jopa kadottaa prisman automaattilukituksen lämpöväreilyn takia. (Jyväskylän yliopisto 2016)

3.4 Muut korjaukset ja virheet

Takymetrilla mitattaessa pitää ottaa huomioon useita mittaustarkkuuksiin vaikuttavia virheitä ja virheiden mahdollisuuksia. Monessa tapauksessa virheen huomioon ottaminen on tehty mittaajan kannalta helpoksi kehittyneiden takymetriensä ansiosta. Tällaisia ovat esimerkiksi lämpötilakorjaus, prismavakio sekä refraktiokerroin.

3.5 Prismavakio

Takymetrilla mitattaessa havaintopäässä käytetään prismaa, johon takymetrilla mitataan etäisyys ja kulmat kojeen asemaan nähden. Mittaus tapahtuu laservaioon perustuvalla säteellä, joka heijastuu prismasta takaisin kojeeseen. Prisma leikataan peilipintojen muodostamasta kuutiosta. Se mahdollistaa suurpiirteisemmän kohdistuksen tavalliseen peilipintaan verrattuna, sillä prisman peilipinnat heijastavat säteen aina takaisin lähtöpisteeseen. Prisman tarkka suuntaaminen vaikuttaa kuitenkin kulma- ja suuntamittausten tarkkuuksiin. Etäisyyden mittauksen tarkkuuteen vaikutus on minimaalinen.

Mitattaessa takymetrilla prismavakion asettaminen on tärkeää. Eri prismoilla on eri prismavakiot, joiden välillä saattaa olla senttien ero, joka puolestaan vaikuttaa etäisyyden mittauksen tarkkuuteen merkittävästi. Etäisyyden mittauksessa tarkoituksena on mitata kojeen pysty akselilla olevan pisteet etäisyys prisman pysty akselilla olevaan pisteeseen. Tätä varten koje ja prisma pitää keskittää ja tasata. Prisman heijastuspiste ei kuitenkaan välttämättä sijaitse pysty akselilla, jolloin prismavakion avulla otetaan huomioon ja korjataan tämä mittaukseen vaikuttava epäkeskisyys. Prismavakio tarkoittaa siis epäkeskisyyden korjausta. (Laurila 2012, 330–331)

3.6 Säätötilakorjaus

Säätilakorjaus on prismavakion lisäksi toinen keskeinen korjaus takymetrillä mitatessa. Ilmanpaine ja lämpötila vaikuttavat mittaussignaalin kantoaallon eli laserin etenemiseen, minkä takia korjauksen tekeminen on tärkeää. Korjausta varten ilmanpaine ja lämpötila pitää mitata. Mittaamiseen käytetään ilmanpaineittaria sekä lämpömittaria. Ilmanpainemittaria kutsutaan barometriksi. Ilmanpainemittari sisältää usein myös lämpömittarin. Takymetreissa ilmanpaineen yksikönä käytetään millibaaria (mbar), hehtopascalia (hPa) tai elohopeamillimetriä (mmHg).

Yksiköiden välinen yhteys on: 1000 mbar = 1000 hPa = 750 mmHg.

Normaalista ilmanpaineesta puhuttaessa tarkoitetaan normaalia ilmanpainetta merenpinnantasolla, joka on 1013,3 mbar. Ilmanpaine laskee merenpinnalta ylöspäin noustaessa. Tätä hyödyksi käyttäen voidaan arvioida suurpiirteisesti paikkojen korkeuksia. Sääkorjaus annetaan suhteellisena korjauksena. yksikönä on ppm eli parts per million. Tämä tarkoittaa, että 10 ppm sääkorjaus on 100 metrin matkalla 1 mm. Taulukossa esimerkki sääkorjauksen vaikutuksessa eräillä ilmanpaineen ja lämpötilan arvoilla. Esimerkiksi hieman merenpinna yläpuolella -30 asteen pakkasessa säätilakorjauksen arvo taulukon mukaan on 47 ppm, joka tarkoittaa -4.7 millimetriä 100 metrin matkalla. (Laurila 2012, 333–334)

Taulukko 4. Ilmanpaineen ja lämpötilan vaikutus sääkorjaukseen. (Laurila 2012, 334)

Paine/ Lämpötila	-30 °C	0°C	+30°C
960 mbar	-34 ppm	0 ppm	+28 ppm
1000 mbar	-47 ppm	-11 ppm	+17 ppm
1040 mbar	-60 ppm	-27 ppm	+7 ppm

4 MITTALAITTEIDEN KALIBROINTI

Liikennevirasto vaatii, että mittaustöissä käytettävissä kojeissa on oltava voimassa olevat kalibrintodistukset. Takymetri huolletaan ja kalibroidaan huollon yhteydessä kerran vuodessa. Tämän lisäksi on syytä tehdä kenttäkalibrointeja vähintään muutaman kuukauden välein. Näitä niin sanottuja akselivirheitä ovat tappikaltevuusvirhe, kollimaatiovirhe, sekä erilaiset epäkeskisyyysvirheet. Tappikaltevuusvirhe tarkoittaa, että vaaka-akseli ei ole kohtisuorassa pystyakselin suhteen. Jos tähtäysakseli ei ole kohtisuorassa vaaka-akselia vastaan, puhutaan kollimaatiovirheestä. Erilaisissa epäkeskisyyysvirheissä akselit eivät leikkaa samassa pisteessä tai ne eivät kulje jakokehien keskipisteiden kautta. Valistunut mittaaja kykenee havaitsemaan mahdollisia akselivirheitä mitattaessa ihannekeilissä. Esimerkiksi tappikaltevuusvirheen kykenee havaitsemaan tavallista suurempana korkeuden siirtovirheenä. Nykyajan takymetrissa kalibrointien tekeminen ja tarkistaminen on helppoa. Kenttäkalibrointia tehtäessä pystyy vertaamaan uusia arvoja vanhoihin ja arvioimaan sitä, kuinka akselivirheiden arvot, ja sitä kautta koneen luotettavuus, paranee. Akseli- ja epäkeskisyyysvirheet voidaan poissulkea mittauksesta toistamalla havainnot kummassakin kojeasennossa ja laskemalla niiden havaintojen keskiarvot. Tämän takia esimerkiksi orientoitaessa takymetria on tärkeää mitata jokainen käytettävä havaintopiste kummastakin kojeasennosta, jotta orientoinnista saadaan mahdollisimman luotettava ja tarkka. (Laurila 2012, 340)

Lähtökohtana mittaustöiden tarkkuuksissa ovat Liikenneviraston ohjeet. Ratateknisissä ohjeissa on määritelty, että ”mittausmenetelmällä saavutettavan tarkkuuden on oltava parempi kuin mitattavalle rakenteelle sallittu toleranssi.” (Liikennevirasto, 2010) Yleisimmin mittaukset suoritetaan Leica GRZ122, 360° prismalla tai GPR121- kehyksellä varustetulla pyöröprismalla. Valmistajan ilmoittamat keskiarvotarkkuudet ovat pyöröprismalle 1 mm ja maksimi mittausetäisyys 3500 metriä. 360° prismalla 3D-kohdistustarkkuus on 2 mm ja autokohdistuksella mittausetäisyys maksimissaan 600 metriä. Näiden prismojen sisäinen tarkkuus on riittävä tarkkuutta vaativiin ratamittauksiin. Epätarkemmilla prismoilla mittausten luotettavuus laskisi ja virheiden riski kasvaisi. 360° prisma nopeuttaa ja tehostaa mittausta, sillä mittauspinta osoittaa aina takymetria kohti. Pyöröprisman edut tulevat esiin olosuhteiden ääripäissä sateen tai voimakkaan auringonpaisteen häiritessä mittausta. Prismojen maksimi mittausetäisyydet eivät rajoita mittausta, sillä mittaukset tapahtuvat aina alle 300 metrin etäisyydellä kojeesta. (Leica geosystems Oy.)

Valmistajan lupaamat tarkkuudet Leica Viva TS15 takymetrille ovat seuraavat:

Tarkkuus/ mittauksen kesto

Vakio 1 mm + 1.5 ppm / tyyp. 2,4 s

Nopea 2 mm + 1.5 ppm / tyyp. 0,8 s

Jatkuva 3 mm + 1.5 ppm / tyyp. <0,15 s. (Leica geosystems Oy.)

Vakio, nopea ja jatkuva tarkoittavat mittaustyyliä. Vakiomittauksen kesto on 2,4 sekuntia ja se on mittaustyyleistä tarkin. Jatkuva ja nopea mittaustyyli mahdollistavat nopeamman havaintojen ottamisen, mutta niissä tarkkuus hieman kärsii. Havaintojen tarkkuus saadaan vieläkin tarkemmaksi, mikäli mittaus toteutetaan keskiarvomittauksella. Siinä määritetään itse vakiomittausten lukumäärä, joista koje laskee keskiarvon. Lisäksi valmistaja on antanut todellisen ATR- kulman-tarkkuuden ja pisteen keskipoikkeaman yhden henkilön mittauksessa. Nämä tarkkuudet ovat 0.3 milligoonia sekä yhden millimetrin keskipoikkeama. (Leica geosystems Oy.)

Prisman ja kojeen tarkkuuden lisäksi mittaushavaintojen tarkkuuteen mittausvälineiden osalta vaikuttavat myös prisma-auvan ja pakkokeskitysalustojen kupla- ja rasiatasainten kalibrointi. Nämä eivät välttämättä vaikuta mittauksen sisäiseen

tarkkuuteen verrattaessa saman mittauksen vierekkäisiä havaintoja. Eroja saattaa syntyä, kun havaintoja verrataan toiseen mittaukseen tai esimerkiksi silloin, jos prismaa vaihdetaan kesken mittauksen. Tarkkuuksia vertaillessa täytyy kuitenkin ottaa huomioon se merkittävä seikka, että koneelle annetut tarkkuusarvot vaativat toteutuakseen optimaalisia olosuhteita, joissa esimerkiksi refraktiivakio ja säätilakorjaus ovat asetettu täysin oikein. Nämä korjaukset sekä mitausolosuhteet vaikuttavat siis suuresti luvattuihin tarkkuuksiin.

Myös ulkoisia tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä saattaa ilmetä. Tällainen saattaa olla esimerkiksi takymetrin ja takymetrin jalkojen auringonpaisteesta johtuva lämpölaajeneminen, joka voi aiheuttaa kojeen tasaukseen muutoksia. Pienet muutokset eivät kuitenkaan vaikuta tarkkuuteen, sillä takymetrin kompensattori pystyy tiettyyn pisteeseen asti korjaamaan tilanteen. Tasauksia ei saa kuitenkaan mennä korjaamaan fyysisesti sen jälkeen, kun orientointi on suoritettu. Toinen mahdollinen riski on ohi menevän junan aiheuttama tärinä, joka usein on hyvinkin voimakasta junan lastista ja radan kunnosta riippuen. Tämä saattaa aiheuttaa isoja heilahduksia takymetrin tasauksiin. Tärkeää on myös varmistaa, että koje lukittuu mittauksessa käytettävään prismaan. Esimerkiksi mittapisteen päällä saattaa olla orientoinnissa käytetty prisma pystyssä, johon koje saattaa lukittua. Joskus koje saattaa myös luulla punaisena palavia junan opastinvaloja prismaksi ja lukittua niihin. Tämä virheen mahdollisuus on kuitenkin helppo sulkea pois käyttämällä kättä mittauksessa käytettävän prisman edessä, jolloin tähtylukitus katkeaa, mikäli koje on lukittunut kyseiseen prismaan.

Lämpöväreilyn vaikutusta mittausetäisyyksiin ja tarkkuuksiin selvitettiin suorittamalla käytännön mittauksia. Mittaukset koostuivat kahdesta osasta, jotka olivat havaintosarjojen mittaus sekä korkeuden siirto. Ideana oli toistaa samanlainen mittaussuoritus eri lämpötiloissa. Koje orientoitiin joka kerta mittausperustasta samaan paikkaan ja huolehdittiin, että kojekorkeus pysyi myös samana. Koje asetettiin joka kerta 1.7 metrin korkeuteen. Itse mittaus suoritettiin 300 metrin matkalla. Kojeasemalta 150 metriin asti mitattiin 10 metrin välein. 150 metristä 300 metriin havainnot otettiin 5 metrin välein. Jokaiselta havaintopaikalta tallennettiin viisi yksittäistä havaintoa. Jokainen mittauskohta oli merkittynä liidulla kiskoon. Mittaus suoritettiin käyttäen Leica Viva TS 15 -takymetria, Leica GRZ122, 360° prismaa ja hiilikuituista prisma-auvaa. Prismasauvan päässä oli kiskoon sopiva kulmarauta, joka mahdollistaa vakaan ja tarkan mittaamisen kiskon kulkupinnan päältä. Lämpimimmällä kelillä sama mittaus suoritettiin lisäksi Leica Viva TS 16 -takymetrillä, sekä pyöröprismalla. Kojeet laitettiin mahdollisimman lähelle toisiaan ja mitattiin samaan prismaan yhtä aikaa. Näin minimoitiin mittaajasta johtuvat virheet. Tämän jälkeen sama suoritus toistettiin vaihtaen pyöröprismaan. Lämpötilojen suhteen pyrittiin saamaan mahdollisimman laaja skaala. Vertailutilanteeksi mitattiin pilvisellä + 4 asteen kelillä, jolloin saatiin vertailupohja tilanteesta, jossa lämpöväreilyä ei esiinny.

Tuloksia lähdettiin analysoimaan muutamasta eri lähtökohdasta. Ensimmäisenä tarkkailupohjana oli viiden yksittäisen mittaushavainnon vaihtelu suurimman ja pienimmän arvon välillä. Näistä jokaiselta havaintopaikalta otetusta viidestä pisteestä laskettiin pienimmän ja suurimman arvon erotus X-, Y- ja Z-koordinaateille, jonka jälkeen ne sijoitettiin viivakaavioon. Tällä tavoin saatiin koko mittausvälille yhtenäinen viiva, joka kuvasi mitattujen pisteiden välisen vaihtelun kasvamista. Tämä tutkintatapa ei sulkenut pois yksittäisiä isompia virheitä mittaustuloksissa, joten kaavioissa esiintyy yksittäisiä piikkejä. Toinen havaintotapa oli keskiarvon laskeminen virheille. Tämä tarkastelutapa simuloi tilannetta, jossa mittaushavainto olisi otettu viiden havainnon keskiarvoa käyttämällä, jolloin mahdolliset yksittäiset suuremmat virhearvot tasoittuvat neljän muun havainnon suhteen. Vaikka virheen mahdollisuus ei kokonaan poistu tällä tavoin, se tarkoittaa kuitenkin sitä, että virhe on todennäköisemmin pienempi ja lähellä todellista arvoa. Keskiarvon vaikutusta mittaukseen tarkasteltiin tekemällä keskihajontataulukko, josta

selviää kuinka keskiarvon käyttö pienentää virheen mahdollisuutta. Kaikki taulukot on esitetty liitteessä 2.

6.1 Mittaustulokset

Tässä työssä puhuttaessa mittaustuloksista, tarkoitetaan mittaushavainnoista saatuja arvoja. Puhuttaessa esimerkiksi hyvistä tuloksista, tarkoitetaan mittaushavaintojen olevan tarkkoja ja luotettavia silloin, kun saatujen havaintojen arvot suhteutetaan mittausetäisyyksiin. Merkki hyvistä mittaustuloksista on esimerkiksi pieni hajonta samasta kohdasta mitattujen havaintojen välillä.

Ensimmäinen mitattu keli oli pilvinen +4 astetta keli. Tämän kelin tuloksia analysoitaessa huomataan, että yksittäisien havaintojen suurin vaihtelu on 6 millimetriä 190 metrin etäisyydellä kojeasemasta. Tätä lukuun ottamatta muut pistevaihtelut pysyvät alle viiden millimetrin koko 300 metrin mittaussvälillä. Tätä voidaan pitää erinomaisena tuloksena ja päätellä, että nämä pienet virheet johtuvat enemmänkin kojeen tarkkuusvirheistä kuin lämpöväireilystä. Keskihajontaa käyttämällä 190 metrin kohdalla oleva virhe supistuu 2,3 millimetriin, joka on suurin virhe koko mittaussmatkalla. Jo yksittäisellä mittaustavalla tuloksia voitaisiin pitää luotettavana koko mittaussmatkalla, mutta keskiarvoa käyttämällä saadaan erinomaisia mittaustuloksia tässä kelissä.

Toinen mittauskeli oli +8 asteen aurinkoinen keli, jossa lämpöväireilyä oli jo havaittavissa paljaalla silmällä. Tämä näkyi selvästi myös mittaustuloksissa. Havaintojen vaihtelua vertaillen huomataan, että 200 metrin päässä kojeesta tulokset ylittävät jo 10 millimetrin viivan. 235 metrin päässä kojeesta Y-koordinaatin vaihteluväli oli jo 23 millimetriä. Z-koordinaatti eli korkeus käyttäytyy koko mittauksen ajan maltillisemmin ja sen suurin virhe, 12 millimetriä, esiintyy 235 metrin päässä kojeesta. 235 metrin jälkeen vaihtelu kuitenkin pienenee, joten vaihtelun kasvuun ei ole havaittavissa selvää lineaarista käyrää. Tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, että 170 metriin asti voidaan yksittäisellä mitata tyydyttävästi. Tämän

jälkeen arvojen vaihtelu kasvaa selvästi yli viiden millimetrin. Keskihajontataulukkoa vertaillen nähdään jälleen keskiarvomittauksen etu. 235 metrin päässä syntyy myös keskiarvolla mitatessa suurin ero, mutta supistuu 6,8 millimetrin vaihteluun. Tämä kohta on ainut jossa virhearvot ylittävät viiden millimetrin viivan. Mittaustuloksista saadaan siis luotettavia, kun yksittäinen mittaustapa vaihdetaan keskiarvomittaukseen esimerkiksi 170 metrin kohdalla. Tämä mittaustavan vaihdos voidaan tehdä myös aikaisemmin, jolloin luotettavuus paranee entisestään. Tällöin mittauksen suorittaminen kuitenkin hidastuu jonkin verran, kun yhdellä havaintopaikalla kuluu enemmän aikaa. Tuloksista voidaan siis päätellä, että auringonpaiste aiheuttaa lämpöväreilyä yllättävän alhaisissa lämpötiloissa.

Seuraava mittauskeli oli +16 asteinen aurinkoinen sää. Tässä kelissä lämpöväreilyn vaikutus mittaukseen oli kaikkein suurinta, mikä oli yllättävää. Viiden millimetrin vaihtelun raja rikkoutui 140 metrin etäisyydellä kojeasemasta. Tämän jälkeen piikkejä sisältävä kuvaaja kasvoi niin, että mittauksen loppupäässä suurin vaihteluero oli jo 27 millimetriä. Tähän syynä saattaa olla kosteuden lievä vaikutus refraktioon. Niin +16 kelin kuin +8 kelinkin mittauksissa mittaus ajankohta oli hieman ennen puoltapäivää, jolloin auringonpaiste alkaa lämmittää voimakkaimmin. Viileän aamun johdosta ilmassa saattoi olla huomattavasti enemmän kosteutta kuin lämpimimmillä keleillä. Vaikka yksittäisellä mittaustavalla ilmennyt vaihtelu oli reilua, niin keskiarvolla mitattaessa ensimmäinen viiden millimetrin ylitys tapahtuu vasta 240 metrin etäisyydellä kojeasemasta. Arvot ovat muutoinkin hyvin maltillisia. Tämä osoittaa, että havaintopisteiltä otetuista viidestä havainnosta usein yksi tai kaksi poikkeavat reilusti lopuista havainnoista. Tämä saa aikaan sen, että verrattaessa minimi- ja maksimiarvoja, on niiden ero suuri, mutta keskihajonnalla tarkasteltaessa keskiarvo painottuu juuri näiden lähellä toisiaan olevien pisteiden mukaisesti. Tällöin tulokseksi saadaan paljon maltillisempia arvoja.

Neljäs mittauskeli oli +22 asteinen aurinkoinen keli. Tämän mittauksen aikana oli kuitenkin pieni tuulenvire. Runsasta lämpöväreilyä oli kuitenkin silmin havaittavissa. Tällä kelillä lämpöväreilyn vaikutukset olivat +16 keliä selvästi maltillisemmat. Yksittäiset piikit olivat matalampia ja suurin vaihteluarvo oli 10 millimetriä, joka ilmeni 255 metrin etäisyydellä kojeasemasta. Ensimmäinen viiden millimetrin

vaihtelun ylitys tapahtui 175 metrin etäisyydellä kojeasemasta. Keskihajonnalla tarkasteltuna koko mittausalueen arvot olivat erinomaisia, sillä suurin vaihtelu oli vain 3,7 millimetriä. Pienellä tuulenvireellä oli siis selvästi lämpöväreilyä heikentävä vaikutus, joka heijastuu suoraan mittaustarkkuuteen.

Viimeinen ja lämpimin mittauskeli oli +25 asteinen auringonpaiste. Tässä lämpötilassa suoritettiin neljä eri mittausta. Mittaus suoritettiin Leica Viva TS15 ja -TS16 takymetreillä niin, että samanaikaisesti mitattiin vierekkäin pystytettyjen koneiden havainto samaan prismaan. Ensimmäinen mittaus suoritettiin 360- prismaan ja tämän jälkeen vaihdettiin pyöröprismaan, jolla sama mittaus suoritettiin uudelleen. Näin saatiin tutkittua, kuinka pyöröprisman käyttö vaikuttaa mittaustuloksiin lämpimällä kelillä. Myös koneista johtuvia eroja mittaustuloksissa tutkittiin tällä tavoin. Tuloksista huomataan, että eri koneilla mitatut havainnot käyttäytyvät suurpiirteisesti samoin. Pyöröprismalla mitatuissa tuloksissa havaitaan kuitenkin TS16- laitteella mitatussa kaaviossa yksittäisiä suuria piikkejä, joita ei kuitenkaan ilmene TS15- laitteella mitatussa kaaviossa. Yhtä TS16-laitteella ja pyöröprismalla mitattua 10 millimetrin piikkiä lukuun ottamatta kaikissa neljässä mittauksessa pystyttiin mittaamaan 150 metrin päähän kojeasemasta ilman viiden millimetrin vaihtelun ylityksiä. Piikeistä huolimatta mittausten kokonaiskuvaa tarkasteltaessa lämpöväreilystä johtuvat vaihtelujen erot olivat yllättävän pieniä verrattuna viileämmissä keleissä ilmenneisiin eroihin. Mittauksen loppupäässä, lähellä 300 metrin etäisyyksiä kojeasemasta, pysyttiin lämpimästä kelistä huolimatta lähellä 10 millimetrin vaihteluviivaa. Keskihajontatuloksia tarkasteltaessa huomataan, että tulokset ovat yhtä 185 metrin etäisyydellä olevaa 6,8 millimetrin piikkiä lukuun ottamatta erinomaisia, pysyen alle viiden millimetrin vaihtelun rajoissa. Tuloksista voidaan myös päätellä, että pyöröprisman ja 360- prisman mittaustarkkuuksien välillä ei ole mainittavaa eroa näillä mittausetäisyyksillä. Suurimpana erona voidaan mainita mittausta aloitettaessa prisman etsiminen. Kyseisellä kelillä 300 metrin päässä kojeasemasta takymetri löytää nopeammin ja helpommin pyöröprisman kuin 360- prisman. Tämä johtuu osaltaan pyöröprisman metallikehyksestä, joka auttaa kojetta havaitsemaan prisman. Myös pyöröprisman kojeseen suunnattu pinta-ala on isompi kuin 360-prismassa.

6.2 Vaikutus korkeuden siirtoon

Kunnossapitomittausten näkökulman lisäksi tarkasteltiin myös lämpöväreilyn vaikutusta korkeuden siirtoon. Korkeuden siirrot toteutettiin ratapenkereellä mittaus-tilanteita vastaavalla tavalla. Korkeuden siirron tutkimisessa keskityttiin löytämään optimi korkeuden siirtomatkat eri lämpötiloilla. Mittaukset toteutettiin joka kerta samalla paikalla. Mittausetäisyydet vaihtelivat 150 metrin ja 250 metrin välillä. Jokaisella kelillä mitattiin keskimäärin neljälle eri etäisyydelle. Tietyillä keleillä testattavat mittausetäisyydet määriteltiin etukäteen edellisten kesien aikana saatujen kokemusten perusteella. Nämä etäisyydet olivat oletettavat kriittiset rajat korkeuden siirron tyydyttävien tulosten toteutumiseen. Mittauksen suorittamista varten pystytettiin kerralla neljät jalat, johon pyöröprisma tasattiin. Ensin takymetrillä mitattiin vuorollaan jokaiseen neljään eri kohteeseen. Seuraavaksi pyöröprisma siirrettiin alkuperäisen kojeaseman päälle ja koje siirrettiin ensimmäisen mitatun keskitysalueen päälle. Tämän jälkeen takymetrillä mitattiin prismaan ja suoritettiin korkeudensiirto. Kun tulokset olivat selvillä, uutta kojeasemaa ei kuitenkaan hyväksytty, vaan palattiin käynnistysvalikkoon ja sammutettiin takymetri. Tämän jälkeen koje siirrettiin seuraavien jalkojen päälle ja sama suoritus toistettiin. Näin jatkettiin, kunnes kojetta oli käytetty kaikkien mitattujen pisteiden päällä. Tällä tavoin saatiin havainnollistettua korkeuden siirtotuloksen muuttamista suhteessa siihen, mitä kauempana uusi kojeasema sijaitsi alkuperäisestä kojeasemasta.



Kuvio 4. Havainnekuva korkeuden siirron tutkimisesta

Taulukko 5 esittelee korkeuden siirrossa aikaansaadut mittaustulokset. Mittaus suoritettiin kaikkiaan viidessä eri kelissä. Ensimmäinen mittaus suoritettiin +3.5 asteen pilvisessä ja tuulisessa kelissä jolloin lämpöväreilyä ei esiintynyt ollenkaan. Tästä lämpötilasta saatiin vertailuarvot muille suoritetuille mittauksille. Ensimmäisen mittauksen tulokset osoittivat, että optimaalisissa olosuhteissa korkeudensiirron tarkkuus ei kärsi, vaikka mittausetäisyys olisikin normaalia pidempi eli 250 metriä. Yleisesti ottaen 10 millimetrin ja sitä pienempien korkeudensiirto virheiden tuloksia voidaan pitää tyydyttävänä arvoina. Viimeiset tämän raja-arvon täyttävät mittausetäisyydet kunkin lämpötilan kohdalla on merkitty taulukkoon tummennetulle pohjalle. Matalimpien lämpötilojen kohdalla ei nähty tarpeelliseksi tehdä 150 metrin siirtoa, sillä tulokset olivat hyviä myös pidemmällä matkoilla. Vastaavasti lämpimimmässä olosuhteissa 250 metrin siirrolle ei nähty perusteita. Taulukon toiseksi alimmainen mittaustulos +22 puolipilvisellä kelillä osoittaa, kuinka suuri vaikutus pilvisyydellä on lämpöväreilyyn ja sen seurauksena myös tuloksiin. 200 metrin siirtoa tehtäessä aurinko meni hetkellisesti pilven taakse, jolloin mittaustuloksissa oli havaittavissa selvä ero hetkeä aikaisemmin mitattuun 175 metrin siirtoon. Kaikissa muissa mittauksissa keli pysyi muuttumattomana

siirtojen ajan. Tämän pystyy myös havaitsemaan tuloksista, jotka kasvavat loogisesti mittaamatkan kasvaessa. Tuloksista voidaan päätellä, että normaalina siirtona pidettyä 200 metriä voidaan käyttää kuumimpia kelejä lukuun ottamatta.

Taulukko 5. Korkeuden siirron mittaustulokset

Säätila	Siirron pituus metreinä				
	150	175	200	225	250
+3.5, pilvinen	-	0mm	1mm	-2mm	-1mm
+8, aurinkoinen	-	2mm	5mm	9mm	11mm
+16, aurinkoinen	-4mm	-8mm	-10mm	-13mm	-20mm
+22, puolipilvinen	6mm	7mm	4mm	9mm	-
+25, aurinkoinen	9mm	13mm	15mm	22mm	-

6.3 Yhteenveto

Yhteenvetona mittaustuloksista saatiin suositellut mittausetäisyydet yksittäisen havainnon mittaustavalle sekä maksimimittausetäisyydet keskiarvomittausta käytettäessä. Yksittäisiä havaintoja mitattaessa kaikissa lämpötiloissa aurinkoisessa kelissä suositellaan maksimimittausetäisyydeksi 140 metriä. Viimeistään tässä vaiheessa suositellaan vaihdettavan keskiarvomittaukseen. Keskiarvomittauksella voidaan jokaisella havaintokelillä omaa harkintakykyä käyttäen mitata 230 metriin asti. Pilvisillä ja viileillä keleillä voidaan mitata tarvittaessa myös pidemmälle. Yleisesti ottaen yli 250 metrin päähän ei ole tarvetta mitata.

Vaikkakin eri lämpötilojen tuloksissa oli suuria vaihteluja, saatiin silti aikaiseksi arvot, joita olisi hyvä noudattaa. Tämän lisäksi on kuitenkin hyvä käyttää myös omaa harkintakykyä. Korkeuden siirron osalta tulokset on esitetty taulukossa 4.

7 POHDINTAA

Koko mittauksen ajan täysin samanlaisena pysyviä mittaolosuhteita oli vaikea saada. Mittaussuoritus oli aina kestoaltaan yli 60 minuuttia, jonka aikana tuli usein tilanne, jolloin aurinko ei paistanut yhtäjaksoisesti. Mikäli isompia pilviä tuli häiritsemään mittausta ja sen myötä lämpöväreily pieneni merkittävästi, täytyi mittauksessa tällöin pitää tauko ja odottaa, että olosuhteista tuli jälleen vertailukelpoiset. Vaikka mittaukset suoritettiin joka kerta samalla tavalla, havaittiin siitä huolimatta mittauksissa epäloogisia tuloksia. Normaaleissa mittaustilanteissa väreilyn määrään vaikuttaisivat myös mahdollinen tuulenvire, ratasepelin väri, kojeen korkeus radasta, maaston muodot, sekä mahdolliset kaaret. Usein ratapenkereen reunat saattavat olla jyrkkiä, jolloin takymetrin asettaminen penkereelle on hankalaa. Tästä seuraa usein se, että takymetri joudutaan asentamaan radan tasoon nähdessä alas, jotta mahdollinen junan ohitus ei aiheuta vaaraa mittalaitteille. Tämän seurauksena mittaussäde saattaa kulkea hyvinkin lähellä maanpintaa, jossa lämpöväreily on luonnollisesti voimakkaampaa. Samanlaiseen tilanteeseen saataan päätyä radan profiilin takia. Junarata saattaa joissain tilanteissa kulkea loivasti mäen yli niin, että korkeimmalla kohdalla oleva taitekohta jää takymetrin ja mitattavan kohdan väliin, jolloin mittaussäde kulkee jälleen lähellä maanpintaa. Nämä muuttujat yleensä lisäävät lämpöväreilyä aiheutuvien virheiden mahdollisuutta. Lisäksi mittaustarkkuuteen saattaa vaikuttaa tilanteesta riippuen se, kummalla puolella rataa koje sijaitsee. Mitattaessa oikeaa kiskoa kojeen sijoittaminen oikealle puolelle ratapengertä tarkoittaa sitä, että mittaussäde kulkee lyhyemmän matkan ratasepelin päällä. Vastaavasti tällaisessa tapauksessa kojeen asettaminen vasemmalle puolella rataa aiheuttaa sen, että mittaussäde joutuu kulkemaan koko ajan päällysrakenteen eli sepelikerroksen yli, missä lämpöväreily usein on voimakkainta. Monella rataosuudella ratapenkereen sivut ovat kasvillisuuden, kuten heinikon, peitossa. Kasvillisuuden päällä lämpöväreilyä ilmenee huomattavasti vähemmän, mikä tarkoittaa parempia mittaolosuhteita. Tästä saattaa olla erityisesti hyötyä tilanteissa joissa mitattava osuus on kaar-

teessa. Tällöin sijoittamalla koje oikeaan paikkaan kaarteiden sisäpuolelle mahdollistetaan mittausväiteen kulkeminen kasvillisuuden päällä tai ainakin pois pahimmalta ratasepelin alueelta.

Korkeuden siirrossa lämpöväireilystä aiheutuvia mittausvirheitä saadaan usein poissuljettua hyvällä suunnittelulla. Siirto voidaan usein suunnitella niin, että jalat sijoitetaan samalle puolelle rataa ja niin, että ratasepelin päällä kuljettava matka jää mahdollisimman pieneksi. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista ratapenkereen ja radan muodon vuoksi. Korkeuden siirrossa lämpöväireilyn vaikutuksen minimointiin käytettävä paras keino on kuitenkin juurikin mittausväiteisyys, jota opinnäytetyössä tutkittiin. Mittausväiteisyyttä lyhentämällä saadaan käytännössä aina tyydyttävät korkeuden siirto tulokset. Tämä saattaa usein johtaa siihen, että korkeuden siirtoja joudutaan tekemään useampi, jotta haluttuun sijaintitavoitteen päästään. Kun siirtojen määrä kasvaa, on tärkeää muistaa tehdä apupisteet jokaiselle kojeasemalla, jotta virheen sattuessa koje voidaan orientoida apupisteillä, eikä alusta aloittaminen ole välttämätöntä. Korkeuden siirron virheitä pienentää se, että mittaus suoritetaan usein keskiarvomittauksella ja pisteen mittaaminen useaan kertaan ennen tallentamista on mahdollista. Tällöin mittaja saa osviittaa lämpöväireilyn vaikutuksesta vertailemalla havaintojen koordinaattien eroja. Vaikka keskiarvo laskee virheen mahdollisuuksia, on koneen kalibroinnin merkitys korkeuden siirrossa jopa tavallista mittausta suurempi, sillä korkeutta siirrettäessä kojeasemalta toiselle kojeen kalibroinnin merkitys kasvaa siitä huolimatta, että uusi kojeasema mitataan kahdesta kojeasennosta.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn aiheen ja mittausten suorittamisen lähtökohtana oli saada selville raja-arvot etäisyyksille ja lämpötiloille, jossa lämpöväreilyn vaikutukset alkavat vaikuttaa liialti mittauksen luotettavuuteen. Odotusarvo oli se, että rajat olisivat olleet selkeästi havaittavissa ja johtopäätökseksi oltaisiin saatu selvät standardit, joiden mukaan toimia. Tämä oletamus ei kuitenkaan täysin toteutunut. Tuloksia analysoidessa huomattiin, että lämpöväreilyn vaikutus ei kasvanut lineaarisesti lämpötilan ja etäisyyden kasvaessa, vaan tulosten käyttäytyminen oli enemmän sattumanvaraista. Korkeuden siirtoa tarkasteltaessa tulokset käyttäytyivät säännöllisemmin ja selkeät kelikohtaiset rajat siirtoetäisyyksille saatiin määritettyä.

Ongelmana mittausten toteuttamisessa olivat säätilat. On lähes mahdotonta saada mittauskeli, jonka aikana säätila pysyy identtisenä koko mittauksen ajan. Lämpötila saattaa muuttua joitakin asteita, sekä mahdollinen pilvisuus vaikutti tuloksiin. Samoin tuuli oli eräs muuttuja, jonka vaikutusta oli mahdoton ennustaa tai ottaa huomioon. Havaittavissa kuitenkin oli, että tuulenvire laski lämpöväreilyn vaikutuksia. Myös yön lämpötila ja sitä kautta maaperän lämpötila lähtötilanteessa vaikuttivat tuloksiin. Mitatun rataosuuden profiili oli tasainen, sillä aloitus ja lopetuspisteen välisellä 300 metrin matkalla korkeus muuttui vain 26 senttiä. Todellisessa mittaustilanteessa radan profiili saattaa usein muuttua voimakkaammin, joten lämpöväreilyn vaikutus saattaa olla erilainen. Tämän tutkimiseen olisi vaadittu useampia mittauspaikkoja ja erilaisia radan profiileja. Takymetrin korkeutena käytettiin 170 senttimetriä. Takymetri sijaitsi jokaisessa mittauksessa samalla kohtaa ratapenkalla. Tämä tarkoittaa, että mittaussäteen etäisyys radan pinnasta oli jokaisella mittauskerralla sama. Usein mittaustilanteissa takymetri saatetaan joutua laittamaan myös lähemmäksi radan pintaa, jolloin lämpöväreily saattaa vaikuttaa voimakkaammin.

Mittauksen aikataulutusta ohjaili osaltaan Rovaniemi- Kemijärvi välinen junaliikenne. Kaikki mittaukset suoritettiin kyseisellä rataosalla. Työraot olivat suurpiirteisesti samat kaikkina arkipäivinä, joten mittausajankohdat määräytyivät tämän myötä samoihin kellonaikoihin. Tästä johtuen aina ei ollut mahdollista saavuttaa tulosten kannalta ihanteellisimpia mittausolosuhteita.

Haasteista huolimatta opinnäytetyössä päästiin tavoitteisiin. Tuloksissa saatiin selville tavoitellut asiat. Tämän lisäksi työssä pohdittiin lämpöväreilyyn vaikuttavia tekijöitä, sekä mittausteknisiä asioita. Näitä olivat esimerkiksi koneen tarkkuuteen vaikuttavat seikat sekä mittauksessa huomioon otettavat korjaukset, kuten säätälakorjaus.

LÄHTEET

Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos. Viitattu 5.10.2017

<https://www.jyu.fi/fysiikka/opiskelu/fysy180/fysy180/kangastus>.

Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. & Manner, O. 2008. Ilmakehä, Sää ja ilmasto. Keuruu; Kirjapaino Otava Oy.

Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Jyväskylä; Kopijyvä Oy.

Lehto, H., Havukainen, R., Maalampi, J. & Leskinen, J. 2012. Fysiikka 3, Aallot. Helsinki; Sanoma Pro Oy.

Leica geosystems Oy. Leica Viva Ts15 takymetrin tekniset tiedot. Viitattu 28.9.2017

http://www.leica-geosystems.fi/downloads123/zz/tps/Viva%20TS15/brochures-datasheet/Leica%20Viva%20TS15%20Datashet_fi.pdf.

Leica geosystems Oy. Prismojen tekniset tiedot. Viitattu 29.4.2017

http://www.leica-geosystems.fi/fi/Vakioprismat_84830.htm

http://www.leica-geosystems.fi/fi/Erikoisprismat_84832.htm.

Liikennevirasto 2010. Ratatekniset ohjeet Osa 2 Radan geometria. Viitattu

5.10.2017 https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lo_2010-03_rato_2_radan_geometria_web.pdf.

Liikennevirasto 2015. Raidegeometrian kunnossapito tukemalla ja

tukemiskalusto Suomen rataverkolla. Viitattu 5.10.2017

https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-23_raidegeometrian_kunnossapito_web.pdf.

Liikennevirasto 2004. Radan tarkastus. Viitattu 10.10.2017

https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rato_13_radan_tarkastus.pdf.

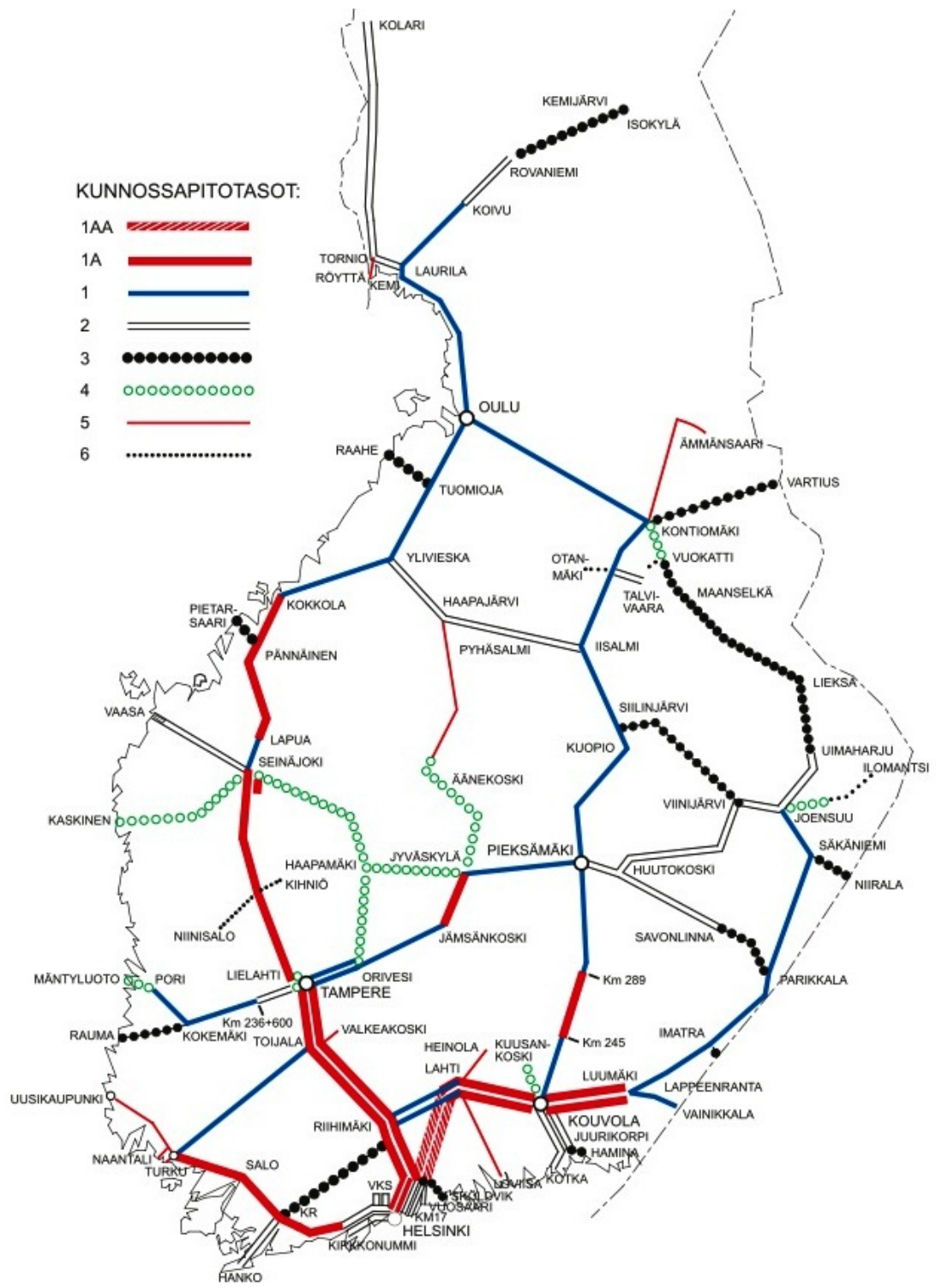
Peltonen, H., Perkkiö, J. & Vierinen, K. 2004. Insinöörin(AMK) Fysiikka osa 2.

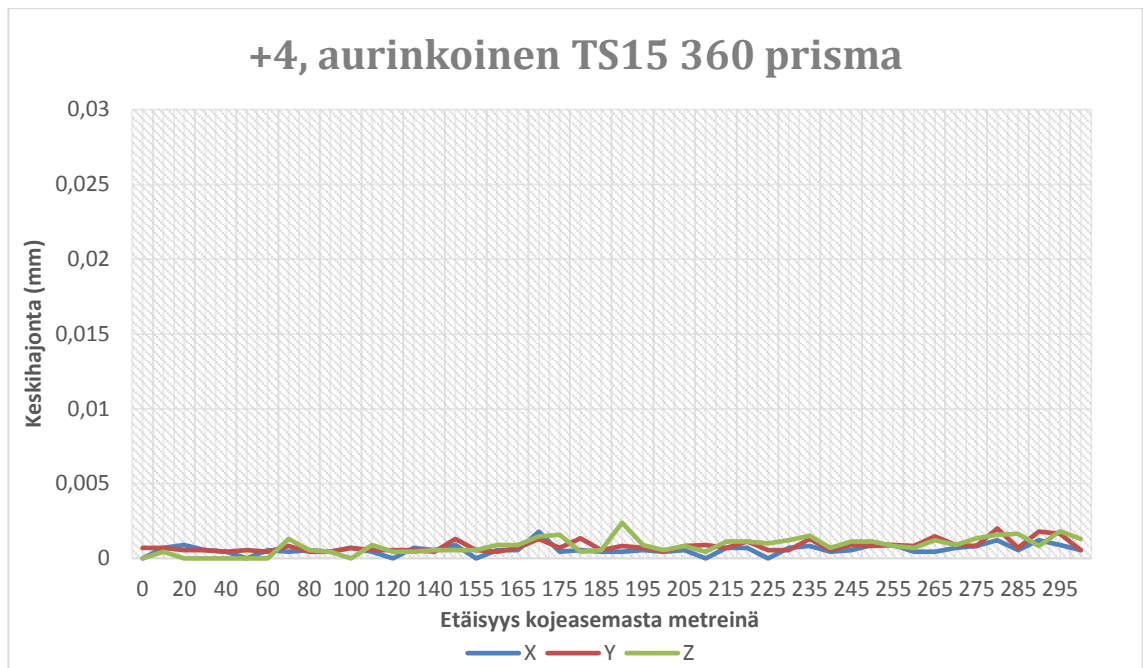
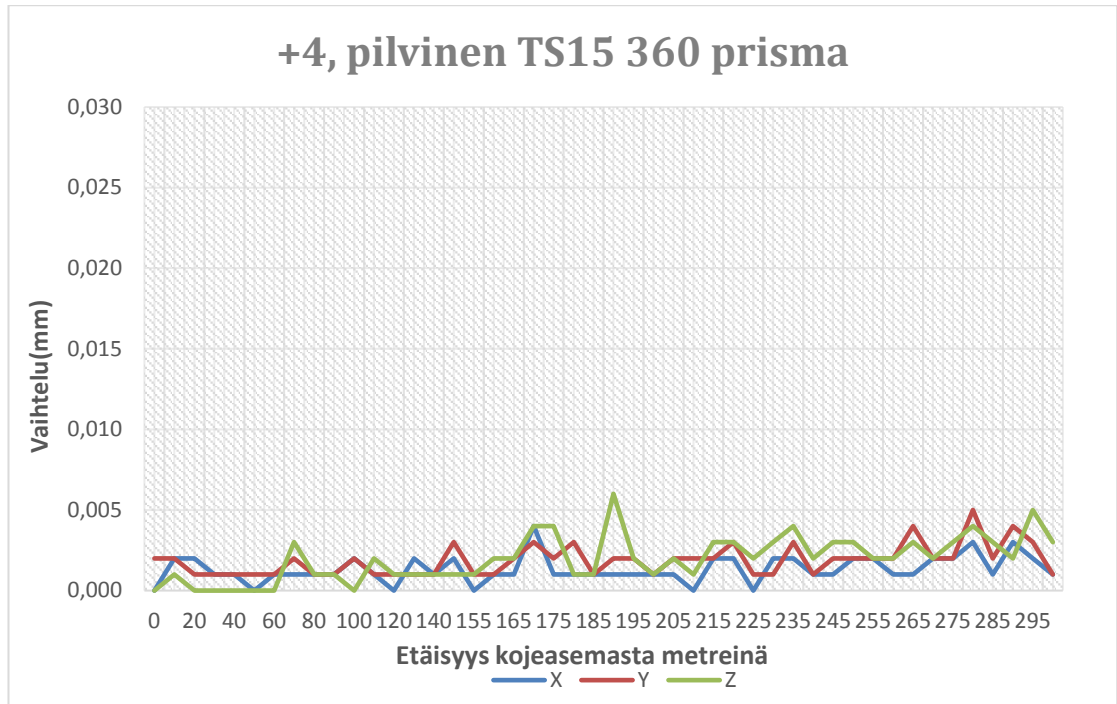
Saarijärvi; OFFSET Oy.

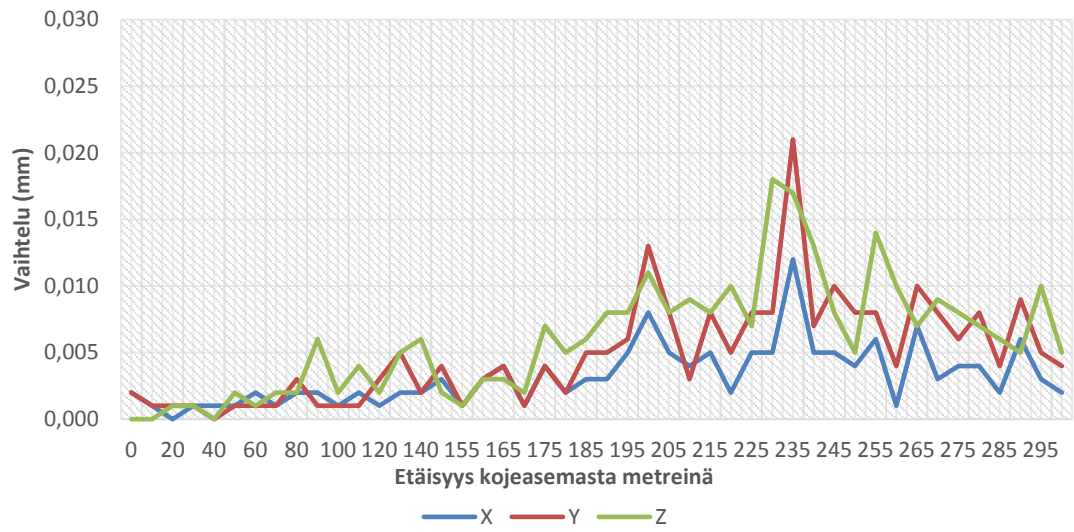
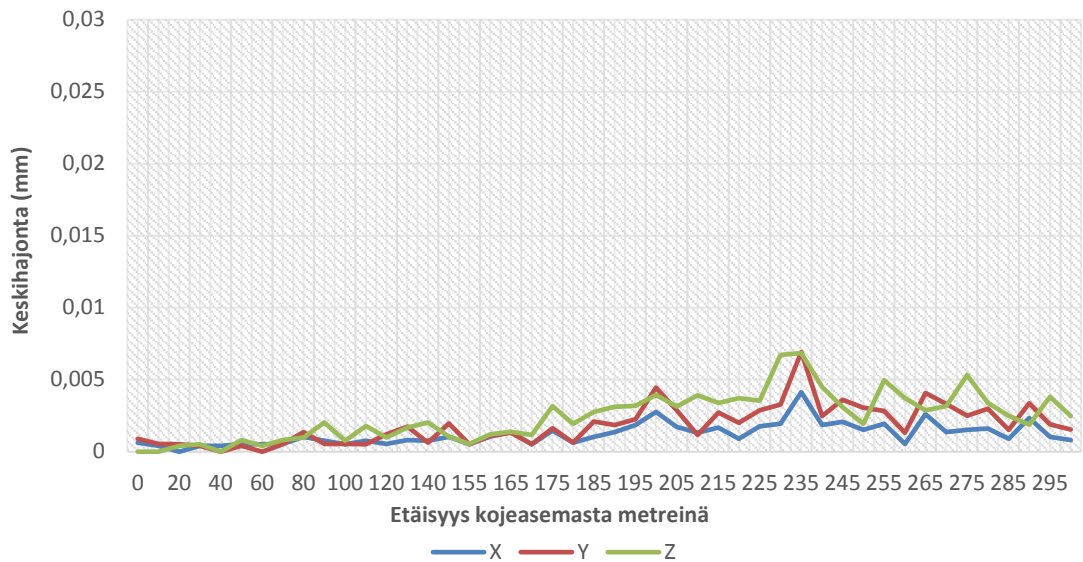
LIITTEET

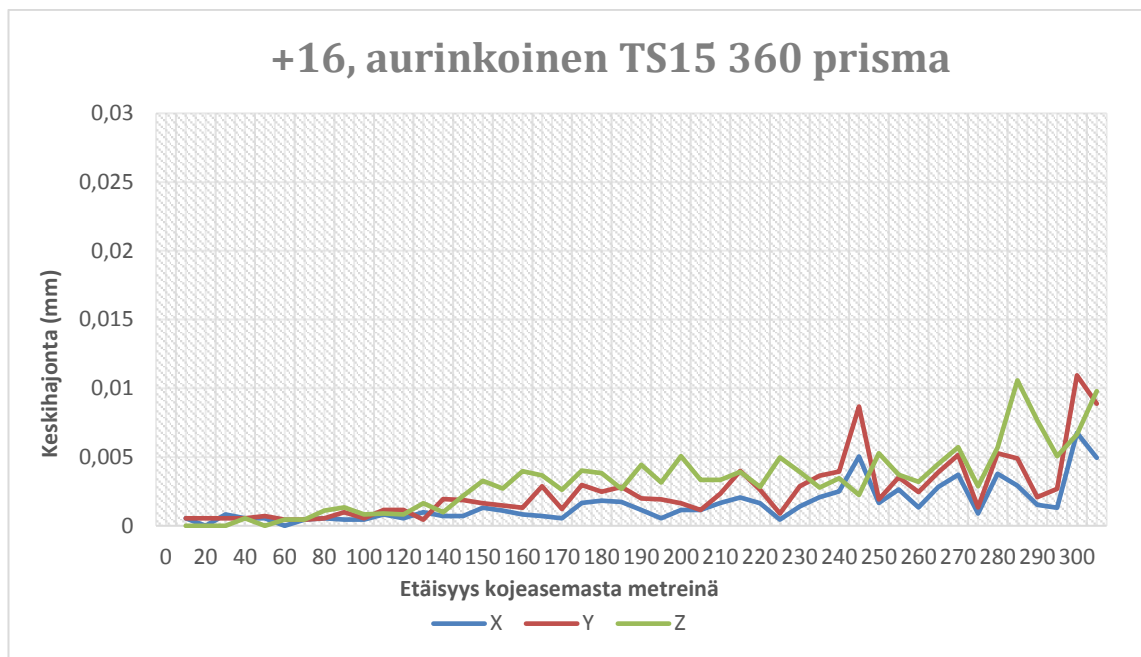
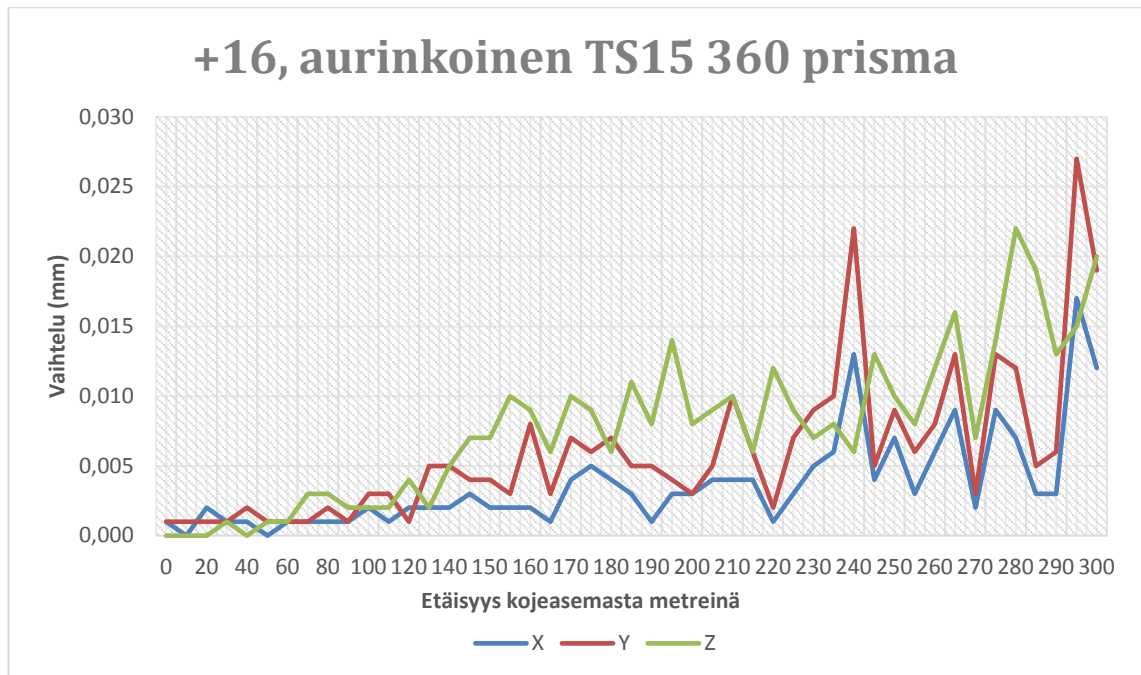
Liite 1. Suomen päärajojen kunnossapitotasot vuonna 2013. (Liikennevirasto 2015)

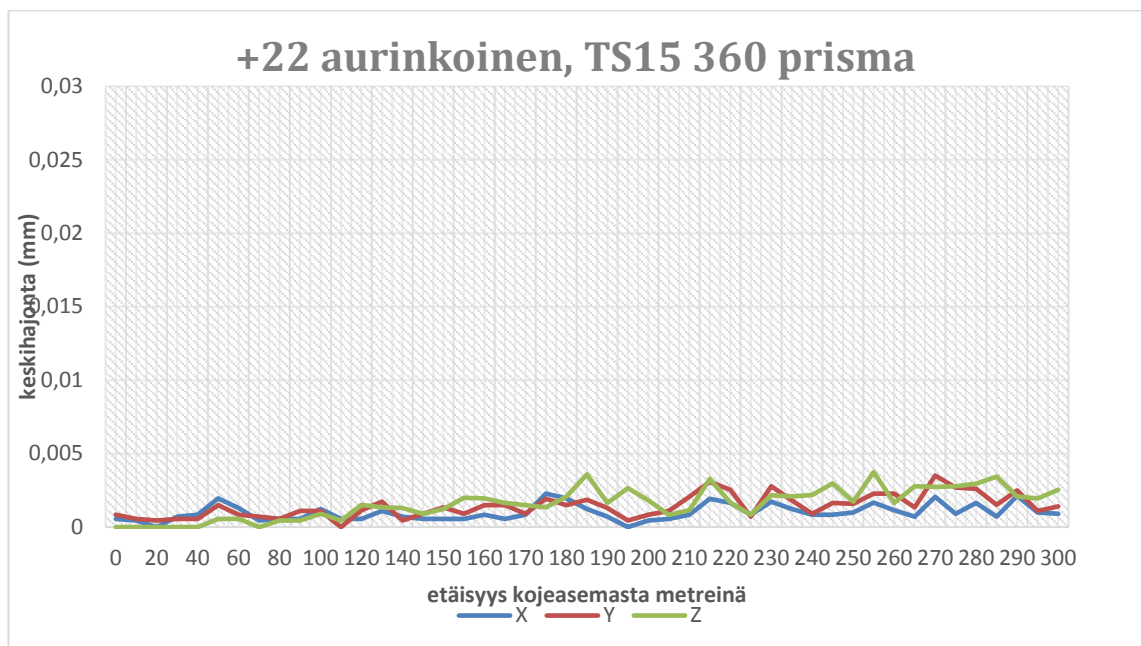
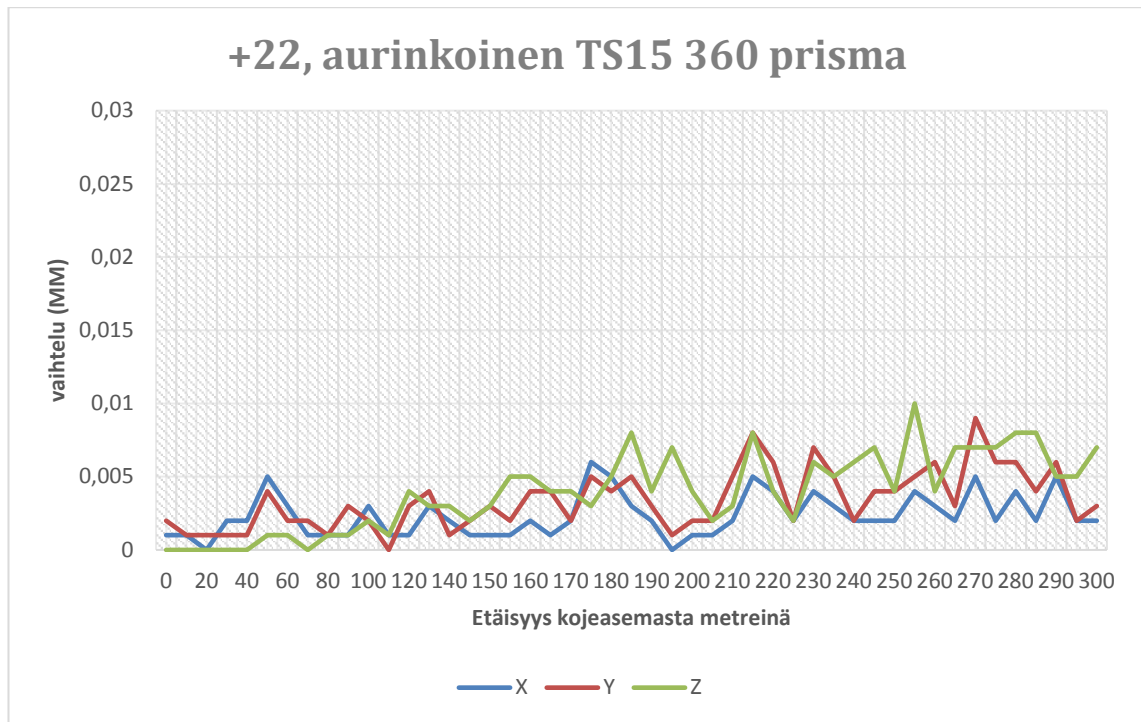
Liite 2. Taulukot mittaustuloksista.

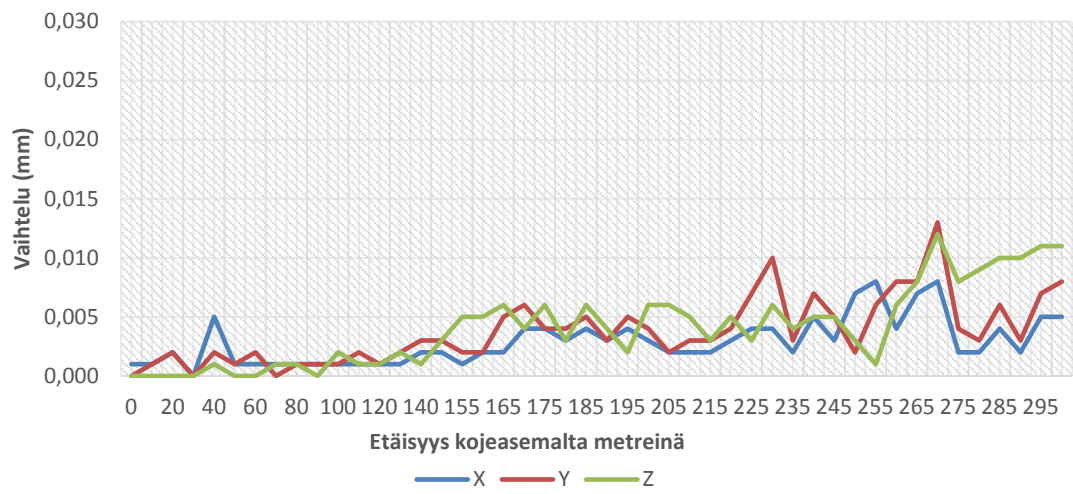
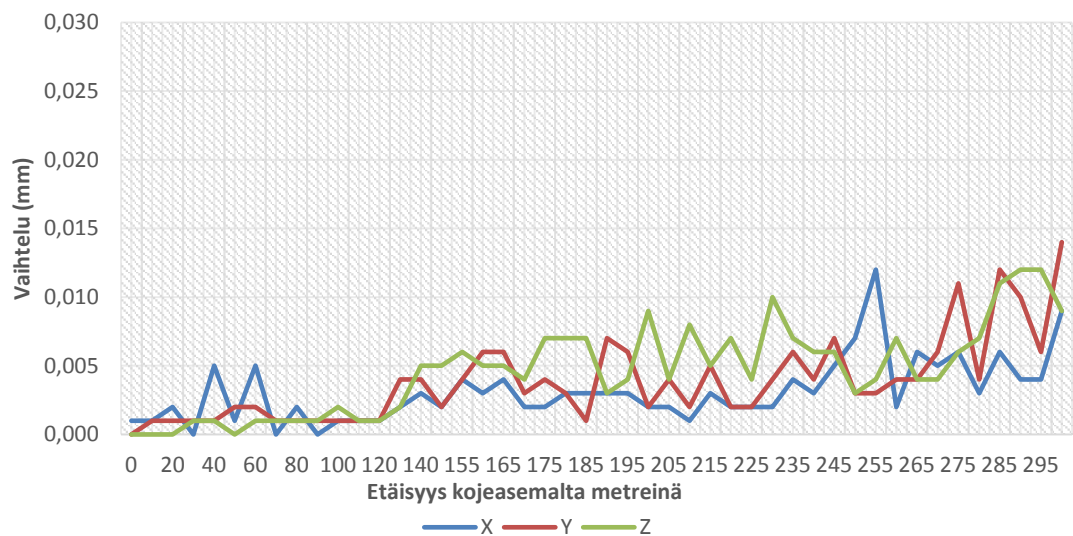


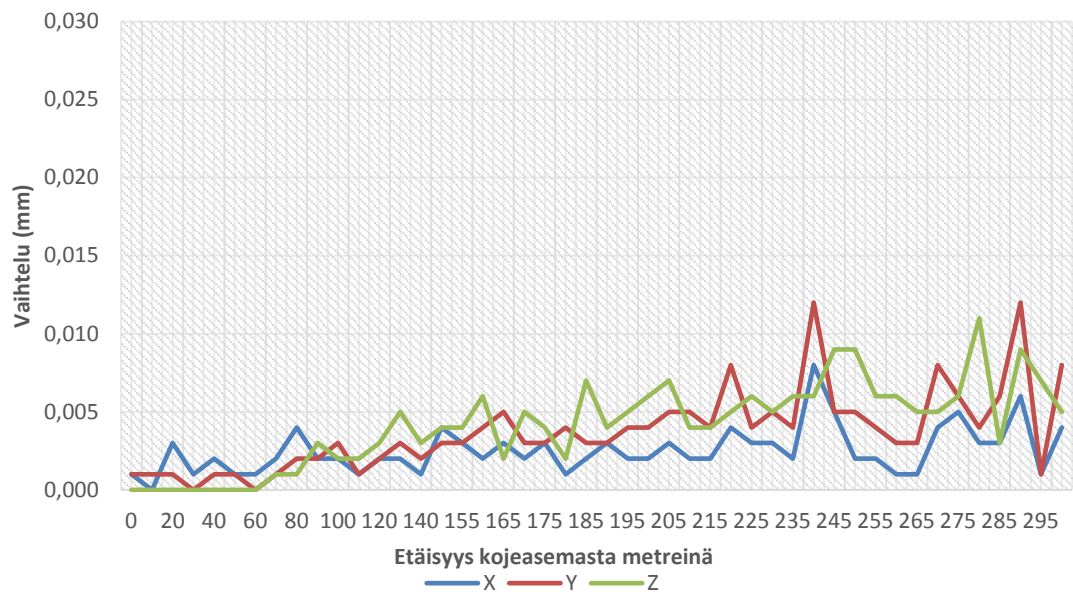
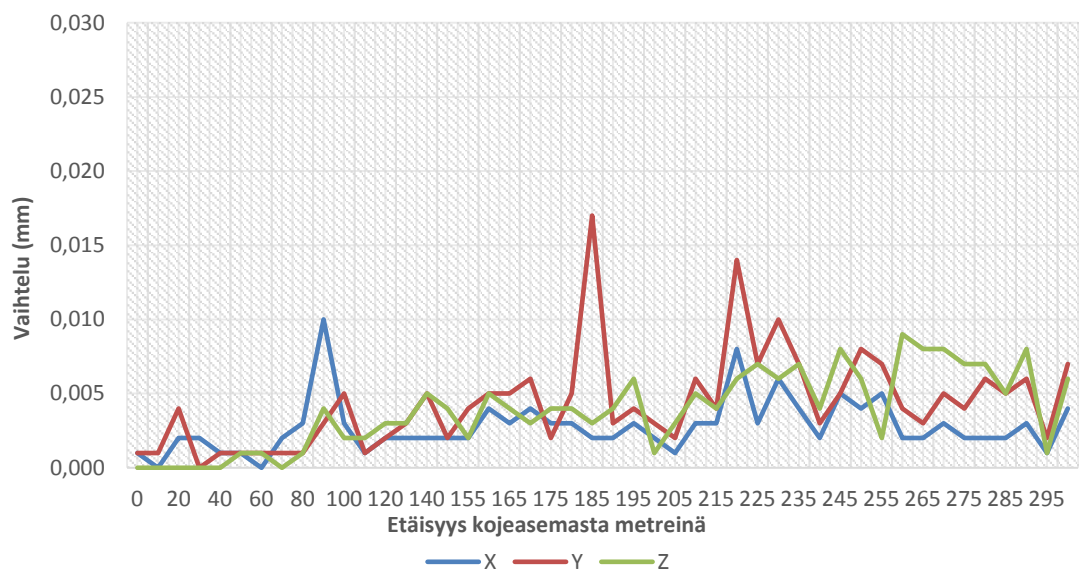


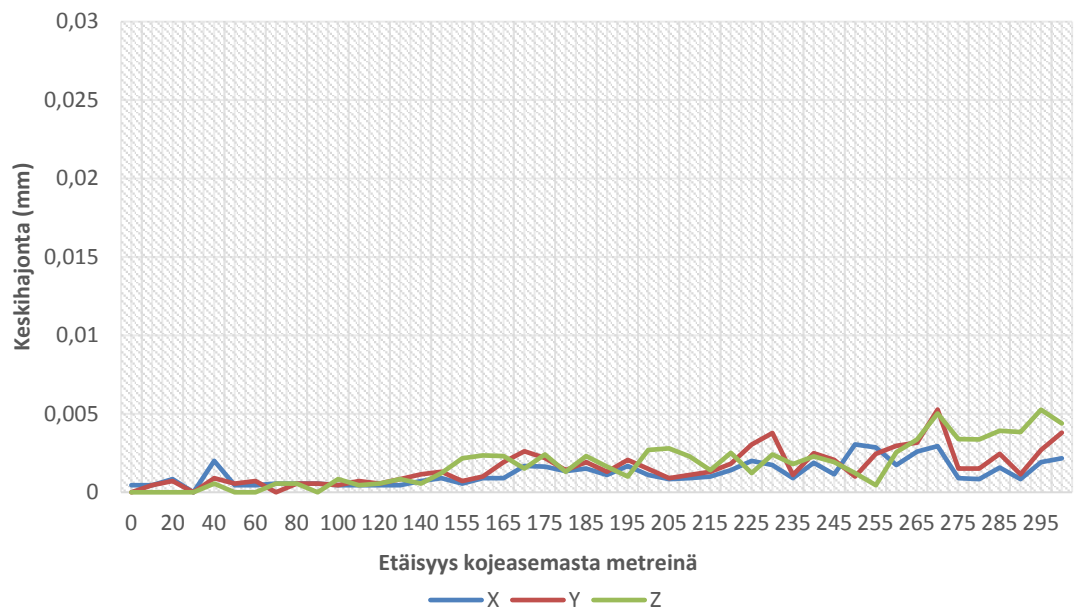
+8 aurinkoinen, TS15 360 prisma**+8 aurinkoinen, TS15 360 prisma**





+25, aurinkoinen TS15, 360 prisma**+25, aurinkoinen TS16 360 prisma**

+25, aurinkoinen TS15 pyöröprisma**+25, aurinkoinen TS16 pyöröprisma**

+25, aurinkoinen TS15 360 prisma**+25, aurinkoinen TS16 360 prisma**