



Koordinaattimittakoneen toisto- tarkkuus

Artur Ristola

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2023

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotantotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotantotekniikka

RISTOLA, ARTUR:
Koordinaattimittakoneen toistotarkkuus

Opinnäytetyö 44 sivua, joista liitteitä 6 sivua
Huhtikuu 2023

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Tampereen ammattikorkeakoulun tuotantotekniikan laboratorio. Työn tarkoituksena oli selvittää laboratoriossa olevan Mitutoyo CRYSTA Apex S 574 -koordinaattimittakoneen toistotarkkuutta ja laitteen asentojen ja mittakärkien vaikutusta tulostarkkuuteen ja toistettavuuteen. Koordinaattimittakone on kallis avainlaite yritykselle, joten sen tarkkuus on hyvä selvittää. Tehdyt mittaukset ovat näin ollen luotettavia, jolloin mittauspalveluita olisi mahdollista tarjota muualle. Olosuhteiden vaikutusta on hyvä selvittää, vaikka varmuutta vaikutuksen suuruudesta ei saataisikaan.

Toistotarkkuutta lähdettiin tutkimaan kahdella eri mittauksella: pituusmittauksella ja halkaisijamittauksella. Mittauksissa hyödynnettiin koko koordinaattimittakoneen repertuaaria eri asennoista eri mittakärkiin. Toistomittaamisen kannalta tärkeää on saada mittauksesta tarpeeksi toistoja. Tällöin saadaan suurempi tulostanta, joka tarjoaa paremman varmuuden mittauksesta. Eri mittausmenetelmillä saadaan tietoa siitä, vaikuttavatko ne mittaustuloksiin vai osaako mittakone kompensoida tulokset oikein. Lisäksi pohdittiin, miten mittausympäristö vaikutti tuloksiin ja voiko ympäristön yksityiskohtiin vaikuttaa tarkkuuden parantamiseksi.

Tuloksia analysoitiin käyttämällä keskihajontaa. Tulosten osalta voidaan todeta niiden olevan odotetun kaltaisia. Vaikeimmat mittaukset tuottivat hieman suurempaa hajontaa asentojen välillä, mutta kärkien välillä ei tuntunut olevan eroja tuloksissa. Hajonta kokonaisuudessaan oli todella pientä, mitä voi olettaa koordinaattimittakoneen kaltaiselta erittäin tarkalta mittavälineeltä. Lämpötilan teoreettinen vaikutus laskettiin, mutta sitä ei mitattu käytännössä.

Asiasanat: toistomittaaminen, koordinaattimittakone, keskihajonta

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Production Engineering

RISTOLA ARTUR:
Repetition Measurement of Coordinate Measuring Machine

Bachelor's thesis 44 pages, appendices 6 pages
April 2023

The purpose of this Bachelor's thesis, commissioned by the laboratory of production engineering at Tampere University of Applied Sciences, was to investigate the repeatability of the Mitutoyo CRYSTA Apex S 574 coordinate measuring machine, as well as the accuracy under different measuring positions and probes, and the impact of measurement conditions on accuracy.

The coordinate measuring machine is an expensive key device for the client, and its accuracy is crucial for providing reliable measurement services. The study conducted length and diameter measurements using the full range of the machine and different measuring probes, with enough repetitions to ensure better certainty and repeatability. The impact of measurement conditions on results were considered, and whether there was anything that could be done to the conditions to improve the accuracy of the results.

Standard deviation was used to analyze the results. The study found that more difficult measurements produced slightly higher variability between measuring positions, but there were no differences between results with different probes. The overall variability was very small, as expected from a highly accurate measuring machine. The theoretical effect of temperature was calculated, but not measured in practice.

Key words: repetition measurement, coordinate measuring machine, standard deviation

SISÄLLYS

| | | |
|---|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 2 | MITTAUSYMPÄRISTÖ | 8 |
| | 2.1 Mittahuone | 8 |
| | 2.2 Koordinaattimittakone | 8 |
| | 2.2.1 Ohjelmat | 10 |
| 3 | MITÄ ON MITTAAMINEN? | 11 |
| | 3.1 Metrologia | 11 |
| | 3.2 Teollinen mittaus | 11 |
| | 3.3 Mittaaminen | 12 |
| | 3.4 Koordinaattimittaus | 13 |
| | 3.5 Mittausvirhe | 14 |
| | 3.5.1 Systemaattinen virhe | 14 |
| | 3.5.2 Satunnainen virhe | 15 |
| | 3.5.3 Karkea virhe | 16 |
| | 3.5.4 Muut virheet | 16 |
| | 3.6 Mittausepävarmuus | 17 |
| | 3.6.1 Määrittäminen | 18 |
| | 3.6.2 Koordinaattimittakoneen oma mittausepävarmuus | 20 |
| | 3.7 Toistomittaus | 21 |
| | 3.8 Mittapalat | 22 |
| 4 | TOISTOMITTAAMINEN | 23 |
| | 4.1 Järjestelyt | 23 |
| | 4.2 Mittausmenetelmät | 23 |
| | 4.3 Pituusmittaus | 24 |
| | 4.3.1 Pituusmittauksen tulokset | 26 |
| | 4.4 Asetusrenkaan mittaus | 27 |
| | 4.4.1 Halkaisijamittauksen tulokset | 28 |
| 5 | TULOSTEN TARKASTELU | 30 |
| | 5.1 Tulosten esittely | 30 |
| | 5.2 Tuloksiin vaikuttavia tekijöitä | 33 |
| | 5.3 Yhteenveto | 35 |
| 6 | POHDINTA | 36 |
| | LÄHTEET | 38 |
| | LIITTEET | 39 |
| | Liite 1. Pituusmittaus tulokset | 39 |
| | Liite 2. Halkaisijamittaus tulokset | 40 |

| | |
|---|----|
| Liite 3. Pistemittaus koko matkalta..... | 41 |
| Liite 4. Skannaus koko matkalta | 42 |
| Liite 5. Pistemittaus sektoreittain | 43 |
| Liite 6. Skannaus sektoreittain | 44 |

LYHENTEET JA TERMIT

| | |
|-----|---|
| CAD | Computer Aided Design Tietokoneavusteinen suunnittelu |
| GPS | Global Positioning System Maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä |
| ISO | International Organization of Standardization Kansainvälinen standardoimisjärjestö |
| KMK | Koordinaattimittakone |
| SFS | Finnish Standards Assosiation Suomen standardisoimisliitto |

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tehtävänä oli selvittää Tampereen ammattikorkeakoululla sijaitsevan koordinaattimittakoneen toistotarkkuutta. Tämän lisäksi haluttiin selvittää, miten eri mittauksen aikana käytetyt mittakärjen asennot ja eri mittakärjet vaikuttavat mittaustuloksiin. Toistettavuus on tärkeä osa mittaamista. On yksi asia saada kerran mittaustulos, mutta saadun tuloksen todentaminen useampaan kertaan vaatii tarkkuutta ja aikaa. Tämän jälkeen voidaan vasta tehdä päätelmä mitä mittaustulos on ja millä varmuudella.

Aihe rajattiin toistomittaamiseen, sillä mittaukset suoritettiin yhdessä työparin kanssa, joka puolestaan teki oman opinnäytetyönsä koneen ja mittauksen mittausepävarmuudesta. Mittausjärjestelyn tarkoituksena oli helpottaa ruuhkaa kovassa käytössä olevan koordinaattimittakoneen luona, sekä mahdollisti yhdessä suunnittelun mittauksen järjestelyihin.

Työ aloitettiin keräämällä tarvittavaa materiaalia TAMKin kirjastosta sekä internetistä ja perehtymällä annettuun aiheeseen. Tulevassa raportissa käydään asiat järjestyksessä, jossa aluksi käydään läpi mittausympäristö sekä laitteisto, jonka jälkeen teoriaosuudessa käydään läpi mittauksen kannalta tärkeät teoriat ja kaavat. Teorian jälkeen kerrotaan toistomittaamisesta ja sen toteutuksesta tässä opinnäytetyössä. Lopuksi käydään läpi vielä mittaustulokset sekä mitä niistä voidaan päätellä ja mitkä asiat niihin vaikuttivat.

2 MITTAUSYMPÄRISTÖ

2.1 Mittahuone

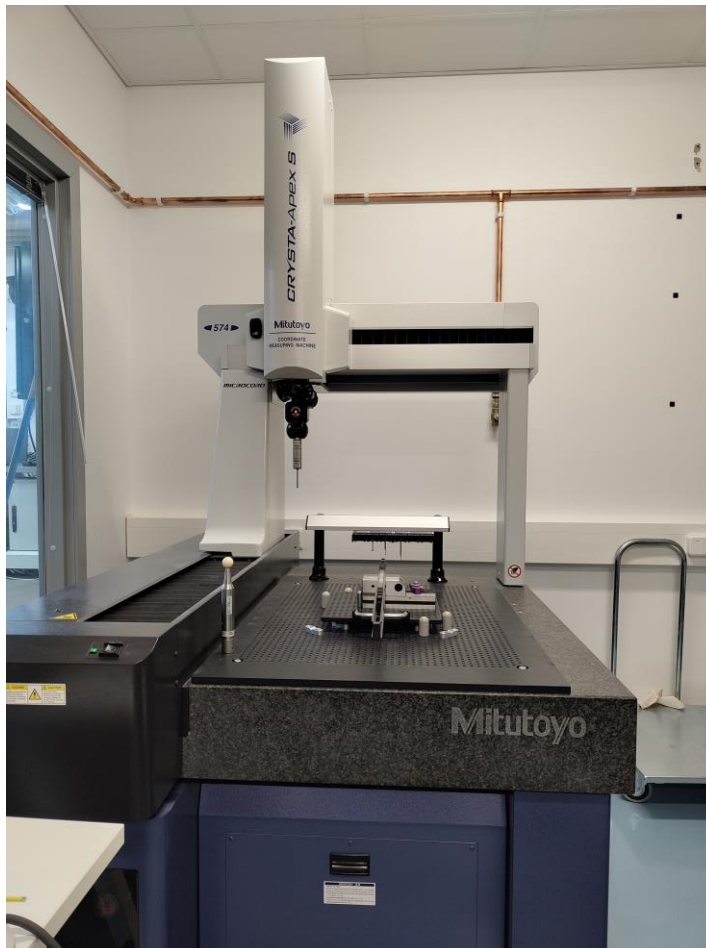
Mittausympäristönä työssä tullaan hyödyntämään Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) laboratoriotilaa, jossa on oma huone mittausvälineistölle. Mittaus-tila on noin 20 m², tila on suhteellisen ahdas, koska tilaa vievät suuret kaapistot ja pöytätilat, sekä tietenkin koordinaattimittalaite ja siihen kytköksissä oleva tietokone.

Mittausympäristö ei ole paras mahdollinen toleroinnin kannalta, huone ei sisällä ilmastointia, joten lämpötilakontrollia ei voida taata. Lisäksi tilasta puuttuu tarvittava kalusto lämpötilan seuraamiseen, tarkkailuun ja dokumentointiin. Lämpötilaan vaikuttivat suuresti ympäröivät olosuhteet sekä tilassa työskentelevien ihmisten määrä. Ilmankosteutta on hankala seurata tai toleroida myös samasta syystä. Suositeltu suhteellinen kosteusprosentti mittahuoneelle on 35–55 %. Alaraja perustuu muun muassa pölyn sitomiseen ja esimerkiksi muovien ja puun muuttumiseen eri kosteudessa. Ylärajaa perustellaan raudan ruostumisen riskillä yli annetulla kosteusarvolla. (Esala, Lehto ja Tikka 2003, 19.)

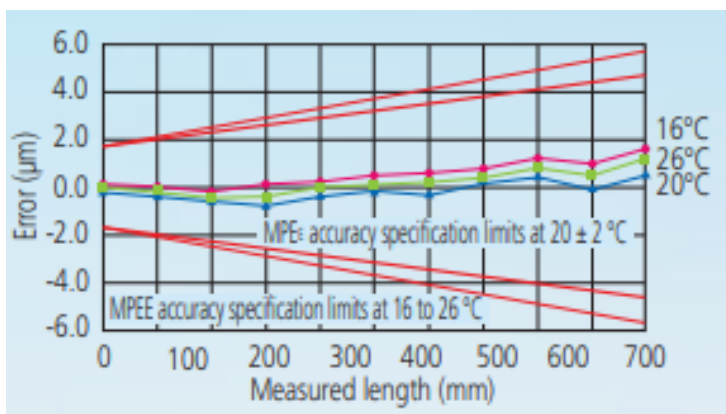
2.2 Koordinaattimittakone

Mittakoneena työssä käytetään Mitutoyon CRYSTA-Apex S 574 siltatyypistä koordinaattimittauskonetta (kuva 1). Valmistaja on myöhemmin päivittänyt käytössä olevan S-malliston uudempaan V-mallistoon. KMK on todella tarkka numeerisesti ohjattu mittalaite, joka voi mitata kappaleen millimetrin kymmenestuhannesosan tarkkuudella (0,0001 mm). Mittakoneelle on määritetty valmistajan puolesta mittausepävarmuusarvo eri lämpötilaympäristöille. Koneessa on lämpötilan kompensointijärjestelmä, joka takaa lämpölaajenemisen kompensoinnin 16–26 °C välillä. Tämäkään järjestelmä ei ole täydellinen ja siinä löytyy myös pientä hajontaa, kuten Mitutoyon grafiikka näyttää (kuvio 1). Lämpötilan kasvaessa, hajonta kasvaa. Mittapöytä on kompakti (400x700 mm), joka sopii hyvin koulun koe- ja harjoituskäyttöön pienille kappaleille. Mittakoneella on nopea suorittaa toistomittauksia, sekä mitata monia eri mittoja samalla, mutta kappaleiden kiinnitys ja

vaihto vie enemmän aikaa kuin perinteisillä mittavälineillä. Tästä syystä koordinaattimittalaitteet ovat yleistyneet suuresti teollisuudessa 2000-luvulla. Koordinaattimittalaite on kallis avainlaite yritykselle, mutta josta syntyy valtavat hyödyt tarkkuuden parantamisen kannalta. Käytössä olevassa mittakoneessa on vain mekaanisia mittakärkiä makasiinissa. (Mitutoyo [1] n.d, [2] n.d, 1, 3; Tikka 2009, 16, 25–26, 45.)



KUVA 1. Mitutoyo CRYSTA Apex S 574 koordinaattimittakone.



KUVIO 1. Lämpötilan kompensoinnin hajonta (Mitutoyo [2], n.d, 1).

Mittakoneella on käytössä neljä eri mekaanista mittakärkeä, joiden erot liittyvät varren pituuteen ja mittapään suuruuteen. Kärjet on järjestetty telineeseen ja nimetty numeroiden 1–4 paikan mukaan (kuva 2).



KUVA 2. Mittakärkien teline.

2.2.1 Ohjelmat

Koordinaattimittakoneen vieressä on siihen kytketty tietokone, joka kerää ja analysoi mitattavan datan eri ohjelmien avulla. Perusohjelmisto, jota käytetään, on nimeltään MCOSMOS. MCOSMOS pitää sisällään kaikki perustoiminnot, joita tarvitaan koordinaattimittaamiseen kuten kappaleen määrittämiseen ja mittaamisen liittyvät asiat. Perusohjelmiston lisäksi löytyy lisäohjelmia, joilla voidaan helpottaa ja nopeuttaa työskentelyä. Näistä esimerkkinä löytyy MiCat Planner. Plannerilla pystytään ottamaan valmis CAD-malli kappaleesta ja kiinnityksistä, tuomaan se ohjelman sisään ja tämän avulla voi helposti määrittää mittauksen turvarajoja sekä mitattavia kohtia kappaleesta. (Mitutoyo [3], [4], n.d.)

3 MITÄ ON MITTAAMINEN?

3.1 Metrologia

Metrologia on tieteenala, joka kuvaa mittaamista ja sen soveltamista. Metrologiaan sisältyy kaikki mikä liittyy mittaukseen teoriassa ja käytännössä. Riippumatta soveltamisalasta, mittausepävarmuudesta ja sen tekijöistä. (SFS-opas 99, 28). Oikeanlaiset mittaukset ja sovitut mittayksiköt ovat olennaisessa osassa tieteellisiä ja teknisiä mittauksia tehdessä. Ne parantavat yleistä tarkkuutta ja luovat luotamusta laatuun. Tieteellinen metrologia on kiinnostunut mittayksiköiden vakiinnuttamisesta ja uusien mittaustietojen kehittämistä, standardien vakiinnuttamisesta ja jäljitettävyydestä. Teollinen metrologia on kiinnostunut tuottamaan mahdollisimman tarkkoja tuotteita, joita sen hetkinen tieteellinen metrologia pystyy takaamaan. (Metrology Asian Pacific n.d.)

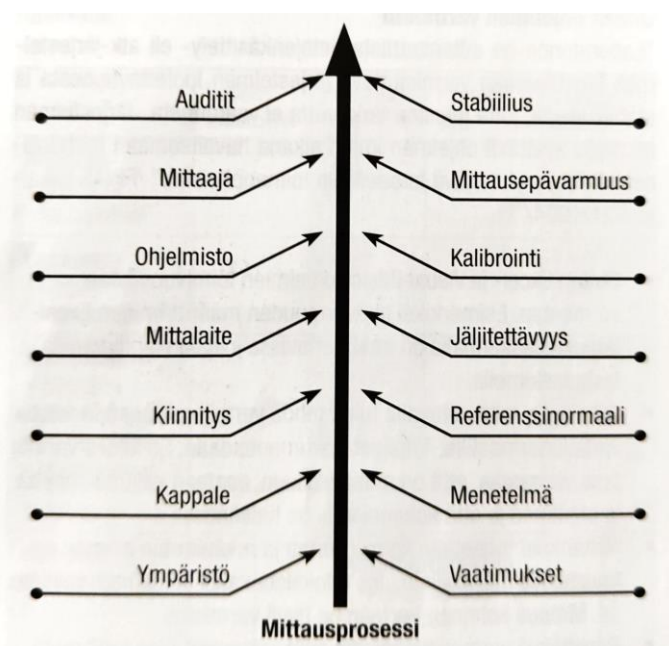
3.2 Teollinen mittaus

Mittaamista harrastetaan niin arkielämässä, kuin teollisuudessaakin päivittäin. Mittaamisella varmistetaan, että saavutettu lopputulos on suunnitelman mukainen. Samalla selvitetään, onko lopputuloksessa korjattavaa ja kuinka paljon. Luotettavan mittatuloksen saamiseksi täytyy ottaa huomioon kaikki mahdolliset seikat, silloinkin mittatulos on parhaimmillaan likiarvo. Pahimmillaan on mahdollista, että väärin tehty mittaus johtaa virheelliseen päätelmään, jolloin vaikutukset voivat pahimmillaan olla korvaamattomat. (Keinänen & Järvinen 2014, 9.)

Yleisiä teollisuudessa käytettyjä mittalaitteita ovat työntömitta ja mikrometri. Perinteisen työntömitan tarkkuusalue on noin 0,05 mm:n tarkkuus. Sitä käytetään yleisesti määrittämään pituusmittoja, kuten sisä-, ulko- ja syvyysmittoja. (Keinänen & Järvinen 2014, 55.) Mikrometrejä on usean tyylinen, yleisimmät ovat: ulko- eli kaarimikrometrit, sisä- eli kaksi- tai kolmepistemikrometrit ja syvyysmikrometrit. Mikrometrin tarkkuusalue on yleensä 0,01 mm luokkaa. (Keinänen & Järvinen 2014, 63.) Tästä tarkemman tuloksen saamiseksi käytetään koordinaattimittakoneita, jonka tarkkuusalue on 0,0001 mm luokkaa (Mitutoyo [2], n.d, 3).

3.3 Mittaaminen

Mittaamista voidaan luonnehtia hyvinkin prosessiksi. Lukuiset tekijät, joita on esitelty kuviossa 2, vaikuttavat mittauksen tulokseen, virheeseen ja epävarmuuteen. Usein mittauksia tehdessä joudutaan tyytymään kompromisseihin, koska optimaalinen tapa tehdä mittaus on usein epärealistinen olosuhteiden tai budjetin kannalta. Ihanteellista olisi, jos mittaustapahtumaa voitaisiin kehittää jatkuvalla periaatteella. Täten mittatarkkuus kasvaisi ja vähennettäisiin virheiden systemaattisia aiheuttajia sekä pienennettäisiin epävarmuutta. (Esala ym. 2003, 32.)



KUVIO 2. Mittausprosessi ja sen osatekijöitä (Esala ym. 2003, 32).

Mittausten kirjallinen ohjeistaminen on tärkeää, sillä jokaisella tekijällä on oma tyylinsä, jolloin sanalliset ohjeet vaihtelevat ohjeistajan mukaan. Kirjoitettu ohje toimii mittausohjeena, josta unohtuneen tai epäselvän asian voi tarkistaa milloin vain. Se toimii myös hyvin koulutusmateriaalina uusille mittaajille, sekä sitä voi tarvittaessa näyttää asiakkaille tai arvioijille. Lisäksi siitä saa perustan mittausepävarmuuden määrittämiselle. Valmiita mittausohjeita löytyy laajasti, jos ei ole tarvetta tehdä omaa. Usein parhaimman lopputuloksen saa muokkaamalla olemassa olevaa ohjetta omaan tarkoitukseen. On hyvä, jos kirjallinen ohjeistus elää mittauksen ohessa ja kehittyy paremmin sitä palvelevaksi. (Esala ym. 2003, 32.)

3.4 Koordinaattimittaus

Lyhyesti koordinaattimittauksella tarkoitetaan koordinaattipisteiden etsimistä ja määrittämistä avaruudesta. Koordinaattimittakoneella määritetään, joko optista tai mekaanista anturia hyödyntäen, pisteiden sijainti tasolla tai avaruudessa. Pisteitä tarkastelemalla saadaan kappaleesta tarkasti haluttuja ominaisuuksia. (Tikka 2009, 16, 25.)

Mittakoneita on monenlaisia ja ne vaihtelevat täysin käsikäyttöisistä, moottoroi-
tuun ja täysin automaattisiin, numeerisesti ohjattuihin mittakoneisiin. Käsikäyttöi-
set ovat hintansa puolesta yleisimmät, mittalaite vaatii kuitenkin vierelle aina vä-
hintään yhden työntekijän. Myöskin sen käyttö on fyysisesti raskasta, joka voi
vaikuttaa negatiivisesti mittatuloksiin. Moottorilla ohjattu koordinaattimittakone
helpottaa monella tapaa mittaamista ja mittatarkkuutta. Täten inhimillisen virheen
osuus pienenee, lisäksi voidaan lisätä tietokone analysoimaan dataa. Numeeri-
sesti ohjatut mittakoneet mahdollistavat täysin automaattisen mittaamisen. (Tikka
2009, 25, 45.)

Kappaleen geometria muodostetaan yksittäisistä mittapisteistä, joita yhdistä-
mällä saadaan tarkka kuva kappaleen muodosta. Mittauksen pääkomponentit
ovat itse kone ja sillä tehtävät koordinaattiakseliston liike, mittauspää, tietokone,
joka hallitsee mittaohjelmiston laskennan ja jatkokäsittelyn sekä mitattava kap-
pale. Kone liikuttaa mitta-anturia, jotta tuloksia voidaan kerätä ja analysoida,
usein tarvitaan tietokone, mittausohjelmisto, sekä työkappaleelle tehty mittaoh-
jelma. Koordinaattimittakone tuottaa vain tietoa koordinaattipisteistä, tietokone ja
siinä pyörivä ohjelmisto analysoi mittakoneen tuottaman tiedon ja yhdistää sen
ymmärrettävään muotoon. Tämä data sisältää tietoa mitatun kappaleen mitoista
ja muodosta. (Anderson & Tikka 1997, 227; Tikka 2009, 25, 45.)

Mittauspäällä on suuri vaikutus koordinaattimittakoneen tuottamaan mittausepä-
varmuuteen ja toistotarkkuuteen. Mittausanturi tarkoittaa laitetta, joka antaa sig-
naalin pisteen rekisteröinnistä, kärjen kosketushetkellä. Mittakärki tarkoittaa
usein lieriömäistä vartta, jonka kärjessä on usein rubiinipallo. Edellä mainitun an-
turin ja mittakärjen yhdistelmää kutsutaan mittapääksi. Mittakärkiä voi yhdistellä

toisiinsa eri menetelmin, mutta yhdistelmän yksinkertaisuus ja keveys mahdollistaa tarkimmat mittaustulokset. (Tikka 2009, 106–107.)

3.5 Mittausvirhe

Mittauksia on mahdoton tehdä absoluuttisen varmasti. Jokainen tulos sisältää mittavirhettä, sillä käytettävistä menetelmistä ja tekijöistä syntyy aina jonkin suuruista virhettä. Tästä ei voida kuitenkaan päätellä, että mittaustulos olisi aina virheellinen. Yleisimpiä asioita, jotka vaikuttavat virheen syntymiseen ovat muun muassa mittaja, mitattava kohde, mittauslaite ja mittaustapa. Mittausvirheellä tarkoitetaan mitattavan kappaleen tai suureen todellisen ja mitatun arvon eroa. Toistomittauksia tekemällä voidaan mittavirheen suuruudelle antaa arvio. Yleensä mittavirheet jaotellaan kolmeen luokkaan: systemaattinen, satunnainen ja karkea virhe. (Andersson & Tikka 1997, 127; Keinänen & Järvinen 2014, 95.)

3.5.1 Systemaattinen virhe

Systemaattinen virhe on se mittausvirheen osa, joka pysyy mittausten aikana vakiona tai sen suuruutta voidaan ennustaa tarkasti. Systemaattiset virheet seuraavat säännönmukaisuuksia, jolloin ne voidaan mittauksen eri vaiheissa laskea matemaattisesti. Systemaattiselle virheelle ominaista on, että virheen suuruus voidaan poistaa kalibroimalla mittalaite standardiin. Tällaisia virheitä voi olla esimerkiksi mittalaitteesta syntyvä virhe, jossa lämpötila voi vääristää mittalaitetta verrattuna kalibroituun lämpötilaan. Mittaustulos voi usein sisältää monia systemaattisen virheen lähteitä. Ne voivat olla toisensa suhteen saman- tai vastakkaissuuntaisia, jolloin vastakkaissuuntaiset kumoavat toisensa. Efektiivinen systemaattinen virhe lasketaan kaikki mittauksen systemaattiset virheet keskenään etumerkit huomioiden.

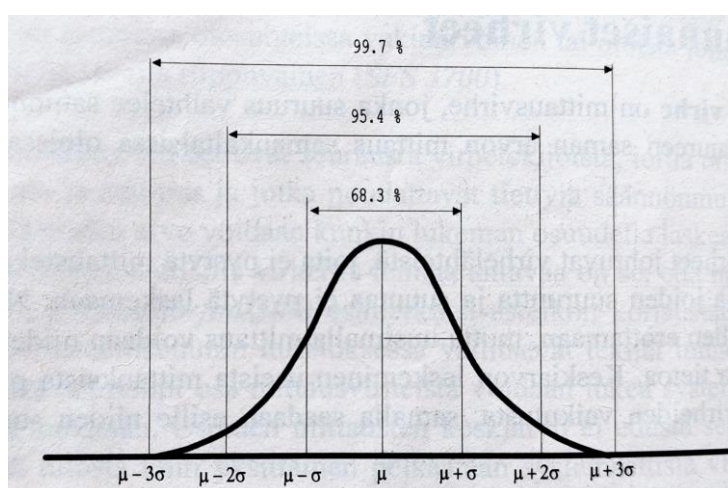
$$\Delta s = \sum s_i \quad (1)$$

Jossa s_i on systemaattinen virhe. (Andersson & Tikka 1997, 128; Keinänen & Järvinen 2014, 95.)

3.5.2 Satunnainen virhe

Satunnainen virhe on mittausvirheen osa, jonka suuruutta ei voida ennustaa mitausten välillä (SFS-opas 99, 33). Vaikka satunnaisia virheitä ei voi erottaa toisistaan, sen suuruudesta kokonaisuudessaan voidaan saada tietoa toistamalla mitaus useampaan kertaan. Satunnaisvirhe saattaa myös hävitä, kun mitaus toistetaan tarpeeksi monta kertaa (eri suuntaiset virheet kumoavat toisensa). Usein saadaan parempi käsitys satunnaisesta virheestä tutkimalla sitä graafisesti. Satunnainen virhe pitää sisällään myös ne systemaattiset virheet, joita ei laskennallisesti voida määrittää, jolloin niitä ei voida myöskään korjata kalibroinnilla. (Andersson & Tikka 1997, 129; Keinänen & Järvinen 2014, 95.)

Kuviossa 3 on esitelty miltä normaalisti jakautunut kuvaaja tulee näyttämään ja miten mittapisteet tulevat järjestymään satunnaisvirhettä mitattaessa. Käyrän määrittämisessä hyödynnetään keskiarvoa sekä keskihajontaa. Kuviossa 3 μ kuvaa keskiarvoa ja σ keskihajontaa. Kattavuuskerroin k , jota käytetään mitausepävarmuuden yhteydessä, on välttämätön. Kattavuuskerroin kuvastaa käytännössä kuinka suurella todennäköisyydellä esitetty tulos on totta. Kattavuuskerroin on esitetty kuviossa 3 prosenttiosuuksina normaalikuvaajasta. Jossa kattavuuskerroin $k=1$ on 68,3 %, $k=2$ on 95,4 % ja $k=3$ on 99,7 %. (Anderson & Tikka 1997, 130; Esala ym. 2003, 56.)



KUVIO 3. Normaalisti jakautuneen mittauksen kuvaaja. (Anderson & Tikka 1997, 130.)

3.5.3 Karkea virhe

Karkeat virheet pitävät sisällään kaikki tahattomat lipsautukset, joita mittaus-työssä tapahtuu silloin tällöin. Tällaiset virheet pyritään yleensä hylkäämään mit-tauksesta ja uusimaan tarvittaessa mittaus. Karkean virheen suuruusluokka vaih-telee, mutta voi olla moninkertainen aiemmin mainittuihin verrattuna. Yleisimpiä karkean virheen aiheuttajia ovat huolimattomuudesta johtuvat: väärin mittaus-menetelmien käyttö, mitta-asteikon väärin lukeminen ja virhelähteiden huomio-matta jättäminen. Huomioitavaa on, että mittapistettä ei sovi hylätä, jos mittaja ei tiedä, mistä erikoinen mittavirhe on syntynyt. (Andersson & Tikka 1997, 130; Keinänen & Järvinen 2014, 95.)

3.5.4 Muut virheet

Muita vartenotettavia mittavirheen aiheuttajia voi olla muun muassa lämpöti-lasta, voimista tai virheellisistä mittausasunnoista johtuva virhe. Yleensä mittauk-set pyritään suorittamaan standardoiduissa tiloissa, jossa ulkoiset olosuhteet py-syvät lähellä vakiota. Kaikkiällä tämä ei ole mahdollista, joten esimerkiksi lämpö-tilan vaihtelu saattaa aiheuttaa huomattavaa virhettä. Lämpölaajenemisesta joh-tuvan virheen voidaan laskea tarkasti, jos on tiedossa kappaleen ja mittavälineen lämpölaajenemiskerroin ja niiden lämpötilat. Kappaleen pituus L_t lämpötilassa t_k °C on

$$L_t = L_{20}(1 + \alpha_k (t_k - 20)) \quad (2)$$

Jossa L_{20} on kappaleen pituus 20 °C

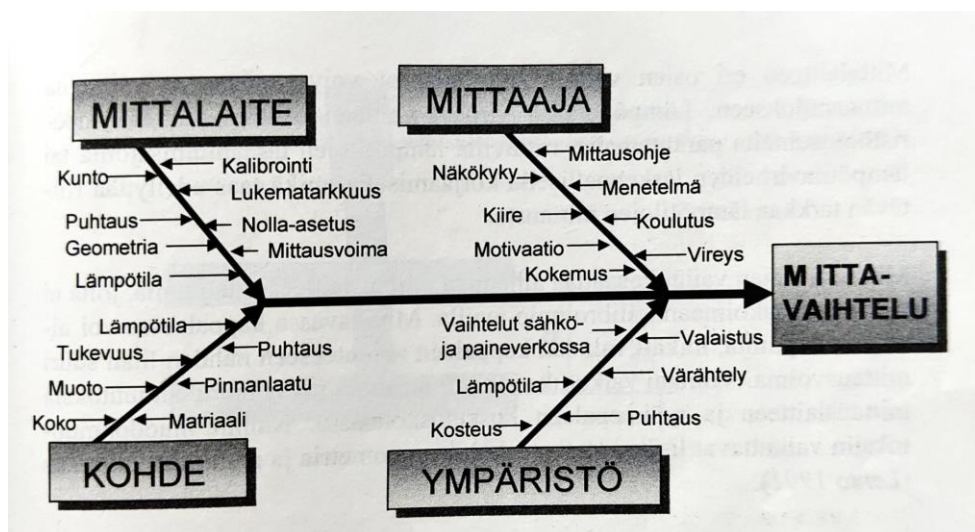
α_k on kappaleen lämpölaajenemiskerroin

Pitkiä kappaleita mitatessa saattaa syntyä taipumaa, jonka voi aiheuttaa kappaleen oma paino, jos kappale on tuettu huonosti esimerkiksi pelkästään päistä tai vain keskeltä. Näitä käsitellään usein systemaattisina, koska ne voidaan laskea matemaattisesti, mutta ongelman aiheuttaa se, että nämä voimat ovat usein tuntemattomia. (Andersson & Tikka 1997, 130–137).

3.6 Mittausepävarmuus

Mittausepävarmuudella kuvataan arviota siitä, kuinka suuri mittavirhe voi olla. Mittaustulos ei ole koskaan täysin oikein, vaan arvio mitatusta arvosta. Mittaustuloksia ja kalibrointeja esitettäessä tulee tulokseen liittää mittauksen epävarmuus. Se on siis mittaukseen liittyvä parametri, jolla kuvataan mittaukseen liittyvien arvojen mahdollista vaihtelua. (Keinänen & Järvinen 2014, 98.)

Yleinen virhe, joka mittaustulosten tarkastelussa sattuu, on mittatuloksen automaattinen hyväksyminen, jos mittatulos on toleranssialueella. Mittaustuloksen on mahdollista toleranssialueelle mittausepävarmuus huomioituna, joten se pienentää käytössä olevaa toleranssirajaa. Jotta voidaan tietää mittausepävarmuudesta mitään, vaatii se hyvää ymmärtämistä epävarmuuden aiheuttajista. Siihen tarvitaan kokemusta, koetoimintaa ja teoreettista tietoa. Tämän lisäksi tarvitaan tilastotieteellistä osaamista mittausepävarmuuden selkeään ja ymmärrettävään muotoon saattamiseksi. Vaikeaksi tekee epävarmuuden laskemisessa, arvioinnissa ja kirjaamisessa asian monitahoisuus. Mittausepävarmuuteen vaikuttaa muun muassa mittalaite, mittauskohde, mittaaja, mittaolosuhteet ja miten mittaus on suoritettu. Tarkemmin tätä eri lähteistä syntyvää ja niihin vaikuttavaa virhettä voidaan tarkastella kuviossa 4. (Anderson & Tikka 1997, 138–139; Esala ym. 2003, 56.)



KUVIO 4. Mittauksen epävarmuuteen liittyvä syy-seuraus-diagrammi. (Anderson & Tikka 1997, 139.)

3.6.1 Määrittäminen

Kun arvioidaan mittausepävarmuutta, tulee olettaa, että kaikki suureet, joiden arvoja ei tunneta tarkasti, pidetään satunnaismuuttujina. Tiettyä todennäköisyysjakaumaa käyttäen, voidaan satunnaismuuttujalle saada mikä tahansa arvo tämän jakauman sisällä. Kun suoritetaan mittauksia, määrittämisen kohteena on usein yksi mittasuure Y (esimerkiksi kappaleen pituus). Mittasuure koostuu yleensä useista lähtösuureista X , jotka voivat olla muun muassa mittanormaanin pituus, mitan lämpötila tai mittakoneen mittausvoima. Lähtösuureet voivat olla joko mitattavia tai koostua muista suureista. Mittasuureen ja lähtösuureen välistä riippuvuutta voidaan esittää yhtälön 3 esittämällä tavalla. (Esala ym. 2003, 65.)

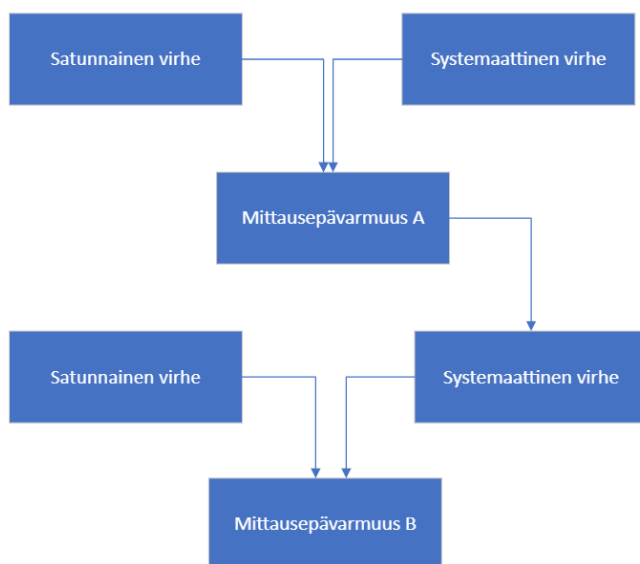
$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (3)$$

Tämä matemaattinen malli mittauksesta pitää sisällään mittausmenettelyn ja mitaustulosten käsittelyn. Välillä f riippuvuuden esittämiseksi tarvitaan monia yhtälöitä, toisinaan määrittely tehdään kokemuksen perusteella tai kokeellisesti. (Esala ym. 2003, 65.)

Lähtösuureina tulisi käyttää mahdollisimman tarkkoja arvioita ja niiden tulisi sisältää mahdolliset korjaukset. Ilman korjauksia, käsitellään ne omina suureinaan. Esimerkiksi mitalle täytyy tehdä lämpötilakorjaus ennen arvon käyttämistä laskeissa. Mittaussuureen tulee sisältää kaikki korjaukset, jotka ovat lopputuloksen kannalta merkittävät. Jos korjausta ei voida tehdä, käsitellään ne epävarmuutena (esimerkiksi työntömitan virhe). Korjausten jälkeenkin tulee korjausten epävarmuus huomioida epävarmuusarviota esitettäessä. (Esala ym. 2003, 66.)

Lähtösuureiden epävarmuudet voidaan jakaa A- ja B-tyyppiin. A-tyypin epävarmuus sisältää useita arvioita mittausepävarmuudesta, jotka perustuvat tilastollisiin menetelmiin ja moniin mitaustuloksiin. Mittauksia tulisi suorittaa tarpeeksi, jotta epävarmuuden arvio olisi luotettava. B-tyypin epävarmuus perustuu tilastanalyysin sijaan muihin perusteltuihin tietoihin kuten: aiemmin tehdyt mittaukset, valmistajan ilmoittamat spesifikaatiot ja kalibrointitodistuksista ja käsikirjoista saatuja taulukkoarvoja ja tuloksia. (Esala ym. 2003, 66.)

Korjauksien ja kompensointien jälkeen on silti otettava huomioon, että kaikki tulokset ovat arvioita. Satunnainen virhe ei poistu ja systemaattisen virheen korjaukset sisältävät myös virhettä. On mahdollista, että syntyy kuvion 5 tyyppinen tilanne, jossa systemaattinen ja satunnainen virhe muuttuu yhdessä seuraavan vaiheen epävarmuuslaskun systemaattiseksi virheeksi. (Anderson & Tikka 1997, 148.)



KUVIO 5. Virheiden systemaattisuus mittausepävarmuuslaskuissa (Anderson & Tikka 1997, 149).

Keskiarvo lasketaan, jotta voidaan pienentää satunnaisvirheiden vaikutusta. Tällöin saadaan usein myös tietoa niiden suuruusluokasta. Laskentakaava keskiarvolle \bar{x} on:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

Satunnaisvaihtelun mittaaminen ja laskeminen on mittausten keskeisimpiä kohteita. Sen suuruus on aina saatavilla, tekemällä tarpeeksi toistomittauksia. Mittausepävarmuutta laskettaessa satunnaisvirheen suuruus saadaan tehtyjen mittausten keskihajonnasta s . Jossa x_i on yksittäinen mittaustulos, \bar{x} mittaustulosten keskiarvo ja n mittaustulosten määrä.

$$s = \sqrt{\sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5)$$

Mittauksia täytyy tehdä paljon (>10), jotta kaava 4 olisi luotettava. Mikäli mitattuja toistoja on vähän, täytyy tulos kertoa vielä varmuuskertoimella (taulukko 1). (Esala ym. 2003, 59.)

TAULUKKO 1. Korjauskerroin taulukko, kun mittauksia on alle kymmenen. (Anderson & Tikka 1997, 151.)

| Mitattujen arvojen lukumäärä | Korjauskerroin |
|------------------------------|----------------|
| 2 | 7,0 |
| 3 | 2,3 |
| 4 | 1,7 |
| 5 | 1,4 |
| 6 | 1,3 |
| 7 | 1,3 |
| 8 | 1,2 |
| 9 | 1,2 |

3.6.2 Koordinaattimittakoneen oma mittausepävarmuus

Tehtaalta tullessaan valmistajan tehtävä on määrittää koneelle sen itseaiheuttama mittausepävarmuus. Tähän vaikuttaa lämpötilaolot, jossa kone operoi ja ne jaotellaan lämpötilaympäristöön 1 ja 2 ja joiden parametrit on kerrottu tarkemmin standardissa ISO 10360-2. Ensimmäinen lämpötilaympäristö on tiukempi, sen lämpötila-alue on 20 ± 2 °C ja lämpötila saa muuttua maksimissaan 2 °C tunnissa siten, että vuorokauden sisällä kokonaislämpötilanmuutos on 2 °C. Toisessa ympäristössä lämpötilanvaihtelu voi olla 16-26 °C, siten että lämpötila saa muuttua tunnin sisällä maksimissaan 2 °C ja vuorokauden aikana 5 °C. Molemmissa lämpötilaympäristöissä huoneen sisäinen lämpötilavaihtelu saa olla maksimissaan 1 °C metriin. (Mitutoyo [2], n.d, 3; ISO 10360-2, 2009.)

Koordinaattimittakone on valmistautunut tekemään mittauksia eri olosuhteissa, jolloin sen epävarmuus vaihtelee olosuhteiden mukaan. Kuten luvussa 2 mainitsin, mittahuoneessa ei vallitse parhaat olosuhteet mittaamisen kannalta, koska lämpötilaa ei voida säädellä ilmastoinnilla. Joten tässä työssä käytetään lämpötilaympäristöä 2. Lisäksi käytössä olevalle mitta-anturille on annettu epävarmuus

arvo, joka huomioidaan kaavassa 6. Valmistaja on määrittänyt CRYSTA-Apex S500 sarjan koneiden tarkkuudeksi lämpötilaympäristössä 2:

$$1,7 + \frac{4L}{1000} \quad (6)$$

Jossa L on mitattava pituus millimetreinä. (Mitutoyo [2], n.d, 3.)

3.7 Toistomittaus

Toistomittaamista voidaan suorittaa määrämittauksena, tästä hyvänä esimerkkinä toimii RR-testi, joka on kansainvälisesti tunnistettu ja standardoitu koemittaus tapa. Testiin löytyy myös ohjeet tulosten tarkasteluun ja käsittelyyn. Testi tuo esiin satunnaisen virheen suuruutta mittauksessa, systemaattiset virheet tulevat esiin myös osittain. RR-testiä on kolmen tyyppistä: lyhyt-, pitkä- ja aistinvarainen testi. (Esala ym. 2003, 60.)

Kuten luvussa 3.6.1 mainittiin, suurien mittausten satunnaisvaihtelua voidaan määrittää myös keskihajonnalla. Mitä suurempi määrä mittauksia, sen luotettavampaa mittauksista syntyvä data on. (Esala ym. 2003, 59.) Toistettavuus on suure, joka kuvaa tiettyä täsmällisyyttä lyhyen aika välin sisään toistettavissa olosuhteissa (esimerkiksi sama tekijä, lämpötila, laite). Toistettavuus voidaan määrittää suorittamalla useita rinnakkaisia mittauksia eri mitoista. Teoriassa mittausten sisäinen vaihtelu tulisi olla suurempaa, kuin ulkoinen vaihtelu eri mittausten välillä. Jos näin ei kuitenkaan ole, täytyy vaihtelun syy selvittää. (Hemminki, Hiltunen, Hägg, Järvenpää, Kärhä, Linko, Saarinen, Simonen 2011, 19.)

Uusittavuudella tarkoitetaan saman mitan selvittämistä eri mittausmenetelmillä. Jos mittaus suoritetaan samasta kohteesta, samalla mittausmenetelmällä eri paikassa esimerkiksi toisessa laboratoriossa eri välineistöllä. Uusittavuudella voidaan tutkia tiettyjen analyysimenetelmien standardoinnissa vertailukokein. Mittauksen pyrkimyksenä on selvittää pitkällä aikavälillä mittausmenetelmien tarkkuutta verrattuna toisiinsa. (Hemminki ym. 2011, 20.)

3.8 Mittapalat

Konepajoilla tehdyt mittaukset ovat pääosin pituusmittauksia. Mittapaloja käytetään näissä mittauksissa mittanormaaleina. Mittapaloja voidaan valmistaa monista eri materiaaleista, joista yleisimmät ovat karkaistu teräs, kovametalli tai keramiikka. Palojen mittapäät ovat hiottu erittäin tasomaiseksi ja toisiinsa nähden yhdensuuntaisiksi. Tarkemmat tiedot löytyvät standardista ISO 3650 (Geometrisen tuotemäärittely [GPS]. Pituudenmittauslaitteet. Mittapalat). Mittapaloja voidaan yhdistää toisiinsa ns. imeyttämällä. Imeyttäminen tarkoittaa yksittäisten mittapalojen yhteen liittämistä hyödyntämällä niiden pintojen tasomaisuutta. Tekniikka onnistuu, kun mittapaloja puristetaan kevyesti toisiinsa ja kierretään pinnan suuntaisesti. Imeytys onnistuu pintojen ollessa absoluuttisen puhtaat, tällöin tasojen välille syntyy heikko metallisidos. Imeyttämisen purkaminen tehdään samalla tapaa kuin kiinnittäminenkin, kiertämällä pinnan mukaisesti ja vetämällä mittapalat irti toisistaan. Huomioitavaa on, että imeyttämistä ei saa suorittaa pitkäjäksoisesti, tai vaarana on mittapalojen vaurioituminen. (Anderson & Tikka 1997, 177–178.)

Mittapalojen tärkein ominaisuus on niiden tarkkuus. Standardissa ISO 3650 on mittapalat jaoteltu neljään tarkkuusluokkaan. Jaotteluperusteena on käytetty mittapalan virhettä sekä mittapinnan virhettä. Mittapalat toimitetaan eri kokoisissa sarjoissa. Suurien sarjojen etuna on suurempi määrä mittapaloja, joista tehdä imeytyssarjoja ja pienentää mittavirhettä täten. Mittapaloista on pidettävä huolta, etteivät ne ruostu ja menetä tarkkuuttaan, tähän käytetään hapotonta rasvaa. (Anderson & Tikka 1997, 179–180.)

4 TOISTOMITTAAMINEN

4.1 Järjestelyt

Tarkoituksena oli suorittaa kaksi eri mittauskokonaisuutta toistomittaukselle: pituusmittaus sekä sisähalkaisijan mittaus. Molemmissa mittauksissa tutkittiin toistuvuutta mittausten välillä sekä vertailtiin, miten koordinaattimittakoneen kärkien asennot ja eri mittapäät vaikuttavat tuloksiin. Toistomittausta varten koneeseen, kappaleeseen tai paletteihin ei koskettu millään lailla, mittauksen aikana, jotta tuloksiin ei tulisi mitään ylimääräistä virhettä.

Mittaustehtävä alkoi mitattavien kappaleiden valitsemisella. Pituusmittaus suoritettiin mittapalokokonaisuudella, jossa yhdistettiin eri mittaisia mittapaloja sarjaan, siten että kokonaispituudeksi tuli 300 mm. Toista mittausta varten valittiin 125 mm asetusrenkas. Mittausta pohdittaessa todettiin, että toistomittauksen kannalta ei ollut olennaista mitä mitataan, kunhan mittaus voitiin suorittaa häiriöttä useampaan kertaan. Tätä varten valittiin kuitenkin tarkat mittapalat siitä syystä, että työparini suoritti samaan aikaan mittausepävarmuus mittauksia, jolloin hänen kannaltaan oli tärkeä tietää mittapalan tarkat tiedot virheineen.

Kappaleen valinnan jälkeen mietittiin, millaisia mittauksia tullaan suorittamaan. Kuten aiemmin, tehtiin kompromissina yhden ohjelman molempia mittauksia varten. Ajatuksena oli tehdä sarja erilaisia mittauksia, mittakärkien eri asennoissa, jolloin voitiin tarkastella ja vertailla niiden vaikutusta mittaustuloksiin. Mittaustulokset saatiin kerättyä Exceliin, jolloin niiden käsittely oli helppoa. Ennen varsinaisen mittauksen aloittamista, suoritettiin käytetyille mittakärjille ja asennoille kalibrointi.

4.2 Mittausmenetelmät

Koordinaattimittakoneella mitattaessa voidaan hyödyntää eri tapoja mitata, jotka kaikki tuottavat vähän erilaista mittausdataa riippuen mittakärjen asennoista ja mittavien pintojen puhtaudesta. Yleisin tapa mitata koordinaattimittakoneella on mitata yksittäisiä pisteitä ja muodostaa niistä kokonaiskuva kappaleesta. Yksi

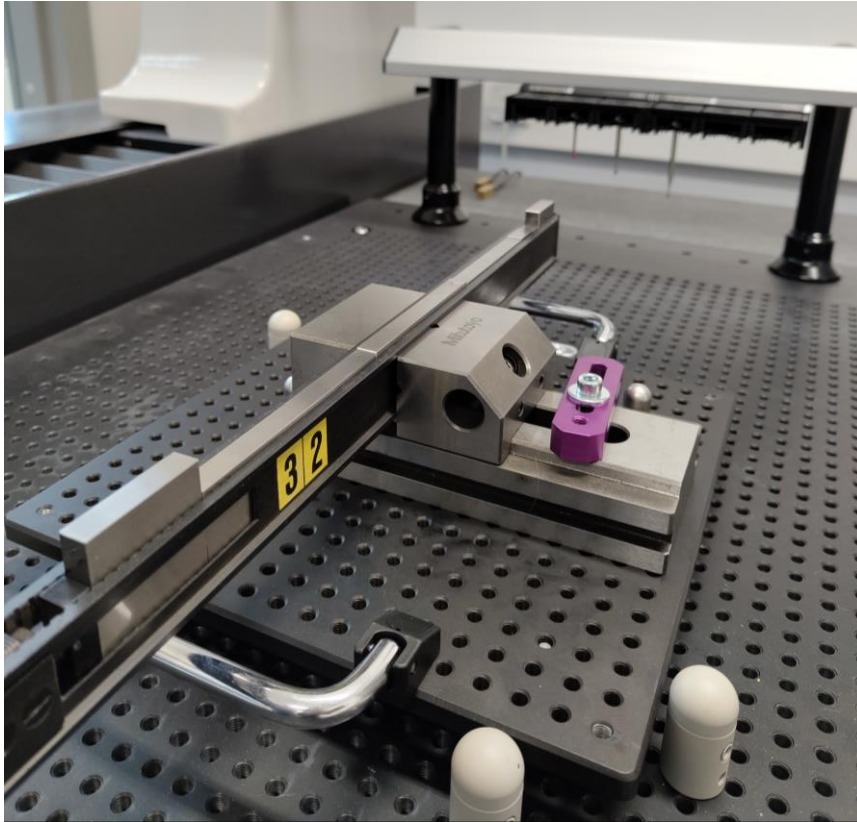
piste ei kerro ihan kauheasti, mutta kaksi pisteettä on jo viiva, kolmas voi olla taso tai ympyrän sisäpinta.

Muita tapoja mitata kappaleen ominaisuuksia on käyttämällä skannausta. Sen sijaan, että otettaisiin esimerkiksi 12 pistettä ympyrän pinnalta, koko pinnan voi skannata raahaamalla mittakärkeä nostamatta sitä koko pinnan matkalta. Mittapisteiden määrää voi säätää, kuten skannausnopeuttakin, mutta mittauspisteiden määrä on silti moninkertainen verrattuna pisteskannaukseen. Heikkoutena tässä on se, että ottamalla niin paljon mittapisteitä, pienimmätkin pölyhiukkaset vääristävät mittaustuloksia ”isoilla” piikeillä kappaleen ympyrämuotoisuudessa.

Kalibrointi on tärkeä osa mittaamista, kalibroinnilla varmistutaan siitä, että mittakärki on oikeassa asennossa ja toimii oikein. Mahdolliset asentovirheet ja kulumat kompensoidaan, jolloin mittadatasta saadaan mahdollisimman tarkka. Ennen mittausten aloittamista täytyy mittapinnat puhdistaa huolellisesti suojaavasta rasvasta sekä pölystä ja sormenjäljistä ym. Pienetkin virheet mittapinnalla vaikuttavat suuresti mittaustarkkuuteen, kun puhutaan koordinaattimittakoneen tarkkuusluokasta. (Tikka 2009, 214–215.)

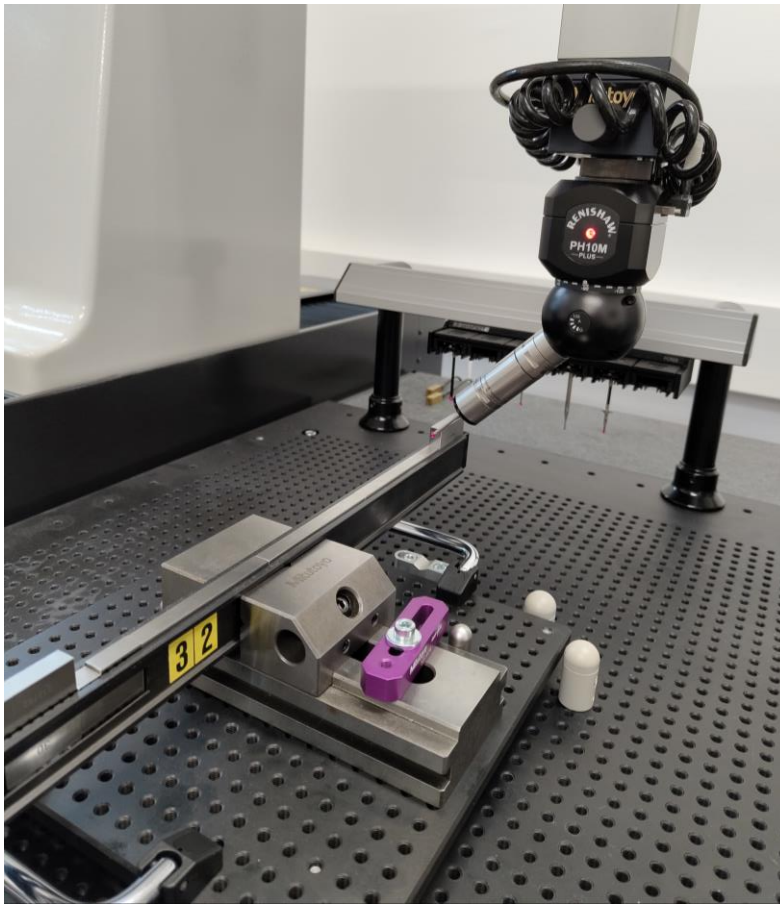
4.3 Pituusmittaus

Pituusmittaus alkoi mitattavan systeemin rakentamisella. Kuvassa 3 havainnollistetaan, miltä viritys näytti. Yksittäiset mittapalat kiinnitettiin toisiinsa imeyttämällä, jonka jälkeen ne kasattiin mittapalasysteemiin puristinleukojen väliin paltin päälle. Päätypaloja nostettiin sen verran pystyyn, että saatiin mittakärjellä pituus mitattua.



KUVA 3. Pituusmittaus järjestely.

Pituusmittausta varten tehtiin ohjelma MCOSMOS-ohjelmalla, joka mittasi kuusi eri mittausta kahdella eri mittakärjellä. Mittaukset 1–3 tapahtuivat mittakärjellä kaksi, joka oli lyhyin käytössä olevista. Loput mittaukset 4–6 tapahtuivat mittakärjellä neljä, joka oli pisin mittakärjistä. Eri mittakärjillä tehdyt mittaukset olivat identtiset. Ensimmäinen mittaus mitattiin suoralla varrella, toinen 45 asteen kulmassa y-akselin ollessa 90 astetta, kolmannessa peilattiin toisen mittauksen tilanne, jossa y-akseli käännettiin -90 asteen kulmaan. Sama toistettiin toiselle mittakärjelle. Kuvassa 4 nähdään mittakärjen olevan 45 asteen kulmassa, mittausasennosta. Mittakärjen eri asentojen vaikutusta mittatuloksiin tutkittiin mittauskärjen asentoja muuttamalla.



KUVA 4. Pituusmittaus 45-asteen kulmassa.

4.3.1 Pituusmittauksen tulokset

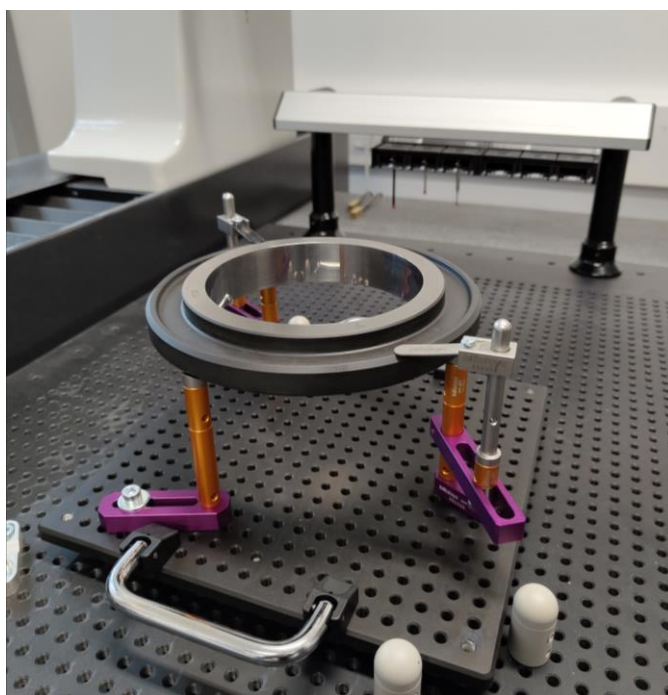
Pituusmittauksesta suoritettiin 20 mittauksen sarja kuudella eri asennolla eli 120 mittatulosta yhteensä. Liitteessä 1 on esitelty mittausten pituusmittauksen tulokset ja niiden selitykset. Tuloksien hajonta oli verrattain pientä, jossa pienin arvo oli 300,001 mm ja suurin arvo 300,004 mm. Mittausten keskiarvo oli 300,0022 mm ja keskihajonta 0,729 μm . Mittajärjestelmän kokonaisvirhe oli +0,03 μm , joka laskettiin mittapalojen virheiden summana. Jos verrataan tuloksien keskiarvoja nimellismittaan 300 mm, huomataan mittojen olevan 2–3 μm yli nimellismittasta (liite 1). Vaikka otetaan huomioon mittapalojen virheet, kokonaisuusmittausvirhe ei muutu merkittävästi. Eri mittakärkien ja mittaussasentojen väliltä oli vaikea löytää systemaattisuutta. Kaikki tulokset olivat lähellä toisiaan, sillä kaikkien kokeiden omissa mittaeroissa oli vain tuhannesosan ero. Myös mittavirhe oli jokaisessa mittakokeessa samaa luokkaa. Taulukossa 2 on mittatulosten määrä per tulos, siitä nähdään, että hajonta oli pientä.

TAULUKKO 2. Mittaustulosten hajonta.

| Mitta (mm) | Määrä (kpl) |
|------------|-------------|
| 300,001 | 20 |
| 300,002 | 66 |
| 300,003 | 30 |
| 300,004 | 4 |
| Yht. | 120 |

4.4 Asetusrenkaan mittaus

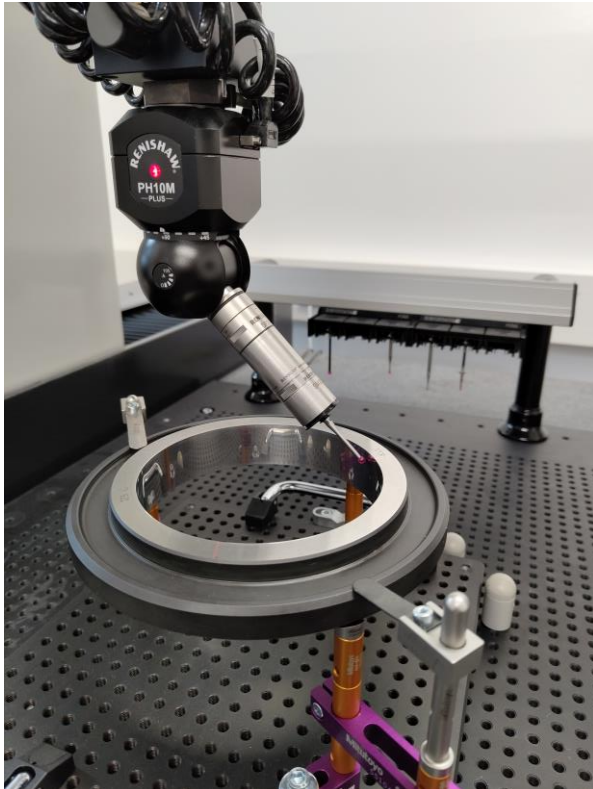
Asetusrenkaan mittaaminen suoritettiin samaan tyyliin kuten pituusmittauskin. Mittausta varten tehtiin kuvan 5 mukaisen kiinnityksen paletin päälle, jotta se voitiin tarvittaessa siirtää pois purkamatta koko kiinnitystä. Mittauksen tarkoituksena oli tutkia asetusrenkaan sisähalkaisijaa ja sen ympyrämäisyyttä. Mittaamista varten tehtiin ohjelma MCOSMOSilla, joka keräsi dataa eri mittausmenetelmillä, jolloin voidaan verrata ja arvioida tuloksien paikkaansa pitävyyttä.



KUVA 5. Mitattava asetusrenkas.

Mittaus suoritettiin taas kahdella eri mittakärjellä: numeroilla kaksi ja neljä, joista kaksi oli mittakärjistä lyhyin ja neljä pisin. Mittaussykliin kuului neljä eri mittausta kahdella eri kärjellä, eli yhteensä kahdeksan mittausta. Yhdellä kärjellä mitattiin

ensin pistemenetelmällä (12 pisteellä) koko sisäpinta ja sen jälkeen skannaamalla. Tämän jälkeen mittaus toistettiin piste- ja skannausmenetelmillä, mutta erona oli, että mittaukset suoritettiin neljässä eri sektorissa, mittakärjen ollessa 45 asteen kulmassa pintaan kohti kuten kuvassa 6 nähdään tarkemmin. Tarkoituksena oli tutkia eroja, miten itse mittakärki ja sen eri asennot vaikuttavat mittatuloksiin, vai oliko sillä vaikutusta. Ennen mittausten aloittamista suoritettiin mittakärjille ja asennoille kalibroinnit.



KUVA 6. Sektoreittain tehty mittaus.

4.4.1 Halkaisijamittauksen tulokset

Halkaisijamittauksesta tehtiin 20 sarjan toistomittaus, jossa oli kahdeksan mittapistettä sarjaa kohti, joten yhteensä kerättiin 160 mittapistettä. Halkaisijamittauksen tulokset kokonaisuudessaan on esitelty liitteessä 2. Tulosten hajonta oli hieman pituusmittausta suurempi, jossa pienin arvo oli 125,003 mm ja suurin arvo 125,012. Koko mittauksen keskiarvo oli 125,0066 mm ja keskihajonta 2,94 μm . Taulukossa 3 on esitetty mittatulosten hajonta eri arvoille. Hajonta oli paljon suurempaa, kuin pituusmittauksessa. Kuitenkin kun verrataan yhden kokeen eli asennon sisäistä eroa, siinä ei ollut suurta eroa. Nämä erot olivat yhden ja kahden

tuhannesosan luokkaa. Eri mittaustapojen väliset erot olivat huomattavat tässä mittauksessa. Riippuen mittatavasta ero oli suurimmillaan 0,009 mm, joka on huomattava koordinaattimittakoneella mitattaessa.

TAULUKKO 3. Halkaisijamittauksen tulosten hajonta.

| Mitta (mm) | Määrä (kpl) |
|-------------------|--------------------|
| 125,003 | 28 |
| 125,004 | 22 |
| 125,005 | 25 |
| 125,006 | 10 |
| 125,007 | 2 |
| 125,008 | 33 |
| 125,009 | 12 |
| 125,01 | 8 |
| 125,011 | 1 |
| 125,012 | 19 |
| Yht. | 160 |

5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Tulosten esittely

Liitteissä 1 ja 2 on esitetty kahden hyvin erilaisen toistomittauksen tulokset, joita vähän sivuttiin kappaleissa 4.3.1 ja 4.4.1. Mittaukset suoritettiin eri tavoilla, missä tarkoituksena oli selvittää koordinaattimittakoneen toistotarkkuutta kyseisissä mittauksissa ja mittauksen eri asentojen sekä kärkien vaikutusta mittaustuloksiin. Ensimmäisenä tehtiin mittapalasarjalle pituusmittaus, jossa suoritettiin kolme mittausta kahdella eri mittakärjellä. Toinen mittaus oli asetusrenkaan halkaisijan mittaaminen, jossa tehtiin neljä mittausta kahdella eri mittakärjellä. Toistuvuutta kuvaamaan päätettiin laskea molemmille mittauksille keskihajonta kaavan 5 mukaan.

Mittaustulokset kahden eri mittauksen välillä olivat toisistaan poikkeavat. Pituusmittauksessa mittatavoilla ja eri mittakärjillä oli hyvin vähän vaikutusta itse mittaustuloksiin, eikä näiden välillä voinut todeta mitään korrelaatiota. Tulostaulukkoa tarkasteltaessa oli hankala huomata mittatuloksissa suuria eroja. Käyttämällä kaavaa 5 voitiin laskea mittatulosten keskihajonnaksi:

$$s = \frac{(300,003 - 300,022)^2}{120-1} + \frac{(300,003 - 300,022)^2}{120-1} + \dots + \frac{(300,002 - 300,022)^2}{120-1}$$

$$s = 0,000729337 \text{ (mm)} \quad (5)$$

Keskihajonta on siis suhteellisen pieni, 0,729 μm , joka näkyy jo mittatuloksissa, koska suurta vaihtelua ei ole. Halkaisijamittauksessa puolestaan mittatavat vaikuttivat suurestikin tuloksiin, mittakärjellä ei tuntunut olevan suurta vaikutusta tässä mittauksessa. Eri tavoilla suoritettut mittaukset tuottivat hieman erilaisia tuloksia molemmilla mittakärjillä. Pienimmän mittavirheen nimellismittaan tuotti skannaamalla suoritettu mittaus (kokeet 2 ja 6). Suurimman mittavirheen tuotti sektoreittain mitattu pistemittaus (kokeet 3 ja 7). Näiden mittausten välinen ero oli suurimmillaan 0,009 mm. Koska hajonta oli suurempaa ja mittaustavat oikeasti vaikuttivat tuloksiin, keskihajonta oli myös huomattavasti suurempi 2,944 μm .

Liitteissä 3–6 on esiteltyä halkaisijamittauksesta syntyneitä kuviota eri mittaus-tavoista ja kuvioden alla esiteltyä perustietoja mittauksesta. Huomattava ero esimerkiksi skannattavan ja pistemittauksella suoritettun mittauksen välillä on mit-tattavien pisteiden määrä kehältä. Pistemittauksella ohjelma ottaa 12 pistettä koko piiriltä, kun taas skannaamalla se ottaa jopa yli 1800 pistettä samalta alu-eelta. Pistemittauksessa tällöin korostuu yksittäinenkin suuri heitto verrattuna skannaukseen, mutta kolikon käänöpuolena on epätodennäköisempää, että yk-sittäinen pölyhiukkanen sattuu juuri siihen, josta pistemitta on mittaamassa. Mit-taustuloksista voidaan kuitenkin nähdä, että kaikissa tapauksissa pistemittauk-sella tehty mittaus tuotti suuremman virheen, kuin skannaaminen. Jos verrataan esimerkiksi ensimmäisen kokeen tuloksia toisiinsa, huomataan, että kokeen si-säiset erot eivät ole suuria, joten mitattu data on aina verrattavissa toisiinsa ja mittauskierrosten aikana asentojen muuttuminen ei vaikuta kokeen sisäisiin mit-tauksiin. Se huomataan mittapisteiden erosta ja kokeen sisäisestä keskihajon-nasta, jotka ovat pieniä.

Kahta mittausta vertailtaessa huomataan, että yksinkertaisemmassa mittauk-sessa mittaustulokset ovat pienemmällä hajonnalla, kun taas vaikeammassa muodossa mittaustuloksissa on enemmän hajontaa. Pituusmittauksessa koordi-naattimittakone ei tee vaikeita liikeratoja, se liikkuu kahden pisteen välillä, välillä kääntäen mittakärjen asentoa tai itse mittakärkeä. Halkaisijamittauksessa liike-sarjat ovat vaikeampia. Mittakärki joutuu seuraamaan ympyrän muotoa ja sekto-rimittauksessa mittakärki on vielä kulmassa, jolloin mittausasento on vielä vaike-ampi. Teoriassa koordinaattimittakoneen pitäisi pystyä kompensoimaan nämä erot, jolloin sillä ei ole vaikutusta mittaustulokseen, mutta näin tarkoissa mitoissa pienetkin virheet vaikuttavat.

Kattavuuskerrointa määritettäessä verrataan keskiarvoa yhteen, kahteen ja kol-meen keskihajontaan, jolloin voidaan tarkastella, kuinka luotettavaa mittausdata on, tai millä varmuudella mittaustulos on totta. Taulukoissa 4 ja 5 on vertailtu mi-ten mittapisteet jakautuvat verrattuna keskiarvoon ja sen molemmille puolille kes-kihajonnan kertoimen mukaan. Pituusmittauksessa kolmen sigman eli kolmen keskihajonnan erolla keskiarvoon kaikki mittatulokset olivat sen sisällä, kahden sigman erolla tulos oli 97 % eli ei jokainen, mutta lähes jokainen mittatulos oli tämän tulonhaarukan sisällä. Yhden sigman erolla tulos oli vain 55 %, joten ei

voida todeta, että se täyttyy. Sama asia toistuu halkaisijamittauksen taulukossa, jossa kaikki tulokset ovat kahden sigman tarkkuudella, mutta ei yhden. Tulostaulukoista voidaan yleisesti todeta, että molemmissa tapauksissa voidaan sanoa mittaustulosten olevan kattavuuskerroin 2 vastaavan todennäköisyyden eli 95,5 % varmuudella oikeellisia.

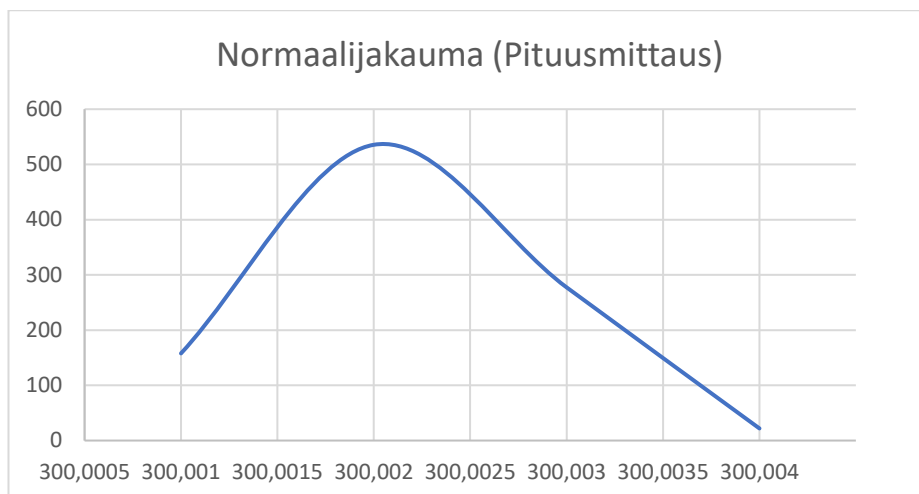
TAULUKKO 4. Pituusmittauksen kattavuuskerroin.

| | 3σ | 2σ | 1σ |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Minimi | 299,999962 | 300,000691 | 300,001421 |
| Maksimi | 300,004338 | 300,003609 | 300,002879 |
| %-osuus | 100 % | 97 % | 55 % |

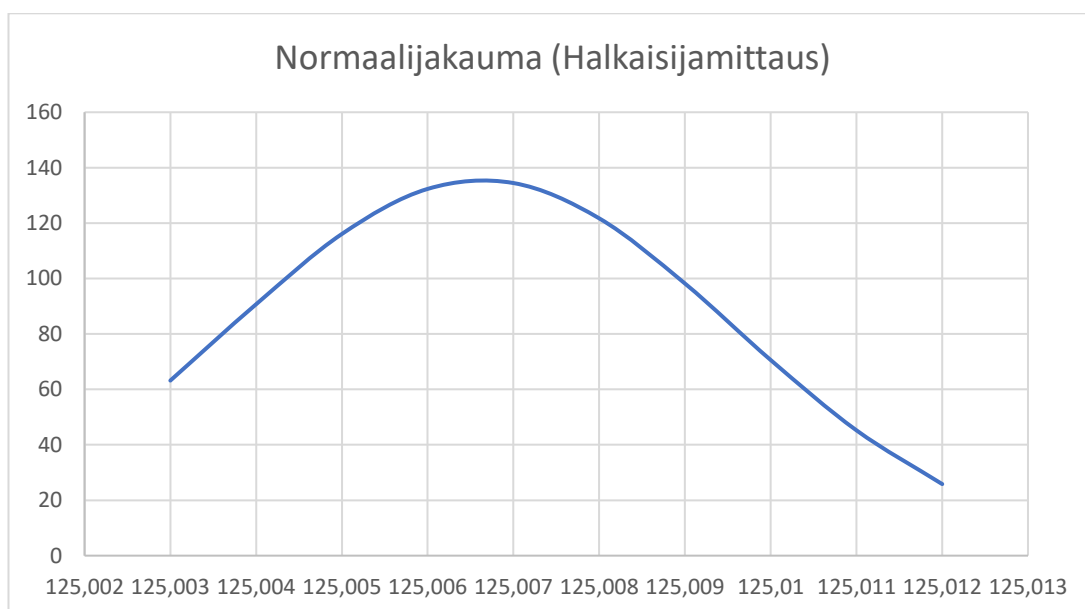
TAULUKKO 5. Halkaisijamittauksen kattavuuskerroin.

| | 3σ | 2σ | 1σ |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Minimi | 124,997803 | 125,000748 | 125,003693 |
| Maksimi | 125,015472 | 125,012527 | 125,009582 |
| %-osuus | 100 % | 100 % | 65 % |

Mittaustuloksista tehtiin normaalijakautuneet kuvaajat (kuvio 6 ja 7) kuvaamaan tulosten jakautumista. Koska pituusmittauksessa oli vähemmän yksittäisiä mitta-pisteitä ja suurin osa niistä oli jakautunut 300,002 mm (taulukko 2) on käyrän kärki terävämpi halkaisijamittauksessa. Halkaisijamittauksessa mittaustulokset olivat jakautuneet tasaisemmin (taulukko 3), joka näkyy loivempänä käyränä. Molemmissa mittauksissa käyrä jatkuu pidemmälle oikeasta reunasta, joka tarkoittaa, että mittaus painottuu lähemmäs kattavuuskertoimen maksimia kuin minimiä.



KUVIO 6. Pituusmittauksen normaalijakauma.



KUVIO 7. Halkaisijamittauksen normaalijakauma.

5.2 Tuloksiin vaikuttavia tekijöitä

Mittauksiin vaikuttavia tekijöitä on monia, tässä mittauksessa ja mittausympäristössä suurin systemaattisen virheen aiheuttaja on kontrolloimattomat lämpötilat. Koordinaattimittakone on ohjelmoitu korjaamaan lämpötilaerosta aiheutuvaa virhettä, mutta jos mittakappale ei olekaan huoneen lämmössä tai jos muutos tapahtuu liian nopeasti, voi tulokset vääristyä sitä kautta. Jos lasketaan kaavalla 2 pituusmittauksessa mittapalojen lämpölaajenemista, niistä johtuva virhe sallitulla lämpötila-alueella on todella suuri (taulukko 6). Esimerkkilasku lämpölaajenemiselle, lämpölaajenemiskerroin $(11,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (ISO 3650, 10):

$$L_t = 300 * (1 + 11,5 * 10^{-6}(22 - 20)) \quad (2)$$

$$L_t = 300,0069 \text{ (mm)}$$

TAULUKKO 6. Lämpötilan vaikutus pituuteen, jossa 20 °C vertailuarvo.

| Lämpötila (°C) | Todellinen pituus (mm) |
|----------------|------------------------|
| 16 | 299,9862 |
| 17 | 299,9897 |
| 18 | 299,9931 |
| 19 | 299,9966 |
| 20 | 300 |
| 21 | 300,0035 |
| 22 | 300,0069 |
| 23 | 300,0104 |
| 24 | 300,0138 |
| 25 | 300,0173 |
| 26 | 300,0207 |

Kuten mainitsin luvussa 2.2 mittakone ottaa huomioon tämän mittauksen tehdessä, mutta siihen ei voi luottaa täysin ilman lämpökontrolloitua mittausympäristöä, koska lämpötilan muutosta ei voida säännellä mitenkään. Kuten taulukosta 6 voidaan todeta, lämpötilan vaikutus on huomattava tulosten kannalta. Lämpötilaan ja sen tuottamaan virheeseen voitaisiin vaikuttaa panostamalla kontrolloituun mittausympäristöön, jonka lämpötilaa voitaisiin tarkkailla ja ylläpitää tietyssä lämpötilassa. Käytetyssä mittatilassa ei ollut lämpötilan mittaukseen liittyvää välineistöä tarjolla, joten mittauksen aikana suoritettu lämpötila on tässä tapauksessa mysteeri.

Muita vaikuttavia tekijöitä on hyvin vähän, koordinaattimittakone karsii mittaajasta syntyviä virheitä, mittauksen aikana ei synny virhettä huonosta käsittelystä tai mittavälineen väärinkäytöstä johtuvaa satunnaista virhettä. Jos mittakärjet ja asennot on kalibroitu oikeaoppisesti niistä ei pitäisi syntyä silloin virhettä. Mittakoneen valmistaja on antanut mittakoneelle oman maksimivirheen, joka laskeaan pituusmittauksen pituuteen suhteutettuna kaavalla 6:

$$1,7 + \frac{4 * 300}{1000} = 2,9 \text{ (}\mu\text{m)} \quad (6)$$

Jos mietitään tehdasympäristöä, mittauksia usein suoritetaan vaihtamalla mitattavia kappaleita tai nostetaan paletteja tai muuten vaikutetaan mittaustilanteeseen, joka vaikuttaa mittaustuloksiin usein negatiivisesti, tässä mittauksessa pyrittiin minimoimaan mittaustapahtuman virheet. Paletti, mittakappale ja mittausympäristö pidettiin standardina, jolloin ulkoiset asiat eivät päässeet vaikuttamaan mittaukseen. Lisäksi mittakoneella ei ole laiminlyöty huoltoja sekä kalibroinnit suoritettiin ennen mittausten aloittamista, jolloin nämäkään asiat eivät päässeet vaikuttamaan negatiivisesti mittauksiin. Molemmissa mittauksissa mittaohjelma paikoitti 0-pisteen joka mittauskierroksen alussa uudestaan, jolloin paikoituksetakaan ei pitäisi syntyä virhettä. Pituusmittaus suoritettiin imeyttämällä useita mittapaloja sarjaan, jolloin tämän mittasysteemin virhe voi olla suurempi kuin valmiin 300 mm palan. Tämä todennäköisesti ei kuitenkaan ole merkittävän suuruinen virhe, koska mittapalojen omat virheet kompensoivat toisiaan hyvin.

5.3 Yhteenveto

Yhteenvetona toistomittaukset suoritettiin halutulla tavalla läpi ja tulokset poikkesivat toisistaan loogisella tavalla. Vaativammasta mittauksesta syntyi hieman enemmän virhettä, joka vaikuttaa toistotarkkuuteen. Skannaamalla suoritettu mittaus antoi tarkemmat mittaustulokset verrattuna pistemittaukseen halkaisijamittauksessa. Molempia tuloksia voidaan tarkastella kattavuuskertoimella kaksi. Tapoja, joilla parannetaan toistotarkkuutta, voidaan vielä lisätä, kuten kappaleessa 5.2 käytiin tarkemmin läpi. Lopuksi taulukossa 7 on esitelty toistomittauksen keskihajonnan tulokset, jotka tässä mittauksessa edustavat satunnaisvirhettä. Jos verrataan pituusmittauksen tuloksia, kaavalla 6 laskettuun koneen pituusmittauksen maksimivirheelle, saatu virhe on pieni.

TAULUKKO 7. Saadut tulokset keskihajonnalle.

| Mittaus | Keskihajonta (μm) |
|-------------------|--------------------------------|
| Pituusmittaus | 0,729337 |
| Halkaisijamittaus | 2,944962 |

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tehtävänä oli selvittää toistomittausten avulla TAMK:n tiloissa olevan koordinaattimittakoneen toistotarkkuus. Samaan aikaan työparini selvitti saman tyylisten mittausten avulla koneen mittausepävarmuutta. Toistomittaukset suoritettiin kahdella eri mittauksella: pituusmittaus sekä halkaisijamittaus, joissa hyödynnettiin mittakoneen kärjen eri asentoja sekä eri mittakärkiä. Näillä tavoilla pyrittiin selvittämään koneen toistotarkkuutta, sekä vaikuttivatko nämä eri asennot ja kärjet mittaustarkkuuteen.

Työ aloitettiin tutustumalla aiheen kirjallisuuteen ja standardeihin. Mittakone oli entuudestaan hieman vieras laite, joten sen perehdytykseen ja käyttöön tarvittiin ohjaavan opettajan apua. Teimme opettajan avustuksella tarvittavat ohjelmat ja suunnittelimme työparin kanssa sopivat mittaukset työtä varten. Tämän jälkeen itse mittaukset onnistuivat hyvin, eikä niissä ilmennyt ongelmia.

Mittauksesta saadut tulokset olivat odotetun kaltaisia. Keskihajonta molemmissa mittauksissa oli pientä, joka käy järkeen, kun käytetään näin tarkkaa mittalaitetta ja mitattavia kappaleita. Mittaustuloksien puolesta puhuu hyvin tehdyt kalibroinnit ennen mittausten aloittamista. Mahdollisia parannuksia mittaukseen voisi tehdä panostamalla mittaustilaston lämpöeristämiseen, jolloin lämpötilaa voidaan kontrolloida ja ylläpitää tavoitelämpötilassaan.

Suurin oppi joka työstä jäi käteen, lienee olosuhteiden vaikutus mittaukseen, olosuhteita minimoimalla voidaan parantaa mittaustuloksia. Teollisuudessa tällä on suurta merkitystä mittauksiin. Aiheeseen liittyen voisi tehdä ja soveltaa monia eri mittauksia tai mittaustapoja. Jos tekisin mittaukset uudestaan, kokeilisin reilusti suurempaa otantaa esimerkiksi 100 tai 200 mittauksella. Tulevaisuutta ajatellen opinnäytetyötä voitaisiin jatkaa tutkimalla lämpötilan vaikutusta todellisuudessa mittauksessa ja lämpötilaolojen hallitsemista tai tekemällä suuremman otannan mittausta, jota voitaisiin verrata tämän työn tuloksiin.

Parityöskentely toimi mielestäni hyvin tässä työssä, kävimme läpi teoriaa yhdessä, sekä suunnittelimme mittaukset siten, että ne palvelevat molempia töitä.

Kirjoitimme kuitenkin omat työmme, mutta saatoimme konsultoida toisiamme, jos matkan varrella syntyi kysymyksiä. Tämä auttoi myös itseäni oppimaan, kun selitti asian toiselle tai haastoi suunnitteluvaiheessa tutkimustavoista. Kokonaisuudessaan opinnäytetyö oli mielenkiintoinen projekti ja vaikka aihe oli ennestään hieman vieras, sitä pystyi lähestymään hyvien lähteiden avulla helposti. Opin paljon mittaamisesta, koordinaattimittakoneesta, sekä virheestä ja sen synnystä.

LÄHTEET

Anderson, P, Tikka, H ja Söderström, W. 1997. Mittaus- ja Laatatuttekniikat. WSOY, Porvoo 1997.

Esala, V-P, Lehot, H & Tikka, H. 2003. Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit. Tekninen tiedotus 3. Tammer-paino, Tampere.

Hemminki, S, Hiltunen, E, Hägg, M, Järvenpää, E, Kärhä, P, Linko, L, Saarinen, P, Simonen, S. 2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet, Espoo 2011. Luettu 7.3.2023.

<https://publications.vtt.fi/pdf/MIKES/2011-J4.pdf>

ISO 10360-2:2009 Geometrical product specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions (ISO 10360-2:2009). Vaatii käyttöoikeuden. Luettu 3.3.2023.

<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/1/138858.html.stx>

Keinänen, T & Järvinen, M. 2014. Mittaustekniikka. 1. painos. Sanoma Pro, Helsinki.

Metrology Asian Pacific. n.d. What is metrology? Verkkajulkaisu. Luettu 1.3.2023.

<https://metrologyasiapacific.com/about-metrology/what-is-metrology/>

Mitutoyo [1]. Benefits of a Mitutoyo Coordinate Measuring Machine. n.d. Luettu 1.3.2023.

<https://www.mitutoyo.com/products/coordinate-measuring-machines/>

Mitutoyo [2]. Crysta-Apex S. Luettu 8.3.2023.

https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/CRYSTA_ApexS_2202.pdf

Mitutoyo [3]. MCOSMOS. Luettu 20.3.2023.

<https://www.mitutoyo.com/products-and-solutions/software/mcosmos/>

Mitutoyo [4]. MiCat Planner. Luettu 20.3.2023.

<https://www.mitutoyo.com/products-and-solutions/software/micat/>

SFS-EN ISO 3650:1998. Geometrical product specifications (GPS). Length standards. Gauge blocks. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu 20.3.2023.

<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/3/13516.html.stx>

SFS-opas 99 Kansainvälinen metrologian sanasto (VIM). Perus- ja yleiskäsitteet sekä niihin liittyvät termit. Suomen standardisoimisliitto SFS. Luettu 1.3.2023. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/ISO/ID4/9/143952.html.stx>

Tikka, H. 2009. Koordinaattimittaus. 2. Korjattu painos. Tampereen Yliopistopaino Oy – Juvenes Print.

LIITTEET

Liite 1. Pituusmittaus tulokset

| | 1. KOE | 2. KOE | 3. KOE | 4. KOE | 5. KOE | 6. KOE |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 300,003 | 300,003 | 300,002 | 300,003 | 300,003 | 300,004 |
| 2 | 300,003 | 300,003 | 300,002 | 300,002 | 300,004 | 300,003 |
| 3 | 300,003 | 300,003 | 300,002 | 300,002 | 300,003 | 300,003 |
| 4 | 300,003 | 300,002 | 300,002 | 300,002 | 300,004 | 300,003 |
| 5 | 300,003 | 300,002 | 300,002 | 300,002 | 300,003 | 300,003 |
| 6 | 300,003 | 300,002 | 300,002 | 300,002 | 300,004 | 300,003 |
| 7 | 300,002 | 300,002 | 300,002 | 300,002 | 300,003 | 300,002 |
| 8 | 300,003 | 300,002 | 300,002 | 300,002 | 300,003 | 300,002 |
| 9 | 300,003 | 300,002 | 300,002 | 300,002 | 300,003 | 300,002 |
| 10 | 300,002 | 300,002 | 300,002 | 300,002 | 300,003 | 300,003 |
| 11 | 300,002 | 300,002 | 300,001 | 300,002 | 300,002 | 300,003 |
| 12 | 300,002 | 300,001 | 300,002 | 300,001 | 300,003 | 300,002 |
| 13 | 300,002 | 300,002 | 300,001 | 300,001 | 300,003 | 300,002 |
| 14 | 300,002 | 300,002 | 300,001 | 300,001 | 300,003 | 300,003 |
| 15 | 300,002 | 300,001 | 300,002 | 300,001 | 300,002 | 300,002 |
| 16 | 300,002 | 300,002 | 300,002 | 300,001 | 300,002 | 300,002 |
| 17 | 300,002 | 300,001 | 300,002 | 300,001 | 300,002 | 300,002 |
| 18 | 300,002 | 300,001 | 300,001 | 300,002 | 300,002 | 300,002 |
| 19 | 300,002 | 300,001 | 300,001 | 300,001 | 300,002 | 300,002 |
| 20 | 300,002 | 300,001 | 300,001 | 300,001 | 300,002 | 300,002 |
| ero | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| mittausvirhe | 0,0024 | 0,0019 | 0,0017 | 0,0017 | 0,0028 | 0,0025 |
| keskihajonta | 0,00050 | 0,00067 | 0,00047 | 0,00059 | 0,00070 | 0,00061 |
| keskiarvo | 300,0024 | 300,0019 | 300,0017 | 300,0017 | 300,0028 | 300,0025 |

| koe | kärki | asento |
|--------|--------------|-----------------------------|
| 1.koe | mittakärki 2 | 0-asento |
| 2.koe | mittakärki 2 | A 45 astetta, B 90 astetta |
| 3.koe | mittakärki 2 | A 45 astetta, B -90 astetta |
| 4.koe | mittakärki 4 | 0-asento |
| 5. koe | mittakärki 4 | A 45 astetta, B 90 astetta |
| 6. koe | mittakärki 4 | A 45 astetta, B -90 astetta |

Liite 2. Halkaisijamittaus tulokset

| | 1. KOE | 2. KOE | 3. KOE | 4. KOE | 5. KOE | 6. KOE | 7. KOE | 8. KOE |
|--------------|----------|----------|-----------|-----------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 125,008 | 125,004 | 125,012 | 125,006 | 125,008 | 125,004 | 125,01 | 125,005 |
| 2 | 125,008 | 125,004 | 125,012 | 125,006 | 125,008 | 125,004 | 125,01 | 125,005 |
| 3 | 125,006 | 125,004 | 125,012 | 125,006 | 125,008 | 125,004 | 125,01 | 125,005 |
| 4 | 125,008 | 125,004 | 125,012 | 125,006 | 125,008 | 125,004 | 125,01 | 125,005 |
| 5 | 125,007 | 125,004 | 125,012 | 125,006 | 125,008 | 125,004 | 125,01 | 125,005 |
| 6 | 125,008 | 125,004 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,004 | 125,01 | 125,005 |
| 7 | 125,006 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,005 |
| 8 | 125,008 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,01 | 125,005 |
| 9 | 125,006 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,004 |
| 10 | 125,008 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,01 | 125,004 |
| 11 | 125,006 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,004 |
| 12 | 125,008 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,004 |
| 13 | 125,006 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,005 |
| 14 | 125,008 | 125,003 | 125,011 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,004 |
| 15 | 125,008 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,004 |
| 16 | 125,008 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,004 |
| 17 | 125,008 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,004 |
| 18 | 125,008 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,004 |
| 19 | 125,007 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,004 |
| 20 | 125,008 | 125,003 | 125,012 | 125,005 | 125,008 | 125,003 | 125,009 | 125,005 |
| ero | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| mittausvirhe | 0,007 | 0,003 | 0,012 | 0,005 | 0,008 | 0,003 | 0,009 | 0,004 |
| keskihajonta | 0,00088 | 0,00047 | 0,00022 | 0,00044 | 0,00000 | 0,00047 | 0,00050 | 0,00051 |
| keskiarvo | 125,0074 | 125,0033 | 125,01195 | 125,00525 | 125,008 | 125,0033 | 125,0094 | 125,0045 |

| koe | kärki | selite |
|--------|--------------|----------------------|
| 1. KOE | mittakärki 2 | pistemittaus ympäri |
| 2. KOE | mittakärki 2 | skannaus ympäri |
| 3. KOE | mittakärki 2 | pistemittaus sektori |
| 4. KOE | mittakärki 2 | skannaus sektori |
| 5. KOE | mittakärki 4 | pistemittaus ympäri |
| 6. KOE | mittakärki 4 | skannaus ympäri |
| 7. KOE | mittakärki 4 | pistemittaus sektori |
| 8. KOE | mittakärki 4 | skannaus sektori |

Liite 3. Pistemittaus koko matkalta



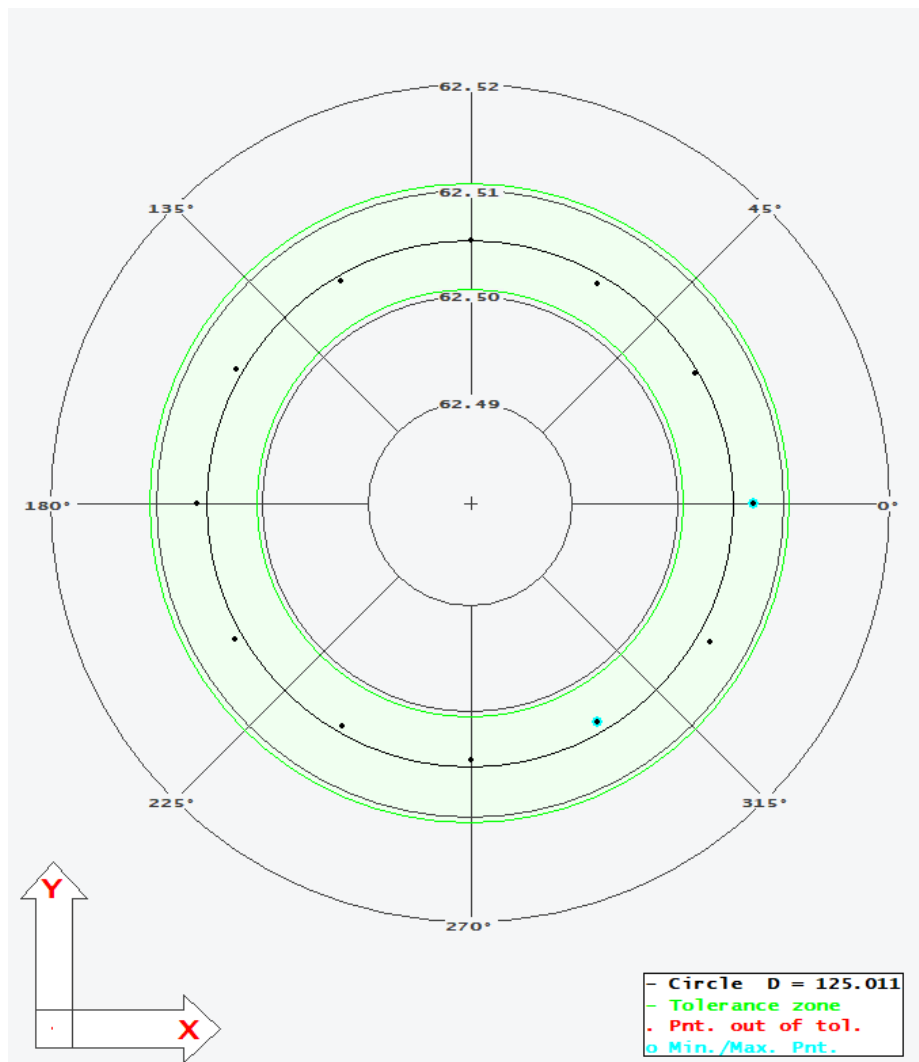
| | | | |
|----------------|-----------|----------------|----------|
| Tolerance zone | 0.010 | Upper tol. | 0.005 |
| | | Lower tol. | -0.005 |
| X | 0.001 | No. of pts. | 12 |
| Y | -0.001 | Min./Max. Pnt. | 12 / 3 |
| Z | -5.003 | Std. dev. * 4 | 0.005 |
| Actual Radius | 62.504 | Circularity | 0.003 |
| Min. dist. | -0.002 | Max. dist. | 0.001 |
| X | 54.134 | X | 31.220 |
| Y | -31.241 | Y | 54.149 |
| Radius | 62.502 | Radius | 62.505 |
| Phi | 330:00:38 | Phi | 60:02:03 |

Liite 4. Skannaus koko matkalta



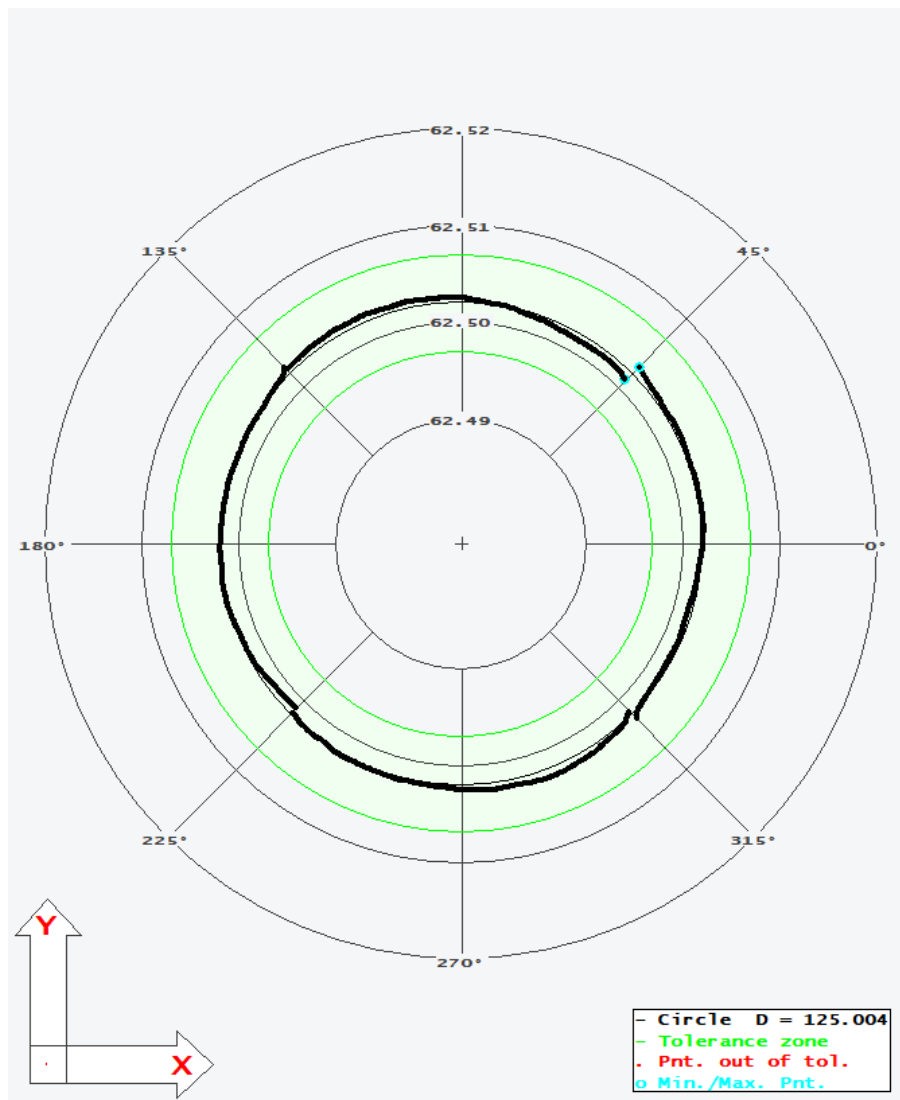
| | | | |
|----------------|-----------|----------------|-----------|
| Tolerance zone | 0.010 | Upper tol. | 0.005 |
| | | Lower tol. | -0.005 |
| X | 0.001 | No. of pts. | 1820 |
| Y | -0.001 | Min./Max. Pnt. | 762 / 232 |
| Z | -5.012 | Std. dev. * 4 | 0.001 |
| Actual Radius | 62.502 | Circularity | 0.001 |
| Min. dist. | -0.001 | Max. dist. | 0.001 |
| X | -54.509 | X | 43.567 |
| Y | 30.579 | Y | 44.816 |
| Radius | 62.501 | Radius | 62.502 |
| Phi | 150:42:29 | Phi | 45:48:36 |

Liite 5. Pistemittaus sektoreittain



| | | | |
|----------------|-----------|----------------|-----------|
| Tolerance zone | 0.010 | Upper tol. | 0.005 |
| | | Lower tol. | -0.005 |
| X | 0.002 | No. of pts. | 12 |
| Y | 0.000 | Min./Max. Pnt. | 3 / 5 |
| Z | -5.037 | Std. dev. * 4 | 0.004 |
| Actual Radius | 62.505 | Circularity | 0.003 |
| Min. dist. | -0.001 | Max. dist. | 0.002 |
| X | 31.234 | X | 62.507 |
| Y | -54.141 | Y | -0.019 |
| Radius | 62.504 | Radius | 62.507 |
| Phi | 299:58:50 | Phi | 359:58:57 |

Liite 6. Skannaus sektoreittain



| | | | |
|----------------|----------|----------------|------------|
| Tolerance zone | 0.010 | Upper tol. | 0.005 |
| | | Lower tol. | -0.005 |
| X | 0.002 | No. of pts. | 1853 |
| Y | -0.002 | Min./Max. Pnt. | 1392 /1390 |
| Z | -5.140 | Std. dev. * 4 | 0.002 |
| Actual Radius | 62.502 | Circularity | 0.002 |
| Min. dist. | -0.001 | Max. dist. | 0.001 |
| X | 44.032 | X | 44.362 |
| Y | 44.357 | Y | 44.030 |
| Radius | 62.501 | Radius | 62.503 |
| Phi | 45:12:37 | Phi | 44:47:07 |