Tampereen ammattikorkeakoulu

Koordinaattimittakoneen mittausepävarmuus

Hermanni Salonen

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2023

Konetekniikka
Tuotantotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotantotekniikka

SALONEN, HERMANNI:
Koordinaattimittakoneen mittausepävarmuus

Opinnäytetyö 49 sivua, joista liitteitä 11 sivua
Huhtikuu 2023

Opinnäytetyön aiheena oli käytetyn koordinaattimittakoneen mittausepävarmuuden selvittäminen. Koordinaattimittakone on tarkka ja kallis mittauslaite, joten sen ominaisuuksia on syytä selvittää. Mittausepävarmuuden ollessa tiedossa, koordinaattimittakoneen käytöstä tulee helpompaa ja varmempaa. Koneen ollessa myös opetuskäytössä siitä tulisi tietää mahdollisimman paljon niin opettajan kuin opiskelijan näkökulmasta. Kun koneen tiedot ovat selvillä, myös mittauspalveluiden myyminen ulkopuolisille toimitsijoille muuttuu helpommaksi.

Mittausepävarmuus selvitettiin kokeellisten mittausten ja niistä luotujen matemaattisten päätelmien pohjalta. Opinnäytetyön raportissa on esitelty selvitystavat ja perusteltu, miksi käytettyyn tapaan päädyttiin. Opinnäytetyön aikana havaitut ongelmakohdat mittausepävarmuuden selvityksessä sekä ongelmakohtien vaikutus saatuihin tuloksiin on myös esitelty.

Mittauksien järjestelyistä ja tuloksista on esitetty tiedot opinnäytetyöraportin loppupuolella. Microsoft Excel -taulukointiohjelmaan kirjatut mittaustulokset on esitelty opinnäytetyön liitteissä. Opinnäytetyöraporttia voidaan käyttää apuna saamaan parempi käsitys koordinaattimittakoneen mittausepävarmuudesta sekä mittausepävarmuuden määrittämisestä.

Asiasanat: mittausepävarmuus, satunnainen virhe, koordinaattimittakone

ABSTRACT

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

SALONEN, HERMANNI:
Measurement Uncertainty of the Coordinate Measuring Machine
Bachelor's thesis 49 pages, appendices 11 pages
April 2023

This thesis investigates the measurement uncertainty of the coordinate measuring machine used at Tampere University of Applied Sciences campus. Since the coordinate measuring machine is an accurate and expensive measuring device, it is important to understand its characteristics. Knowing the measurement uncertainty makes the coordinate measuring machine easier and more reliable to use, especially since it is also used for teaching purposes. Additionally, having this information readily available makes it easier to sell measurement services to external customers.

The measurement uncertainty was determined through experimental measurements and mathematical analysis. The thesis explains the methods used and justifies why they were chosen. Any problems encountered during the investigation of measurement uncertainty are also discussed, along with their impact on the results.

The thesis concludes with information about the experimental setup and results, which are presented in a Microsoft Excel spreadsheet included as appendices. The thesis can also be used as a guide to gain a better understanding of the measurement uncertainty of a coordinate measuring machine and how to determine it.

Key words: measurement uncertainty, random error, coordinate measuring machine

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 6
2 MITTAUSYMPÄRISTÖ 7
2.1 Koneen esittely 7
2.2 Ohjelmistot 8
2.2.1 MCOSMOS 8
2.2.2 MiCat Planner 9
2.3 Mittaushuone 9
3 MITTAAMINEN 11
3.1 Mittaamisen teoria 11
3.1.1 Mittatyökalut 12
3.2 Mittausvirhe 13
3.2.1 Systemaattinen virhe 13
3.2.2 Satunnainen virhe 13
3.2.3 Karkea virhe 14
3.3 Mittausolosuhteiden vaikutus 14
3.3.1 Lämpötilan vaikutus 15
4 MITTAUSEPÄVARMUUS 16
4.1 Mittausepävarmuuden teoria 16
4.2 Määrittäminen 17
4.2.1 RR-testi 19
4.2.2 Mittausepävarmuus keskihajonnalla 20
4.3 Mittausepävarmuus koordinaattimittakoneilla 22
4.3.1 Käytetyn koneen suurin sallittu virhe 23
5 MITTAUKSET 24
5.1 Lähtökohdat 24
5.1.1 Pituuden mittaus 25
5.1.2 Halkaisijan mittaus 26
5.2 Kontrollimittaukset 28
6 MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI 29
6.1 Pituusmittauksen tulokset 29
6.2 Halkaisijamittauksen tulokset 30
6.3 Mittaustulosten analysointi ja mittausepävarmuus 31
7 POHDINTA 35
LÄHTEET 37
LIITTEET 39
Liite 1. Pituusmittausrigi. 39

Liite 2. Pituusmittauksen tulokset 40
Liite 3. Halkaisijamittauksen tulokset 41
Liite 4. Kontrollimittaukset 42
Liite 5. Halkaisijamittauksen eri asentoja 44
Liite 6. Mittaukset kokonaan, pisteillä ja tiedot 46
Liite 7. Mittaukset kokonaan, skannauksella ja tiedot 47
Liite 8. Mittaus sektoreilla, pisteillä mitattuna ja tiedot..... 48
Liite 9. Mittaus sektoreilla, skannauksella mitattuna ja tiedot 49

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on määrittää Tampereen ammattikorkeakoululla sijaitsevan Mitutoyon CRYSTA-Apex S574 -koordinaattimittakoneen mittausepävarmuus. Opinnäytetyön toimeksiantaja on Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö tehdään, jotta koordinaattimittakoneen käytöstä tulisi varmempaa ja helpompaa tulevaisuudessa.

Mittausepävarmuus on arvo, joka kertoo mittauksen luotettavuuden. Toisin sanoen mittausepävarmuutta käytetään ilmaisemaan, kuinka paljon mittalaitteella mitattu mitta voi olla virheellinen. Mittausepävarmuutta voidaan myös luonnehtia mittalaitteen toleranssiarvoksi. Opinnäytetyön aikana koordinaattimittakonetta käytettiin mittaamaan asetusrengasta ja mittapaloja eri mittakärjen asennoissa. Tulokset kirjattiin ylös, joiden perusteella päätelmät mittausepävarmuuteen tehtiin. Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä toisen oppilaan kanssa, kuka määritti samalle koordinaattimittakoneelle sen epävarmuuden toistomittauksissa.

Tässä raportissa käydään läpi mittaamisteoria, kuin myös mittausepävarmuuden teoria. Lisäksi on käyty läpi koordinaattimittakoneen toimintaa ja sillä mittaamista. Tämän jälkeen esitellään mittaustulokset ja päätelmät tulosten perusteella mittakoneen mittausepävarmuudesta sekä pohdinta suoritetusta työstä.

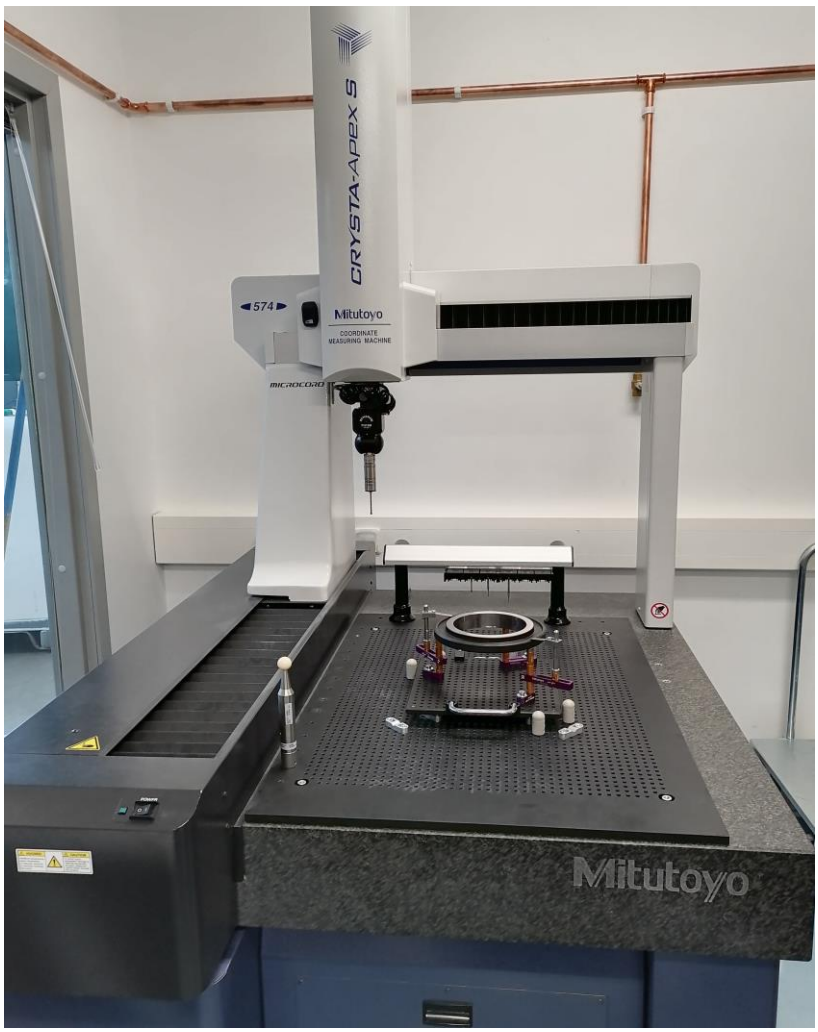
2 MITTAUSYMPÄRISTÖ

2.1 Koneen esittely

Tässä työssä käytettiin Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) mittauslaboratoriossa sijaitsevaa koordinaattimittakonetta (KUVA 1). Kyseinen kone on Mitutoyon siltatyyppinen CRYSTA-Apex S-sarjan koordinaattimittakone. Tämän S-sarjan koneet ovat pieniä ja ne soveltuvat hyvin varsinkin TAMKilla tapahtuvaan koulutuskäyttöön, kun mitattavat kappaleet eivät ole kovin suuria.

Koordinaattimittakoneet ovat hyvin tarkkoja mittalaitteita. Kyseinen S-sarja pystyy mittaamaan kappaleita kymmenestuhannesosamillin tarkkuudella (0.0001 mm). Koneiden käyttämät mittauspäät voivat vaihdella mitattavan kappaleen vaatimusten mukaan. Koordinaattimittakoneet ovat myös nopeita mittalaitteita. Kun mittaamiselle suunnitellut radat on tehty, kone mittaa ne paljon nopeammin ja tarkemmin kuin ihminen mekaanisen mittalaitteen kanssa. Koordinaattimittakone voidaan luokitella yleismittauskoneeksi. Sen tarkkuudesta, nopeudesta ja joustavasta sekä luotettavasta käytöstä johtuen koneen hinta on myöskin melko kallis, joten se toimii usein hankkijan avainkoneena mittauksissa. (Tikka, H. 2009, 25; Mitutoyo [1]. n.d.)

Koordinaattimittakoneen toiminta perustuu 3D-ympäristössä tapahtuvaan mittaustapahtumaan. Käytännössä mitattava kappale asetetaan koneen työtasolle, jossa se käy mittaamassa kappaleesta haluttuja mittoja. Kone mittaa kappaleesta pisteitä, joiden avulla kappalegeometrian mitat muodostuvat. Jos mittaaminen suoritetaan kosketuskärjellä tai laserilla, mitatut pisteet ovat kappaleen pinnoilla. Videomittauksessa kappalegeometria syntyy kappaleen kontrastieroista syntyvistä havainnoista. (Tikka, H. 2009, 24.)



KUVA 1 TAMKilla käytössä oleva koordinaattimittakone.

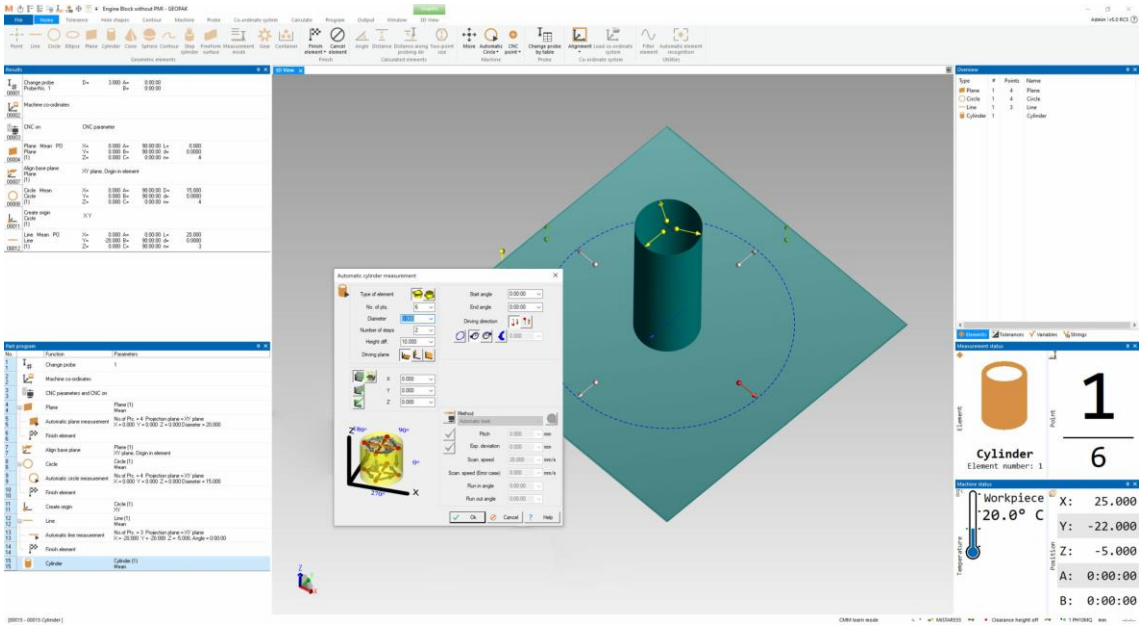
2.2 Ohjelmistot

Jokaisella koordinaattimittakoneella on olemassa tietokonekäyttöisiä ohjelmia, joilla konetta pystytään ohjelmoimaan ja lukemaan saatuja mittaustuloksia. Näillä kappaleohjelmilla muodostetaan kappalekoordinaatisto ja geometriat kappaleelle mitattujen pisteiden avulla. TAMKilla koordinaattimittakoneella oli käytössä kaksi Mitutoyon omaa ohjelmaa: MCOSMOS ja MiCat Planner.

2.2.1 MCOSMOS

MCOSMOS on Mitutoyon koordinaattimittakoneen datan prosessointiohjelma. Se mahdollistaa käyttäjille mittausohjelmien luomisen, mittausten suorittamisen ja mittausdatan analysoinnin. Nämä ominaisuudet varmistavat, että käyttäjä saa paljon dataa mittauksista (KUVA 2). MCOSMOS tukee erialisia tiedostomuotoja,

kuten CAD-tiedostoja, mikä mahdollistaa kappaleiden mittaussuunnitelmien tuomisen ohjelmaan, joista MCOSMOS osaa suoraan luoda mittausohjelmat. MCOSMOS pystyy tulostamaan dataa monissa eri muodoissa ja useita eri mittausprosessissa tuotettuja tuloksia, kuten mittoja, toleranssiheittoja ja mittauspisteiden koordinaatteja. (Mitutoyo [2]. n.d., 8–10.)



KUVA 2 Kuva MCOSMOS:in näytön näkymästä. (Mitutoyo [2]. n.d., 8.)

2.2.2 MiCat Planner

MiCat planner on Mitutoyon koordinaattimittakoneita varten suunniteltu metrologiaohjelma. Ohjelma on tarkoitettu automaattiseen osan ohjelmointiin ja mittausratojen luomiseen. Järjestelmän ollessa automaattinen se säästää aikaa ohjelmien luomisessa ja vähentää törmäysriskejä. Yksi ohjelman etuja on, että ohjelmaan voidaan suoraan tuoda CAD-malli mitattavasta kappaleesta ja osoittaessa mittaamiseen haluttua pintaa, ohjelma osaa itse muodostaa optimaalisen mittausradan. (Mitutoyo [3], n.d.)

2.3 Mittaushuone

Mittaushuone, jossa koordinaattimittakone on, sijaitsee TAMKin pääkampuksen alakerroksessa tuotantotekniikan laboratorion yhteydessä. Huone on pieni ja

siellä on koordinaattimittakoneen lisäksi tietokone ja muita koordinaattimittakoneen käyttöön tarkoitettua välineistöä. Tavallisuudesta poiketen kyseistä mittaustilan lämpötilaa ei ole kontrolloitu, tämä on toimeksiantajankin taholta havaittu merkittävä epäkohta huoneessa.

3 MITTAAMINEN

Metrologia on tieteenala, joka käsittelee mittaamista. Metrologia, ja myös siis mittaaminen, on välttämätöntä tieteellisessä tutkimuksessa ja kehityksessä. Mittatekniikan keskus, MIKES, jaottelee metrologian kolmeen eri luokkaan: teollisuusmetrologiaan sekä tieteelliseen ja lakisääteiseen metrologiaan. Mittaamista ei siis tapahdu pelkästään teollisuudessa. Mielipidekyselykin on eräänlainen mittaus. (Järvinen, J. Eerola, S. Kaukonen, M. 2008, 9–10.)

Kirjassaan Mittaus- ja laatutekniikat Andersson ja Tikka ovat luetelleet metrologiaan kuuluvien keskeisten kohteiden olevan

- Suureet
- Mittayksiköt ja niiden mittanormaalit
- Mittaukset
- Mittauslaitteet
- Mittaustulosten käsittely ja luotettavuuden arviointi
- Mittausten inhimilliset tekijät

(Andersson, P & Tikka, H. 1997, 120)

Yllä olevasta luettelosta, tässä kappaleessa käsitellään mittauksia, mittalaitteita ja mittatulosten käsittelyä ja niiden luotettavuutta.

3.1 Mittaamisen teoria

Teollisuudessa työkappaleiden mittaaminen on hyvin oleellinen osa kappaleiden ja tuotteiden valmistusta. Mittaamalla pystytään tarkastelemaan valmistettua kappaletta halutessa hyvinkin tarkasti ja kertomaan onko se valmistettu valmistajan haluamalla laatutasolla. Mittaamista tehdään tavallisesti monessa eri vaiheessa kappaleiden valmistusta, näin varmistuen, että kappale on valmistettu ohjeiden mukaan ja virhekappaleet voidaan karsia pois. Lopuksi kappaleille suoritetaan loppumittaus, jossa vähintään tarkastellaan kappaleelle merkityt kriittiset mitat, joiden pitää olla oikein. (Esala, V-P, Leino, H & Tikka, H. 2003, 6)

Mittaaminen on osa laadunvalvontaa. Varsinkin loppumittauksessa on tärkeää suorittaa mittaaminen huolellisesti, sillä se on viimeinen osa kappaleen valmistusta. Jos kappaleessa huomataan virheitä tai epätasaisuuksia laadussa, pystytään selvittämään, missä vaiheessa tuotteen tekoprosessia virhe on syntynyt. Virheet kappaleissa voivat johtaa hyvin kalliisiin materiaalimenetyksiin ja aikatauluviiveisiin. Näistä syistä teollisuudessa panostetaan mittaamiseen ja on tärkeää, että mittaukset ja mittatyökalut ovat laadukkaita ja luotettavia. (Esala, V-P, ym. 2003, 6)

Laadukkailla ja luotettavilla mittauksilla ja mittatyökaluilla varmistetaan, että mittaaminen tapahtuu laadunhallintastandardin mukaisesti. Standardin toteutuminen jää mittaajaorganisaation vastuulle, joten sen on järjestettävä mittausten onnistumiselle tarvittavat resurssit. Mittausorganisaation on myös suoritettava paikkansa pitävää dokumentointia mittausresurssien sopivuudesta kyseiseen tarkoitukseen. (SFS-EN 9001:2015,16–17.)

3.1.1 Mittatyökalut

Käsikäyttöisiä mittatyökaluja, kuten työntömittoja ja mikrometrejä käytetään laajalti teollisuudessa. Niitä on helppoa ja nopeaa käyttää ja niillä saa tarkkoja mittoja erilaisista kappaleista. Ne eivät kuitenkaan pysty mittaamaan monimutkaisia kappaleita tai muotoja.

Mittakoneet ovat nykyaikaisia mittalaitteita. Mittakoneet ovat yleisiä työkaluja, varsinkin isoilla tehtailla, joissa kappaleiden muodot voivat vaihdella suuresti. Nämä koneet ovat hyvin tarkkoja mittalaitteita, jotka kykenevät mittaamaan hyvin erilaisia kappaleita ja niiden mittoja. Mittakoneet ja varsinkin koordinaattimittakoneet soveltuvat mittaamaan pieniä ja keskisuuria kappaleita.

Teollisuudessa on käytössä myös optisia mittalaitteistoja, kuten laserskannereita. Optisilla mittalaitteilla pystytään tuottamaan erittäin tarkkoja mittoja kappaleista. Niillä mitataan usein suuria ja hyvin monimutkaisia kappaleita, jotka tuottavat hankaluuksia mitata muilla keinoilla.

3.2 Mittausvirhe

Mittausvirhe tarkoittaa mitattavan suureen todellisen arvon ja mitatun tuloksen eroa. On yleisesti hyväksytty fakta, että mikään mittaus ei ole täysin virheetön. Virheitä tapahtuu aina, koska mitkään mittaukseen kuuluvat tekijät eivät ole täydellisiä. Mittaamalla samaa kohdetta useita kertoja, eli tehdessä toistomittauksia, mittausvirhe on mahdollista antaa arvio laskemalla. Virhetekijöitä on lukuisia, kuten mittauksen kohde, mittalaite, mittaaja ja ulkoiset olosuhteet, näitä tekijöitä kutsutaan myös virhelähteiksi. Virheet mittatuloksissa jaetaan perinteisesti kolmeen ryhmään: systemaattiset, satunnaiset ja karkeat virheet. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 127; Keinänen, T & Järvinen, M. 2014, 95.)

3.2.1 Systemaattinen virhe

Systemaattinen virhe on virhe, joka esiintyy mittauksissa säännönmukaisesti. Säännonmukaisuus tulee ilmi, jos mitataan samaa suuretta toistuvasti. Virhelähteitä tällöin ovat mittalaite, mittausympäristö tai mittausmenetelmä, eli niille tiedetään jokin tunnettu suunta ja suuruus ja ne noudattavat tiettyjä säännönmukaisuuksia. Mitä suurempi osa mittaukseen vaikuttavista tekijöistä tiedetään, sitä paremmin ne voidaan luokitella systemaattisiksi virheiksi. Systemaattiset virheet ovat korjattavissa kalibroimalla mittalaitteet standardin mukaisesti. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 128; Keinänen, T & Järvinen, M. 2014, 95.)

Mittaustuloksissa systemaattisen virheiden lähteitä on tavallisesti useita. Varsinainen systemaattinen virhe saadaan, kun ne lasketaan yhteen. Virheet voivat esiintyä toisiinsa nähden vastakkaissuuntaisina, joten varsinaista virhettä laskiessa on tärkeää huomioida virheiden etumerkit. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 128.)

3.2.2 Satunnainen virhe

Satunnainen virhe on mittausvirhe, joka esiintyy mitattaessa samaa arvoa samoissa tai samankaltaisissa olosuhteissa. Satunnaisesta virheestä käytetään myös nimitystä tilastollinen virhe (Keinänen, T & Järvinen, M. 2014, 95). Nimitys tulee siitä, että virheen suuruus vaihtelee satunnaisesti ja virhelähteitä ei pystytä

laskemaan tai hallitsemaan. Näin ollen satunnaisiin virheisiin on otettava mukaan myös ne systemaattiset virheet, joita ei pystytä korjaamaan vajavaisen tiedon vuoksi. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 129.)

Satunnainen virhe on mahdollista havaita ja poistaa tekemällä toistomittauksia. Toistomittauksista saaduista tuloksista voidaan laskea keskiarvo. Toistomittauksia ja keskiarvon laskemista jatkettaessa, satunnaisen virheen vaikutus pienenee. Tällöin havaitaan myös satunnaisvirheen suuruusluokka. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 129.)

3.2.3 Karkea virhe

Karkea virhe on se mitä tarkoitetaan, kun arkikielessä käytetään termiä virhe. Karkea virhe siis on erilaisista erehdyksistä ja huolimattomuudesta johtuvia virheitä. Karkeiden virheiden syitä voi olla laidasta laitaan ja niiden suuruusluokka voi olla moninkertainen muihin virheisiin verrattaessa. Vaikka mittauspisteestä saadut tulokset voivat olla räikeästi eriarvoiset, muihin verrattuna, niitä ei voida tulostentarkastelussa hylätä, ennen kuin mittaajalla on selkeä käsitys siitä, mistä erikoinen tulos on saattanut johtua. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 130; Keinänen, T & Järvinen, M. 2014, 95.)

3.3 Mittausolosuhteiden vaikutus

Missä tahansa mittaamisprosessissa on äärimmäisen tärkeää huomioida mittausolosuhteiden vaikutus mittaukseen ja mittaustuloksiin. Mittauksissa pyritään aina pitämään mittausolosuhteet vakiona, näin varmistaen, että mittauksissa syntyy mahdollisimman vähän ympäristöstä johtuvia virheitä.

Varteen otettavia ympäristötekijöitä mittauksissa ovat

- Lämpötila
- Ilman kosteus
- Värähtely
- Valaistus
- Puhtaus
- Ilman värähtely

(Keinänen, T & Järvinen, M. 2014, 97.)

Erilaiset ympäristötekijät vaikuttavat eri lailla mitattavaan kohteeseen ja mittalaitteeseen riippuen kyseisistä materiaaleista ja toimintatavasta. Tässä kyseisessä tutkimuksessa tärkein yksittäinen ympäristötekijä on lämpötila.

3.3.1 Lämpötilan vaikutus

Lämpötilan vaihtelut ovat mittauksien suurin virhelähde (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 130). Lämpötilat vaikuttavat aina mitattavien kappaleiden muodoista aina valoon asti. Mekaanisten mittalaitteiden virhe on yleensä pieni, sillä mittalaitteet ja mitattavat kappaleet ovat yleisesti metallia, jolloin lämpölaajenemisen ansiosta ne muuttuvat hitaammin. Jos mitattava kappale ja mittalaite ovat samaa materiaalia, ne muuttuvat lähes samalla tahdilla, jolloin virhe pysyy pienenä. Mittakoneilla, kuten koordinaattimittakoneella lämpötilan vaikutus voi olla suuri, tämä johtuu mittalaitteen tarkkuuden suuruudesta, jolloin pienikin muutos näyttäytyy suurena mittavirheenä. (Keinänen, T & Järvinen, M. 2014, 97.)

Lämpötilojen vaihtelu on myös vaikeimmin hallittavissa oleva virhelähde. Vaikeus johtuu kappaleiden materiaalien ominaisesta käyttäytymisen erilaisuuksista ja tasaisen lämpötilan saavuttamisen hankaluudesta. Mittaamistiloissa pyritään mahdollisimman tasaisiin olosuhteisiin, tämä tehdään yleensä erilaisten lämmönsäätelylaitteiden avulla. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 130.)

Vaativat mittaukset on määritelty suoritettaviksi noin +20 °C:n lämpötilan mittaustiloissa (Keinänen, T & Järvinen, M. 2014, 97). Tästä johtuen teknisten kappaleiden mitat on myös ilmoitettu niiden +20 °C:n mitoissa. Koska mittauslämpötila on säädelty ja kappaleiden mitat on tunnettu, syntyvät virheet ovat systemaattisia, kunhan tiedetään kappaleen ja mittalaitteen lämpölaajenemiskertoimet sekä kappaleen ja mittavälineen lämpötila. Jos jostain näistä neljästä tiedosta ollaan epävarmoja, on lämpötilasta johtuvat virheet käsiteltävä tuntemattomina systemaattisina virheinä. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 130–131.)

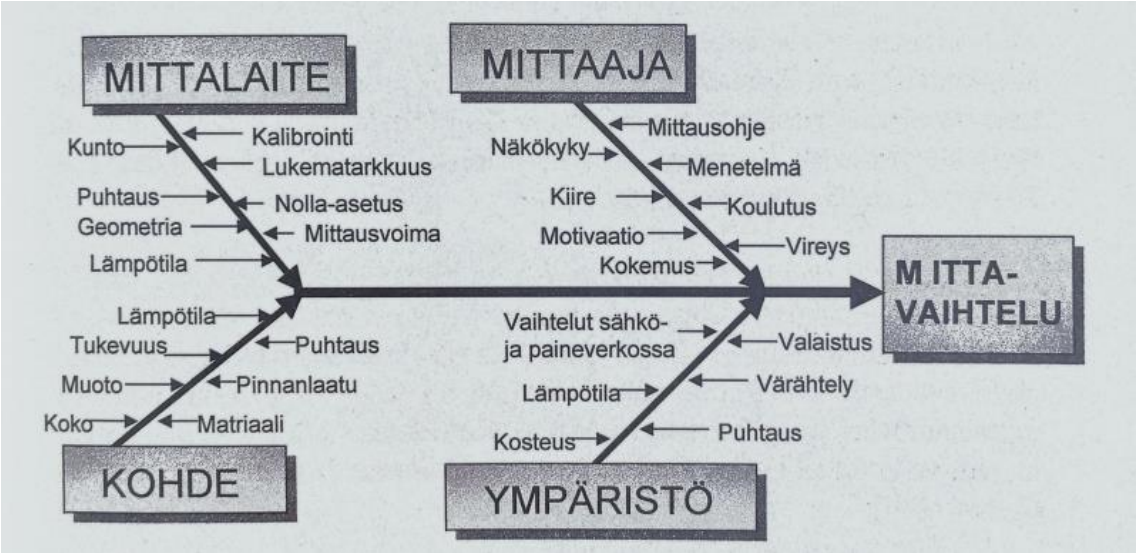
4 MITTAUSEPÄVARMUUS

4.1 Mittausepävarmuuden teoria

Mittatulosten luotettavuuden tietäminen on hyvin tärkeää mittaamisessa ja varsinkin kalibroinnissa. Mittatulos ei ole ikinä absoluuttinen, vaan se on vain arvio todellisesta mitasta. Jotta saatu mitta olisi mahdollisimman tarkka, on tiedettävä mitatun arvon ja mittavirheen lisäksi myös mittausepävarmuus. Mittausepävarmuus (käytetään myös nimitystä mittaustulosten vaihtelu) on arvio mittavirheen suuruudesta, toisin sanoen se on parametri, joka kuvaa mittaustulosten odotettua vaihtelua (Keinänen, T & Järvinen, M. 2014, 98). Mittausepävarmuus on mukana jokaisesta mittauksessa mittaajasta, mittalaitteesta tai mittausolosuhteista riippumatta. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 147; Mittausepävarmuus. 2021.)

Varsinkin nykypäivänä, tuotteet ja palvelut vaativat entistä tarkempaa ja luotettavampaa dataa tuotekehityksen ja kilpailun takia. Tästä syystä mittausepävarmuuden määrittelemisestäkin on tullut entistä tärkeämpää. (Peuranen, H & Esala, V-P, 2020.)

Mittausepävarmuus voi olla monen asian summa (KUVIO 1), joten sen määrittelyn halutaan olevan mahdollisimman kaikenkattava, jolloin se sopisi mahdollisimman monenlaisille mittauksille. Syy-seuraus-diagrammi on tehokas työkalu selvittämään mittausepävarmuuden lähteitä. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 147; Peuranen, H & Esala, V-P. 2020.)



KUVIO 1 Mittausepävarmuuden syy-seuraus-diagrammi (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 139.)

Itse mittausepävarmuus on luonnehdittu koostuvan vain kahdesta komponentista: satunnaisesta- ja systemaattisesta virheestä. Kaava tälle on suhteellisen yksinkertainen

$$u = u_r + u_s \tag{1}$$

tai vaihtoehtoisesti

$$u = \sqrt{u_r^2 + u_s^2} \tag{2}$$

joissa u_r on satunnainen virhe ja u_s on systemaattinen virhe.

Se kumpaa kaavaa käytetään, riippuu määritettävästä kohteesta. Kaavaa 1 käytetään yleisesti, mikäli mitattavat kappaleet ovat todella erisuuruisia. Muissa tapauksissa käytetään kaavaa 2, joka on johdettu Pythagoraan lauseesta. Vaikka mittausepävarmuuden kaavat ovat yksinkertaisia, näiden komponenttien määrittämiseen voi olla useita eri tapoja ja kaavoja, riippuen määrittelymetodista.

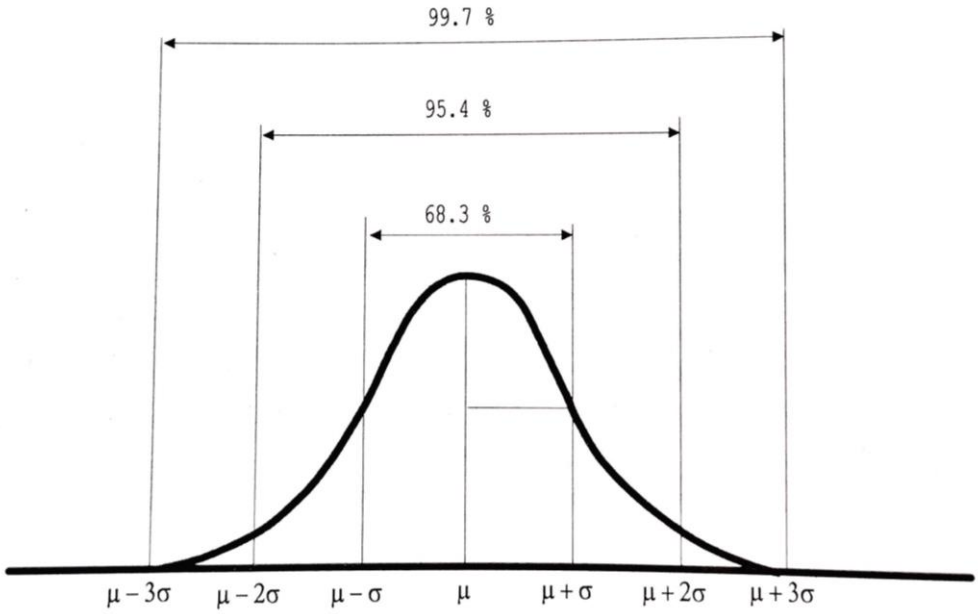
4.2 Määrittäminen

Mittauksia on hankalaa tarkastella, jos ne on tehty eri aikana, eri paikoissa, minkä vuoksi mittausprosessien mittausepävarmuuden määrittämiseksi on

määritelty standardi. Standardi määrittelee, että mittausepävarmuus tulee määritellä jokaiselle mittausprosessille, jota suoritetaan mittauksien hallintajärjestelmässä. Standardi ohjeistaa, että niin epävarmuuden arvioinnit kuin mittauksen vaihteluiden lähteet tulee dokumentoida. Ennen kuin mittalaitteisto ja mittausprosessi hyväksytään, tulee mittausepävarmuuden määrittely olla suoritettu. Lisäksi on varmistettava, että mittatulokset ovat jäljitettävissä SI-järjestelmään. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 147; SFS-EN 10012:2003, 28).

Ilmoittaessa mittaustulosta ja -epävarmuutta on myös olennaista kertoa saatuihin tuloksiin johtaneista tekijöistä. Näitä tekijöitä ovat epävarmuuden määrityksessä käytetty laskutapa, epävarmuudessa olevat osatekijät, itse epävarmuudessa käytetty lasku, kerroin epävarmuudelle ja kertoimen avulla saatu todennäköisyys epävarmuuden oikeellisuudesta. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 155.)

Ilmoittaessa mittausepävarmuutta on myös välttämätöntä ilmoittaa mittauksissa käytettävä kattavuuskerroin. Tämä on kerroin, jota käytetään mittausepävarmuuden määrittämisessä, joka taas kertoo mittauksia tehdessä tulosten oikeellisuuden todennäköisyyden. Kertoimesta yleensä käytetään kirjainta *k* ja se ilmaistaan arvoina 1, 2 ja 3. Nämä arvot vastaavat todennäköisyyksiä 68,3 %, 95,5 % ja 99,7 %, joilla mittaustulos on totta annetulla mittausepävarmuudella. Kuviossa 2 on esitelty, mitkä osuudet varmuuskertoimet kattavat, tulosten ollessa normaalisti jakautuneet. (Esala, V-P, ym. 2003, 56.)



KUVIO 2 Normaalisti jakautunut kuvaaja ja varmuuskertoimet tuloksista (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 130.)

Käytännössä mittausepävarmuus on mahdollista määrittää laskennallisesti tai kokeellisesti mittausten avulla. Laskennallinen tapa voi olla teoreettisesti monimutkaista ja kokeellisesti päästään usein hyväksyttäviin arvoihin, joten kokeellista tapaa suositaan. Kokeellisesti mittausepävarmuus voidaan määritellä eri tavoilla. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 147; Peuranen, H & Esala, V-P. 2020.)

4.2.1 RR-testi

RR-testi tai GR&R- testi (eng. Gage Repeatability & Reproducibility) on yksi mittalaitteen mittausepävarmuuden kokeelliseen määrittämiseen oleva keino. Suomeksi RR-testi tarkoittaa karkeasti käännettynä toistettavuus ja uusittavuus testiä, englannin sana ”Gage” tarkoittaa tässä mittavälinettä, jolle testi suoritetaan. (Hessing. n.d.)

Toistettavuus tarkoittaa vaihtelua mittaustulosten välillä, kun mittaaja, mittaväline ja mittauskohde pysyvät samoina. Eli toisin sanoen kuinka paljon mittatuloksissa on vaihtelua toistomittauksissa. Mittausten on myös tapahduttava lyhyellä aikavälillä. Tällä tarkastelulla pystytään kertomaan kuinka tarkka ja luotettava mittaaja on. (SFS-EN 21748:2017, 3; Hessing. n.d.)

Uusittavuus tarkoittaa puolestaan sitä vaihtelua mittaustulosten välillä, kun mittauskohde ja mittaustekniikka pysyvät samoina, mutta mittaaja vaihtuu. Myös mittalaite voidaan vaihtaa, mutta sen toimintaperiaate on pysyttävä samana. Tämä kertoo paremmin, kuinka luotettava mittaustekniikka ja -kohteet ovat käyttäjästä riippumatta. (SFS-EN 21748:2017, 3; Hessing. n.d.)

Näistä kahdesta vertailusta yhdessä voidaan arvioida mittausjärjestelmän vaihtelua. Tästä vaihtelusta voidaan sitten saada mittausepävarmuus laskemalla. RR-testi onkin havainnollisempi ja helpompi tapa selvittää teoreettisesti hankalia asioita. RR-testit pohjautuvat siis toistomittauksiin ja niitä on olemassa lyhyt ja pitkä RR-testi, sekä aistinvarainen testi. Näistä lyhyt ja pitkä RR-testi liittyvät suoranaisesti mittausepävarmuuteen. Lyhyen ja pitkän RR-testien nimitykset tulevat siitä, kuinka monen toiston toistomittaus on kyseessä. Lyhyt testi kertoo nopeasti vain mittausten kokonaisvaihtelun, kun taas pitkä testi kertoo myös mittaajasta, mittavälineestä, mitattavasta kappaleesta johtuvat sekä koko mittausprosessin kokonaisvaihtelut. (Peuranen, H & Esala, V-P. 2020; Hessing. n.d.)

Lyhyetkin RR-testit kertovat siis tarkasti mittausprosessien tai -järjestelmien kokonaisepävarmuudet, joka on usein riittävä arvo, kun mittausepävarmuus halutaan tietää. Ihanteellisessa tapauksessa RR-testejä suoritetaan säännöllisesti, jolloin mittausprosessit pysyvät ajan tasalla ja syntyviä muutoksia on helpompi havaita. (Feldman, K. 2018; Peuranen, H & Esala, V-P. 2020.)

Mittausepävarmuusarvo saadaan RR-testeillä prosenttilukuna, joka kertoo, kuinka suurta epävarmuus on. Huolellisesti suoritetut RR-testit antavat prosenttiarvot, joiden tuloksia on luonnehdittu seuraavasti: Alle 10 %, mittausprosessi voidaan hyväksyä, 10 % – 30 %, mittausprosessi voidaan hyväksyä tapauskohtaisesti ja yli 30 %, mittausprosessia ei voida hyväksyä. (Feldman, K. 2018; Peuranen, H & Esala, V-P. 2020.)

4.2.2 Mittausepävarmuus keskihajonnalla

Toinen tapa selvittää kokeellisesti mittausepävarmuus, on mittausten keskihajonnan kautta. Näin tehdään yleensä, jos RR-testiä ei ole mielekästä käyttää tai

vaihtoehtoisesti vain halutaan selvittää mittausepävarmuus toisella tavalla. Keskihajonnalla selvittäminen perustuu mittausten satunnaisen virheen vaikutuksen huomioon ottamiseen. Kuten aiemmin todettiin satunnaiset virheet ovat nimensä mukaan satunnaisia, eikä niiden lähteitä pystytä hallitsemaan. Tämän vuoksi on kehitetty keino, jolla satunnaiset virheet voidaan ottaa huomioon ilman, että tiedetään niiden tarkkaa syytä. Satunnaiset virheet tulevat esiin suorittaessa toistomittauksia, joissa räikeät, yksittäiset virheet tulevat hyvin esille ja tuntemattomista lähteistä johtuvat satunnaiset virheet pysyvät, jolloin niitä voidaan laskea. Pelkistettynä satunnaisen virheen suuruus on mittausten keskihajonta, *s*. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 129; Esala, V-P. Lehto, H. Tikka, H. 2003, 59.)

Keskihajonnan, *s*, määrittämiseen on olemassa kaava

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{3}$$

jossa x_i on yksittäinen tulos, $\bar{x}$ on mittausten keskiarvo ja *n* on mittausten lukumäärä. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 129; Esala, V-P, ym. 2003, 59.)

Kuten jo todettu, keskihajonta selvitetään parhaiten toistomittauksilla, joten mittauksia on suorittava monta, jotta saatu tulos keskihajonnalle olisi luotettava. On suositeltavaa, että mittauksia suoritetaan ainakin kymmenen, jos niitä suoritetaan alle tämän verran, pitää saatu tulos kertoa vielä varmuuskertoimella *h*. Varmuuskertoimet mittausten lukumäärään nähden on esitetty alla (TAULUKKO 1). (Esala, V-P, ym. 2003, 59.)

TAULUKKO 1 Varmuuskerrointaulukko (Esala, V-P, ym. 2003, 59.)

Mittausten lkm.	Varmuuskerroin *h*
2	7,0
3	2,3
4	1,7
5	1,4
6	1,3
7	1,3
8	1,2
9	1,2

Kuten kaavoista 1 ja 2 kerrotaan, satunnainen virhe keskihajonnalla ei yksinomaan riitä mittausepävarmuuden laskemiseen, vaan tarvitaan myös systemaattinen virhe. Systemaattisia virhelähteitä voi olla useita ja kaikkien määritys tarkasti voi olla hankalaa. Joskus systemaattiset virheet voivat olla niin pieniä, että on syytä pohtia, onko kaikkia virhelähteitä järkevää lähteä selvittämään ja saavutetaanko niillä todellisesti merkittäviä tuloksia. Jos kaikki systemaattisten virhelähteiden arvot halutaan selvittää, se voi osoittautua hankalaksi ja kalliiksi, virhelähteiden moninaisuuden vuoksi. (Andersson, P & Tikka, H. 1997, 128.)

4.3 Mittausepävarmuus koordinaattimittakoneilla

Perinteisesti koordinaattimittakoneen mittaamista tutkitaan jo kalibroiduilla normaaleilla, kuten mittapaloilla. Mittaukset suoritetaan näin, koska koordinaattimittakone on erittäin tarkka mittauksissaan, joten mitattavien kappaleiden on myös syytä olla tarkkoja. Mittaepävarmuuden määrityksessä on tärkeää varmistaa koneen mittauskyky, jotta konetta olisi ylipäätään mielekästä tutkia. Alkaessa selvittämään mittausepävarmuutta on myös järkevää pohtia, onko se tarpeellista koneelle. Yleisesti mittausepävarmuuden määrittäminen on fiksua, jos edellisestä määrityksestä on aikaa tai kone on kokenut jonkin muutoksen, että kalibrointi on myös tarpeellista. (Tikka, H. 2009, 388–389.)

Euroopassa käytetyt standardit ja ohjeet koordinaattimittakoneiden suorituskyvyn tarkastukseen on ISO 10360, VDI/VDE 2617 ja CMMA. Näistä ISO 10360 on kenties tunnetuin ja Suomessa yleisesti käytössä. VDI/VDE 2617 on koko ajan uudistuva ohje, ei standardi. Sen on laatinut saksalainen insinöörijärjestö.

CMMA on taas koordinaattimittakoneiden valmistajien luoman järjestön virallinen kalibrointiohje. Euroopassa on siis useita standardeja ja ohjeita, on siis tärkeää tietää mitä noudattaa, koska myös se pitää ilmoittaa mittausepävarmuuden määrityksessä. (Tikka, H. 2009, 389–390.)

Koska mittaepävarmuuden määritys suoritetaan yleensä mittapaloilla ja muilla tarkoilla mittauskohteilla, myöskin tulos kuvastaa näitä olosuhteita. On siis tärkeää pitää mittausepävarmuusmittaukset monipuolisina, koska myös käytännön tapauksissa mitattavat kappaleet voivat vaihdella hyvin paljon. Eli on suositeltavaa tehdä mittausepävarmuustestejä erilaisilla mittakärjillä, mittausasennoilla ja -nopeuksilla. Näin eri tapoja käytettäessä käytännössä mittausepävarmuus on paremmin määritelty ja näin varmempi. (Tikka, H. 2009, 391.)

4.3.1 Käytetyn koneen suurin sallittu virhe

Koneen valmistaja Mitutoyo on käyttänyt edellä mainittua standardia ISO 10360 määrittämään käytössä olleen CRYSTA-Apex S 500 -sarjan koneen tietoja. Dokumentissa, missä esitellään koneen tiedot, on myös esitelty valmistajan määräämä maksimi virhe pituusmittauksessa eri mittauskärjille eri mittauslämpötiloissa. Tarkemmin näihin käytetty standardi on ISO 10360-2:2009. (Mitutoyo [4]. n.d., 3.)

Suurin sallittu virhe on määritelty eri lämpötilaluokissa, nämä luokat määräytyvät sen mukaan, kuinka tasainen lämpötila on mittaustilassa. Luokkia on 1 ja 2. Luokka 1 on tila, jonka lämpötila saa olla 20±2 °C, luokka 2 taas on tila, jossa se saa olla 16–26 °C. Koska käytössä olleen mittaustilan lämpötilaa ei ollut säädelty, joten on oletettavaa, että mittaustilanteessa lämpötilaluokka on 2. Tämän luokan ja käytössä olleiden mittakärkien mukaan suurimmalle sallitulle virheelle otetaan käyttöön kaava

$$1{,}7 + 4 * \frac{L}{1000} \tag{4}$$

jossa L on pituuden mitta millimetreinä. Kaava 4 antaa tuloksen mikrometreinä. (Mitutoyo [4]. n.d., 3.)

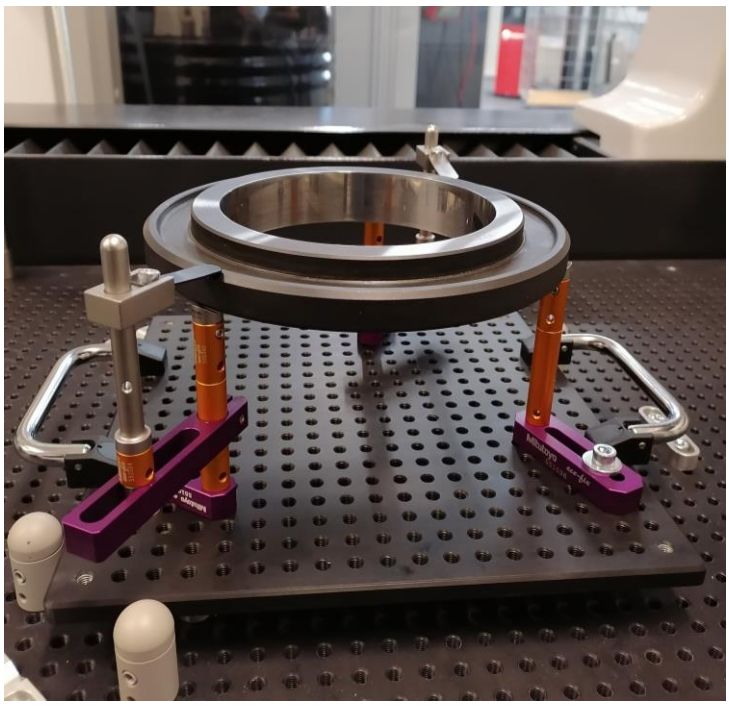
5 MITTAUKSET

5.1 Lähtökohdat

Koordinaattimittakoneen mittausepävarmuutta lähdettiin selvittämään kahdella eri mittauskohteella. Mittauskohteina käytettiin mittapaloja ja asetusrengasta. Tämä tehtiin, sillä mittapaloja ja asetusrenkaita käytetään kalibroimiseen, jolloin niiden mitat ovat eksakteja ja saatuja tuloksia on helpompi vertailla, kun kohteiden tarkat mitat ovat tiedossa. Toki on huomioitavaa, että mittapaloissa ja asetusrenkaissa on myös pieniä toleransseja, mutta ne ovat huomattavasti pienempiä kuin muissa valmistetuissa kappaleissa. Aloittaessa mittausta, kävi myös ilmi, että viimeisestä koneen mittakärkien kalibroinnista oli kulunut jo aikaa. Tästä syystä ennen mittauksia mittakärjet kalibrointiin, jotta mittaustulokset olisivat varmempia mittauksia suorittaessa.

Kummastakin kohteesta mittauksia suoritettiin eri mittaustyyleillä ja -asennoilla, näin saaden mahdollisimman paljon dataa mittauksista, jolloin mittausepävarmuustulos olisi varmempi. Mittauksia suoritettiin kahdella eri mittakärjellä, lyhyellä ja pitkällä. Mittakärjet olivat Mitutoyon K651151 ja K651147 malleja, joista jälkimmäisessä oli käytössä vielä K651159 jatkovarsi. Molemmissa kärjissä on päässä rubiinipallo, joilla kosketus kappaleeseen tapahtuu, K651151:ssa pallo on 4,0 mm halkaisijaltaan ja K651147:ssa 2,0 mm. Näistä mittakärjistä käytetään myöhemmin nimityksiä lyhyt ja pitkä mittavarsi yksinkertaisuuden vuoksi, K651151 on lyhyt ja K651147 on pitkä.

Mittausepävarmuutta päätettiin lähteä selvittämään ottamalla mittausdata kaksi kertaa kustakin mittaustavasta molemmilla mittauskohteilla. Tämä suoritettiin siten, että jokaisen mittauskerran jälkeen paletti, jossa mitattava kohde oli kiinni (KUVA 3), irrotettiin pöydästä ja laitettiin takaisin, jolloin saatiin mittaustulosten vaihtelua paletin asettamisesta. Koska paletilla on tietty asento, jolla se saadaan pöytään ihmisen toimesta, tämän pitäisi antaa tuloksissa mittauseroja. Tämän lisäksi mittauksia suoritettiin siten, että mittakärki oli eri asennoissa, missä selvitettiin kuinka paljon se vaikuttaa mittaustulosten vaihteluun.

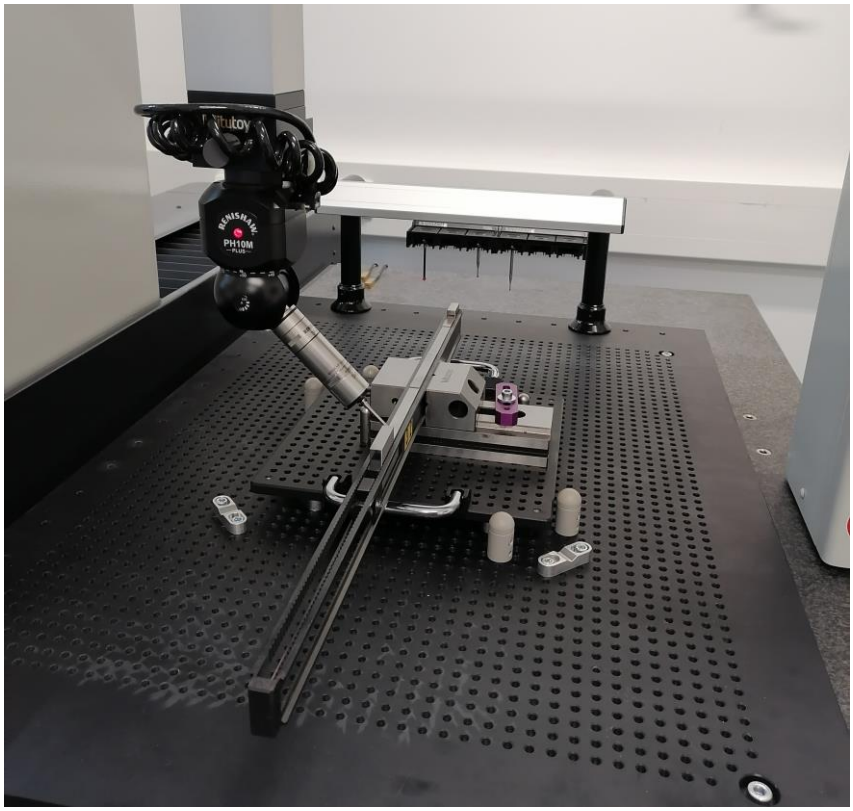


KUVA 3 Mittakoordinaattikoneen paletti ja mitattava asetusrengas.

Tässä kyseisessä tapauksessa mittausepävarmuutta oli järkevämpi selvittää keskihajonnan kautta. RR-testi vaatisi monia eri kappaleita, joita tällä kertaa ei ollut saatavilla. Lisäksi pitkä RR-testi vaatisi useita eri mittaajia ja koska nyt mittauksen suoritti koordinaattimittakone, niin tätä ei ollut mahdollista suorittaa.

5.1.1 Pituuden mittaus

Ensimmäinen mitattava suure oli pituusmittaus. Tämä tehtiin asettamalla mittapalat 300 millimetriä pitkään jonoon, erityiseen mittapalojen kalibrointirigiin (Liite 1). Mittapalat uitettiin yhteen ja niistä syntyneen jonon yhteinen toleranssi oli +0.83 µm. Jonon päihin asetettiin yhdet mittapalat pystyyn, jotta koordinaattimittakone pystyisi mittapäällä mittaamaan niiden etäisyyden. Sen jälkeen koordinaattimittakoneella mitattiin näiden etäisyys kosketusmittapäällä. Ensin etäisyys mitattiin mittakärjen ollessa suorassa, sitten sen ollessa 45 asteen kulmassa ja lopuksi päätä pyöritettiin 180 astetta z-akselin ympäri, jolloin pää oli yhä 45 asteen kulmassa, mutta mittaus tapahtui eri puolelta kuin toisessa mittauksessa (KUVA 4). Näiden mittausten jälkeen kone vaihtoi mittakärjen ja samat mittaukset toistettiin. Kahden mittauskierroksen jälkeen paletti irrotettiin ja laitettiin takaisin. Tämä sarja toistettiin kymmenen kertaa, jolloin saatiin liitteessä 2 esitetyt arvot pituudelle ja mittavaihteluille tavoitellusta mitasta, joka oli 300 millimetriä.



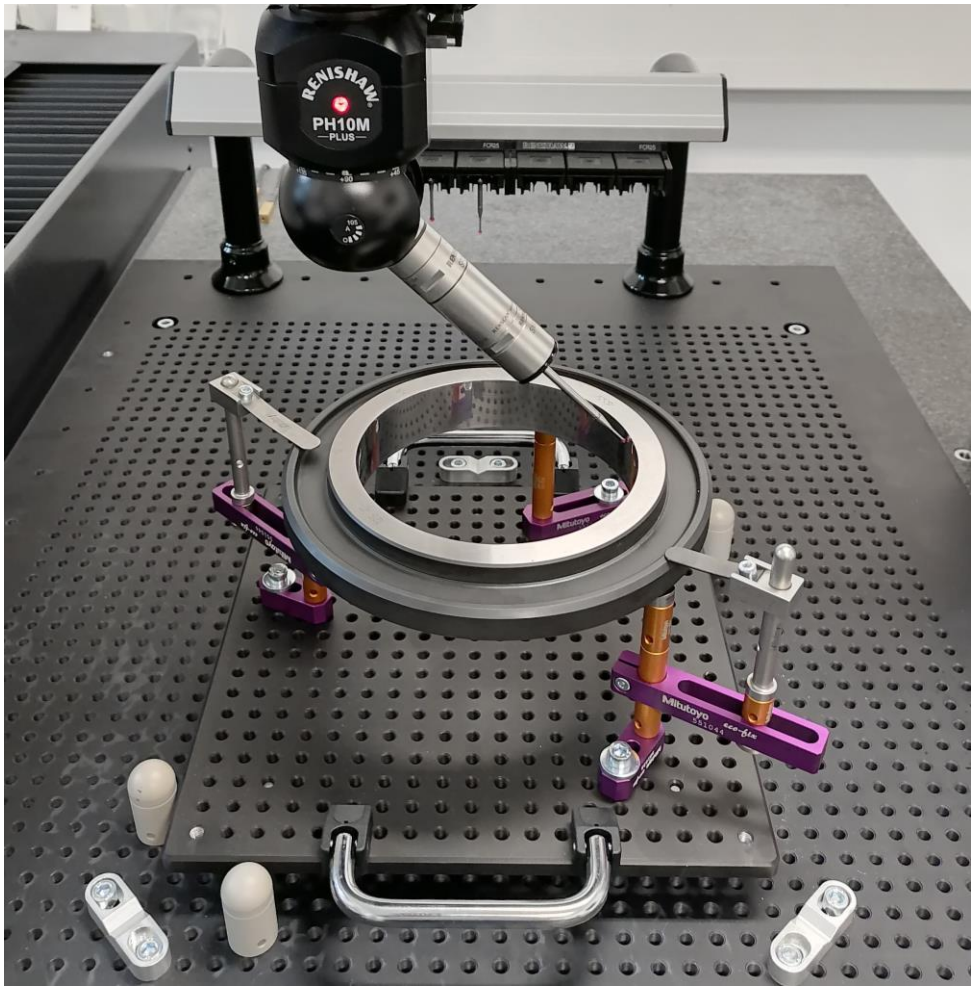
KUVA 4 Pituuden mittaaminen mittakärjen ollessa 45 asteen kulmassa.

5.1.2 Halkaisijan mittaus

Pituusmittauksen tapaan, halkaisijan mittaus tehtiin kahdella eri mittauskärjellä ja eri asennoissa. Mittakärki asetettiin mittaamaan 125 mm asetusrenkaan sisähalkaisijaa. Asetusrenkaan toleranssi oli ±0,006 µm. Kuten aiemmin, palettia myös nostettiin mittauskiertojen välissä. Mittauksia suoritettiin yhteensä kahdeksan, ensin neljä mittausta taas lyhyemmällä mittakärjellä ja sen jälkeen pidemmällä.

Ensin mittakärki oli suorassa, jolloin kone laitettiin mittaamaan renkaan halkaisijaa pisteittäin sen kehältä, näitä mittauspisteitä oli yhteensä 12. Tämän jälkeen mitattiin halkaisija skannaamalla, eli mittakärki pyörähti renkaan ympäri yhdellä liikkeellä, mittakärjen ollessa koko ajan kosketuksissa renkaaseen. Liikkeen aikana mittapisteitä otettiin tietyin väliajoin, jolloin tulokset saatiin. Skannauksessakin päädyttiin ottamaan 12 mittauspistettä, vaikka skannauksessa olisi ollut mahdollista ottaa pisteitä paljon enemmän.

Seuraava mittaus tehtiin asettamalla mittakärki 45 asteen kulmaan kuten pituuden mittauksissa. Hankalauutena näin mittaamalla oli, että mittakärki ei pystynyt pyörähtämään z-akselin ympäri ja samalla mittaamaan. Ratkaisuksi tähän löydettiin, että rengas jaettiin 90 asteen mittaussektoreihin, eli neljään osaan. Tälläkin tavalla mitattaessa mittaukset suoritettiin ensin 12 mittapisteellä ja tämän jälkeen skannauksella. Kun kone oli asettanut mittakärjen 45 asteen kulmaan se mittasi yhdeltä 90 asteen sektorilta kolme mittapistettä, jonka jälkeen se pyöräytti kärkeä 90 astetta z-akselin ympäri ja mittasi uudet kolme pistettä (KUVA 5). Tämä toistettiin vielä kaksi kertaa niin, että mittaukset oli suoritettu jokaiselta renkaan sektorilta. Sen jälkeen mittaus suoritettiin vielä skannaamalla. Mittakärjen liikkeet olivat samanlaiset, kuin edellisessä vaiheessa, mutta kolmen mittapisteen sijaan kone suoritti skannauksen 90 asteen sektorilta. Kun skannaus oli tehty jokaiselta sektorilta, mittakärki vaihdettiin pidempään ja sama mittauskierto toistettiin. Näin saatiin yhteensä kahdeksan mittaustulosta asetusrenkaan halkaisijasta, jotka on esitelty liitteessä 3.



KUVA 5 Asetusrenkaan mittaus pidemmällä mittakärjellä.

5.2 Kontrollimittaukset

Ennen kuin mitään mittauksia tehtiin, suoritettiin kontrollimittaus, jotta saatiin lähtötieto perustilanteesta. Kontrollimittausten tulokset on esitelty liitteessä 4. Kontrollimittaus saatiin ottamalla kymmenen mittausta ilman, että palettia nostettiin välissä. Kontrollimittauksissa käytettiin myös samoja mittaamiskohteita, kuin varsinaisissa mittauksissa. Näin saatiin saman verran mittauspisteitä samoissa asennoissa, joita pystyttiin vertaamaan koemittauksiin. Kontrollituloksista pystyttiin myös näkemään, onko mitatut arvot realistisia ja näin, onko mittakärkien kalibrointiin tai mittausohjelmassa muutoksen tarvetta. Eli toisin sanoen pystytiin havaitsemaan karkeita virheitä, mikäli niitä olisi syntynyt.

Saatua dataa analysoitiin samalla tavalla, kuin oikeissa mittauksissa. Näitä ei kuitenkaan otettu huomioon epävarmuuslaskelmissa, vaan ne otettiin puhtaasti vertailun vuoksi. Arvojen analysointiin ja laskemiseen käytettiin Microsoftin Excel-ohjelmaa, sen kätevyyden takia. Saaduista arvoista tehtiin Excel-taulukko (Liite 4), jossa näkyy mitatut arvot, näiden keskiarvo, suurin ja pienin arvo sekä keskihajonta, joka laskettiin siis kaavalla 3.

6 MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

6.1 Pituusmittauksen tulokset

Kuten mainittu, pituusmittausten tulokset on esitelty liitteessä 2. Mittauskertoja oli siis kymmenen, kaksi eri mittauskärkeä ja kolme erilaista mittaamisasentoa molemmilla kärjillä. Näitä kuutta erilaista mittaustapahtumaa nimettiin kokeiksi, eli jokaisesta kokeesta saatiin kymmenen eri mittaustulosta. Näistä kokeista laskettiin keskiarvo tutulla keskiarvon kaavalla:

$$\frac{(x_1 + x_2 + \cdots + x_n)}{n} \tag{5}$$

jossa x on mittaustulos ja n on mittauskertojen lukumäärä eli 10.

Jokaisesta kokeesta myös otettiin niistä saadut minimi- ja maksimiarvot, sekä niiden erotus. Tällä nähdään selvemmin, kuinka paljon vaihtelua tulosten välillä oli.

Lopuksi laskettiin mittausepävarmuuden kannalta tärkein arvo, eli keskihajonta koekohtaisesti ja lopuksi kaikkien kokeiden yhteinen tulos. Tämä laskettiin siis kaavalla 3.
Esimerkkilasku kokeesta 1

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}(300{,}001 - 300{,}0011)^2}{10 - 1}} = 0{,}000316 \tag{6}$$

Keskihajonta kokeessa 1 oli 0,000316 mm eli 0,316 µm. Laskimella laskettaessa keskihajontaa, voidaan saada hieman eri luku, kuin Excelissä. Tämä todennäköisimmin johtuu siitä, että Excel käyttää hyvin tarkkoja arvoja muun muassa keskiarvolle. Laskimista riippuen tulokset voidaan esittää eri tarkkuuksilla. Ohjelma näyttää keskiarvon tuloksen kahden desimaalin tarkkuudella, mutta sen sijaan laskiessa se käyttää paljon tarkempaa arvoa, joka voi olla hyvin monen desimaalin tarkkuudella.

Tärkeimpinä laskuina liitteessä 2 voidaan pitää kaikkien mittaustulosten yhteistä keskiarvoa ja keskihajontaa. Näitä voidaan käyttää mittausepävarmuuden määrittelemiseen. Lisäksi Liitteessä 2 on esitelty kattavuuskertoimet, k, joiden mukaan on laskettu maksimi- ja minimiarvot kaavalla:

$$X + k * S \tag{7}$$

ja

$$X - k * S \tag{8}$$

joissa X kaikkien tulosten keskiarvo, k on kattavuuskerroin ja S on kaikkien arvojen keskihajonta.

Kaava 7 on maksimiarvolle ja kaava 8 minimiarvolle. Kutakin kattavuuskerrointa voidaan käyttää mittausten tulosten arviointiin. Aiemmin raportissa on kerrottu prosenttiarvot, joita kukin kattavuuskerroin esittää. Eli pituusmittauksessa kattavuuskertoimella yksi, mitatut arvot ovat 300,0017 mm ja 300,0006 mm välissä. Lopuksi Liitteessä 2 on myös laskettu prosentti saaduista tuloksista, jotka oikeasti osuvat kunkin kattavuuskertoimen osoittamalle välille. Laskettuna tässä kokeessa se on 72 % tuloksista, jotka osuvat tähän kattavuuskertoimeen 68,3 %.

6.2 Halkaisijamittauksen tulokset

Samoin kuin pituusmittauksessa, halkaisijamittauksessa mittauskertoja oli kymmenen, mutta halkaisijamittauksessa kokeita oli kahdeksan, neljä kummallakin mittakärjellä. Tästä huolimatta tulokset on listattu, analysoitu ja laskettu samaan tyyliin, kuin pituusmittauksissa. Näin voitiin tehdä, sillä kokeiden määrä ei vaikuta keskiarvon, keskihajonnan tai muiden arvojen laskemiseen päinvastoin, tulosten pitäisi olla sitä luotettavampia, mitä useampia kokeita tehtiin.

Halkaisijamittauksen mittaustapahtumaa on selvennetty kuvin liitteessä 5, jossa näkyy myös mittakärjen eri asentoja. Tämän lisäksi mittausohjelma MCOSMOS pystyi esittämään halkaisijamittauksien tulokset graafisesti. Ohjelma pystyi piirtämään asetusrenkaan kehän mitattujen pisteiden avulla. Pistemittauksella otetut tulokset ohjelma näyttää vain pisteinä 125 mm halkaisijan kehällä (Liitteet 6 ja 8), mutta skannauksella suoritetut mittaukset ohjelma pystyi piirtämään yhtenäisenä viivana (Liitteet 7 ja 9). MCOSMOS osasi myös yhdistää sektorimittauksissa saadut arvot yhteen kuvaajaan, kuten liitteistä 8 ja 9 voidaan huomata.

Kuvaajien vertailu auttaa hyvin hahmottamaan mittauksissa syntyneitä eroja. Kuvaajissa esitetty vihreä alue on toleranssialue, joka renkaalle oli asetettu. Jos mittaukset menisivät tämän alueen ulkopuolelle, niitä ei voisi hyväksyä. Lisäksi pistemittauskuvaajissa näkyvät siniset pisteet ilmaisevat mitattujen pisteiden minimi- ja maksimiarvoja, jotka määriteltiin tarkemmin Excel-taulukoihin. Skannauksissa siniset pisteet ovat myös näkyvissä, mutta ohjelma määritteli nämä pisteet vain skannauksien alussa ja lopussa, joten niistä ei saada paljon hyödyllistä informaatiota. MCOSMOS antoi myös mittaustapahtumasta saadut yksityiskohtaiset tiedot, joista olisi apua ympyrämäisyyden ja muiden mitattavan kappaleen ominaisuuksien määrittelyissä.

6.3 Mittaustulosten analysointi ja mittausepävarmuus

Kuten aiemmin oli todettu, mittausepävarmuus saatiin laskemalla yhteen systemaattinen ja satunnainen virhe (Kaavat 1 ja 2). Koska mitattavat kappaleet pysyivät samoina eri kokeiden välillä, on siis järkevämpää käyttää kaavaa 2. Satunnainen virhe päätettiin selvittää keskihajonnan avulla, jolloin saatu keskihajonta oli siis satunnainen virhe. Liitteissä 2 ja 3 on mittauksista saadut kokonaiskeskihajonnat sekä pituus- että halkaisijamittauksille, joita on merkitty yksiköllä *S*. Saatiin, että pituusmittauksissa kokonaiskeskihajonta on 0,000515 mm ja halkaisijamittauksissa 0,002597 mm (Taulukko 2). Nämä arvot ovat siis saadut satunnaisvirheet pituus- ja halkaisijamittauksilla. Saadut arvot ovat luotettavia, sillä kokeita suoritettiin useita, joissa mittakärki oli eri asennoissa. Näin siis mittatuloksia saatiin erilaisista tilanteista, jolloin tulosten luotettavuus kasvaa. Mittauksissa suoritettiin myös useita toistoja, jolloin säästyttiin varmuuskertoimen, *h*, käytöltä, jotka esiteltiin taulukossa 1.

TAULUKKO 2 Saadut tulokset satunnaisvirheelle

Mittaus	Keskihajonta/Satunnainen virhe (µm)
Pituusmittaus	0,515
Halkaisijamittaus	2,597

Tulosten luotettavuus kasvaa, kun otetaan vertailuun liitteessä 4 esitellyt kontrollimittaukset. Verrattaessa keskenään huomataan, että molemmissa: pituus- ja halkaisijamittauksissa saadut kokonaiskeskihajonnat ovat hyvin lähellä toisiaan. Koska tulokset ovat niin lähellä toisiaan, voidaan päätellä, että mittausmetodit olivat kunnollisia ja mittaukset suoritettiin oikeanmukaisesti. Itse asiassa koemittauksissa keskihajonta on pienempi kuin kummassakaan kontrollimittauksissa. Toki tässä vielä otos oli suhteellisen pieni, mutta tulosten perusteella voitaisiin argumentoida, että paletin nostaminen mittauskiertojen välissä voisi jopa parantaa mittaustuloksia.

Liitteissä 6–9 olevista kuvaajista huomataan myös, että vaikka mittaukset suoritettiin eri metodeilla, tulokset olivat silti hyvin saman mukaisia. Oli odotettavaa, että varsinkin sektoreilla mitattaessa, syntyisi isoja eroja, kun mittapää joutui liikkumaan paljon. Liitteessä 9 erot ovat parhaiten huomattavissa, kun mittauksen alku- ja loppukohta eivät kohtaa kuvaajassa. Vaikka ero voidaan huomata, mittaukset pysyivät toleranssialueella. Mutta kuten kaikissa halkaisijamittauksien kuvaajista nähdään, ne eivät ole täysin ympyrän muotoisia. Tämä johtuu siitä, että mittalaitteen ollessa niin tarkka, kuin koordinaattimittakone, se havaitsee pienetkin mittatulosten vaihtelut. Tällöin tulokset ja näin kuvaajatkin vaihtelevat, vaikka asetusrengas silmämääräisesti näyttäisi pyöreältä.

Kuvaajissa ja muutenkin mittauksissa havaitut vaihtelut, voivat johtua hyvin monesta asiasta, kuten pienestä tärähdyksestä, mittakärjen kulumisesta, mitattavan kappaleen pinnanlaadusta tai siinä olevasta vauriosta, liasta tai roskasta. Pieni pölyhiukkanenkin mittausradalla voi aiheuttaa suuriakin mittauseroja. Myös ympäristön tekijät vaikuttavat mitattuihin tuloksiin. Koska näitä virheitätekijöitä ei voitu arvioida tai mitata mittaushuoneessa, ne on lueteltava systemaattisiksi virheiksi. Osan virheistä olisi voitu määrittää, mutta se olisi vaatinut aikaa

ja kalliita laitteistoja ja siltikin kaikkia virhelähteitä ei olisi välttämättä saatu. Ne olisivat voineet olla myös niin triviaaleja virheitä, että niillä ei käytännössä olisi ollut merkitystä mittausepävarmuuden suhteen tässä tilanteessa.

Systemaattisesta virheestä ja virhelähteistä on kerrottu tarkemmin kappaleessa kolme. Yleisesti suurimmat virhetekijät näin tarkoissa mittauksissa ovat mittaajasta johtuva virhe sekä mittausympäristön vaikutus tilanteessa. Kuitenkin, koska mittaajana kyseisissä mittauksissa toimi koordinaattimittakone, mittaajasta johtuvaa virhettä ei juurikaan synny. Koordinaattikoneen ohjelmat osaavat myöskin automaattisesti kompensoida pienet vaihtelut, joita voi syntyä koneen omasta tekemisestä mittaamisen aikana. Varsinkin, koska mittakärjet kalibroitiin ennen mittauksia, voidaan todeta, että mittaajasta johtuvaa virhettä ei synny.

Pientä systemaattista virhettä voisi syntyä mitattavien kappaleiden omasta virheestä, jotka on esitelty aiemmin. Nämä virheet ovat lähtöisin kappaleiden valmistuksesta ja virheet ovat valmistajan määrittämiä. Nämä voitaisiin ottaa huomioon mittauksissa, kun nimellismitoiksi oli ilmoitettu 300 mm ja 125 mm. Mutta toisaalta, koska kappaleet ja niissä mittauspisteet pysyvät samoina, ne eivät vaikuta keskihajontaan. Mitattavien kappaleiden toleranssit on järkevää ottaa huomioon, jos saatuja tuloksia verrattaan ilmoitettuihin nimellismittoihin. Tarkempia kappaleita on vaikeampaa tehdä, joten ne maksavat myös enemmän. Uusien, tarkempien kappaleiden tilaamista ei tehty, koska kuten todettu, se ei olisi vaikuttanut merkittävästi lopputulokseen.

Ympäristöstä johtuvia virhetekijöitä on useita, kuten ilmanpaine ja kosteus sekä puhtaus. Ilman ominaisuuksia olisi voitu mitata siihen erikoistuneilla laitteistoilla, mutta todennäköisesti tällaiset asiat, kuten ilmanpaine ei vaikuttaisi merkittävästi tuloksiin, joten se jätettiin mittaamatta. Myös likaisuutta ja ilman kosteutta on hankala pitää kontrolloituna tilan käytön vuoksi. Sen ollessa koulutuskäytössä ja kaikilla kulkuluvallisilla on pääsy huoneeseen, on tilan tarkkojen olosuhteiden ylläpitäminen hankalaa. Samasta syystä mittaushuoneen lämpötilan vaihtelusta, josta oletettavasti syntyy suurinta mittaustulosten vaihtelua, on vaikeaa kontrolloida ilman tarvittavia laitteistoja. Näitä ympäristön luomia mittausvirheitä voitaisiin rajoittaa, jos mittaushuone olisi lämpösäädelty jollain tavalla.

Mittaushuoneessa vallitsevan lämpötilan selvittäminen olisi helppoa jollakin lämpömittarilla, mutta siitä syntyviä virheitä olisi hankalampaa selvittää. Tähän tarvitsisi tietää lisää asioita, kuten mitattavan kappaleen tarkka materiaali, jotta sen lämpölaajenemiskerroin tiedettäisiin. Josta taas voitaisiin selvittää kappaleiden tarkat mitat mitatussa lämpötilassa. On siis selvää, että mittaushuoneen lämpötila vaikuttaa mittaustuloksiin, mutta se kuinka paljon se vaikuttaa, ei voitu selvittää vielä kontrolloimattomassa ympäristössä.

Kaavassa 4 on esitelty miten konevalmistaja huomioi tietyn lämpöisen mittausympäristön suurimman sallitun virheen pituusmittauksissa eli tässä tapauksessa suurin sallittu virhe on:

$$1{,}7 + 4 * \frac{300}{1000} = 2{,}9\ \mu\mathrm{m} \tag{9}$$

Tuloksesta voidaan päätellä, että ainakin pituusmittauksissa tätä rajaa ei ylitetä vielä satunnaisella virheellä, mutta systemaattisen virheen suuruus jää selvittämättä. Voitaisiin olettaa, että systemaattista virhettä ei syntyisi niin paljoa, että kyseinen raja ylittyisi, mutta toisaalta sitä ei voida sanoa varmaksi tietojen puuttumisen takia. Tähänastisilla tiedoilla voidaan kuitenkin todeta, että TAMKilla käytössä olevan koordinaattimittakoneen mittausepävarmuus on pituusmittauksissa 0,515 µm ja halkaisijamittauksissa 2,597 µm. Näihin molempiin lisätään systemaattinen virheen suuruus, joka koostuu muun muassa lämpötilan vaihtelusta.

7 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli määrittää TAMKilla sijaitsevan koordinaattimittakoneen mittausepävarmuus. Tämä tehtiin, jotta kyseisen mittauskoneen käytöstä tulisi varmempaa tulevaisuudessa. Työ tehtiin yhteistyössä erään toisen opiskelijan kanssa, joka teki opinnäytetyön saman koneen toistotarkkuudesta samoilla mittaustekniikoilla ja -kohteilla.

Työ aloitettiin tutustumalla koneeseen, mittausympäristöön sekä aiheesta kertovaan materiaaliin. Toimeksiantajan avulla koneeseen päästiin tutustumaan nopeasti ja syvemmin kuin aikaisemmilla kursseilla. Suunnitelmat mittauksista luotiin myös yhdessä niin, että mittaukset olisivat tarpeeksi varmoja ja toteuttamiskelpoisia. Mahdollisia mittauskohteita oli aluksi muutama, mutta lopulta päädyttiin mittaamaan mittapaloja ja asetusrengasta, sillä näillä saatiin mittaukset suoritettua helposti ja ne olivat saatavilla heti käyttöön TAMKin tiloissa. Mittaukset saatiinkin suoritettua odotettua nopeammin, jolloin itse opinnäytetyökin valmistui odotettua aikaisemmin.

Kuitenkin lopputuloksista todettakoon, että täydellistä mittausepävarmuutta ei pystytty selvittämään. Tämä johtui pääosin siitä, että mittausolosuhteisiin ei voitu vaikuttaa kyseisessä mittaustilassa. Näin ollen aiemmin mainittu systemaattinen virhe pystyttiin vain arvioimaan, eikä sille voitu määrittää mitään tarkkaa arvoa. Tietyt normaaleissa mittaustilanteissa olevat systemaattiset mittausvirheet pystyttiin karsimaan pois tai lukemaan satunnaisiksi virheiksi, mutta kaikessa tätä ei kuitenkaan pystytty tekemään, joten tulokseen jäi jonkin verran systemaattista virhettä. Tulevaisuudessa tämä voisi olla mahdollista selvittää siinä auttavien laitteistojen avulla tai kontrolloidun mittausympäristön avulla.

Satunnainen virhe sen sijaan pystyttiin määrittämään ja niiden tulokset olikin esitetty edellisessä kappaleessa. Saadun satunnaisen virheen arvon voidaan sanoa olevan melko tarkka, sillä käytössä ollut koordinaattimittakone oli tarkka mittalaite ja sen käytössä oltiin määrätietoisia, mittauksia myös suoritettiin riittävän monta kertaa, että tulokset olivat luotettavia. Saadut tulokset olivat myös

realistisia ja ne täsmäsivät esimerkiksi konevalmistajan antamiin virhemarginaaleihin. Tulosten oikeellisuudesta käytiin myös keskustelua toimeksiantajan ja työparina olleen opiskelijan kanssa ja todettiin, että tulokset olivat hyväksyttäviä.

Mittausten tekeminen parityönä oli varsin mielekästä ja siinä onnistuttiinkin hyvin. Yhdessä aiheen ja tulosten pohtiminen sekä analysointi oli tehokasta. Toisen mielipiteen saaminen työssä oli myös arvokasta ja tämä edisti opinnäytetyön tekemistä huomattavasti. Parityönä opinnäytetyötä tehdessä oli myös aktiivisempaa ja nopeampaa, kuin yksin, sillä toisen motivoidessa toista työn jatkaminen oli aina helpompaa.

Vaikka täydelliseen lopputulokseen ei päästy, opinnäytetyön aihe oli mielenkiintoinen ja opettavainen. Aiheeseen oli helppoa päästä kiinni toimeksiantajan, työparin ja aiheesta luodun kirjallisuuden avulla. Myös koordinaattimittakoneen ollessa ennestään jokseenkin tuntemattomampi laite, siitä selvittäminen ja sen kanssa työskentely tekivät työstä mielekästä. Käsitteenä mittausepävarmuus oli myös täysin tuntematon, joten aiheesta selvittäminen ja lopuksi tulosten saaminen tekivät tästä opettavaisen projektin.

LÄHTEET

Andersson, P. & Tikka, H. 1997. Mittaus- ja laatutekniikat. Ensimmäinen painos. WSOY, Porvoo 1997.

Esala, V-P. Lehto, H. Tikka, H. 2003. Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit. Kolmas painos. Teknologiainfo Tekova Oy, Helsinki 2003.

Feldman K. 2018. Gage R&R. Verkkoaineisto. Isixsigma. Viitattu 6.3.2023. https://www.isixsigma.com/dictionary/gage-rr/

Hessing, T. Gage Repeatability and Reproducibility (R&R). Verkkoaineisto. Six Sigma Study Guide.com. Viitattu 6.3.2023. https://sixsigmastudyguide.com/repeatability-and-reproducibility-rr/

Järvinen, J. Eerola, S. Kaukonen, M. 2008. Metrologiasta lyhyesti. Neljäs painos. Multiprint, Espoo 2008. Verkkoaineisto. Viitattu 3.3.2023. https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/metrologiasta_lyhyesti_nettiin.pdf

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

Mittausepävarmuus. 2021. Verkkoaineisto. FINAS-AKKREDITOINTIPALVELU. Helsinki Viitattu 3.3.2023. https://www.finas.fi/akkreditointi/jaljitettavyys/Sivut/Mittausepavarmuus.aspx

Mitutoyo [1]. n.d. Verkkosivu. Viitattu 8.3.2023. https://www.mitutoyo.com/products/coordinate-measuring-machines/

Mitutoyo [2]. n.d. MCOSMOS v5. Esite. Viitattu 8.3.2023. https://shop.mitutoyo.eu/media/mitutoyoData/DO/base/pre_1156(7)_-_mcosmos_v5_web_(5).pdf

Mitutoyo [3]. n.d. Develop CMM Measurement Programs Easier and Faster. Verkkosivu. Viitattu 8.3.2023. https://www.mitutoyo.com/products-and-solutions/software/micat/

Mitutoyo [4]. n.d. CRYSTA-Apex S Series. Katalogi. Viitattu 29.3.2023. https://www.mitutoyo.co.uk/application/files/3415/5888/3870/E16004.pdf

Peuranen, H. Esala, V-P. 2020. Mittausepävarmuuden parempi hallinta on tavoittelemisen arvoista. Blogi. JAMK. Viitattu 3.3.2023. https://blogit.jamk.fi/techtothefuture/2020/02/24/mittausepavarmuuden-parempi-hallinta-tavoittelemisen-arvoista/

SFS 9001. 2015. SFS-EN ISO 9001:2015. Laadunhallintajärjestelmät. Vaatimukset. Helsinki: Suomen Standarditoimistoliitto SFS. Luettu 13.3.2023. Vaatii käyttöoikeiden. https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/9/394310.html.stx

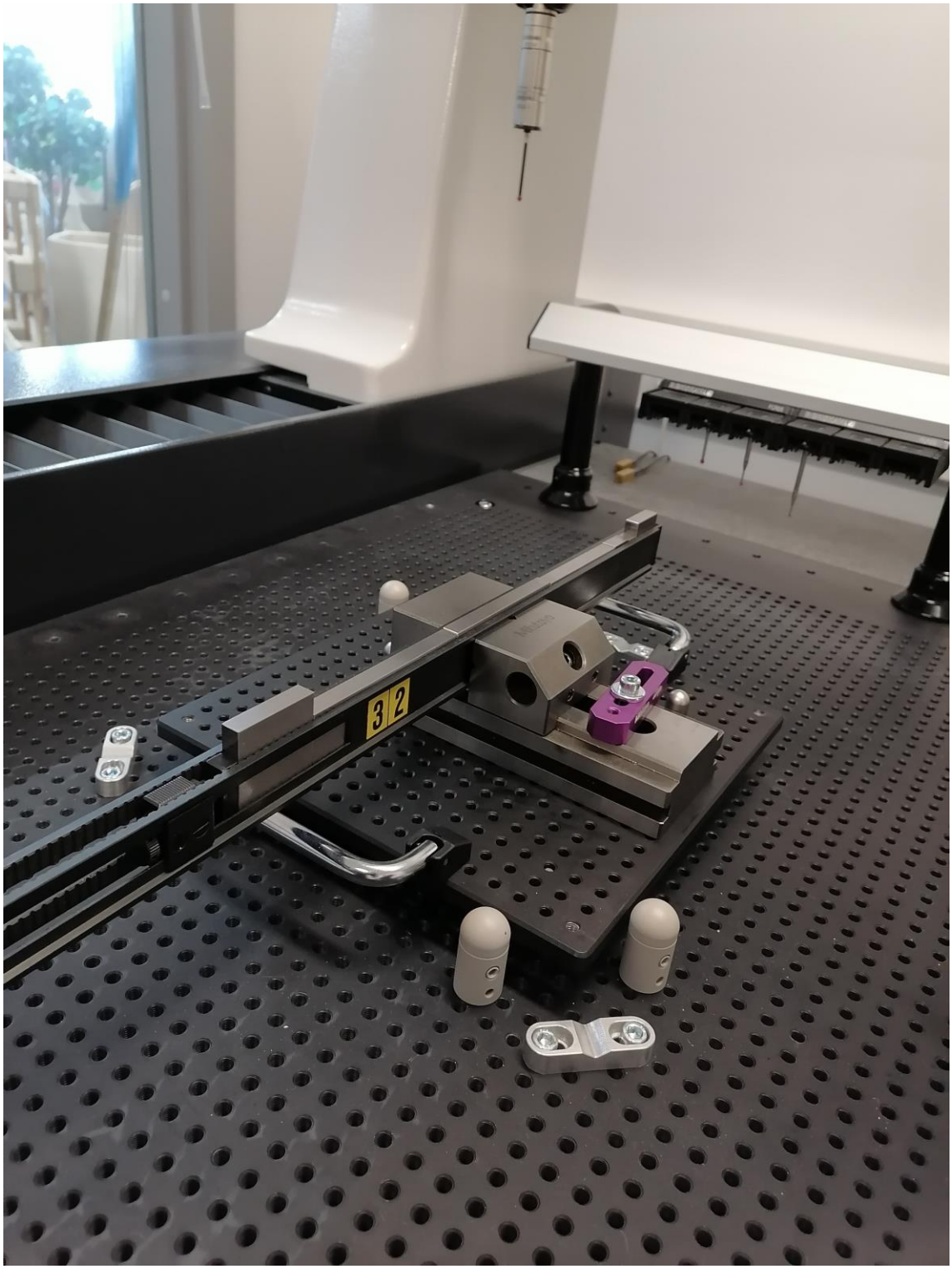
SFS 10012. 2003. SFS-EN ISO 10012:2003. Mittausten hallintajärjestelmät. Vaatimukset mittausprosesseille ja mittauslaitteistoille. Helsinki: Suomen Standarditoimistoliitto SFS. Luettu 3.2.2023. Vaatii käyttöoikeiden. https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/1/11403.html.stx

SFS 21748. 2017. SFS-EN ISO 21748:2017. Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty evaluation. Helsinki: Suomen Standarditoimistoliitto SFS. Luettu 6.3.2023. Vaatii käyttöoikeiden. https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/ISO/ISO/ID9998/2/489929.html.stx

Tikka, H. 2009. Koordinaattimittaus. Toinen korjattu painos. Tampereen Yliopistopaino Oy - Juvenes Print, Tampere 2009.

LIITTEET

Liite 1. Pituusmittausrigi.



Liite 2. Pituusmittauksen tulokset

Pituusmittaus - Tulokset 300 mm **Nostot välissä**

	Koe 1	Koe 2	Koe 3	Koe 4	Koe 5	Koe 6
1	300,001	300,002	300	300,001	300,001	300,002
2	300,001	300,001	300,001	300,001	300,001	300,002
3	300,001	300,001	300,001	300,001	300,002	300,001
4	300,002	300,001	300,001	300,001	300,002	300,002
5	300,001	300,001	300,001	300,001	300,001	300,001
6	300,001	300	300	300,001	300,002	300,001
7	300,001	300,001	300,001	300,001	300,002	300,001
8	300,001	300,001	300,001	300,001	300,002	300,001
9	300,001	300,001	300,001	300,001	300,001	300,001
10	300,001	300,002	300,001	300	300,002	300,002

Keskiarvo, x	300,0011	300,0011	300,0008	300,0009	300,0016	300,0014
Maksimi	300,002	300,002	300,001	300,001	300,002	300,002
Minimi	300,001	300	300	300	300,001	300,001
Ero	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Keskihajonta, s	0,000316	0,000568	0,000422	0,000316	0,000516	0,000516

Koe 1	Lyhyt mitta-kärki	Suorassa
Koe 2	Lyhyt mitta-kärki	45 astetta
Koe 3	Lyhyt mitta-kärki	45 astetta, 180 z-akselin ympäri
Koe 4	Pitkä mitta-kärki	Suorassa
Koe 5	Pitkä mitta-kärki	45 astetta
Koe 6	Pitkä mitta-kärki	45 astetta, 180 z-akselin ympäri

Keskiarvo (kaikki), X	300,0012		
Keskihajonta (kaikki), S	0,000515		
Kattavuuskerroin, k	1	2	3
Maks.arvo k:n mukaan	300,0017	300,0022	300,0027
Min.arvo k:n mukaan	300,0006	300,0001	299,9996
Prosentti, jolla tulokset osuvat maks ja min arvojen väliin tietyllä k kertoimella	72 %	93 %	100 %

Liite 3. Halkaisijamittauksen tulokset

Halkaisijamittaus - Tulokset 125 mm **Nostot välissä**

	Koe 1	**Koe 2**	**Koe 3**	**Koe 4**	**Koe 5**	**Koe 6**	**Koe 7**	**Koe 8**
1	125,008	125,011	125,007	125,008	125,003	125,005	125,003	125,004
2	125,007	125,003	125,011	125,005	125,007	125,003	125,008	125,004
3	125,007	125,003	125,011	125,005	125,007	125,003	125,008	125,004
4	125,007	125,003	125,011	125,005	125,007	125,003	125,008	125,004
5	125,007	125,003	125,011	125,005	125,007	125,003	125,008	125,004
6	125,007	125,003	125,011	125,005	125,007	125,003	125,008	125,004
7	125,007	125,003	125,011	125,005	125,007	125,003	125,008	125,004
8	125,007	125,003	125,01	125,005	125,007	125,003	125,008	125,004
9	125,007	125,003	125,011	125,005	125,007	125,003	125,008	125,003
10	125,007	125,003	125,01	125,005	125,008	125,003	125,008	125,004
Keskiarvo, x	125,0071	125,0038	125,0104	125,0053	125,0067	125,0032	125,0075	125,0039
Maksimi	125,0080	125,0110	125,0110	125,0080	125,0080	125,0050	125,0080	125,0040
Minimi	125,0070	125,0030	125,0070	125,0050	125,0030	125,0030	125,0030	125,0030
Ero	0,001	0,008	0,004	0,003	0,005	0,002	0,005	0,001
Keskihajonta, s	0,000316	0,00253	1,26E-03	0,000949	0,001337	0,000632	0,001581	0,000316

Koe 1	Lyhyt mittakärki	Suorassa	Pisteillä	Kokonaan
Koe 2	Lyhyt mittakärki	Suorassa	Skannaamalla	Kokonaan
Koe 3	Lyhyt mittakärki	45 asteen kulmassa	Pisteillä	Sektoreissa
Koe 4	Lyhyt mittakärki	45 asteen kulmassa	Skannaamalla	Sektoreissa
Koe 5	Pitkä mittakärki	Suorassa	Pisteillä	Kokonaan
Koe 6	Pitkä mittakärki	Suorassa	Skannaamalla	Kokonaan
Koe 7	Pitkä mittakärki	45 asteen kulmassa	Pisteillä	Sektoreissa
Koe 8	Pitkä mittakärki	45 asteen kulmassa	Skannaamalla	Sektoreissa

Keskiarvo (kaikki), X	125,0059875		
Keskihajonta (kaikki), S	0,002597437		
Kattavuuskerroin, k	1	2	3
Maks. arvo k:n mukaan	125,00858	125,01118	125,01378
Min. arvo k:n mukaan	125,00339	125,00079	124,99820
Prosentti, jolla tulokset osuvat maks ja min arvojen väliin tietyllä k kertoimella	61 %	100 %	100 %

Liite 4. Kontrollimittaukset

Pituusmittaus - Kontrolli 300 mm

	Koe 1	Koe 2	Koe 3	Koe 4	Koe 5	Koe 6
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
Keskiarvo, x	300,0028	300,0023	300,002	300,0021	300,0033	300,0028
Maksimi	300,003	300,003	300,002	300,003	300,004	300,004
Minimi	300,002	300,002	300,002	300,002	300,003	300,002
Ero	0,001	0,001	0	0,001	0,001	0,002
Keskihajonta, s	0,000422	0,000483	0	0,000316	0,000483	0,000632

Koe 1	Lyhyt mittakärki	Suorassa
Koe 2	Lyhyt mittakärki	45 astetta
Koe 3	Lyhyt mittakärki	45 astetta, 180 z-akselin ympäri
Koe 4	Pitkä mittakärki	Suorassa
Koe 5	Pitkä mittakärki	45 astetta
Koe 6	Pitkä mittakärki	45 astetta, 180 z-akselin ympäri

Keskiarvo (kaikki), X	300,0026		
Keskihajonta (kaikki), S	0,000622		
Kattavuuskerroin, k	1	2	3
Maks. arvo k:n mukaan	300,0032	300,0038	300,0044
Min. arvo k:n mukaan	300,0019	300,0013	300,0007
Prosentti, jolla tulokset osuvat maks ja min arvojen väliin tietyllä k kertoimella	93 %	93 %	100 %

(jatkuu)

Halkaisijamittaus – Kontrolli 125 mm

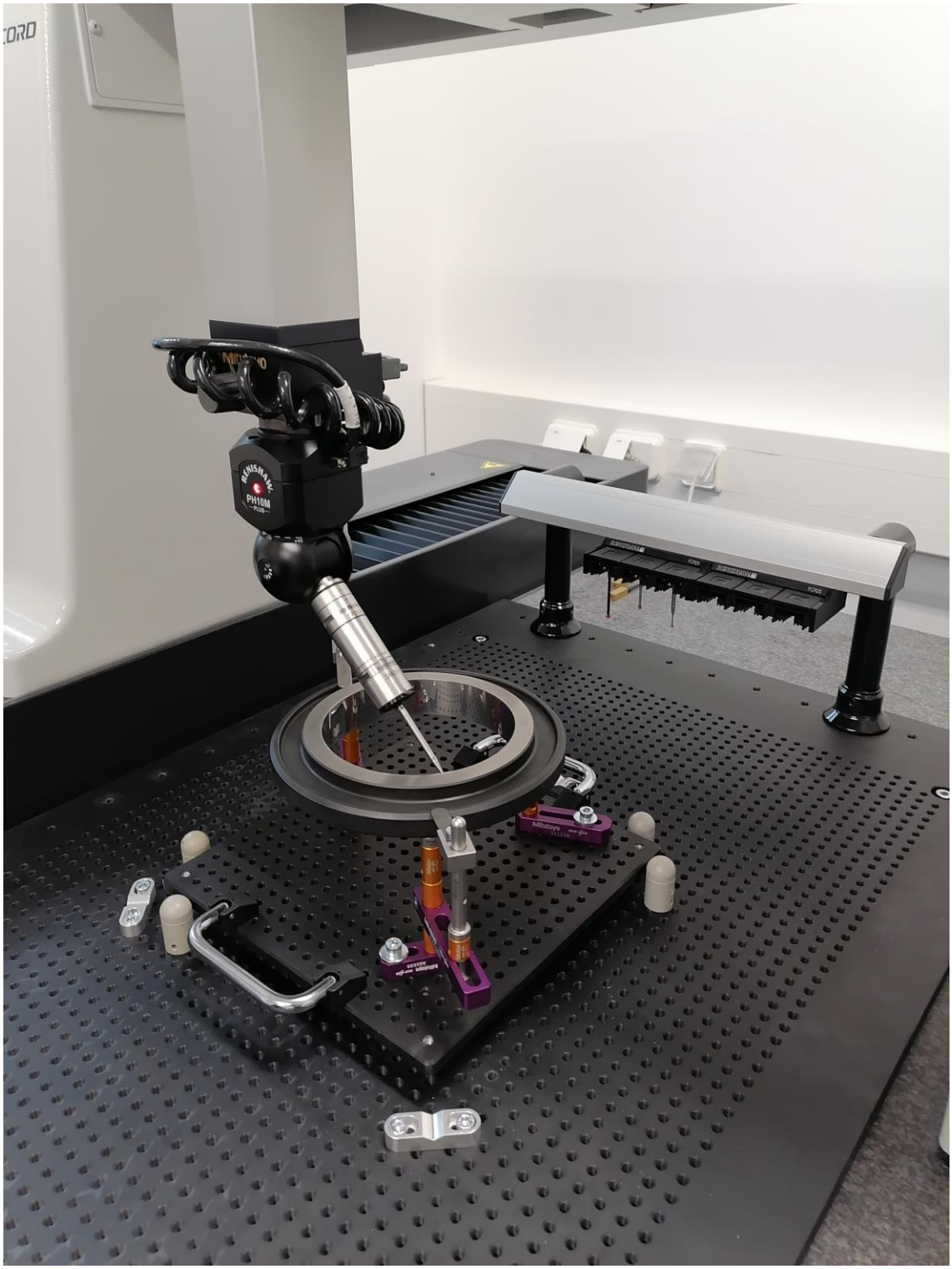
	Koe 1	Koe 2	Koe 3	Koe 4	Koe 5	Koe 6	Koe 7	Koe 8
1	125,008	125,004	125,012	125,006	125,008	125,004	125,010	125,005
2	125,008	125,004	125,012	125,006	125,008	125,004	125,010	125,005
3	125,006	125,004	125,012	125,006	125,008	125,004	125,010	125,005
4	125,008	125,004	125,012	125,006	125,008	125,004	125,010	125,005
5	125,007	125,004	125,012	125,006	125,008	125,004	125,010	125,005
6	125,008	125,004	125,012	125,005	125,008	125,004	125,010	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	125,010	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	125,010	125,004

Keskiarvo, x	125,0073	125,0036	125,012	125,0055	125,008	125,0036	125,0098	125,0048
Maksimi	125,0080	125,0040	125,0120	125,0060	125,0080	125,0040	125,0100	125,0050
Minimi	125,0060	125,0030	125,0120	125,0050	125,0080	125,0030	125,0090	125,0040
Ero	0,002	0,001	0	0,001	0	0,001	0,001	0,001
Keskihajonta, s	0,000949	0,000516	3,00E-14	0,000527	1,5E-14	0,000516	0,000422	0,000422

Koe 1	Lyhyt mitta-kärki	Suorassa	Pisteillä	Kokonaan
Koe 2	Lyhyt mitta-kärki	Suorassa	Skannaamalla	Kokonaan
Koe 3	Lyhyt mitta-kärki	45 asteen kul-massa	Pisteillä	Sektoreissa
Koe 4	Lyhyt mitta-kärki	45 asteen kul-massa	Skannaamalla	Sektoreissa
Koe 5	Pitkä mitta-kärki	Suorassa	Pisteillä	Kokonaan
Koe 6	Pitkä mitta-kärki	Suorassa	Skannaamalla	Kokonaan
Koe 7	Pitkä mitta-kärki	45 asteen kul-massa	Pisteillä	Sektoreissa
Koe 8	Pitkä mitta-kärki	45 asteen kul-massa	Skannaamalla	Sektoreissa

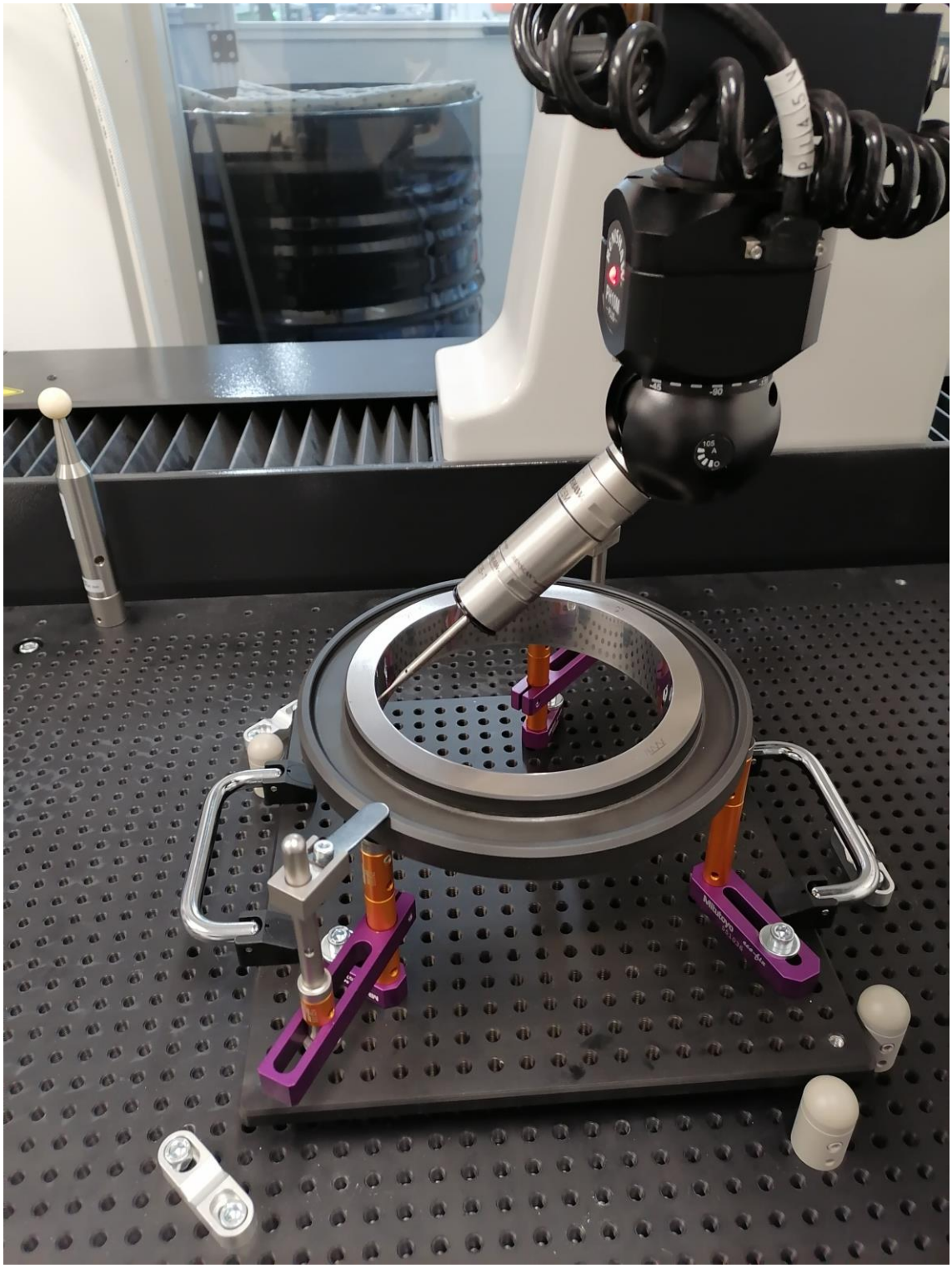
Keskiarvo (kaikki), X	125,006825		
Keskihajonta (kaikki), S	0,002885033		
Kattavuuskerroin, k	1	2	3
Maks. arvo k:n mukaan	125,00971	125,0125951	125,01548
Min. arvo k:n mukaan	125,00394	125,0010549	124,99817
Prosentti, jolla tulokset osuvat maks ja min arvojen väliin tietyllä k kertoimella	68 %	100 %	100 %

Liite 5. Halkaisijamittauksen eri asentoja

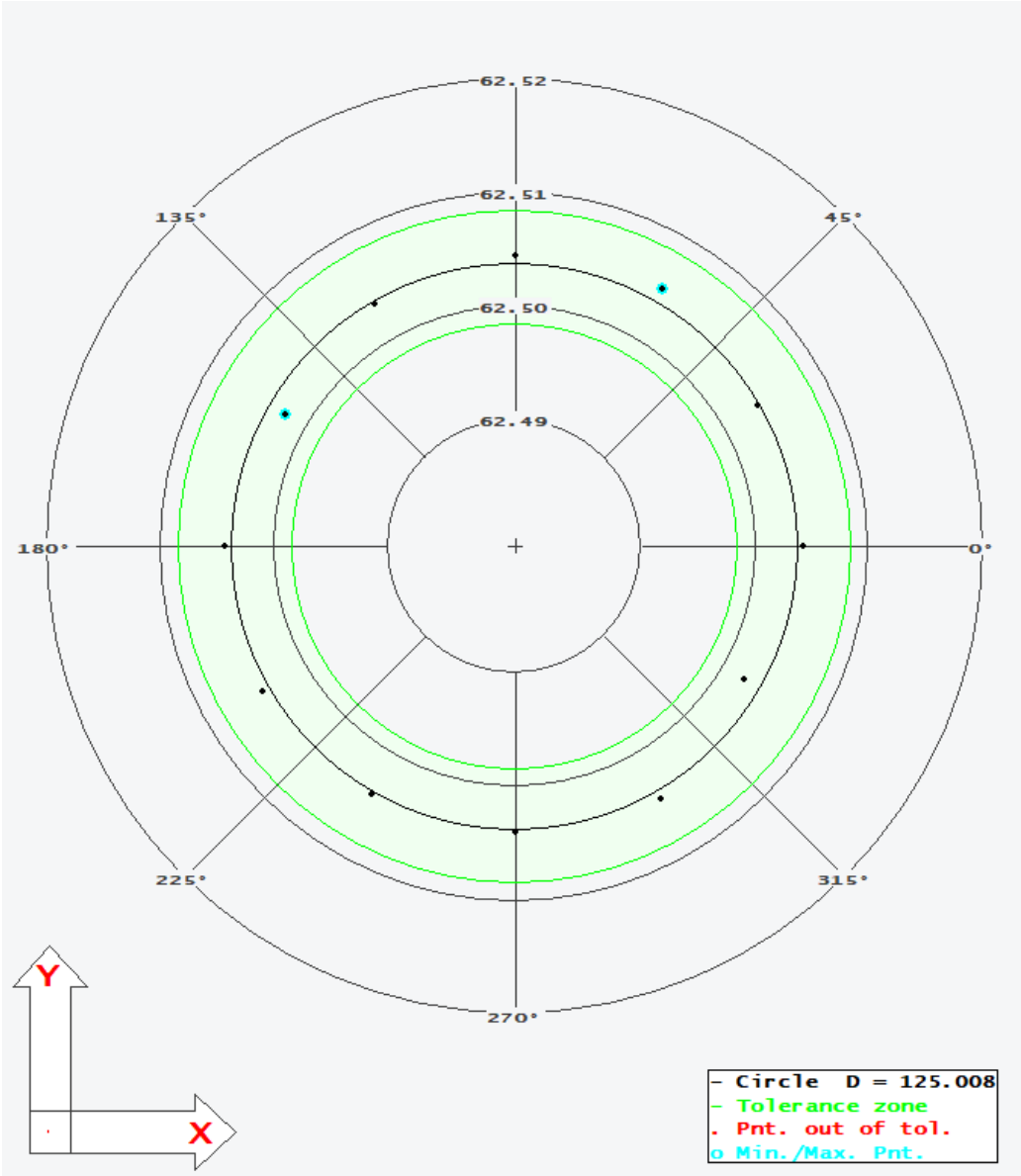


(jatkuu)

2(2)



Liite 6. Mittaukset kokonaan, pisteillä ja tiedot

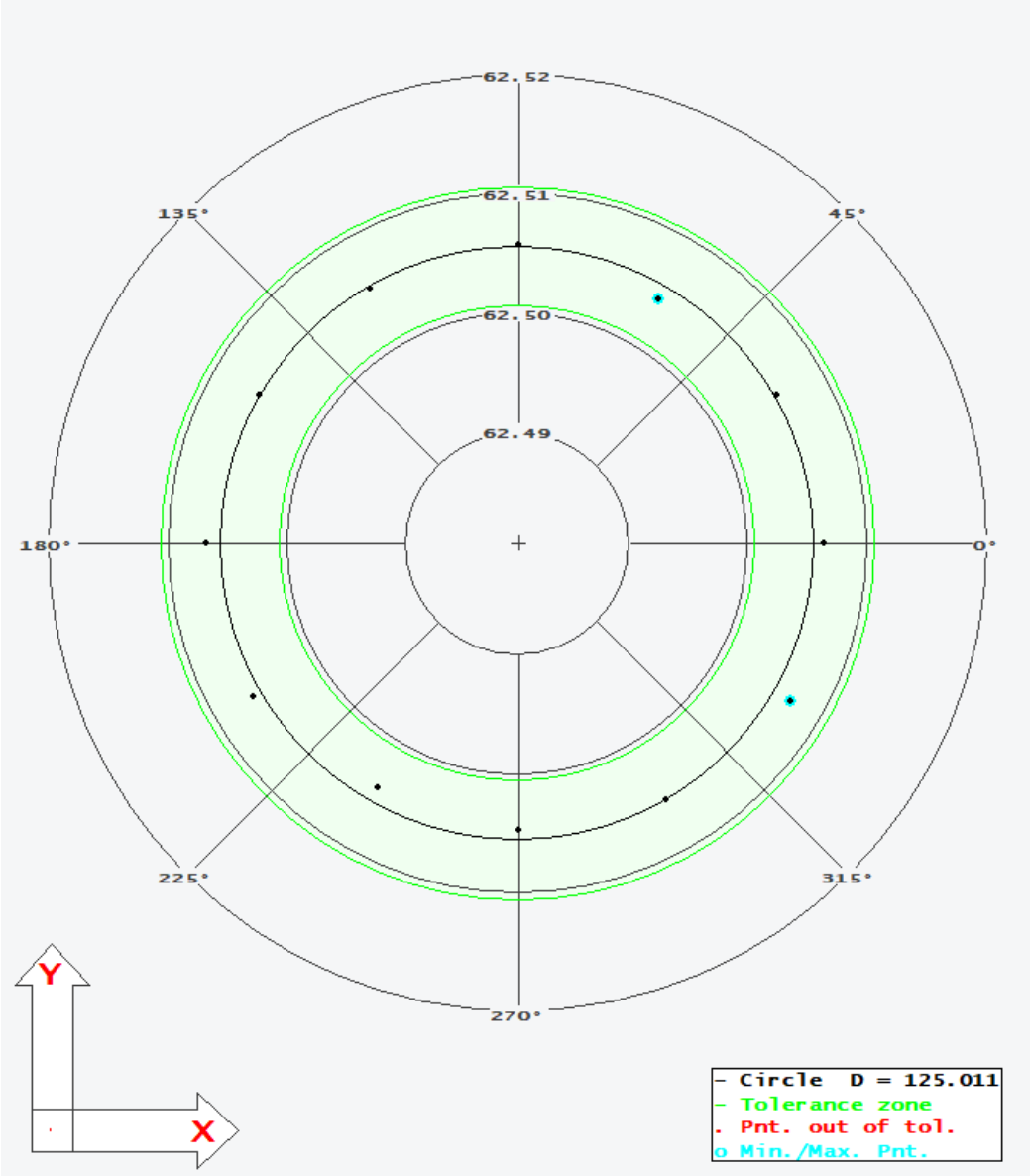


Tolerance zone	0.010	Upper tol.	0.005
		Lower tol.	-0.005
X	0.002	No. of pts.	12
Y	-0.001	Min./Max. Pnt.	6 / 3
Z	-5.003	Std. dev. * 4	0.004
Actual Radius	62.504	Circularity	0.003
Min. dist.	-0.002	Max. dist.	0.001
X	-54.152	X	31.221
Y	31.210	Y	54.149
Radius	62.502	Radius	62.505
Phi	150:02:37	Phi	60:02:02

Liite 7. Mittaukset kokonaan, skannauksella ja tiedot

Tolerance zone	0.010	Upper tol.	0.005
		Lower tol.	-0.005
X	0.002	No. of pts.	1820
Y	-0.001	Min./Max. Pnt.	739 / 248
Z	-5.012	Std. dev. * 4	0.001
Actual Radius	62.502	Circularity	0.001
Min. dist.	-0.001	Max. dist.	0.001
X	-51.922	X	41.011
Y	34.791	Y	47.165
Radius	62.501	Radius	62.502
Phi	146:10:32	Phi	48:59:32

Liite 8. Mittaus sektoreilla, pisteillä mitattuna ja tiedot



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.	7 / 4
Z	-5.036	Std. dev. * 4	0.004
Actual Radius	62.506	Circularity	0.003
Min. dist.	-0.001	Max. dist.	0.001
X	31.240	X	54.131
Y	54.137	Y	-31.256
Radius	62.504	Radius	62.507
Phi	60:00:48	Phi	329:59:52

Liite 9. Mittaus sektoreilla, skannauksella mitattuna ja tiedot

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