

# Putkimaisen lieriön geometrian määrittäminen

Jaakko Kontio

Opinnäytetyö  
Joulukuu 2019  
Tekniikan ala  
Insinööri (AMK), konetekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Kontio, Jaakko	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Joulukuu 2019
	Sivumäärä 44	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Putkimaisten lieriön geometrian määrittäminen</b>		
Tutkinto-ohjelma Konetekniikka		
Työn ohjaaja(t) Kalevi Jaaranen ja Harri Peuranen		
Toimeksiantaja(t) Valmet Technologies Oyj		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Raskaan konepajateollisuuden putkimaisten lieriöiden geometriset ominaisuudet mitataan yleensä työvaiheen yhteydessä pyörähdyssymmetristen kappaleiden valmistustavan vuoksi. Valmet Technologies Oyj halusi selvittää soveltuvinta mittaustulokkeista ja -menetelmää ennen työvaihetta tehtävään mittaukseen.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli esittää paras menetelmä putkimaisten lieriöiden geometrian määrittämiseen tilanteessa, jossa työstökoneita ei käytetä kappaleen mittaamiseen. Työssä otettiin kantaa ennen työvaihetta tehtyjen mittausten mahdollisesta hyödyntämisestä kappaleen asetusajan lyhentämiseksi.</p> <p>Tutkimus oli laadullista tutkimusta, jossa asiantuntijaroolissa osallistuttiin seminaareihin ja mittaustapahtumiin. Tiedonhaussa kerättiin tietoa lähinnä moderneista 3D-mittausmenetelmistä, sillä niillä saavutetaan helpommin ja enemmän mittaustuloksia verrattuna perinteisiin konepajamenetelmiin.</p> <p>Tutkimusaineisto kerättiin laserseuraimien mittaustulokkeista- ja mittausten menetelmätseistä. Skannausominaisuuksia testattiin kahden eri laserseurainjärjestelmän osalta ja kappaleen pyörittämisen mahdollisuutta testattiin toisessa menetelmätestissä. Kappaleen sopiva tuenta mittaustapahtuman aikana esitettiin pohjautuen hyvin mittaustuloksiin ja viitaten arvioituihin muodonmuutoksiin tuennasta johtuen.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena esitettiin mittaustulokkeiksi laserseurainjärjestelmää skanneripäällä laitteiston kustannustehokkuuden, monipuolisuuden ja käyttäjäystävällisyyden ansiosta. Mittaustuloksien perusteella voidaan lyhentää asetusajoja työvaiheissa ja parantaa laadunvalvontaa. Lisätestit tuotantokappaleilla rajoitteiden selvittämiseksi ovat tarpeen.</p>		
Avainsanat (asiasanat) ISO GPS, geometriset toleranssit, 3D-mittaus, laserseurainjärjestelmät		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Kontio, Jaakko	Type of publication Bachelor's thesis	Date December 2019 Language of publication: Finnish
	Number of pages 44	Permission for web publication: x
Title of publication Validating the geometry of cylindrical tubes		
Degree programme Mechanical Engineering		
Supervisor(s) Kalevi Jaaranen ja Harri Peuranen		
Assigned by Valmet Technologies Oyj		
Abstract  <p>Geometric product specifications are usually a part of the manufacturing process during heavy duty turning. Valmet Technologies Oyj wanted to determine the most suitable measurement devices and methods for measurements before machining.</p> <p>The main target was to find the best possible measurement solution in a situation in which a machine is not used to rotate the workpiece. Possibilities to use the measurement results to shorten the set up time for workpiece were considered.</p> <p>Qualitative research methods were used, as various measurement events were attended as a measurement specialist. The study on measurement devices focused on modern 3D measurement technologies, that produce more measurement data and are more accessible than traditional measurement methods.</p> <p>Research data was gathered from measurement device and method tests done with laser tracker systems. The scanning properties of two systems were tested and the possibility for rotating the measurement piece was tested in a method test. The proper way to support the workpiece was presented based on acknowledged measurement methods and approximated deformations caused by the support method.</p> <p>As a result of the study, laser tracker system with a handheld scanner was the most suitable solution based on cost-efficiency, versatility and user friendliness. Measurement results can be used to shorten the set up times for workpieces and to improve early quality control. More testing needs to be done with a proper workpiece to determine the possible limitations of the measurement system and method.</p>		
Keywords/tags (subjects) ISO GPS, geometric tolerances, 3D measurement, laser tracker systems		
Miscellaneous (Confidential information)		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Tuotteen geometristen ominaisuuksien mittaaminen .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Valmet Technologies Oyj – Rautpohja .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Tutkimuksen toteutus.....</b>	<b>6</b>
3.1	Käytetyt tutkimus- ja kehittämismenetelmät .....	6
3.2	Tutkimuksen toteutus .....	7
<b>4</b>	<b>ISO GPS – standardijärjestelmä .....</b>	<b>7</b>
4.1	Mikä on ISO GPS - standardijärjestelmä?.....	7
4.2	Miten verhopintavaatimukset määritellään? .....	8
4.3	Maksimi- ja vähimmäismateriaalin sekä vastavuoroisuuden vaatimus.....	9
<b>5</b>	<b>Putkimaisten lieriöiden geometristen ominaisuuksien mittaaminen.....</b>	<b>11</b>
5.1	Perinteiset mittausmenetelmät .....	11
5.1.1	Ympyrämaisyyden- ja lieriömaisyydenmittauslaitteistot.....	11
5.1.2	SFS-4910 esittämät mittausmenetelmät.....	13
5.2	Modernit mittausmenetelmät .....	16
5.2.1	Paikallaan olevat mittauskoneet .....	16
5.2.2	Liikuteltavat 3D-mittauslaitteet .....	19
5.3	Mittauslaitteistojen soveltuvuuden arviointi.....	23
<b>6</b>	<b>Mittauslaitteistotesti .....</b>	<b>24</b>
6.1	Testin tavoitteet ja mittausasetelma .....	24
6.2	Testin mittaustulokset.....	26
<b>7</b>	<b>Kappaleen tuenta mittaustilanteessa .....</b>	<b>27</b>
7.1	Kaksitukisen putken taipuminen .....	27
7.2	Säteissuuntaisen tuennan menetelmät .....	28
<b>8</b>	<b>Testi kappaleen pyörittämisestä mittaustilanteessa .....</b>	<b>31</b>
<b>9</b>	<b>Tulokset .....</b>	<b>34</b>
9.1	Mittauslaitteisto ja menetelmä.....	34

	2
9.2 Kappaleen tuenta mittaustilanteessa .....	36
9.3 Muut huomioitavat asiat.....	37
<b>10 Johtopäätökset.....</b>	<b>38</b>
<b>11 Pohdinta.....</b>	<b>40</b>
<b>Lähteet .....</b>	<b>42</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>44</b>
Liite 1. Mittauslaitteistojen ominaisuuksien vertailutaulukko .....	44

## Kuviot

Kuvio 1. Toleranssirajojen muodostaman verhopinnan graafinen esitys. (SFS-EN ISO 1101:2017, 93 muokattu.).....	9
Kuvio 2. Esitys maksimimateriaalin vaatimuksesta. (SFS-EN ISO 2692:2015, 46)	10
Kuvio 3. Esitys vähimmäismateriaalin vaatimuksesta. (SFS-EN ISO 2692:2015, 54) .....	11
Kuvio 4. Mitutoyo Roundtest RA-1600 ympyrämäisyydenmittauskone. Ympyröitynä pyörityspöytä ja mittausanturi. (Mitutoyon verkkokauppa, 9/2019. Muokattu.) .....	12
Kuvio 5. Suljettu Gaussinen suodatus parametrin $f_c$ arvolla 5 aaltomuotoa kierrokselle. (SFS-EN ISO 16610-21:2011, 20) .....	13
Kuvio 6. Ympyrämäisyyden määritelmä. (SFS-EN ISO 1101:2017, 71) .....	15
Kuvio 7. Mitutoyo Falcio Apex koordinaattimittauskone. (Mitutoyon verkkokauppa 9/2019).....	17
Kuvio 8. Zeiss O-Inspect koordinaattimittakone. (Zeiss O-Inspect tuote- esittelysivu, 9/2019) .....	18
Kuvio 9. Havainnekuva röntgentomografian mittausmenetelmästä. (Heikkinen 2019, 2) .....	19
Kuvio 10. Romer Absolute Arm koskettavalla ja skannaavalla mittauspäällä. (Hexagon Metrologyn tuotesivut, 9/2019).....	20
Kuvio 11. Leica RTC360 laserkeilain. (Leica Geosystems'in tuotesivut, 9/2019) ..	21

Kuvio 12. Leica AT960-lasereurain. (Hexagon Metrologyn tuotesivut, 9/2019)	22
Kuvio 13. Creaform MetraScan. (Creaformin tuotesivu, 10/2019) .....	23
Kuvio 14. Mittaustestin kappale.....	25
Kuvio 15. Mitatun pistepilven vertailu 3D-malliin. Lähikuva.....	26
Kuvio 16. Mitatun pistepilven vertailu 3D-malliin.....	27
Kuvio 17. Kappaleen tukeminen besselin pisteistä ja mahdollisesti kolmannesta keskituesta. ....	28
Kuvio 18. Pohjasta tuettu kehä, jossa on oman kehän oman massan vaikutus. (Young & Budynas, 326) .....	29
Kuvio 19. Mittaukseen soveltuvat tuentamenetelmät. ....	31
Kuvio 20. Mittausjärjestely kappaleen pyöritystestistä mittauksen aikana.....	33
Kuvio 21. Kappaleen pyöritysmittaustestin tulokset esitettynä Spatial Analyzerissa. Palkkien pituudet kuvaavat mittauspisteen eroa lieriöpinnasta....	34

# 1 Tuotteen geometrinen ominaisuuksien mittaaminen

Mittausvälineiden kehittyessä kiinnostus laadukkaamman mittausdatan saamisesta on kasvanut. 3D-mittalaitteiden kehitys on tehnyt haastavampien geometrinen ominaisuuksien mittaamisen helpommaksi ja pistepilvien tai -joukkojen hyödyntämisen yleisemmäksi. Pistepilvien mittaaminen on nopeutunut huomattavasti viime vuosina ja niiden käsittely kehittyy ohjelmistojen mukana. Perinteiset mittausmenetelmät pituusmitan mittaamiseksi, kuten kaksipistemitta, toimivat pyörähdyssymmetrisillä pinnoilla vain satunnaisina mittoina tietyltä linjalta. 3D-mittalaitteet mahdollistavat kattavamman otannan mittaamisen annetun toleranssin määrittämiseksi.

Jos piirustukseen on merkitty geometrinen toleranssi, kuten pyörähdyssymmetrisen kappaleen ympyrämäisyys, on sen todentamiseen usein tietyt vakiintuneet menetelmät. Pienille kappaleille on omat ympyrämäisyyden mittauskoneensa, mutta mittojen kasvaessa pyörityslaitteiston hyödyntäminen voi olla haastavaa, taloudellisesti kannattamatonta tai jopa mahdotonta. Yleisimmin käytetty pyörityslaitteisto sorvattaville kappaleille on työvaiheessa käytetty sorvi, mutta mitä tehdä tilanteessa, jossa työstökoneetta haluttaisiin käyttää lastuavaan työstöön mittaamisen sijaan. Joustavan kappaleen toleranssit on mahdollista antaa ns. vapaassa tilassa tai tarkkaan määritellyn tuennan alaisena. Nämä tolerointitavat ovat tarpeellisia, kun kappale halutaan mitata työstökoneen ulkopuolella.

Aikaisempi työkokemukseni Valmetin Rautpohjan toimipisteessä optisten ja käsimittavälineiden parissa motivoi lisäämään tietämystäni 3D-mittalaitteiden käytöstä. Tähdänneeseen työnkuvaani on kuulunut käsimittavälineiden kalibrointi, apu- ja mittalaitteiden kehitys, sekä kappaleiden geometrian tarkastamista optisilla mittauslaitteilla. Olen saanut koulutuksen optisten mittavälineiden käyttöön, kuten vaaituskoje ja takymetri, mutta erityisesti olen kiinnostunut 3D-pistemittauksen ja pistepilvien käsittelystä mittaustilanteessa. Mittaustapojen kehitys ja yhtenäistäminen tuovat mahdollisuuden laitteiston tehokkaalle käyttämiselle ja mittaushenkilöstön kouluttamiselle. Henkilökohtainen tavoitteeni on jatkaa opinnäytetyön jälkeen 3D-mittalaitteiden tut-

kimusta, käyttöä ja apulaitekehitystä mittaustilanteisiin, jotka vaativat erityisosamista. Voin näissä hyödyntää opiskeluista keräämäni tuotekehitys- ja suunnitteluosaamista.

## 2 Valmet Technologies Oyj – Rautpohja

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Valmet Technologies Oyj:n Rautpohjan tehdas Jyväskylässä. Työ tehdään Tuotannon Laatutuen osastolle, jonka tehtävänä on tukea tuotantoa laadun ylläpitämiseksi. Rautpohjan tehdasalueella työskentelee 1430 ihmistä paperit- ja palvelu-liiketoimintalinjoista (Valmet Suomessa, N.d.). Lisäksi alueella on Valmetin valimo ja kaksi koekonetta. Tehtaalla valmistetaan paperi- ja kartonkikoneen komponentteja, esikokoonpanoja ja tehdään huoltotoimenpiteitä paperikoneen osille ympäri maailmaa. Valmet toimii maailmanlaajuisesti yli 30 maassa ja työllistää yhteensä noin 12000 ihmistä. Valmet Technologiesin liikevaihto vuonna 2018 oli noin 3,3 miljardia euroa ja tilauksista 35 % kuului palvelu-liiketoimintalinjaan. Seuraavaksi suurimmat liiketoimintalinjat tilauksien perusteella ovat paperit sekä sellu ja energia, jotka muodostavat yhtä suurina osina puolet koko yrityksen tilauksista. Viimeisenä on automaatio-liiketoimintalinja 9 % osuudella tilauksista. (Valmet lyhyesti, N.d.)

Valmet Technologies ei ole aina ollut Jyväskylässä yhtä maailmanlaajuisena yrityksenä, vaan se on saanut alkunsa Suomenlinnasta Viaporin allastelakasta noin 1750-luvulta. Ryhmä Suomen valtion omistamia metallitehtaita yhdistettiin vuonna 1946 Valtion Metallitehtäiksi, josta tuli 1951 Valmet Oy. Tuolloin paperikoneiden lisäksi tuotevalikoimaan kuuluivat traktorit, laivamoottorit, aseet, lentokoneet sekä paljon muita metalliteollisuuden tuotteita. 1900-luvun lopulla yhtiö keskittyi entistä enemmän paperikoneisiin ja 1999 Valmetin ja Rauman yritysfuusiassa muodostettiin Metso Oyj. Monien yritysostojen jälkeen Valmet Oyj irtautettiin 2013 Metsosta siten, että Valmet sai Metson massa-, paperi- ja voimatuotanto-liiketoimintalinjat. Kaksi vuotta myöhemmin siirrettiin myös prosessiautomaatio-liiketoimintalinja. (Valmet lyhyesti, N.d.)

## 3 Tutkimuksen toteutus

### 3.1 Käytetyt tutkimus- ja kehittämismenetelmät

Tutkimusaineistoon kuuluvat aihepiiriin liittyvät standardit, kuten ISO GPS-järjestelmän standardit, joiden määritelmien perusteella pystytään valitsemaan sopivia mittaustapoja tutkittavaksi tai testattavaksi. Mittausalan asiantuntijoita haastellaan heidän käyttämistään mittausten menetelmistä ja -kokemuksista. Yrityksen pitkää 3D-mittaushistoriaa ja -kokemusta hyödynnetään mittaustestien järjestämisessä, joista kerätään kokemusta oikean menetelmän valitsemiseen.

Tutkimuksen vuoksi osallistutaan Suomen metrologiajajoksen ja VTT Mikesin järjestämään Mittaukset Konepajassa-seminaariin, Hexagon Metrologyn mittaustapahtumaan Tampereen Konepajat Oy:llä ja Leica Geosystemsin Laserkeilauspäiville. Näistä MIKO-seminaari ja Hexagonin mittaustapahtuma ovat paremmin aiheen keskiössä, mutta Laserkeilauspäivillä voi tulla uutta tietoa tulevista mittalaitteista ja -tekniikoista.

Tutkimuskysymykset ovat:

- Millä menetelmillä geometrisia tuoteominaisuuksia voidaan mitata?
- Mikä on soveltuvin mittausten menetelmä putkimaisille lieriöille?
- Miten kappale tulee tukea mittauksen aikana?

Tutkimuskysymysten avulla pyritään vastaamaan millä laitteistolla ja menetelmällä putkimaisten lieriöiden geometrian todentaminen olisi parasta tehdä tilanteessa, jossa kappale on vapaana ja sen pyörittämiseen ei käytetä sorvia. Toimeksiantaja haluaa välttää työstökoneen käyttöä mittaamiseen ja käyttää koneaikaa materiaalia poistavaan menetelmään. Mittaustapahtuma itsessään ei ole kappaleen arvoa lisäävää, vaan siitä saatavat hyödyt ovat laadunhallintaan liittyviä. Laaduttomuus johtaa laadukustannuksiin, joita halutaan välttää. Tutkimuksessa käytetään kvalitatiivisia tutkimusmenetelmiä, kuten haastatteluita ja osallistavia kokemuksia, kuten mittaus-trendien seuraamista seminaareissa ja tapahtumissa.

## 3.2 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus aloitettiin perehtymällä geometrinen tuoteominaisuuksien määrittelyyn, jotta soveltuvia mittausmenetelmiä osattaisiin käsitellä ei pelkästään mittaustarkkuuden osalta, vaan myös tulosten käsittelyn kannalta. Tutkimuksessa tuotiin esille tärkeimpiä ISO-GPS – standardijärjestelmän standardeja ja niistä tuotantokappaleiden mittaamisen kannalta 3D-mittausmenetelmiin liittyvät otettiin tarkempaan käsitelyyn.

Mittausvälineitä tutkittiin perinteisistä mittausmenetelmistä uusiin teknologioihin painopisteen ollessa tietokoneavusteisissa mittauksissa. Moderneihin mittausmenetelmiin keskityttiin, jotta mittaustuloksista saatavat hyödyt olisivat suurimmat mahdolliset. Mittaustuloksista ei tällöin vain numeerisesti tarkasteltaisi toleranssien täytymistä, vaan niitä voidaan hyödyntää tuotannon kehityksessä.

Tutkimuksen painopiste on mittausmenetelmien testeissä, jotka ovat laadullista tutkimusta. Testeissä havaittujen asioiden perusteella arvioidaan menetelmän soveltuvuutta tuotantoon ja jatkuvaan käyttöön. Merkittävät ongelmakohdat pyritään poistamaan ja virhelähteet minimoimaan. Tutkimuksen lopputuloksena on esitys mittauslaitteistosta, -menetelmästä ja siinä huomioon otettavissa muista asioista. Menetelmän heikkouksien perusteella esitetään jatkotutkimuksen tarve.

## 4 ISO GPS – standardijärjestelmä

### 4.1 Mikä on ISO GPS - standardijärjestelmä?

ISO GPS-järjestelmän nimitystä käytetään standardiryhmästä, joka käsittelee tuotteen mittatoleransseja ja geometrisia tuoteominaisuuksia. GPS-lyhenne tulee englanninkielisestä nimityksestä ”Geometric product specifications”. Tämän ryhmän tärkeimpiä standardeja ovat (Rapinoja 2019, 10):

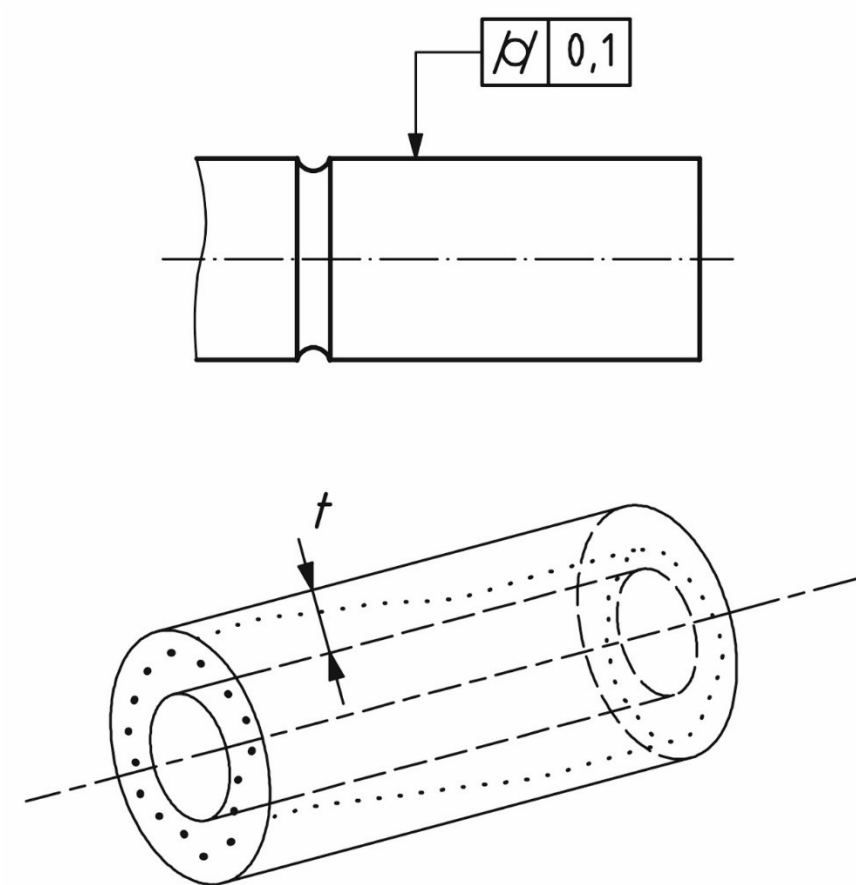
- ISO 8015 Perussäännöt
- ISO 14405 Mittatoleranssit
- ISO 268 ISO-sovitejärjestelmä
- ISO 5459 Peruselementit
- ISO 1101 Geometriset toleranssit
- ISO 1302 Pinnankarheuden merkinnät
- ISO 2768 Pituusmittojen yleisoleranssit ja geometriset yleistoleranssit
- ISO 14253 Mittausepävarmuus

Standardiryhmän tarkoituksena on luoda yhtenäisesti käytetty, kaikkien ymmärrettävissä oleva merkitsemistapa geometrisille ominaisuuksille ja niiden suuruuksille.

Työssä käsitellään tarkemmin geometrisia toleransseja ja niiden todentamisen keinoja.

#### 4.2 Miten verhopintavaatimukset määritellään?

Yleinen piirustusmerkintä pituusmitan toleroinnille on esim.  $1000 \pm 0,01$ . Tämä pituusmitta mitataan kahden pisteen välisenä etäisyytenä, jonka tulee olla vaaditun toleranssialueen sisällä. Geometriset toleranssit kuten ympyrämuotoisuus tai lieriömuotoisuus eivät ole yksiselitteisesti todennettavissa kaksipistemittaan avulla, vaan ne määritellään toleranssialueen sisältävänä alueena tai muotona. Kuviossa 1 2D-kuvannossa esitetty lieriömuotoisuustoleranssi tarkoittaa yksiselitteisesti, että pisteviivalla esitetyn pinnan tulee olla toleranssialueen  $t$  muodostamien verhopintojen välillä. Toleranssirajan esittämien pinnan rikkoontumattomuudesta käytetään usein nimitystä verhopintavaatimus, mikä on helpompi ymmärtää ilman graafista esitystä.



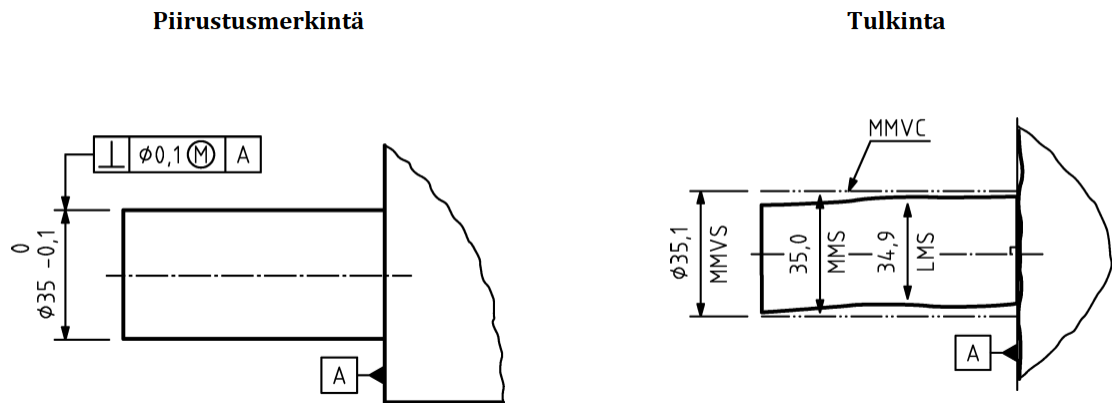
Kuvio 1. Toleranssirajojen muodostaman verhopinnan graafinen esitys. (SFS-EN ISO 1101:2017, 93 muokattu.)

Varsinkin 3D-mittalaitteilla mitatessa pistejoukkoja tai skannauksia, voidaan sovitettavilla 3D-malleilla määrittää verhopinta tekemällä malli toleranssin ala- tai ylärajalle. 3D-mallin pinnan rikkominen siinä tapauksessa tarkoittaa kappaleen hylkäämistä tai korjaamista. Geometriset toleranssit määrittävät verhopinnan siten, että kaikkien mitattavan ominaisuuden pisteiden tulee olla toleranssialueen sisäpuolella.

#### 4.3 Maksimi- ja vähimmäismateriaalin sekä vastavuoroisuuden vaatimus

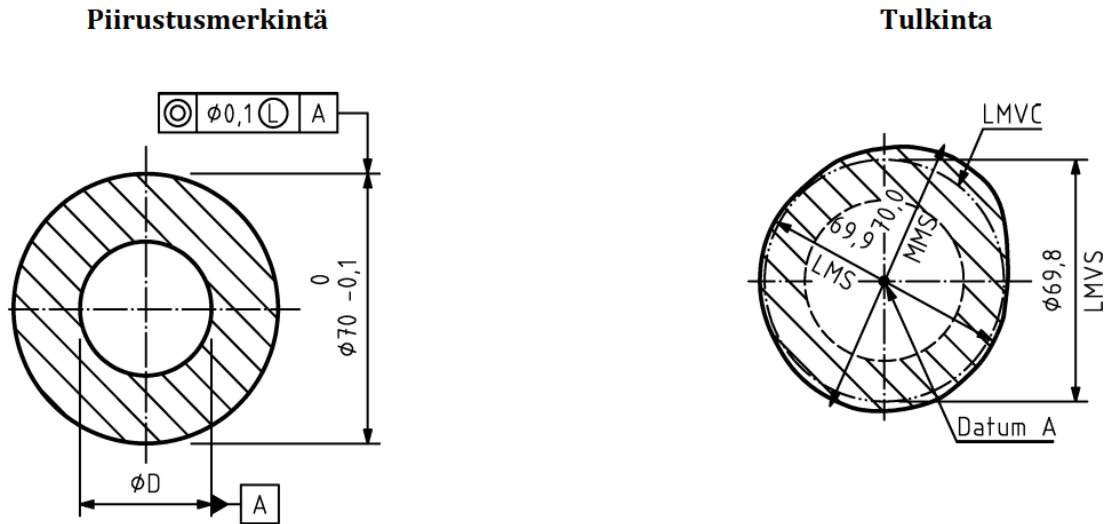
SFS-EN ISO 2692 antaa puitteet suunnittelulle kappaleiden tolerointiin maksimimateriaalin vaatimuksen määrittelyllä ja pienimmän seinämänpaksuuden säilyttämiseksi vähimmäismateriaalin vaatimuksella. Näistä kahdesta voidaan yhdessä käyttää nimitystä vastavuoroisuuden vaatimus. Maksimimateriaalin vaatimus voidaan helpoiten selittää standardin kuvion 2 mukaan. Kuviossa 2 esitetystä kappaleesta käsitellään

lieriöpinnan kohtisuoruutta perustasoa A kohtaan. Lieriöelementti ei saa loukata las-kennallista menorajaa eli sen on oltava halkaisijaltaan 35,1 mm lieriön muodostaman verhopinnan sisällä. Samanaikaisesti mitattavan lieriön halkaisijan tulee olla annetun halkaisijatoleranssialueen 34,9-35,0 mm sisällä. Huonoimmassa kohtisuoruustapauksessa lieriön halkaisija voi olla koko matkalta 34,9 mm ja keskilinjan kohtisuoruus perustasoon A 0,2 mm.



Kuvio 2. Esitys maksimimateriaalin vaatimuksesta. (SFS-EN ISO 2692:2015, 46)

Maksimimateriaalin vaatimusta kiinnostavampi aiheen kannalta on vähimmäismateriaalivaatimus, jota voidaan ajatella valmistusvaiheessa merkittävänä tekijänä. Käsiteltäessä raaka-aineena olevaa kappaletta, voidaan vähimmäismateriaalivaatimusta ajatella työvarojen riittävyyden arviointina. Vähimmäismateriaalivaatimuksen tapauksessa puhutaan usein lopputuotteen kestävyuden varmistamisessa esimerkiksi riittävän seinämänpaksuuden muodostamisessa, mutta raaka-aineena oleva aihio on jo työvaiheensa lopputuote. Vähimmäismateriaali voidaan määrittää sisä- ja ulkopuoliselle ominaisuudelle siten, että valmistettava kappale löytyy aihion rajoista. SFS-EN ISO 2692 mukaan putken poikkileikkaukselle voidaan määrittellä vähimmäismateriaalin vaatimus, kuten kuviossa 3 on esitetty.



Kuvio 3. Esitys vähimmäismateriaalin vaatimuksesta. (SFS-EN ISO 2692:2015, 54)

## 5 Putkimaisten lieriöiden geometrinen ominaisuuksien mittaaminen

### 5.1 Perinteiset mittausmenetelmät

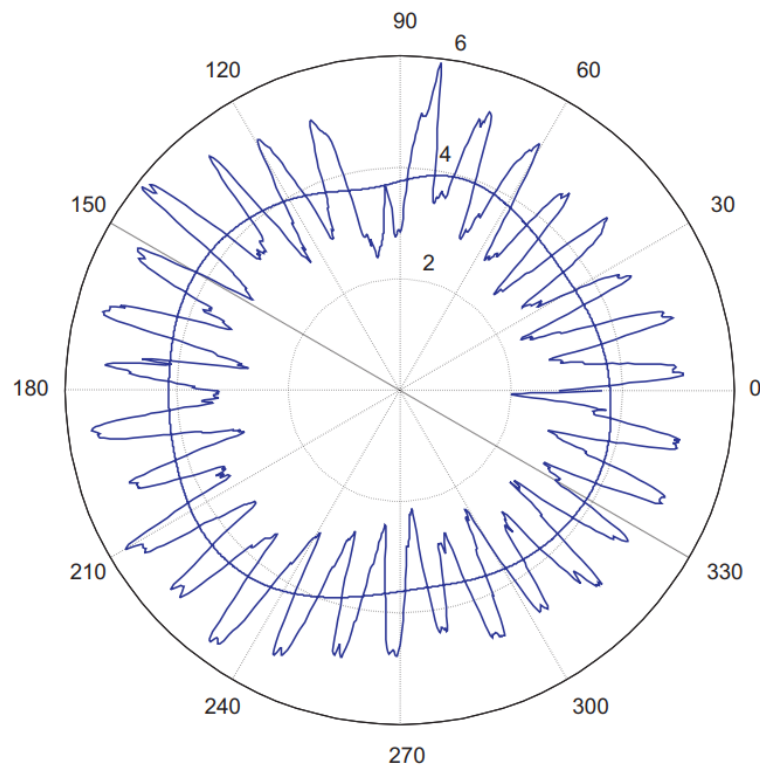
#### 5.1.1 Ympyrämaisyyden- ja lieriömaisyydenmittauslaitteistot

Perinteisesti tarkkuutta vaativien pyörähdysymmetristen kappaleiden geometrinen ominaisuuksien mittaamisessa käytetään ympyrämaisyydenmittauslaitetta. Laitteessa on tarkoin keskiöity pyörityspöytä, johon kappale kiinnitetään. Pyörityspöydässä olevan kulma-anturin ja varsinaisen mitta-anturin avulla saadaan mitattua ympyrämaisyyttä ja lieriömaisyyttä, sekä lieriömäisen kappaleen pään tasomuus. Ympyrämaisyydenmittauslaite on esitetty kuviossa 4.



Kuvio 4. Mitutoyo Roundtest RA-1600 ympyrämäisyydenmittauskone. Ympyröitynä pyörityspöytä ja mittausanturi. (Mitutoyon verkkokauppa, 9/2019. Muokattu.)

Vaikka ympyrämäisyydenmittauskoneessa kappale pyritään keskittämään pöydän kanssa mahdollisimman hyvin, pystytään mittaustuloksesta tekemään keskiönsiirto ja keskittymään varsinaisen muodon tulosten tulkitsemiseen. Ympyrämäisyyden mittauksessa käytetään standardien määrittelemiä suodatuksia, jolloin mittauksen häiriösignaali ja pinnankarheus saadaan poistettua tuloksesta ja jäljelle jää pinnan varsinainen muoto. Mittaajat voivat valita parametrit sovelluskohteen mukaan, ellei niitä ole erikseen piirustuksessa annettu. Kuviossa 5 on esimerkki Gaussisesta suodatuksesta, jossa sallitaan 5 aaltomuotoa kierroksella.



Kuvio 5. Suljettu Gaussinen suodatus parametrin  $f_c$  arvolla 5 aaltomuotoa kierrokselle. (SFS-EN ISO 16610-21:2011, 20)

Ympyrämäisyydenmittauskoneet ovat herkkiä mittalaitteita ja siten asennettu tukevasti omalle pöydälleen. Mitattavien kappaleiden koot rajoittuvat halkaisijaltaan 0,5 m ja pituudeltaan 1 m kokoluokkaan perustuen Mitutoyon katalogissa oleviin ympyrämäisyyden mittauslaitteisiin (Mitutoyon verkkokauppa 9/2019). Ne ovat stabiiliuden ja anturiteknologian ansiosta tarkimpia 3D-muodon mittauslaitteita, mutta raskaassa konepajateollisuudessa lopputuotteiden mittaamiseen liian pieniä. Kokorajoituksen vuoksi, ennen nykyaikaisten 3D-mittalaitteiden yleistymistä, lopputuotteiden mittaamiseen on täytynyt keksiä keinoja käyttäen hyväksi työstökoneita ja muita apulaitteita.

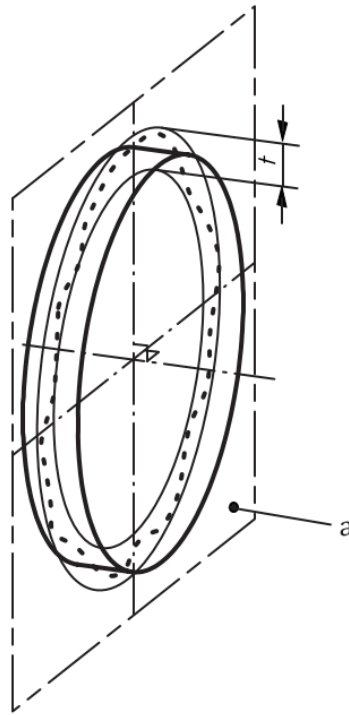
### 5.1.2 SFS-4910 esittämät mittausmenetelmät

Geometristen toleranssien määrittely on ollut olemassa jo ennen uusinta ISO GPS-standardijärjestelmän määrittelyä. Nyt korvattavaksi esitetystä SFS-4910 -standardissa toleranssien määrittelyn ohella kuvataan menetelmiä, miten niitä voidaan mitata. Nämä esimerkit puuttuvat täysin uudemmissa ISO GPS -järjestelmästä, vaikka

menetelmät ovat edelleen hyväksyttäviä (Rapinoja, 2019). SFS-4910 kuvaa tarkasti menetelmiä, miten ominaisuuksia, kuten lieriömäisyyttä, voidaan mitata heittokellon ja pyörityslaitteiston avulla.

Nämä kynä ja paperia - menetelmät ovat yhtä päteviä, kuin modernit menetelmät, mutta niiden vaatima työmäärä saman mittaustuloksen saamiseksi on erittäin työlästä. Käsimittavälineiden käyttö, kuten mikrometrien, luotilangan ja halkaisijamitta-nauhan käyttö on teoriassa mahdollista, mutta käytännössä mahdotonta mittauksen tehostumisen vuoksi. Lisäksi mittaustuloksia on hankala hyödyntää tuotannossa millään muulla tavalla.

Yleisin sorvattavien kappaleiden mitattava geometrinen ominaisuus on heittotoleranssi. Heitto tarkoittaa sorvissa kappaleen pinnan ja pakan ja karan välille muodostuvan peruslinjan välisen etäisyyden muutosta. Yleisin mittaväline on mittakello ja työvaiheen yhteydessä tehtynä se on helppo, sillä kappale on työstetty jo pyörimis-keskiönsä ympäri. Tilanteessa, jossa mitattava kappale asetetaan sorviin ja mitataan, on mittaus vain niin hyvä, kuin kappaleen keskitys ja kiristyksen voiman aiheuttama muodonmuutos pyörimisakselinsa suhteen. Tällä menetelmällä voidaan mitata myös kappaleen ympyrämuotoisuus pyörittäen kappaletta tietyin asteluvuin ja ottamalla mittakellon näyttämä ylös. Mittaustulokset voidaan analysoida SFS-4910 (SFS-4910:1983, 25) kuvaamien ohjeiden avulla määrittämällä mittaustuloksien sisä- ja ulkopuolelle sovitettujen samankeskisten ympyröiden säteiden erotuksena kuvion 6 havainnollistamalla tavalla.



Kuvio 6. Ympyrämäisyyden määritelmä. (SFS-EN ISO 1101:2017, 71)

Teollisuudessa on kehitetty omia mittavälineitä tarkkojen valmistustoleranssien saavuttamiseksi esimerkiksi hiomakoneilla, joita Valmetin Rautpohjan tehtaallakin on käytössä. Hiomakoneiden mittalaitteistot pohjautuvat normaaliin ympyrämäisyyden ja lieriömäisyyden mittauskoneisiin, mutta käyttävät nelianturimittausta yhden anturin sijaan. Valmistettavista putkimaisista lieriöistä mitataan 3D-muotoa, joka vastaa standardin mukaisilla termeillä lieriömäisyyttä, sekä ympyrämäisyyttä valituilta alueilta. Monianturitekniikka mahdollistaa yksittäisen mittausvirheen merkityksen pienentämisen, mitä voi esiintyä pinnalla olevien partikkelien seurauksena. Tekniikalla saadaan myös selville pinnan muodon jaksolliset monikerrat. Tämä tarkoittaa arkikielessä, kuinka monta kulmaa putkimaisessa lieriössä on. Lopputuotteen pyörimisnopeus on suuri, jolloin jaksolliset muotovirheet aiheuttavat värähtelyjä ja lyhentävät tuotteen käyttöikä. Hiomakoneiden mittalaitteet yltyvät lähes perinteisten ympyrämäisyyden mittauskoneiden tarkkuuteen, mutta jäävät suuren kokoluokan vuoksi toiseksi. Mekaniikan monimutkaisuus useista johteista ja nivelistä johtuen aiheuttaa mahdollisia mittausvirheitä.

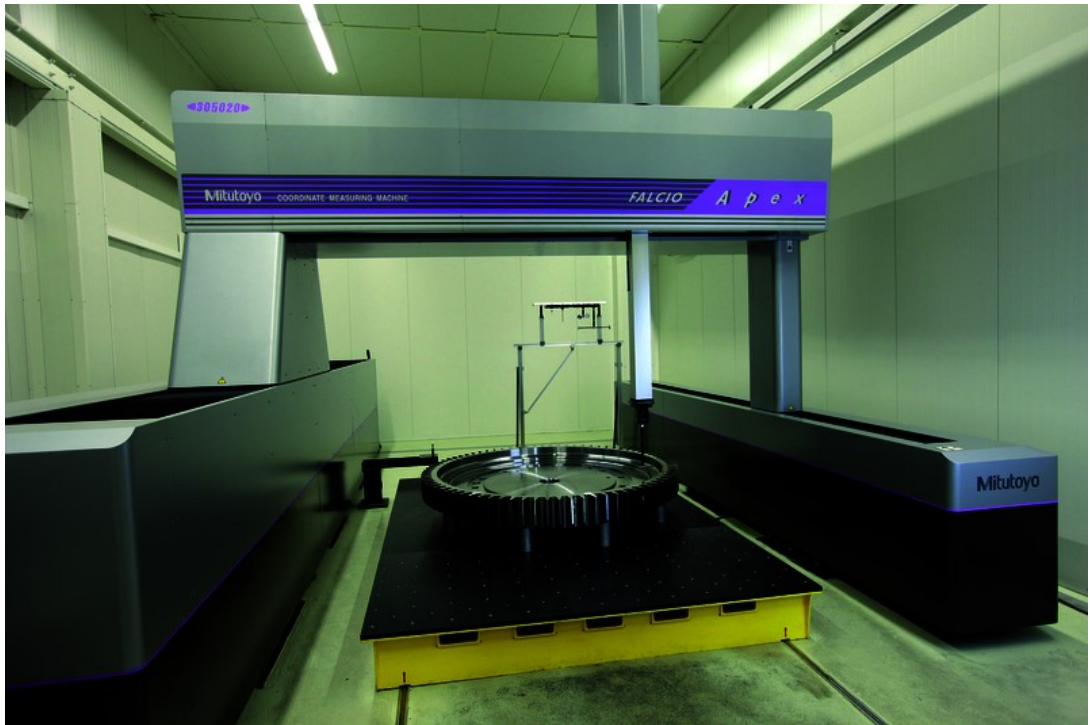
Hiomakoneiden, kuten ympyrämäisyydenmittauskoneidenkin, tuloksia suodatetaan sopivilla suodatuksilla ja niiden parametreilla mitattavasta kohteesta riippuen. Koneilla mitataan yleensä vain viimeisteltyjä pintoja, jolloin pinnanlaatu on hyvä ja mitaus ylipäättään voidaan suorittaa vaaditulla tarkkuudella.

## 5.2 Modernit mittausmenetelmät

Viime vuosien aikana saadun mittausdatan käsittely on parantunut ja helpottunut, mikä on nähtävissä mittalaitteiden ja varsinkin skannerien mittauksien näytteenotto-  
taajuudessa. Entistä tiheämpien ja tarkempien pistepilvien tuottaminen lyhyessä ajassa on tuottavuuden kannalta avainasemassa, sillä mittauksen jälkeen kappaleelle voidaan tehdä toimenpiteitä ja mittaustuloksia käsitellä samaan aikaan. Yritysten tarjotessa palveluita koko tuotteen elinkaaren ajan, kannattaa datan kerääminen tehdä mahdollisimman aikaisesta vaiheesta lähtien. Tuotteen elinkaaren missä tahansa vaiheessa voidaan palata siihen, missä tilassa tuote on ollut, mitä muutoksia siihen on tullut ja mitä vaikutuksia niistä on syntynyt.

### 5.2.1 Paikallaan olevat mittauskoneet

Paikallaan olevista 3D-mittauskoneista yleisin on koordinaattimittakone, kuten Mitutoyon Falcio Apex (kuvio 7).



Kuvio 7. Mitutoyo Falcio Apex koordinaattimittauskone. (Mitutoyon verkkokauppa 9/2019)

Koordinaattimittauskoneet ovat 3D-mittauksen tarkimpia mahdollisia välineitä, niiden vakauden ja kolmen akselin kompensointimahdollisuuden vuoksi. Koordinaattimittauskoneelle on aina rakennettava tasaiset mittaolosuhteet pitävä huone tai alue. Muutoin mittauksen tarkkuus voi kärsiä merkittävästi esim. lämpötilavaihteluista johtuvien rungon muodonmuutoksien vuoksi. Suurimmat koordinaattimittauskoneet ovat noin ison huoneen kokoisia ja liikuteltavat 3D-mittauslaitteet ovat suurilla kappaleilla edukseen. Koordinaattimittauskoneita voidaan käyttää automatisoidusti tai manuaalisesti riippuen onko kyseessä sarjatuotanto vai yksittäiskappaleita.

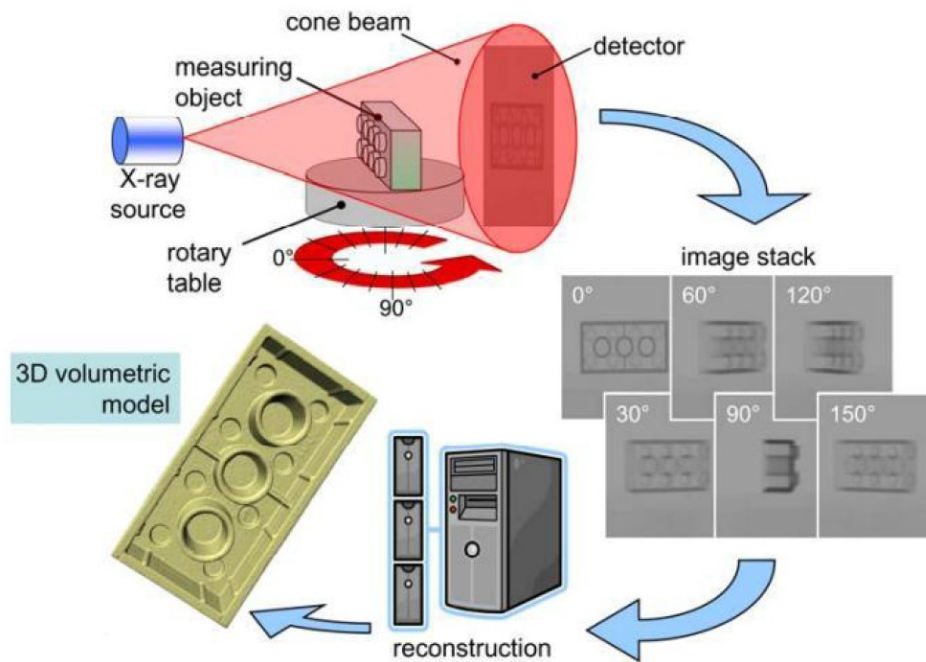
Koordinaattimittauskoneeseen on mahdollista myös integroida optinen mittaustapa, kuten Zeiss O-Inspectissä on tehty (kuvio 8).



Kuvio 8. Zeiss O-Inspect koordinaattimittakone. (Zeiss O-Inspect tuote-esittelysivu, 9/2019)

Mittaustekniikka toiminta perustuu korkearesoluutioiseen kuvaan, josta voidaan ohjelmallisesti mitata ominaisuuksia. Tekniikka soveltuu hyvin pehmeille kappaleille, joille normaalin koordinaattimittauskoneen mittausvoima aiheuttaa muodonmuutoksia ja tulosten vääristymistä.

Röntgentomografiaan perustuvat mittauslaitteet ovat hyödyllisiä metalliteollisuudessa, mutta ne ovat oikeastaan edukseen vain pienillä kappaleilla. Kappaleiden isoon vuoksi vaadittava suojaus säteilyltä ja laitteiston osat, lähinnä paneelit, kasvavat niin suureksi, että mittausmenetelmä ole käytännössä mahdollinen tai ainakaan taloudellisesti kannattava. Pienissä kämmenen kokoisissa kappaleissa onkaloiden ja muiden ominaisuuksien tarkasteleminen on röntgentomografian parhaita puolia tarkkuuden kasvun vuoksi. Iso paneeli suurentaa tässä tapauksessa mitattavaa kohdetta ja erottelukyky paranee. Röntgentomografian mittausprosessi on esitetty kuviossa 9.



Kuvio 9. Havainnekuva röntgentomografian mittaamenetelmästä. (Heikkinen 2019, 2)

Röntgentomografian suuri käyttäjäkunta on 3D-tulostuksen parissa, jossa huokosten ja epäjatkuvuuskohtien etsiminen kappaleen sisältä ainetta rikkomattomalla mittaamenetelmällä on tärkeää ja mittaustarkkuus mikrometrin luokkaa (Zanini ym. 2018, 1). Teollisuudelle on käynnissä kaksi tutkimusprojektia röntgentomografiamittauksien kehittämisestä (Heikkinen 2019, 18).

### 5.2.2 Liikuteltavat 3D-mittauslaitteet

Liikuteltavien mittauslaitteiden käyttö on yleistynyt niiden tarkkuuden parantuessa. Enää ei ole tarvetta lähettää kappaletta tarkalle mittauskoneelle, vaan mittaus voidaan suorittaa kohteessa. Pienen kokoluokan kappaleet voidaan mitata nivelvarsimitalaitteilla, kuten Hexagonin Romer Absolute Armilla (kuvio 10).



Kuvio 10. Romer Absolute Arm koskettavalla ja skannaavalla mittauspäällä. (Hexagon Metrologyn tuotesivut, 9/2019)

Nivelvarsimittakoneiden volumetrinen tarkkuus ja ulottuvuus ovat toisistaan riippuvia suureita. Pienillä n. 1 m ulottuvuuden laitteilla päästään 0,01 mm tarkkuuksiin, siinä missä isommilla 4,5 m ulottuvuuksilla tarkkuus on millimetrin kymmenyksen luokkaa. Moniin laitteisiin voidaan lisätä pistemittauskärjen lisäksi skanneripää, jolla pienen kokoluokan skannaukset onnistuvat. (Hexagon Metrologyn tuotesivut, 9/2019.)

Isompien skannausten mittalaitteena on usein laserkeilain sen edullisuuden ja nopeuden vuoksi. Laserkeilain ei välttämättä tarvitse siirtopisteitä, vaan eri koneosien pistepilvet yhdistetään yhteisten mitattujen pisteiden avulla. Laserkeilausta käytetään paljon rakennustoiminnassa julkisissa rakennuksissa ja tieverkoston rakennuksessa. Näissä sovelluskohteissa toleranssit ovat reilusti yli 1 mm, joten huonompi mittaustarkkuus ei haittaa. Leica RTC360 (kuvio 11) on esimerkki yleisesti käytetystä laserkeilaimesta.



Kuvio 11. Leica RTC360 laserkeilain. (Leica Geosystems'in tuotesivut, 9/2019)

Laserseuraimet ovat yleistyneet viime vuosina teollisuuden käytössä ja ne ovatkin tutkimuksen kappaleiden kokoluokassa edukseen. Niiden tehokas mittausalue on halkaisijaltaan n. 40 m. Laserseuraimet, kuten Leican AT960 (kuvio 12) käyttävät samaa laserinterferometritekniikkaa, kuin tarkimpien mittavälineiden kalibroinnissa käytettävissä laitteissa. Tarkkuus perustuu tähyksenä toimivan prisman ja laitteen välillä liikkuvan stabiloidun lasersäteen vaihe-eron muutokseen. Laserseuraimen käytössä todettu luotettava mittaustarkkuus konepajaolosuhteissa on 0,01-0,1 mm. Epävarmuudet johtuvat pääosin prisman ja laitteen välillä olevan ilman vaihteluista ja prisman asettelusta. Laserseuraimiin voidaan yhdistää käsiskannereita, jotka mahdollistavat suurien skannausten tekemisen lähes koko laserseuraimen mittausaluetta hyödyntäen. Tällöin laserseurain mittaa käsiskannerin paikkaa ja asentoa 3D-avaruudessa ja skannauksen epätarkempi mittausetäisyys, 0,1-0,6 m, on vain käsiskannerista mitattavaan pintaan. Luotettava yksittäispisteen mittaustarkkuus tippuu tällöin kuitenkin hieman alle 1 mm luokkaan.



Kuvio 12. Leica AT960-lasereurain. (Hexagon Metrologyn tuotesivut, 9/2019)

Leican uusin lasereurain ATS600 toimii kuten AT960 pistemittauksessa, mutta siinä on integroituna tarkka laserkeilausominaisuus. Mitattava alue rajataan laitteessa olevan kameran avulla, valitaan haluttu pistepilven tiheys ja automatisoitu mittaus hoitaa loput. Valmistajan mukaan skannauksen mittaustarkkuus on 0,3 mm, jopa äärimmäisen kaltevilla pinnoilla mittaussuuntaan nähden (Lupus & Taher, 2019). Laitteen etuna on tarkka skannaus ja koneasema siirtoon vaadittavien pisteiden mittaustarkkuus. Mittaustapahtuma on hieman hitaampi, kuin varsinaisella laserkeilaimella, mutta tarkempi (Laserkeilauspäivä, 2019).

Fotogrammetriaan, strukturoituun valoon ja laserviivaan perustuvat mittausjärjestelmät (kuvio 13) käyttävät kameroita tai laserviivaa havaitsemaan kappaleen pinnan. Nämä ovat kokoluokkansa puolesta rajoitettuja ja laserviivaaskannerit vaativat usein tähyksien kiinnittämistä kappaleeseen, jotta pistepilvi osataan koota ohjelmallisesti. Niiden mittausalue rajoittuu alle 10 m, joka on raskaassa konepajateollisuudessa usein liian pieni.



Kuvio 13. Creaform MetraScan. (Creaformin tuotesivu, 10/2019)

### 5.3 Mittauslaitteistojen soveltuvuuden arviointi

Mittauslaitteistoja vertailtiin viiden ominaisuuden avulla. Nämä ominaisuudet ovat mittaustarkkuus, mittausetäisyys, käyttömukavuus, verrannollinen hinta ja mittaustietojen käytettävyys. Arvosteluasteikko on kolmiportainen huonoimmasta parhaimpaan: Huono, tyydyttävä ja hyvä. Yksikin huono ominaisuus tarkoittaa, ettei laitteisto sovellu putkimaisten lieriöiden geometrian todentamiseen. Taulukko on liitteessä 1.

Ominaisuudet muodostuivat työnantajan toiveiden mukaan ja omien kokemusten perusteella. Määrävimpiä näistä olivat mittaustarkkuus ja mittaustietojen käytettävyys, mutta niiden painoarvoa ei ollut tarpeellista käyttää. Arviointeja tehdessä käytettiin hyväksi mittaus tapahtumissa ja -seminaareissa tehtyjä havaintoja ja keskusteluja mittausalan asiantuntijoiden kanssa heidän kokemuksistaan. Käyttökokemuksia saatiin rajatusti, kuten nivelvarsikoneella ja laserseuraimella tehtävä skannaus, mutta yleiskuva useista mittalaitteista pystyttiin muodostamaan. Muut tiedot tulkittiin valmistajien tuotesivujen perusteella sovelluskohde silmällä pitäen.

Arviointitaulukosta huomattiin, että kaksi mahdollisesti soveltuvaa menetelmää ovat fotogrammetria ja valotoimiset skannerit, sekä laserseuraimet. Laserseuraimet ovat parhaimpia muutoin, paitsi verrannollisen hintansa puolesta. Niiden hintaluokka on alkaen 100 000 € skannausvalmiudella. Lopullinen hinta riippuu paljon lisätarvikkeista ja ohjelmistotarpeista, sillä ohjelmistojen lisenssien hinnat voivat vaihdella. Laserseuraimet valittiin mittaustilasto- ja menetelmätesteihin, koska niistä on vähän, mutta hyviä kokemuksia ja niiden tarkkuudesta oltiin vakuuttuneita.

## 6 Mittauslaitteistotesti

### 6.1 Testin tavoitteet ja mittausasetelma

Mittaustilastotestiin valittiin pitkäaikaisen yhteistyökumppanin Hexagon Metrologyn valikoimiin kuuluva AT960-laserseurain kahdella eri skannerilla (LAS ja LAS XL) ja uutena valikoimaan tuleva ATS600, eli prismaan ja pintaan mittaava laserseurain. Näistä laitteista ei ole yrityksessä vielä kovin paljon kokemusta ja niiden mittausominaisuuksien selvittäminen oli testin päätavoite. Hexagonin ja Leica Geosystems'in edustajat tulivat vierailulle toimipisteeseen, jossa palaverissa esiteltiin laitteet ja keskusteltiin niiden ominaisuuksista ja rajoitteista. Palaverin jälkeen järjestettiin mittaustesti kappaleelle, jonka arvioitiin tuovan haluttuja ominaisuuksia hyvin esille.

Palaverissa keskusteltiin AT960:n kanssa käytettävistä käsiskannereista ja niiden tekniikkaeroista. Liikkuvan pisteen ja viivalaserin ero tulee parhaiten esille reunan erottelukyvyssä, mikä on toisarvoinen asia sovelluskohteessa. Lupus esitteli uutena markkinoille tulevan ATS600:n ominaisuuksia ja huomautti käyttöliittymän olevan vielä hieman kehitysasteella ja käyttäjien kokemukset ja toiveet huomioidaan jatkokehityksessä.

Keskustelujen jälkeen laitteistot pystytettiin testiin järjestetyn kappaleen mittaamiseen. Mittaustestin toteuttamisesta keskusteltiin Valmetin 3D-mittausasiantuntijoi-

den kanssa ja testikappaleen todettiin olevan sopiva tähän tarkoitukseen. Testikappale on esitetty kuviossa 14. Testikappaleessa on sorvatun pinnan lisäksi raakapinnalla oleva kuoppa, joka on syvyydeltään joitain millimetrejä lieriöpinnasta. Tämän vajaatyöstö antaa hyvän kuvan mittalaitteiden erottelukyvystä pinnanlaadulle ja suhteellisen pienen dimensiomuutoksen selvittämisestä skannauslaitteistolla. Kappale on tuettu lähes besselin pisteiden kohdalta (kuvio 17), mikä minimoi pituussuuntaisen muodonmuutoksen, vaikka testikappaleella sen seinämävahvuudesta johtuen ei ole havaittavaa roikkumista (Esala ym. 2003, 58).

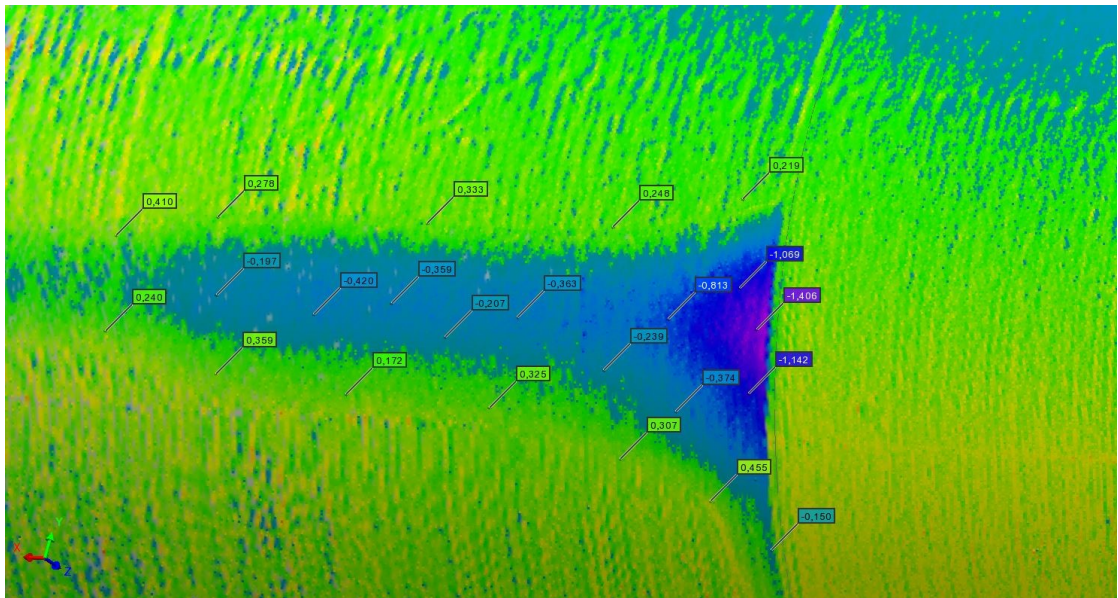


Kuvio 14. Mittaustestin kappale.

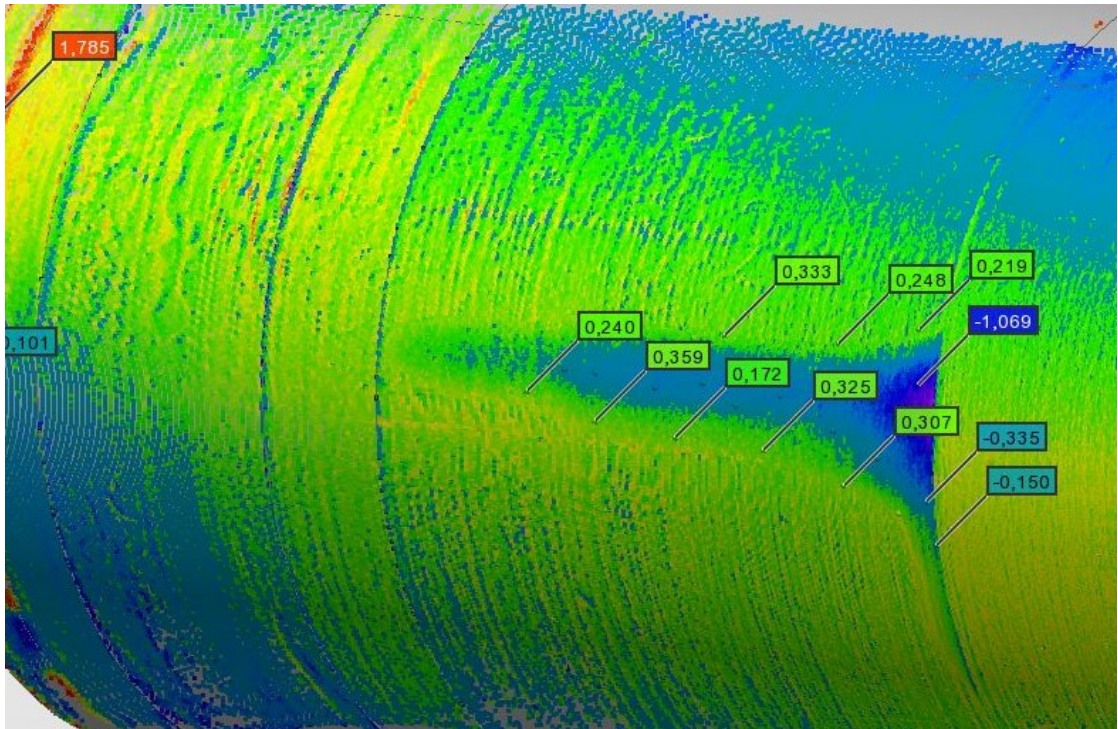
Mittauksissa käytettiin Polyworks-ohjelmistoa, joka on skannausystävällisempi vaihtoehto sen suurten pistepilvien käsittelyn tehokkuuden kannalta, kuin esimerkiksi pistemittaukseen optimoitu Spatial Analyzer. Mittaukset aloitettiin asettamalla koneaseman siirtopisteet ympäristöön, jolloin eri laitteiden mittauksia voidaan verrata samassa koordinaatistossa. Kappale mitattiin AT960:n ja LAS-XL:n yhdistelmällä ja sen jälkeen ATS600:lla. Polyworksiiin tuotiin karkea 3D-malli kappaleesta pistepilven sovitukselta varten, josta luotiin värikartat muotovirheiden havainnollistamiseksi.

## 6.2 Testin mittaustulokset

Mittauksien tuloksena saatiin yksittäispisteitä ja kaksi pistepilveä, joiden ominaisuuksia voitiin selvittää tai verrata etäisyyttä 3D-mallin pintaan muodostaen hyvinkin visuaalisia värikarttoja kuvioiden 15 ja 16 mukaisesti. Geometrinen ominaisuuksien tulosten kerääminen mittauspisteistä on piirustusten vaatimusten täyttämisen kannalta tärkeää, mutta vertailu ideaalisen kappaleen 3D-malliin on ymmärrettävämpää ja visuaalisempaa kokemattomalle käyttäjälle. Värikartasta pystyisi myös päättelemään valmistusprosessin sujuvuutta ja mahdollisia korjaustoimenpiteitä vaativat kohdat.



Kuvio 15. Mitatun pistepilven vertailu 3D-malliin. Lähikuva.



Kuvio 16. Mitatun pistepilven vertailu 3D-malliin.

Eri laitteilla mitatut pistepilvet eivät juurikaan eronneet toisistaan koostumusta lukuun ottamatta. ATS600:lla pistepilvi koostuu vaaka- ja pystysuuntaisista linjoista sen mittaustavan vuoksi. Laitteen automatisoitu mittaus koettiin vaivattomaksi ja mittaustaluen määrittely helpoksi.

Mittaustuloksien käsittely osoittautui uudessa kohteessa aluksi haastavaksi, mutta asiantuntijoiden avulla 3D-malli saatiin sovitettua mittaustulokseen. Hexagonin edustajat kertoivat, että mittaustuloksien käsittelystä tuotannossa saa nopeampaa makrojen avulla, kun prosessi ja kappale ovat samat lähes joka kerta.

## 7 Kappaleen tuenta mittaustilanteessa

### 7.1 Kaksitukisen putken taipuminen

Putkimaisten lieriöiden pituussuuntaista taipumista ei yleensä valmistustavasta johdun tarvitse ottaa huomioon, sillä sorvattaessa sitä ei ole merkittävästi havaittavissa. Ilman pyörityslaitteistoa mitattaessa taipuma on kuitenkin huomioitava jollakin

tavalla, kuten esimerkiksi kappaleen tuennassa. Ilmiötä voidaan käsitellä yksinkertaisesti kaksitukisen putken taipumisena oman massan vaikutuksesta. Mittavälineistä puhuttaessa kaarimikrometrin tarkistussauva eli siirtonormaali on hyvä esimerkki putken taipumisesta. Sama tuentamenetelmä pätee myös muun muotoisille esineille, kuten mittapaloille. Ohjeena mittauksille on, että sauva tuetaan päistään 1/5-matkan päästä, jolloin sen pituus on suurin ja roikkuma pienin mahdollinen. Tuennasta puhutaan myös besselin pisteinä (kuvio 17) (Esala ym. 2003, 58) ja se on yleisesti mittavälineiden kalibroinnissa tunnettu menetelmä.

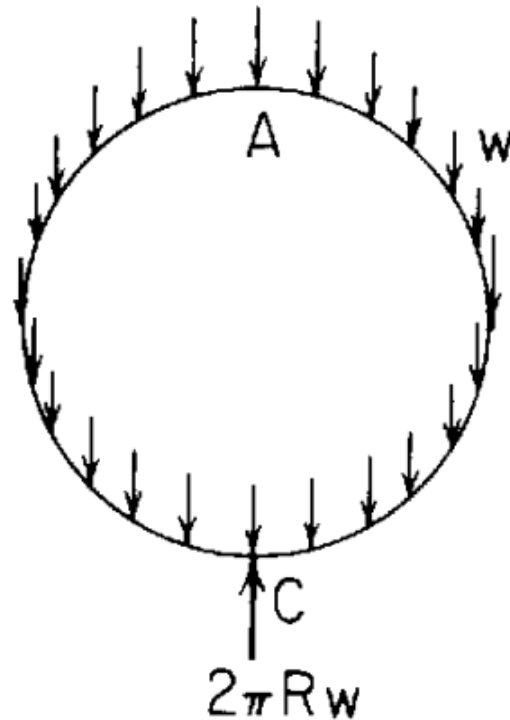


Kuvio 17. Kappaleen tukeminen besselin pisteistä ja mahdollisesti kolmannelta keskituella.

Ohutseinämaisillä putkimaisilla lieriöillä pituuden ja halkaisijan suhteen suuruuden vuoksi äärimmäisissä tapauksissa voi olla tarpeellista käyttää kolmatta tukipistettä keskellä kappaletta. Käytettäessä useampaa kuin kolmea tukipistettä, ei mittaus ole yksiselitteisesti toistettavissa (Esala ym. 2003, 58). Tämä on erityisen tärkeää tuotannossa, jossa tehdään samanlaisia kappaleita ja niiden kehityksen vertailu on olennaista.

## 7.2 Säteissuuntaisen tuennan menetelmät

Ohutseinämäisten putkimaisten lieriöiden halkaisijasuuntaisen poikkileikkauksen muodonmuutoksien suuruutta voidaan arvioida oman massan vaikutuksesta olettaen, että kappale on homogeeninen eikä siinä esiinny epäjatkuvuuskohtia. Young ja Budynas eivät teoksessaan määrittele tarkkaan, mikä on ohut- ja mikä paksuseinämainen kehä, mutta raja-arvoksi voidaan olettaa tapaus, missä massan säteissuuntaisen jakautumisen tekijä  $K_T = 1 + \frac{I}{AR^3} \approx 1$  (Young & Budynas, 326). Lukuarvoina yhdessä esimerkissä, jossa puhutaan ohuesta kehästä, seinämänpaksuuden suhde halkaisijaan on 1/26 (Young & Budynas, 287).



Kuvio 18. Pohjasta tuettu kehä, jossa on oman kehän oman massan vaikutus. (Young & Budynas, 326)

Kuvion 18 pistemäisesti tuetun putkimaisen lieriön poikkileikkausta vastaavan kehän halkaisijamuutokset pysty- ja vaakasuuntaan saadaan kaavoista 1 ja 2 (Young & Budynas, 326):

$$\Delta D_H = \frac{wR^3}{EAe} \left( \frac{k_1\pi}{2} - k_2\pi + 2k_2^2 \right) \quad (1)$$

$$\Delta D_V = \frac{-wR^3}{EAe} \left( \frac{k_1\pi^2}{4} - 2k_2^2 \right) \quad (2)$$

, missä

$\Delta D_H$  = Vaakahalkaisijan muutos

$\Delta D_V$  = Pystyhalkaisijan muutos

$w$  = Kehän suuntainen painoelementti

$R$  = Säteen pituus poikkileikkauksen keskilinjaan

$E$  = Kimmomoduuli

$A$  = Poikkileikkauksen ala

$e$  = Etäisyys keskiöstä taipumalinjaan

$k_1 = 1 - \alpha + \beta = \text{Kehäjännityksen muodonmuutoskompensointikerroin}$

$k_2 = 1 - \alpha = \text{Leikkausjännityksen muodonmuutoskompensointikerroin}$

Käsiteltäessä putkimaisia poikkileikkauksia, joiden seinämänpaksuus on niin pieni, ettei leikkausjännityksestä johtuvaa muodonmuutosta ole tai sen merkitys on olematon, voidaan kaavoja selventää hieman. Tekijöitä  $k_1$  ja  $k_2$  käytetään pääasiassa kenorakenteiden parissa, joissa niiden huomioonottaminen on merkittävämpää (Young & Budynas, 286). Merkinnät  $\alpha$  ja  $\beta$  sisältävät kaavat, joissa materiaalin ominaisuudet otettaisiin huomioon, mutta ohuen kehän approksimaatiolla voidaan olettaa, että:  $\alpha = \beta = 0$ , mistä seuraa  $k_1 = k_2 = 1$ . Tällöin vaaka- ja pystyhalkaisijoiden muutokset saadaan kaavoista 3 ja 4 (Young & Budynas, 326):

$$\Delta D_H = 0,4292 \frac{wR^4}{EI} \quad (3)$$

$$\Delta D_V = -0,4678 \frac{wR^4}{EI} \quad (4)$$

Näitä kaavoja käyttämällä voidaan arvioida melko tarkasti, miten ohuen kehän halkaisijat muuttuvat oman kuorman vaikutuksesta. Jos halutaan tarkempia tuloksia koko kehän muodonmuutoksesta, voidaan huomioida myös suurimman vaakahalkaisijan korkeuden muutos (kaava 5),  $\Delta L$ , ideaalimuodosta pystyhalkaisijalla (Young & Budynas, 326):

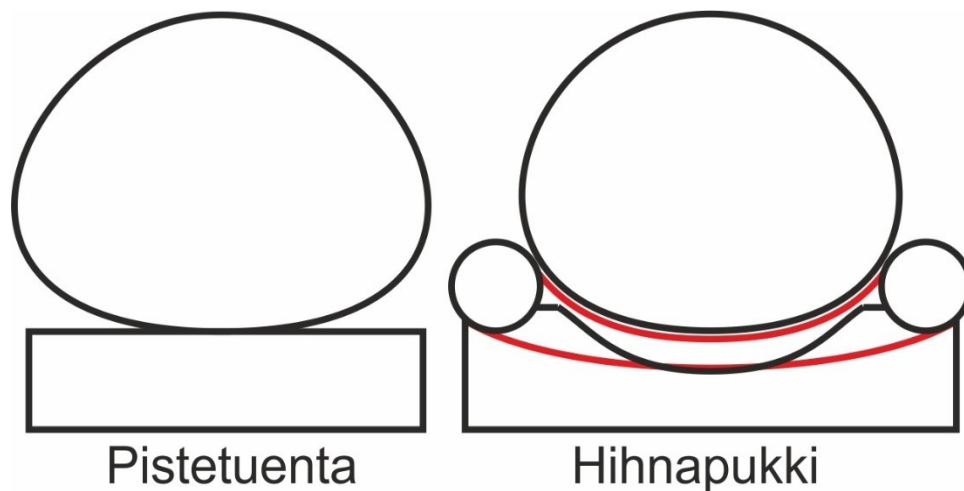
$$\Delta L = -0,2798 \frac{wR^4}{EI} \quad (5)$$

Tästä huomataan, että

$$\frac{\Delta L}{\Delta D_V} = \frac{-0,2798}{-0,4678} = 0,5981 > \frac{1}{2} \quad (6)$$

Koska suurimman vaakahalkaisijan korkeuden muutos on yli puolet pystyhalkaisijan muutoksesta, ei lopputuloksena ole soikio (kaava 6). Oman massan vaikutuksesta

ohuen kehän muoto muistuttaa pystyssä olevaa pyöreähköä kananmunaa, jonka leveys on suurempi, kuin korkeus (kuvio 19). Tästä syystä muoto on ennustettava ja mahdollisimman pistemäinen tuenta kappaleen keskeltä on hyvä tuentamenetelmä. Toinen mahdollinen valinta on hihnoilla varustettu leveä rullapukki, joka myötäilee hieman pidemmältä matkalta kappaletta, kuin rullapukki, mutta on edelleen yksi leveä tuenta kappaleen painopisteen kohdalta (kuvio 19). Hihnapukilta on odotettavissa, että se pyöristää muotoa hieman säteissuuntaisen tukipinnan suuruuden ansiosta.



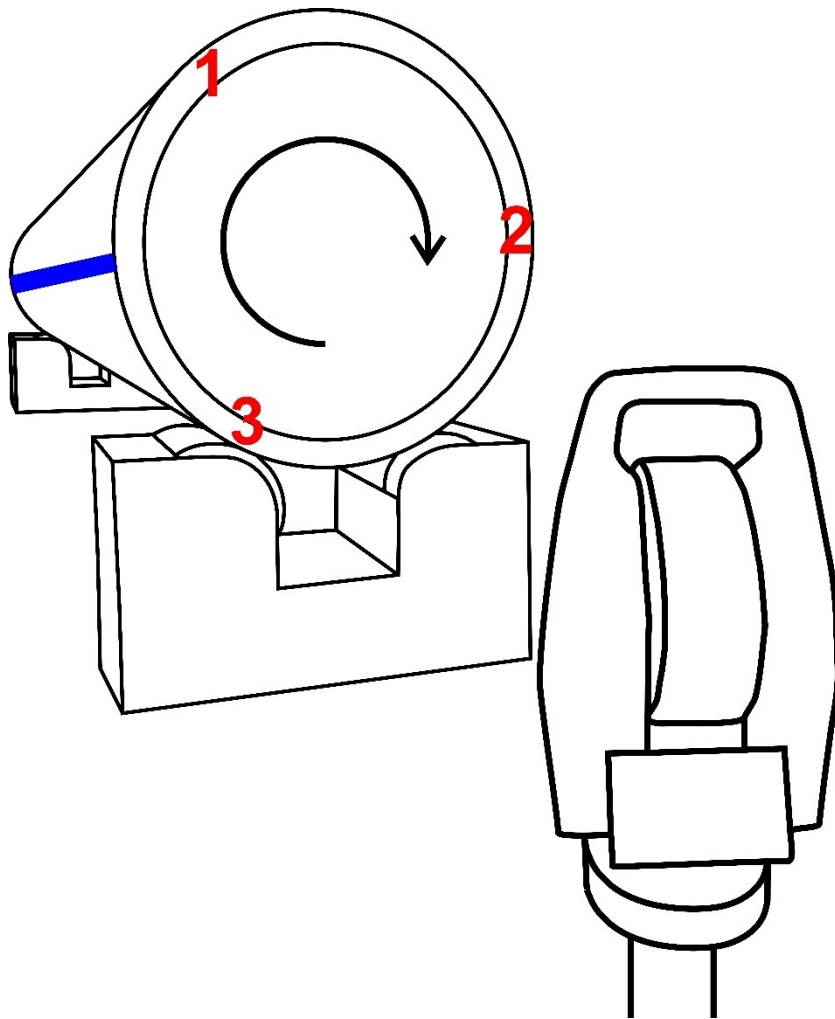
Kuvio 19. Mittaukseen soveltuvat tuentamenetelmät.

## 8 Testi kappaleen pyörittämisestä mittaustilanteessa

Toinen menetelmätesti järjestettiin tutkimusten loppupuolella, kun arvioitiin mahdollisuutta kappaleen pyörittämiselle mittaustapahtuman aikana. Perinteisesti kappaleen pysyessä paikallaan, laserseuraimelle tehdään vähintään kolmella mittauspisteellä siirtopisteet, jotka mitataan uudessa koneasemassa siirtämisen jälkeen. Kertyvät mittauspisteet pysyvät samassa koordinaatistossa ja mittausta voidaan jatkaa normaalisti. Siirtopisteet sijoitetaan yleensä mahdollisimman kauas toisistaan niiden mittaamisen epävarmuuden vuoksi, sillä silloin yksittäinen pieni mittausrvirhe ei vaikuta juurikaan siirron onnistumiseen.

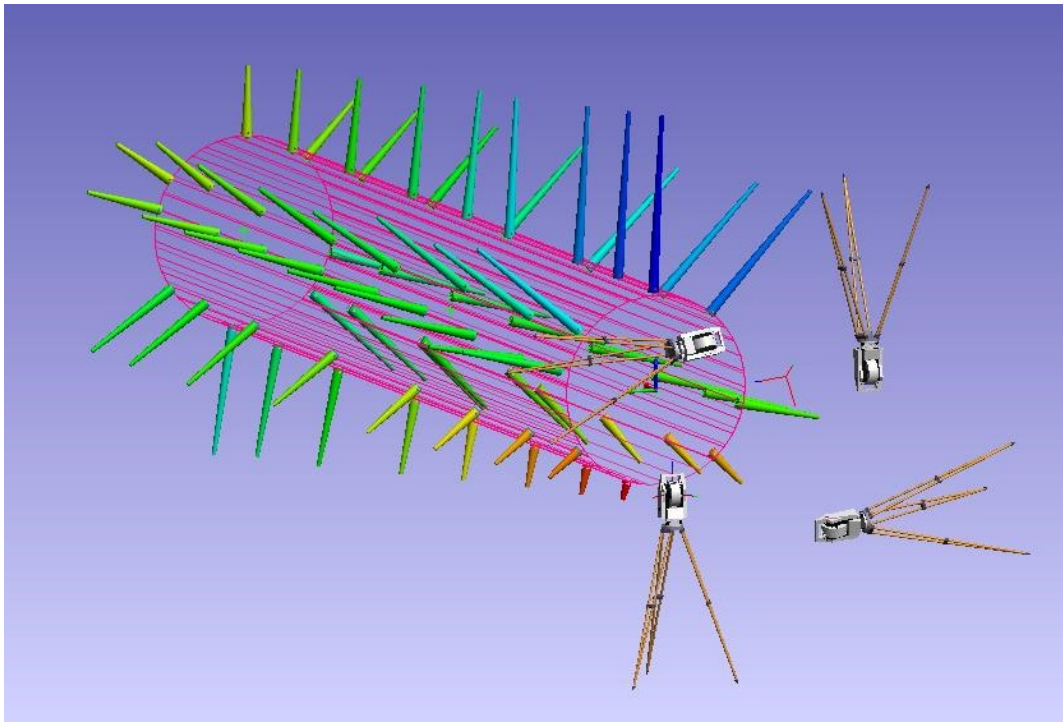
Toimeksiantajalla käytössä olevan Spatial Analyzer – mittausohjelman ominaisuudet mahdollistavat ajatuksen kappaleen pyörittämisestä laserseuraimen pysyessä paikallaan. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että kappaletta kääntäessä siirtopisteiden tulee olla kiinni kappaleessa. Testi on tarkoituksella tehty vain kolmella siirtopisteellä, jotka ovat lähempänä toisiaan, kuin olisi toivottavaa. Tilanne demonstroi tässä tapauksessa huonointa mahdollista menetelmää koneaseman siirrossa, mutta siitä voi olla hyötyä joissakin mittauskohteissa. Tilanteessa, jossa putkimaisen lieriön toiselle puolelle ei ole pääsyä jostain syystä, kappaleen pyörittäminen voi olla ainoa vaihtoehto. Saatavilla oleva pyörityslaitteisto ei välttämättä aina ole samaa tarkkuusluokkaa, kuin hiomakoneilla, jolloin pyörityslaitteisto ei pyöritä kappaletta sen keskiön ympäri. Jotta koko kappaleen pinta on mahdollista mitata, on kappale voitava mitata pyörittämällä ja käyttämällä siirtopisteinä kappaleessa kiinni olevia pisteitä.

Testi valmisteltiin kiinnittämällä 3 siirtopistettä putkimaiseen lieriöön, joka oli sorvattu tuotantokappale. Tällöin kaikki muotovirheet muodostuivat virhelähteistä ja niiden suuruutta pystyttiin arvioimaan helposti. Kappale mitattiin kuvion 20 mukaisessa asetelmassa, siirtopisteet kiinnitettynä päätypintaan. Mittauspisteitä otettiin kahdesta linjasta sinisen viivan kohdalta, koneaseman siirto suoritettiin pyörittämällä kappaletta ja mittaus toistettiin sinisen viivan kohdalta kahdelta linjalta. Tätä prosessia toistettiin kolmesti, kunnes koko kappaleen pinta oli mitattu harvalla ruudukolla.



Kuvio 20. Mittausjärjestely kappaleen pyöritykestistä mittauksen aikana.

Kun mittaustuloksia käsiteltiin ja pistejoukkoon sovitettiin lieriö, oli havaittavissa millimetrin eroja mittauslinjojen etäisyydestä lieriöpintaan. Mittaustuloksiin vaikutti luultavasti vasta lopussa havaittu huono siirtopisteen kiinnitys. Yhden siirtopisteen alusta pääsi liikkumaan hieman mittausten välillä, mikä aiheutti huonon koneaseman paikoituksen kertautumisen joka pyöräytyksellä. Mitattujen pisteiden ero sovitettuun lieriöön on kuviossa 21 osoitettu värein koodatuilla palkeilla niiden osoittaessa positiiviseen suuntaan lieriön pinnasta. Kuviossa 21 näkyy kappaleen pyöriksen seurauksena uusien koneasemien paikoitus 90 asteen välein.



Kuvio 21. Kappaleen pyöritysmittaustestin tulokset esitettynä Spatial Analyzerissa. Palkkien pituudet kuvaavat mittauspisteen eroa lieriöpinnasta.

## 9 Tulokset

### 9.1 Mittauslaitteisto ja menetelmä

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää paras mittauslaitteisto ja -menetelmä putki-  
maisten lieriöiden geometrian todentamiseen. Mittauslaitteistojen tiedonhaku-  
vaiheessa kävi hyvin nopeasti selväksi, että soveltuvimpia ja monikäyttöisimpiä ovat la-  
sersurainjärjestelmät. Niiden mittaustarkkuus on parempi kuin tuotantokappaleiden  
alkuvaiheiden toleranssialue vaadittavan suurella mittausetäisyydellä. Suuri hyöty la-  
sersuraimien käytöstä ja ylipäätään tietokoneavusteisista mittauksista on mittaustu-  
lostojen hyödynnettävyys vielä mittaustapahtuman jälkeen. Hyvin mitatun kappaleen  
mittatietoja voidaan tarvittaessa hyödyntää toiseen samanlaiseen kappaleeseen vielä  
pitkänkin ajan jälkeen, jos mittausmenetelmä on samanlainen.

Ensimmäisessä mittaustestissä, jossa tutkittiin mittalaitteiden erottelukykä, ei ha-  
vaittu eroja mittaustarkkuudessa. Testikappaleen muodot saatiin hyvin esille ja itse

mittaustapahtuma oli nopea. Yhden sektorin mittausta sekä AT960:n ja käsiskanneripään yhdistelmällä ja ATS600:lla kestivät noin 15 minuuttia ja pistepilven tiheys oli varmasti riittävä. Polyworks-ohjelmisto, joka on Hexagonin mukaan parempi skannaukseen, käsitteli pistepilven hyvin, mutta Spatial Analyzer ei pitkään odotuksen jälkeen pystynyt käsittelemään tuloksia. Ohjelmistoja on saatavilla useampia, mutta näistä kahdesta vaihtoehdosta Polyworks olisi järkevämpi valinta.

Käsiskanneripään käytössä huomattiin eduksi, että sillä pystytään skannaamaan kulman taakse, joka tässä tapauksessa tarkoittaa päätypintojen skannaamista yhdestä koneasemasta ja skannaussäteen ja interferometrisäteen olemista 90 ° kulmassa. Skannaaminen on nopea tapa tuottaa paljon mittaustietoa kerralla. Laserseuraimen ja skanneripään yhdistelmä on tarpeeksi tarkka tuotteiden valmistuksen alkuvaiheiden mittauksiin ja sen etuna on tarkka koneasemien siirto. ATS600:n automaattinen skannaus esivalmistelujen jälkeen osoittautui hyödylliseksi, mutta tapahtumassa, jossa mittaaja mittaa kappaletta, ei hänellä ole välttämättä muuta tehtävää. Omasta kokemuksestani on hyvä, että mittaajia on muutenkin paikalla kaksi, jolloin toinen voi kuljettaa prismaa tai skanneria ja toinen käyttää ohjelmaa tietokoneella ja valvoa mittauksen edistymistä. Tottuneet käyttäjät toimivat tehokkaasti yhdessä ja ohjelmiston mahdollisilta ongelmilta vältytään. ATS600:n käyttöliittymä on vielä kehitysvaiheessa, sillä se on uusi tuote ja käyttäjiltä ei ole saatu ohjaavaa palautetta tarpeellisista toiminnoista. Molemmat ovat teknisesti yhtä hyviä vaihtoehtoja, mutta monikäyttöisyyden vuoksi AT960 ja skanneripää ovat laitevalintana parempi. Pelkkää laserseurainta voidaan käyttää esimerkiksi työstökoneiden geometrian tarkistukseen.

Käsiskannereista selkeästi sopivin oli LAS XL, sillä sen viivan pituus on n. 600 mm, 1 m päässä pinnasta. Toiset Leican skannerit ovat mittaussektoriltaan kapeampia. Iso sektori mahdollistaa kattavan pistepilven mittaamisen nopeasti. Skannerit ovat johdollisia, mikä on huomioitava laitteiston hankinnassa, muttei aiheuta toimenpiteitä kuin koneen sijoitteluun mittaustilanteessa.

Kun putkimaisia lieriöitä skannataan ulkopuolelta, saadaan koko pinta mitattua vain siirtämällä mittalaitetta tai kääntämällä mitattavaa kappaletta. Koneasemien siirtopisteet saadaan huomattavasti suuremmalle etäisyydelle toisistaan tilanteessa, jossa

mittalaitetta siirretään. Toinen menetelmätesti järjestettiin, jotta havaittaisiin, onko siirtopisteiden kiinnittäminen kappaleeseen mahdollista ja mittausepävarmuuden pysyminen silti hyväksyttävissä rajoissa. Testin tulos oli odotettu, sillä sen suorittaminen vain kolmella mittauspisteellä oli arveluttavaa. Laserseuraimille yleisesti havaittu koneaseman vaihdosta seuraava virhe on 0,05 mm kokoluokassa huonoissakin mittausolosuhteissa. Jos pyörittäminen tulee kuitenkin tarpeelliseksi, voidaan koneaseman vaihdon epävarmuutta pienentää laittamalla neljäs siirtopiste kappaleen toiseen päähän ja lisäämällä yksi tai useampi siirtopiste päätypintaan. Tähän testiin ei ollut saatavilla tarpeeksi apulaitteita ja prisman pidikkeitä siirtopisteiden hyvään kiinnittämiseen.

Mittaustulokset ovat sekä helposti esitettävissä olevia ja tulkittavia 3D-malliin vertailun ansiosta, mutta hyödyntävät myös jatkotuotantoa. Sorvattavien kappaleiden muutkin geometriset ominaisuudet kuin heitto, saadaan selville ennen työstön aloittamista. Työvarat yritetään optimoida mahdollisimman pieniksi kustannuksien pienentämiseksi ja 3D-mittaustuloksien avulla voidaan koneistajalle ilmoittaa tarpeellisista keskityksen korjauksista. Esimerkiksi banaanin muotoisen putkimaisen lieriön keskilinjan erot pinnasta voidaan ilmoittaa päädyissä havaittavana heittona. Tällöin sorvin käyttäjä voi asettaa kappaleen siten, että työvarat ovat tasaisesti jakautuneet.

## 9.2 Kappaleen tuenta mittaustilanteessa

Mitattava kappale tulee tukea hyvien mittauskäytänteiden mukaisesti pituussuunnastaan besselin pisteistä. Toisenlaista tuentaa ei kannata käyttää, ellei omasta painosta johtuvat muodonmuutokset ole niin suuria, ettei kolmekaan pituussuuntaista tukea riitä. Tällöin tarkempi taipumalinjan laskenta olisi tarpeellista, jotta tulosten tulkinta olisi helpompaa. Ohuen kehän muodonmuutoksen laskelma perustuu vain säteissuuntaisen muodonmuutoksen huomioonottamiseen olettamuksella, että pituussuuntaisesta taipumisesta aiheutuvia jännityksiä ei ole.

Vaikka alhaalta pistemäisesti tuetun kehän muoto on hyvin ennustettavissa kappaleelle, joka on homogeeninen ja jossa ei ole epäjatkuvuuskohtia, ei tuenta ole välttämättä riittävän tukeva turvallisen työskentelyn takaamiseksi. Pistemäinen tuenta tarkoittaisi käytännössä todella pienen kontaktipinnan lovipuita, kapean välin rullapukkeja tai mittaamista kiiloilla tuettuna lattialla. Nämä toimivat hyvin kappaleella, joka on melko muotovirheetön, mutta kappaleessa voi olla merkittäviä muotovirheitä ja tukevin tuenta saadaan käyttämällä hihnapukkeja. Hihnapukkien käyttö tarkoittaa, että on tehtävä lisää mittaustestejä todellisilla tuotantokappaleilla. Laskennalliset muodonmuutokset on todennettava mittaamalla, jos omasta massasta johtuvat muodonmuutokset ovat merkittäviä. Monissa tuotantokappaleissa kuitenkin on epäjatkuvuuskohtia, jotka vaikuttavat ennustettavaan muodonmuutokseen. Kokenut mittaaja, joka tuntee mitattavan kappaleen ominaisuudet, osaa luultavasti tulkita kappaleen ominaiskäyttäytymistä. Sopivin ja käytännöllisin säteissuuntainen tuentamenetelmä kyseessä oleviin mittauksiin on hihnapukki.

### 9.3 Muut huomioitavat asiat

Valmistajat ilmoittavat mittalaitteille parhaan mahdollisen mittaustarkkuuden, joka saavutetaan optimiolosuhteissa. Normaalisti konepajan tuotantotilat eivät vastaa näitä odotuksia, vaan mittausalue joudutaan eristämään muusta tuotannosta. Eroa ei tarvitse tehdä rakentamalla laboratorio-olosuhteita, vaan sermien ja kunnollisen ilmanvaihdon ja valaistuksen järjestäminen on riittävää. Lämpötila on suurin yksittäinen pituusmittauksiin vaikuttava tekijä. Koska skannaus ei ota huomioon lämpölaajenemista, on kappaleen tasaantuminen ympäröivään lämpötilaan huomioitava ja lukevat otettava ylös. Vain tällä keinoin mitatut mitat ovat todellisia ja verrattavissa 3D-malliin.

Mittauslaitteistoa käyttävät henkilöt vaativat koulutusta, mutta päivittäinen tai edes viikoittainen käyttö pitää ohjelmiston käyttötaitoa yllä. Usein tietokoneavusteisista mittalaitteista puhuttaessa niiden käytön kuulee olevan hankalaa. Suurimmassa osassa tapauksista kyseessä on toimenpiteiden unohtaminen mittaustapahtumien

välillä. Tästä syystä jokaisella käyttökerralla tuntuu, kuin olisi ensikertalainen. Mittaustaitoa on tärkeää ylläpitää jo pelkästään poikkeavien tuotteiden tai erikoisten laatupoikkeamien vuoksi.

## 10 Johtopäätökset

Putkimaisten lieriöiden geometrian todentaminen on ammatillisesti kiinnostava mitausaihe, sillä 3D-mittauksessa tapahtuva kehitys on jatkuvaa ja se tarjoaa uusia haasteita. Tutkimuksen tavoitteena oli tiedonhaun ja testien perusteella valita sopivin mittauslaitteisto ja -menetelmä, joka soveltuu käyttökohteeseen. Lisäksi kappaleen sopiva tuenta mittaustilanteessa tuli selvittää. Valinnassa tuli huomioida mitausten edullisuus, tulosten käytettävyys ja muu sopivuus putkimaisten lieriöiden mittaamiseen.

Tutkimuksen tuloksina saatiin kattava katselmus perinteisiin ja nykyaikaisiin mittauslaitteistoihin, sekä niiden eroihin. Eri tekniikoiden ominaisuuksia, etuja ja haittoja tuotiin esille, joiden perusteella voitiin esittää mittaukseen sopivia mittauslaitteistoja. Kahdesta mittaustekniikasta, laserseuraimista sekä fotogrammetriaan, strukturoituun valoon ja laserviivaan perustuvista laitteistoista valittiin laserseurainjärjestelmä sen monipuolisuuden, mittaustarkkuuden ja tehokkaan mittausetäisyyden vuoksi. Valinnan perustelu on järkevä, sillä muut ominaisuudet olivat yhtä hyviä kyseisillä laitteilla. Mittauslaitteiston valinnassa onnistuttiin suoritetujen testien perusteella hyvin. Toisen menetelmätestin tulos oli odotettavissa, eivätkä huonot tulokset olleet mittauslaitteiston syytä, vaan johtuivat käyttäjän tekemästä mittaussuunnitelmasta.

Mittaustestit olivat onnistuneita, mutta lisätestaamiselle on todellinen tarve, kun oikea muotovirheellinen ohutseinämäinen tuotantokappale on mitauskohteena. Tällöin voidaan hyödyntää yhteistyökumppaneita ja alihankkia mittaus etukäteen laaditun mittaussuunnitelman mukaan oikeilla laitteilla käyttäen niiden vahvuuksia hyväksi. Näistä tuloksista voidaan vielä arvioida käytännön toimivuutta ja onko säteissuuntaisen muodonmuutoksen laskentaan käytetyt kaavat riittäviä vai onko tarve

tarkemmille laskelmille. Ohutseinämäisten putkimaisten lieriöiden halkaisijasuuntaisen poikkileikkauksen muodonmuutoksien kaavojen käsittely onnistui ja siinä pystyttiin selittämään mitä kukin tekijä tarkoittaa ja millä perusteella päädyttiin lopullisiin kaavoihin. Myös muodonmuutoksien lopulliset muodot pystyttiin havainnollistamaan hyvin kuvien avulla pistemäisessä ja hihnapukkituennassa.

Mittausmenetelmätesti olisi ollut hyvä tehdä hyvin ohutseinämäiselle putkimaiselle lieriölle, jolloin oltaisiin varmasti pystytty vastaamaan varmasti muodonmuutosten kysymyksiin. Saatavilla ei ollut sopivan kokoisia kappaleita testiin ja alkuperäinen aikataulusuunnitelma oli jo ylitetty toisen mittaustestin aikaan. Tilanteessa, jossa arvioidaisiin tietyn tuotteen mittausmenetelmiä, olisi tarpeellista tehdä mittaustestejä oikeassa työvaiheessa oikealle työkappaleelle. Varsinkin kappaleilla, joissa esiintyy suuria muotovirheitä, käytännön mittaustulosten käsittely tulee esiin. Demonstraatiotarkoituksessa tehdyt mittaukset eivät välttämättä vastaa todellista tilannetta. Tehdyissä mittaustesteissä mittalaitteen tarkkuus ei välttämättä vastaakaan tuotantoympäristössä järkevästi toteutettavissa olevia olosuhteita mittausepävarmuuksien pienentämiseksi.

Tämä tutkimus toimii hyvin ennakkotapauksena raskaan konepajatuotannon putkimaisten lieriöiden 3D-mittauksista. Testien tuloksien perusteella voidaan päätellä, ettei skannaus sovellu putkimaisten lieriöiden viimeistellyn geometrian määrittämiseen mittaustarkkuuden rajoituksen vuoksi. Mittaustarkkuus on riittävä valmistuksen alkuvaiheessa ja siitä voidaan saada merkittäviä hyötyjä. Mittauksessa havaittu viallinen kappale ei aiheuta turhia laatukustannuksia siihen käytetyn valmistusajan vuoksi. Jos työvarojen riittämättömyys havaitaan vasta viimeistelyvaiheessa, laatukustannukset ovat voivat olla merkittäviä. Toinen saavutettava etu saadaan asetusajan lyhentämisessä, kun mittaustulosten avulla voidaan ilmoittaa mahdollisista erikoisasetuksista sorvilla. Valmetilla on käytössä mittaustekniikoita -ja laitteistoja, joilla voidaan sorvilla pyöritettäessä mitata työvarojen riittävyys ja vaadittava keskiön siirto. Prosessi on kuitenkin hitaahko ja kasvattaa kappaleen asetusaikaa huomattavasti. Etukäteen mittauksella mahdollistetaan aikainen laadunvarmistus ja asetusajan lyhentäminen.

## 11 Pohdinta

Tutkimusta tehdessä pyrittiin käyttämään mahdollisimman ajantasaista tietoa mittalaitteista. Seminaareihin ja mittaustapahtumiin osallistumalla varmistettiin mahdollisten uusien mittaustekniikoiden esille tuleminen. Ajantasainen tieto uusista mittalaitteista ja niiden ominaisuuksista parantaa varsinkin soveltuvan mittauslaitteiston valinnan luotettavuutta. Standardeista käytettiin viimeisimpiä vahvistettuja versioita, jotta tutkimuksessa käsitellyt asiat ovat mahdollisimman pitkään paikkansapitäviä. ISO GPS-standardeja tutkittaessa huomattiin määritelmien samankaltaisuus korvattavaksi esitettyyn SFS-4910-standardiin. Perinteisten geometrinen tuoteominaisuuksien mittaustapojen kelpaavuus nykyajan tuotannossa pystyttiin arvioimaan laadukkaasti standardiasiantuntijan lausuntojen perusteella.

Mittauslaitteisto- ja mittausten menetelmätien luotettavuus on objektiivista, mutta niiden valmistelussa käytettiin hyväksi Valmetin mittausasiantuntijoita. Yrityksessä on pitkä historia 3D-mittauksista teodoliiteista takymetreihin ja uusien menetelmien soveltuvuuksia tutkitaan jatkuvasti. Laserseurainjärjestelmien mittaustestillä saavutettiin tilannetta kuvaavia tuloksia vaihtelevista pinnanlaaduista ja -puhtauksista huolimatta. Tämän seurauksena skannaustekniikka on luotettavaa laajasti eri sovelluskohteissa. Vaikka mittausten menetelmätesti kappaleen pyörittämisestä antoi mittaustausepävarmuuksia sisältäviä tuloksia, pystyttiin niiden juurisyyn selvittämään. Lisätestien vaatimukset ja niissä tehtävät parannuskohteet pystyttiin tuomaan esille mittauksien perusteella. Mittauslaitteistotestejä olisi ollut ehkä tarpeellista tehdä vielä useammalle laitteistolle kattavan näkemyksen muodostamiseksi. Aikataulu ei kuitenkaan mahdollistanut järjestää ulkopuolisten kanssa toista mittalaitetestiä.

Suurimmat haasteet olivat työn ajoituksessa uudelleen aikataulusuunnitelman muutoksen vuoksi. Ennen mittauslaitteistotestejä oli pitkä korkean työkuorman jakso, mikä hidasti teoriaosuuden kokoamista sopivaksi kokonaisuudeksi. Aikataulusuunnitelmasta olisi ollut tärkeä pitää kiinni, jotta raportoinnin huolelliseen viimeistelyyn olisi jäänyt enemmän aikaa.

Itse työn tekeminen oli mielenkiintoista, sillä pääsin osallistumaan mittaustapahtumiin ja keskustelemaan mittausalan asiantuntijoiden kanssa tutkimuksen aiheesta. Pystyin käyttämään hyväksi myös omaa asiantuntemustani 3D-mittauksista, erityisesti mittausohjelmistojen käytöstä. Tuotekehitystaustani ansiosta 3D-mittausohjelmistot ovat helppoja oppia, sillä niiden toimintaperiaatteet ja käyttöliittymät muistuttavat 3D-mallinnusohjelmia. Toivon valmistumisen jälkeen voivani jatkaa kehitystyötä 3D-mittausten parissa. Laserseuraimet ovat vielä suhteellisen uusia laitteita ja erilaisten kohteiden mittaaminen tarkasti vaatii usein apulaitteita ja mittausmenetelmien kehitystä.

## Lähteet

Esala, V-P., Lehto, H. & Tikka, H. 2003. Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit. Helsinki: Teknologiainfo Teknova

Creaform Metrascanin tuotesivu Creaformin verkkosivuilla. Viitattu 21.11.2019. <https://www.creaform3d.com/en/optical-3d-scanner-metrascan>

Heikkinen, V. 2019. Jäljitettävät mittaukset tietokonetomografialla (XCT), Röntgentomografiomittauksen hyötyjä ja mahdollisuuksia. Esitys MIKO-seminaarissa 2019.

Koordinaattimittauskoneiden tuotesivu Mitutoyon verkkokaupassa. Viitattu 11.11.2019. <https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/08/Coordinate%20Measuring%20Machines/index.xhtml>

Laserkeilainten tuotesivu Leica Geosystems verkkosivuilla. Viitattu 12.11.2019. <https://leica-geosystems.com/fi-fi/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>

Laserseurainten tuotesivu Hexagon Metrologyn verkkosivuilla. Viitattu 12.11.2019. <https://www.hexagonmi.com/fi-FI/products/laser-tracker-systems>

Leica Geosystems Laserkeilauspäivä. Verkostoitumiskeskustelut. Hanaholmen, Espoo.

Hexagon Metrologyn ja Leican laserseurainlaitteistoiesittely Valmetin Rautpohjan tehtaalla. 21.8.2019.

Nivelvarsimittalaitteiden tuotesivu Hexagon Metrologyn verkkosivuilla. Viitattu 12.11.2019. <https://www.hexagonmi.com/fi-FI/products/portable-measuring-arms>

Rapinoja, J-P. ISO GPS-toleranssistandardit - koulutus ja koulutusmateriaali. 24.1.2019.

SFS-4910:1983. Geometriset toleranssit. Muoto-, suunta-, sijainti- ja heittotoleranssien mittauseriaatteet ja -menetelmät. Yleisohjeet. Vahvistettu 26.9.1983. Viitattu 22.11.2019. Valmetin standardijärjestelmä.

SFS-EN ISO 1101:2017. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Geometriset toleranssit. Muodon, suunnan, sijainnin ja heiton toleranssit. Vahvistettu 24.2.2017.

SFS-EN ISO 2692:2015. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Geometrinen tolerointi. Maksimimateriaalin vaatimus (MMR), vähimmäismateriaalin vaatimus (LMR) ja vastavuoroisuuden vaatimus (RPR). Vahvistettu 19.1.2015. Viitattu 22.11.2019.

SFS-EN ISO 16610-21:2011. Geometrical products specifications (GPS). Filtration. Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters. Vahvistettu 17.9.2012. Viitattu 22.11.2019.

Valmet lyhyesti. N.d. Artikkele Valmetin nettisivuilla. Viitattu 22.11.2019.  
<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/>

Valmet Suomessa. N.d. Artikkele Valmetin nettisivuilla. Viitattu 22.11.2019.  
<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-suomessa/>

Young, W.C. & Budynas, R.G. 2002. Roark's formulas for stress and strain. 7. p. Yhdysvallat: McGraw-Hill Companies.

Ympyrämäisyydenmittauslaitteiden tuotesivu Mitutoyon verkkokaupassa. Viitattu 11.11.2019. <https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/04/Form%20Measurement/index.xhtml>

Zanini, F., Sbettega, E. & Carmignato S. 2018. X-ray computed tomography for metal additive manufacturing: challenges and solutions for accuracy enhancement. University of Padova.

Zeiss O-inspect tuotesivu Zeissin verkkosivuilla. Viitattu 11.11.2019.  
<https://www.zeiss.fi/metrology/products/systems/optical-systems/o-inspect.html>

## Liitteet

Liite 1. Mittauslaitteistojen ominaisuuksien vertailutaulukko

Mittauslaitteisto	Mittaustarkkuus	Mittauseiäisyys	Käyttäjäturvallisuus	Verrannollinen Hinta	Mittausdatan käytettävyys	Soveltuvuus
Ympyrämäisyydenmittauslaite	Hyvä	Huono	Hyvä	Tyydyttävä	Tyydyttävä	Ei sovellu
Käsimittavälineet	Hyvä	Huono	Huono	Hyvä	Huono	Ei sovellu
Muodonmittauskoneet (Monianturi)	Hyvä	Hyvä	Tyydyttävä	Huono	Tyydyttävä	Ei sovellu
Koordinaattimittauskone	Hyvä	Tyydyttävä	Tyydyttävä	Huono	Hyvä	Ei sovellu
Röntgentomografia	Hyvä	Huono	Tyydyttävä	Huono	Hyvä	Ei sovellu
Nivelvarsimittauslaite	Tyydyttävä	Huono	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Ei sovellu
Laserkeilain	Huono	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Ei sovellu
Laserseurain	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Tyydyttävä	Hyvä	Soveltuu
Fotogrammetria, valotoimiset skannerit	Tyydyttävä	Tyydyttävä	Hyvä	Tyydyttävä	Hyvä	Soveltuu