

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Esa Kojo

KONEPAJAN MITTAUSSTRATEGIA

Opinnäytetyö

Toukokuu 2013

# SISÄLTÖ

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto .....	5
1.2	John Deere Forestry Oy .....	5
1.3	Tuotanto Joensuun tehtaalla .....	6
2	Laatu ja laadunohjaus .....	7
2.1	Laatu käsitteenä .....	7
2.2	Ennakoiva laadunhallinta ja laadunohjaus .....	8
2.5	Laatukustannukset .....	9
2.3	Benchmarking .....	12
2.4	Benchmarkingin toteutus .....	13
3	Mittaustekniikka .....	13
3.1	Mittaustekniikan laatukustannukset .....	14
3.2	Mittauslaittevalmiudet ja valmistelu .....	15
3.3	Kuinka valmistelua parannetaan? .....	16
3.4	Mittausten suunnittelu .....	17
3.5	Mittauslaitteiden kalibrointi .....	17
3.6	Jäljitettävyys .....	18
3.7	Mittaustarkkuus ja virhelähteet .....	18
4	Koordinaattimittaus .....	21
4.1	Koordinaattimittauskoneet .....	22
4.1.1	Portaalityyppinen koordinaattimittauskone .....	23
4.2.2	Portaalikoordinaattimittauskoneen hankinta .....	25
5	ATOS Triple Scan II-3D-skanneri .....	26
5.1	ATOS Triple Scan II-3D-skannerilla mittaaminen .....	28
5.2	Mittaustulosten analysointi .....	31
6	Mapvison Quality gate .....	32
6.1	Järjestelmän ohjelmointi ja mittaukset .....	34
6.2	Järjestelmän tarkkuus .....	36
7	John Deere Forestry Oy:n mittauksen nykytila .....	38
7.1	Mittavat kappaleet ja niiden vaatimukset .....	38
7.2	Havainnot mittauksen nykytilasta .....	40
7.3	Toimenpiteitä mittauksen nykytilan parantamiseen .....	42
8	Valmistettavien osien mittauksen automatisointi .....	45
9	Mittauksen tarkkuuden parantaminen .....	48
10	Mittausstrategian vaiheet .....	49
10.1	Strategian vaihe 1: Mittauksen nykytilan parantaminen .....	49
10.2	Strategian vaihe 2: Tuotannonmittauksen automatisointi .....	50
10.3	Strategian vaihe 3: Mittaustarkkuuden merkittävä parantaminen .....	51
10.4	Mittausstrategian vaiheiden yhteenveto .....	51
11	Yhteenveto .....	52
	Lähteet .....	54



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Toukokuu 2013**  
**Kone- ja tuotantotekniikan**  
**koulutusohjelma**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
p. +358 50 260 6800

Tekijä  
Esa Kojo

Nimeke  
Konepajan mittausstrategia

Toimeksiantaja  
John Deere Forestry Oy

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia erilaisia mittausmenetelmiä ja niiden soveltuvuutta toimeksiantajan käyttöön. Työssä tutkittiin toimeksiantajan mittauksen nykytilaa ja pyrittiin etsimään uusia mittausvälinesovellutuksia, joita yritys voi tulevaisuudessa ottaa käyttöön ja tätä kautta parantaa tuotteiden laatua sekä pienentämään laatuksustannuksia.


Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, kuinka yrityksen mittauksen nykytilaa voidaan parantaa ilman henkilöstöresurssien lisäämistä. Päättävänä oli löytää ja tutkia mittaussovelluksia, joilla mittaus pystytään automatisoimaan ja mittaustarkkuutta parantamaan. Tutkittujen mittausvälinesovelluksien soveltuvuutta ja käytännön hyötyä arvioitiin toimeksiantajan näkökulmasta. Tutkimuksen perusteella laadittiin mittausstrategia, jossa mittauslaitehankinnat jaksotettiin ajallisesti. Opinnäytetyön tutkimusvaiheessa vierailtiin teollisuuden alan yrityksissä, joissa tutustuttiin heidän tuotannonmittaukseensa sekä vierailtiin mittausvälineitoimittajien luona.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin tutkittua useita erilaisia mittaussovelluksia ja niiden tuomia etuja ja kustannuksia toimeksiantajalle. Tutkimuksessa tuli ilmi paljon asioita, joita toimeksiantajan tulee ottaa huomioon suorittaessaan ja kehittäessään tuotannonmittaustaan. Tutkimustuloksien perusteella toimeksiantaja voi tehdä päätelmiä kehittäessään tuotannonmittausta ja perustella mahdollisia mittauslaitteinvestointeja.

Kieli  
suomi

Sivuja 54  
Liitteet 1  
Liitesivumäärä 1

Asiasanat  
mittaustekniikka, laatuksustekniikka, koordinaattimittaus

	<p><b>THESIS</b>  <b>May 2013</b>  <b>Degree Programme in Mechanical and Production Engineering</b>  Karjalankatu 3  FIN 80200  JOENSUU  FINLAND</p>
<p>Author Esa Kojo</p>	
<p>Title Engineering workshop measuring strategy</p> <p>Commissioned by John Deere Forestry Oy</p>	
<p>Abstract</p> <p>The main goal in this thesis was to examine the different measuring methods and their applicability to the use of the commissioner. The thesis studies the current state of principal measuring and researches new measuring applications for the company. In the future, these new measuring applications can be utilized when the company wants to develop the quality of their products and reduce quality costs.</p> <p>The aim of this thesis was to research improvement methods for the company's current measuring state without increasing human resources. The main aim was to find and study measurement applications in phases where the process could be automated and accuracy could be improved. The suitability of the investigated measurement applications and practical utility were estimated from the company's perspective. On the basis of the research the measuring strategies were drawn up, in which the measuring equipment purchases were divided into sections. During the research industrial sector companies were visited and their production measuring methods were explored. Moreover, the gauge suppliers were visited.</p> <p>On the basis of the results a number of different measuring applications and their benefits and costs were studied. The thesis revealed a variety of aspects that the company should consider when developing and implementing production measuring methods. In addition, the company could utilize the results when developing their production measuring and justifying obtaining new measuring devices.</p>	
<p>Language Finnish</p>	<p>Pages 54  Appendices 1  Pages of Appendices 1</p>
<p>Keywords measuring technique, quality technique, coordinate measuring</p>	

# 1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö tehdään John Deere Forestry Oy:n Joensuun tehtaalle. John Deere Forestry Oy on maailman johtava metsä- ja maatalouskoneiden valmistaja, jonka pyöräalustaisten harvesterien ja kuormaintraktoreiden tuotanto on Joensuussa. Yrityksen tuotekehitys ja markkinointi sijaitsee Tampereella.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia erilaisia olemassa olevia mittaussovelluksia. Työssä pyritään löytämään keinoja, joilla John Deere Forestry Oy:n tuotannon mittausta voidaan kehittää. Työssä tutkitaan, kuinka tuotannon mittaus voidaan automatisoida, ja kuinka mittaustarkkuutta voidaan parantaa. Tutkimuksien kautta pyritään selvittämään erilaisten mittaussovellusten toimivuutta ja vaatimuksia sekä tuomaan esille syntyviä kustannuksia ja säästöjä. Yrityksen mittauksen nykytilan selvittämisen kautta laaditaan mittaussstrategia, jossa tuodaan esille kunkin kehityssuunnan etuja.

Työn tarkoituksena ei ole lisätä yrityksen käytössä olevaa mittaushenkilöstöä, vaan löytää muita keinoja mittauksen tehostamiseen ja kehittämiseen. Työssä ei myöskään arvioida eri mittaussovellus hankintojen taloudellista kannattavuutta, vaan pyritään tuomaan esille faktoja, jotka tulee huomioida mittaustehokkuuksissa. Opinnäytetyön laajuussyistä työssä ei käsitellä kuin muutamaa eri mittaustehokkuussovellusta ja niiden toimintaperiaatteet tuodaan esille pintapuolisesti. Saatuja tutkimustuloksia yritys voi käyttää suunnitellessaan tulevaisuudessa mittaustehokkuushankintoja ja mittauksen kehityssuuntaa.

## 1.2 John Deere Forestry Oy

Herra John Deere perusti vuonna 1837 Deere & Company nimisen yrityksen, joka on nykyään yksi maailman arvostetuimmista yhtiöistä. Deere & Company on maailman johtava metsä- ja maatalouskoneiden valmistaja sekä merkittävä maansiirto- ja ympäristökoneiden toimittaja. Deere & Companyllä on maailmanlaajuisesti noin 50 000 työntekijää yli 30:ssä eri maassa. Yhtiön liikevaihto vuonna 2012 olin noin 36 miljardia dollaria. (John Deere 2013.)

John Deere Forestry Oy on maailman johtava metsäkoneiden valmistaja ja myyjä. Yhtiö on lähtöisin Tampereelta ja tunnettiin ennen Timberjack Oy:nä. Deere & Company osti Timberjack Oy:n vuonna 2000 ja vuonna 2005 yhtiön nimi muutettiin virallisesti John Deere Forestry Oy:ksi. Tampereella sijaitsevat yrityksen Euroopan markkinointikeskus, hallinto ja tuotekehitys. Yhtiö työllistää Suomessa noin 700 henkeä. Yhtiön tuotanto toimii Joensuussa. (John Deere 2013.)

### 1.3 Tuotanto Joensuun tehtaalla

Joensuun tehdas on perustettu vuonna 1972. Tehtaalla valmistetaan yhtiön kaikki pyöräalustaiset harvesterit ja kuormatraktorit sekä kuormaimet. Tehtaan läheisyydessä toimii Waratah OM, joka valmistaa harvestereihin tulevat harvesteripäät. Tehtaan pinta-ala on noin 20 000 neliometriä, josta tuotantokäytössä on noin 18 000 neliometriä. Tehtaalla työskentelee noin 400 henkeä. (John Deere 2013.)



Kuva 1. John Deere 1470E iT4 harvesteri esittelyssä (John Deere 2013).

Tehdas jaetaan neljään osa-alueeseen. Osavalmistuksessa tehdään koneiden rungot, pilarit ja puomit. Osat ensin silloitetaan hitsauskiinnittimissä, jonka jälkeen hitsataan valmiiksi hitsausroboteilla. Metsäkoneet ovat runko-ohjattavia, joten yhteen valmiiseen koneeseen tarvitaan kaksi runkoa, etu- ja takarunko. Robottihitsauksen jälkeen osat menevät koneistukseen, jossa niihin koneistetaan mm. kiinnitysreiät. Tämän jälkeen osat menevät maalaamoon, jossa ne maalataan John Deere yhtiön väreihin. Maalauksen

jälkeen osat menevät kokoonpanoon, josta lopputuotteena on valmis metsäkone. Kokoonpanon jälkeen koneet käyvät läpi perusteellisen koeajon, josta valmiit koneet toimitetaan asiakkaille. (John Deere 2013.)

## **2 Laatu ja laadunohjaus**

### **2.1 Laatu käsitteenä**

Vuosikymmenten aikana laadun käsite on muuttunut hyvin paljon. Ennen laatu käsitettiin nimenomaan tuotteen virheettömyyden mukaan, mutta nykyään laatuun liittyy paljon suurempia kokonaisuuksia. Tänä päivänä laatu käsitetään yhä useammin yrityksen kehittämisen ja johtamisen ajatusmallina. Näiden tavoitteena on asiakastyytyväisyys, kannattava liiketoiminta ja mm. kilpailukyvyn ylläpitäminen ja kehittäminen. Esimerkiksi tuotteen tai palvelun, joka täyttää sille asetetut vaatimukset ja odotukset asiakkaan näkökulmasta, voidaan sanoa olevan laadukas. (Silen 2006, 40.)

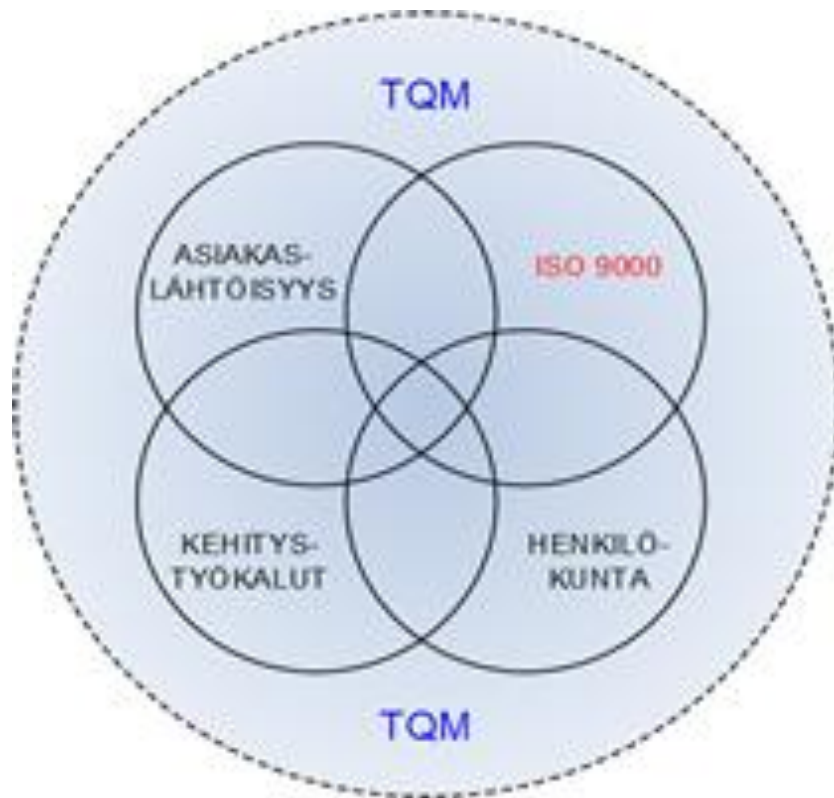
Yritysmailmassa laatua voidaan tarkastella sen eri näkökulmista. Yksi näistä näkökulmista on valmistuskeskeinen laatu, jossa pyritään tuotteiden ja tuotannon vaiheiden virheiden minimointiin. Tällä ajattelumallilla pyritään saavuttamaan ns. nollavirhetaso, jolloin yritykselle aiheutuvia lisäkustannuksia pyritään pienentämään. Yleisimpiä lisäkustannuksia ovat takuukustannukset, tuotteiden korjaukset, vahingonkorvaukset, myöhästymissakot ja jopa koko tuotantoerän hylkääminen huonon laadun vuoksi. Suunnittelukeskeisellä laadulla pyritään jo suunnitteluvaiheessa tekemään tuote, joka vastaa sen käyttötarkoitusta. Asiakaskeskeisessä laadussa suunnittelukeskeinen laatu konkretisoituu, jolloin tuotteelle luvatut ominaisuudet selviävät käytännössä. Asiakaskeskeisen laadun tavoitteena on asiakastyytyväisyys, joka tarkoittaa esimerkiksi tuotteen eliniän odotusten täyttymistä ja kuinka tuote menestyy sille tarkoitetussa käytössä. Ympäristökeskeisen laadun tavoitteena on täyttää yritykselle ja sen tuotteille muiden sidosryhmien kuin asiakkaan asettamat vaatimukset ja odotukset. Vaatimukset voivat olla tuotteiden ja työympäristön turvallisuus, tuotteiden kierrätettävyys, päästöjen alentaminen ja erinäiset ympäristölle aiheutuvien haittojen minimointi. (Laatuakatemia 2010.)

## 2.2 Ennakoiva laadunhallinta ja laadunohjaus

Laadunvalvonnalla tarkoitetaan tuotteiden laatueroavien havaitsemista ja toleranssien ylittävien yksiköiden poistamista prosessista (Andersson & Tikka 1997, 29). Laadunohjaus on puolestaan laajempi käsite, joka kattaa kaiken tuotannosta saadun havainnointitiedon hyödyntämisen itse tuotteen valmistusprosessin ohjaamiseen ja kehittämiseen. Laadunohjaus on kaikkien niiden toimintojen ja rutiinien järjestetty yhteistoiminta ja ohjaus, jotka ovat tarpeellisia vaaditun laadun saavuttamiseksi mahdollisimman alhaisin kustannuksin (MET-julkaisu 1987, 10). Laadunohjaus toisin sanoen säätää tuotantoa siitä saatavalla palautetiedolla. Laadunohjauksessa on erilaisia toimenpiteitä, joita sanotaan laatutyökaluiksi. Näiden avulla pyritään tuottamaan asiakkaiden tarpeet ja odotukset täyttäviä tuotteita. Laadunohjaus lähtee liikkeelle nimenomaan käyttäjien tarpeista ja odotuksista (Andersson & Tikka 1997, 29–30).

Laatujohtamisessa ja laadunhallinnassa ovat lähtökohtana ne eri sidosryhmien toiveet laadusta, mitkä liittyvät tuotteiden ja palvelujen ominaisuuksiin. Tärkeimpänä yrityksen laatumittarina pidetään asiakkaiden tarpeita, vaatimuksia ja odotuksia. Virheettömät lopputuotteet ja yrityksen sisäisen toiminnan tehokkuus, eivät suoraan takaa korkeaa laatua. Korkean laadun edellytyksen takaamiseen tarvitaan ulkopuolinen taho eli asiakas. Kokonaisvaltaisella laatujohtamisella ei tarkoiteta ainoastaan asiakastyytyvää tai asiakasvaatimukseen vastaamista. Siinä painotetaan asiakaslähtöisyyden näkökulmasta yrityksen koko organisaation toimintatapoja, joilla asiakkaan vaatimukset saadaan tyydytettyä jatkuvasti. Tästä ajattelumallista on kehitetty kokonaisvaltainen laatujohtamisen malli TQM (Total Quality Management). Sen mukaan laadun kehitystyökalut, ISO 9000 -standardin mukainen laadunhallintajärjestelmä ja yrityksen henkilökunta ovat oleellisin osa kokonaisvaltaista laadunhallintaa. (Lecklin 2006, 18.)





Kuvio 1. Kokonaisvaltaisen laatujohtamisen TQM-malli (Laatuakatemia 2010).

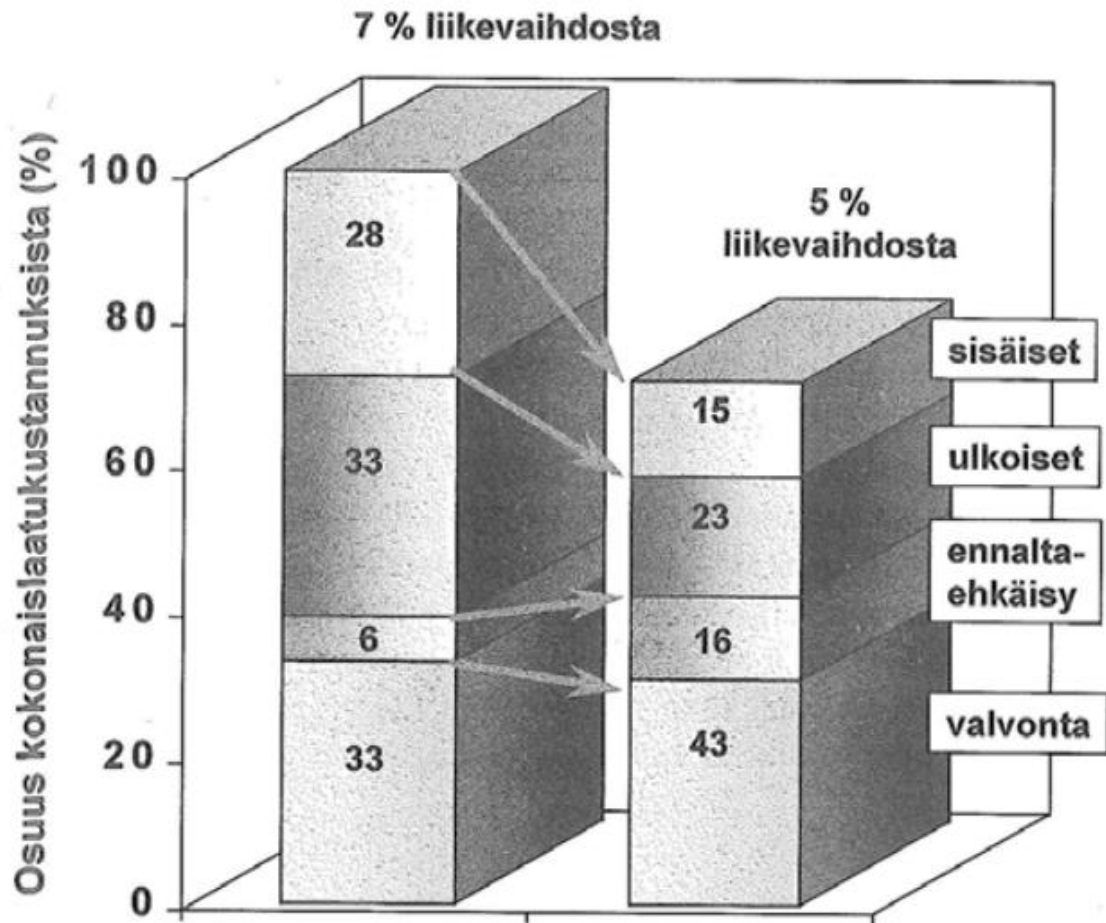
## 2.5 Laatuksennukset

Laatukustannuksia ovat ne kustannukset, jotka laatu toiminta aiheuttaa. Ne syntyvät pääosin virheiden tekemisestä, kun asiat joudutaan tekemään moneen kertaan. Osana laadunohjausta tulee myös laatukustannuksien seurannan olla systemaattista, jolloin siitä saadaan yksi tehokkaimmista laadunohjauksen välineistä. Tehokkuus perustuu siihen, että puutteellisen laadun vaikutukset voidaan esittää suoraan euroina. Laatukustannuksien seuraamisen hyöty taas saadaan, kun laatukustannustietoja käytetään hyväksi laadunparannusprojektien suunnittelu- ja seurantavaiheissa. (Andersson & Tikka 1997, 31.)



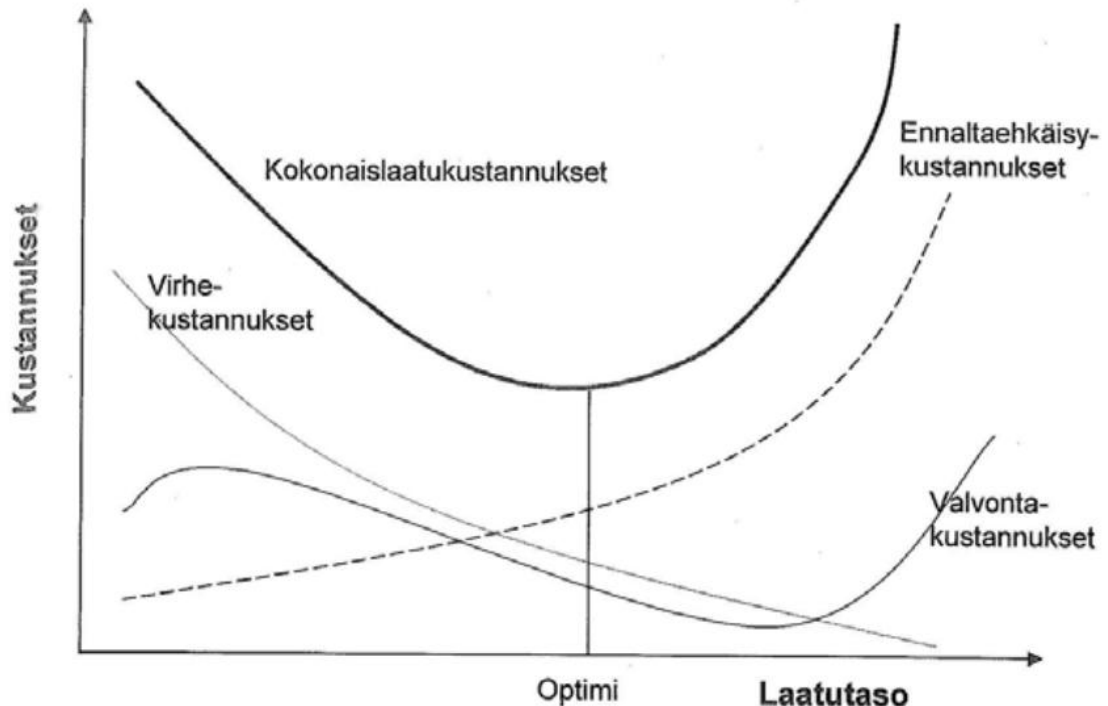
Kuvio 2. Laatukustannusten erittely (Andersson & Tikka 1997, 32).

Kuviossa 2 laatukustannukset on jaettu yleisimmin käytössä olevalla laatukustannuksien erittelyperiaatteella. Siinä laatukustannukset jaetaan laadunvalvonnasta ja laatuvirheistä syntyviin kustannuksiin. Kuviossa mainituista ryhmistä nimenomaan ennalta ehkäisevät kustannukset muodostavat yleensä pienimmän ja haastavimman mitattavissa olevan laatukustannusryhmän. Kuitenkin ennalta ehkäisemällä virheitä ja niiden syntyä, voidaan kokonaislaatukustannuksia pienentää merkittävästi. Luomalla edellytykset virheettömälle toiminnalle voidaan ennalta ehkäisevillä toimenpiteillä vähentää sisäisiä ja ulkoisia laatukustannuksia, kuten kuvio 3 esittää. (Andersson & Tikka 1997, 33.)



Kuvio 3. Ennalta ehkäisevän toiminnan lisäämisen vaikutus laatu-kustannuksiin (Andersson & Tikka 1997, 33).

Usein tuotannossa syntyy paljon ns. piilokustannuksia, joista suurin osa on yleensä juuri laatu-kustannuksia. Näiden kustannuksien esille tuonti ja hallittavuus on hyvin vaikeaa. Liian usein laatu- virheitä etsitään sieltä, mistä ne on helpoin löytää, jolloin todellisten kustannusten määrää ei saada selville. Monesti myös suurin osa virheiden välillisistä kustannuksista jätetään ottamatta huomioon. Ei oteta esimerkiksi huomioon virheiden vaikutusta koko prosessiin. Tällaisia ovat muun muassa materiaalipuutteista johtuvat odotusajat, aikataulujen muutokset tai ylityöt. Usein ei myöskään huomioida riittävästi virheiden analysointiin, syiden selvittämiseen ja korjaustoimenpiteiden suunnitteluun käytettyjen henkilöstöresurssien kustannuksia. (Andersson & Tikka 1997, 31–32.)



Kuvio 4. Laatukustannusten optimointi (Andersson & Tikka 1997, 35).

Kuviosta 4 voidaan havaita, että kokonaislaatukustannukset muodostavat laatutason kanssa selvän optimipisteen, johon toimintaa tulisi ohjata. Ennaltaehkäisevä toiminta alentaa virheistä aiheutuvia kustannuksia, mutta tietyn rajan jälkeen valvonnan ja ennaltaehkäisyn lisääminen kasvattaa kustannuksia enemmän kuin aiheuttaa säästöä. (Andersson & Tikka 1997, s. 34). Laatukustannuksia ja etenkin ennalta ehkäisevään toimintaan lisättäviä resursseja tulee aina ajatella suuremmasta näkökulmasta. Lähtökohtaisesti virheistä ja tuotannon ongelmista johtuvien virhekustannuksien suuruus tulee selvittää mahdollisimman tarkasti. Tätä kautta saadaan laskettua mm. erilaisten ennalta ehkäisevään laadunvalvontaan liittyvien investointien kannattavuutta.

### 2.3 Benchmarking

Benchmarking eli suomennettuna esikuva- tai vertailuanalyysi on yrityksen tietyn toiminnan vertaamista jonkin toisen yrityksen vastaavaan toimintaan. Benchmarkingin perusajatuksena on oppia uusia toimintatapoja toisilta yrityksiltä ja kyseenalaistaa yrityksen omaa toimintaa. Benchmarkingia käytetään kehitettäessä yrityksen organisaation tuottavuutta, tuotteiden laatua, työtapoja ja prosesseja. Benchmarkingilla havaitaan oman toiminnan epäkohdat ja voidaan laatia kehityssuunnitelmia oman

toiminnan parantamiseksi. Vastaavasti Benchmarkingilla voidaan havaita yrityksen toiminnan tason olevan huippuluokkaa. (Laatuakatemia 2010.)

## **2.4 Benchmarkingin toteutus**

Benchmarking toteutetaan usein vierailemalla kohde yrityksessä tutustumalla heidän toimintatapoihin. Ennen varsinaista benchmark-vierailua on yrityksen päästävä selville heidän organisaationsa ongelmista. Ongelmakohteen tarkka määrittäminen auttaa suunnittelemaan benchmark-vierailun tavoitteet, mitä vierailulta haetaan. Ennen benchmark-vierailua on laadittava esimerkiksi kysymyslista niihin aiheisiin, joita halutaan parantaa tai hankkia uudenlaista näkökulmaa. Benchmarkingilla saadut tiedot täytyy analysoida tarkasti ja vertailla esimerkiksi toisen yrityksen käytäntöjen sopivuutta omaan yritykseen. Yritysten on sovittava erikseen, mikäli benchmarking-prosessissa jaetaan salassa pidettäviä tietoja ja on varmistettava toiminnan laillisuus. Hyvällä benchmark-suunnittelulla ja tietojen analysoinnilla saadaan hyviä uusia työkaluja oman toiminnan kehittämiseen. (Laatuakatemia 2010.)

## **3 Mittaustekniikka**

Mittaustekniikalla on perustavaa laatua oleva merkitys jokaisen yrityksen laatu- ja tuotantotoiminnassa. Mittaus on tutkimuksen, tuotekehityksen, tuotannon ja etenkin laadunvalvonnan edellytys. Konepajateollisuuden tuotanto perustuu siihen, että täytetään valmistettaville osille ja tuotteille asetetut vaatimukset ja määräykset. Suurin osa asetetuista vaatimuksista on nimenomaan mittoja, tietoja muoto- ja sijaintitoleransseista ja mm. pintavaatimuksista, jotka ilmenevät tuotepiirustuksista. (MET-julkaisu 1987, 64.) Tuotteiden laatu- ja luotettavuusominaisuudet ovat riippuvaisia tuotekehityksen, tuotesuunnittelun, tuotannon ja laadunvalvonnan olosuhteista ja edellytyksistä. Näistä syistä voidaan sanoa, että tuotannollinen yritys ei tule toimeen ilman mittauksia. Nykyään standardointi, kilpailutilanne, asiakkaan vaatimukset, tuotannon tehokkuus, tuotevastuukysymykset ja tuotteiden monimutkaisuus ovat pakottaneet yritykset panostamaan parempaan mittaustekniikkaan

lisäämällä mittauksen joustavuutta, nopeutta ja mittaustarkkuutta. (MET-julkaisu 1987, 31.)

### **3.1 Mittaustekniikan laatukustannukset**

Mittaustekniikka vaikuttaa eniten valvonta- ja virhekustannuksiin. Oikeanlaisella mittaustekniikalla saadaan virhekustannuksia vähennettyä huomattavasti ja vastaavasti ylimitoitetulla mittaamisella valvontakustannukset kasvavat merkittävän suuriksi. Jo tuotteiden suunnittelusta alkaen on otettava huomioon yrityksen mittaustekniset valmiudet. Vastaavasti tuotannon aloitusvaiheessa on huomioitava tuotteiden vaatimukset mittaustekniikan osalta. Tuotteiden toiminta, mitoitus, sarja- tai erän suuruus sekä valmistustapa määräävät oleellisesti mittauslaitteen ja mittausmenetelmän valinnan. Valmistettaessa suuria sarjoja koneissa, joissa prosessin hajonta on suhteellisen suuri, voidaan käyttää automaattisia mittausasemia tai mittasäättöä. Pienemmissä sarjoissa täytyy käyttää yleismittauslaitteita (MET-julkaisu 1987, 239). Lisäksi tuotteiden ominaisuudet, kuten koko, tarkkuus ja monimutkaisuus asettavat usein haasteita käytettävän mittauslaitteen valintaan. Valmistusprosessien tarkkuus ja vakaus vaikuttavat paljolti myös mittauslaitteiden valintaan. Mikäli valmistusprosessi ei ole vakaa koneesta, ympäristöstä, työntekijästä tai materiaalista johtuen, vaaditaan mittauslaitteisto, jolla kyetään tekemään 100-prosenttinen tarkastus (MET-julkaisu 1987, 243).

Ennalta ehkäisevistä kustannuksista osa kuluu mittausmenetelmien ja mittauslaitteiden valintaan ja hankkimiseen. Tuotteiden suunnitteluvaiheessa on käytetty paljon aikaa piirustusten ja tuotteen toiminnan kriittiseen tarkasteluun niin, että mitoitus on oikea myös mittausnäkökulmaa silmälläpitäen. Ellei jokin mittauskohteen ominaisuus ole nykyisellä mittauslaitteistolla mitattavissa, pitää ominaisuuden vaatimuksia muuttaa tai on hankittava uusi mittauslaite. Mittauslaitteiden valinta vaikuttaa suoraan mittauksien vaatimaan aikaan, mittausvirheiden välttämiseen, mittausresurssien käyttöön ja tätä kautta mittauksista tuleviin kustannuksiin. Jotta valvontakustannukset saataisiin kohtuullisiksi, on otettava huomioon kappaleiden mittauslaittekustannukset, mittausaika ja muut välilliset kustannukset. Etenkin kappalekohtaisien mittauslaitteistojen kohdalla on otettava huomioon laitteistojen säätö- ja henkilöstön koulutuskustannukset. Usein

mittalaitetoimittajilla on suuri rooli esittelyvaiheessa laitteen ymmärtämiselle ja tulevalle käytölle. Myös mittauslaitteen elinikä sekä huolloista ja kalibroinneista aiheutuvat kustannukset on otettava huomioon mittauslaitetta hankittaessa. (MET-julkaisu 1987, 239–244.)

Mittaustekniikan vaikutus satunnaisiin ja systemaattisiin virheisiin on merkittävä. Näiden virheiden vaikutus ratkaisee virheellisesti hyväksytyjen ja virheellisesti hylättyjen kappaleiden määrän. Virheellisesti hyväksytyt kappaleet aiheuttavat lisäkustannuksia, kun kappaleita joudutaan myöhemmin korjaamaan tai ne on korvattava, joko yrityksessä tai asiakkaan luona. (MET-julkaisu 1987, 245). Etenkin sarjatuotanto-tyyppisessä tuotannossa kappaleet, joita ei voida resurssien puitteissa tai mittalaitteiden tarkkuuden riittämättömyyden johdosta hylätä, aiheuttavat merkittäviä lisäkustannuksia. Kappaleiden virheiden syyt on etsittävä, jotta kyseiset virheet eivät toistuisi, jolloin joudutaan käyttämään paljon henkilöstöresursseja virheiden selvittämiseen.

### **3.2 Mittauslaittevalmiudet ja valmistelu**

Mittauslaittevalmiudet ja niiden valmistelu ovat oleellinen osa laadunvarmistuksen suunnittelutyötä. Nykyään käytössä olevat tilastolliset tarkastus- ja valvontatyöt ovat tulleet merkittävästi käyttöön valmistavassa tuotannossa. Tuotannossa tehtävien tarkastuksien suunnittelun tehtävänä on analysoida, suunnitella ja antaa ohjeita siitä, missä, koska ja kuinka eri tarkastustehtävät sijoitetaan tuotannon kulkuun. Ennen kappaleiden eri ominaisuuksien laatuvaatimusten määrittämistä on tehtävä huolellinen analyysi, jottei asetettaisi liian korkeita tai matalia vaatimuksia kuin todellisuudessa on tarpeen. Tarkastuspanosta optimoitaessa ja suunniteltaessa on huomioitava tuotannon eri vaiheiden tuotantovaatimukset ja laatuedellytykset. Tätä kautta mittauksen suunnittelun on käsitettävä kaikki tuotanto- ja tarkastusvaiheiden mittaustehtävät. On myös tärkeää luoda tarkastus- ja mittaustulosten raportoinnille selkeä järjestelmä ja ohjeistus. (MET-julkaisu 1987, 38.)

Tuotannon mittauslaitevalikoiman on katettava pääsääntöisesti seuraavat mittaustyöt:

- mittaus ensikappaleen tarkastuksen yhteydessä
- mittaukset koneilla valmistuksen aikana
- mittaukset väli- ja lopputarkastuksen yhteydessä (MET-julkaisu 1987, 38).

Eri mittaustöitä varten voidaan valita aivan erilaiset mittauslaitteet, vaikka mitattaisiin samoja työkappaleita. Kun mittauslaitteiden mittausominaisuudet ovat samat, saadaan tätä kautta mittaustuloksia, jotka ovat vertailukelpoisia toisiinsa (MET-julkaisu 1987, 38). Mittauksen vaikeusaste riippuu yleensä mitattavan kappaleen ominaisuuksista ja halutuista mittatiedoista. Mittauksen haastavuus riippuu mm. siitä, mitataanko kappaleesta yhtä, kahta vai kolmea ulottuvuutta. Yksinkertaisille kappaleille ja niiden vaatimuksille riittää peruskäsimitalaitteet, kuten mikrometri. Mitattaessa kolmannessa ulottuvuudessa haastavia kappaleita, joiden vaadittava tarkkuus ja/tai koko ovat suuria, tarvitaan koordinaattimittauslaitesovelluksia. (MET-julkaisu 1987, 65.)

### **3.3 Kuinka valmistelua parannetaan?**

Pyrittäessä alentamaan tarkastus- ja virhekustannuksia on entistä enemmän kiinnitettävä huomioita virheiden ennalta ehkäisyyn. Virheiden ennalta ehkäisevän toiminnan elinehto on toiminnan keskittyminen tietoon virheiden syistä. Mittausten valmistelu keskittyy suurissa määrin tuotannon työsuunnitteluun. Mikäli nimenomaan mittausten ja tuotannon valmistelut yhdistettäisiin lähemmin, antaisi tämä paremmin perusteltuja tietoja tarvittavista toimenpiteistä valmistusvirheiden vähentämiseksi tai poistamiseksi. Tätä kautta on tärkeää seurata sellaisten mittausmenetelmien kehittymistä, jotka voidaan sijoittaa tuotantoprosessiin tai sen ohien ja joiden mittaustulokset vaikuttavat automaattisesti prosessien säätöön. Mittaus- ja ohjausjärjestelmät, jotka sijoitetaan tuotantoprosessin yhteyteen, vaativat tavanomaiselta jälkitarkastukselta suurempaa joustavuutta. Näiden tarkastuksien laajuus on tapauksesta riippuen määrättävä sen mukaan, mitä vaikutusta valmistuksen aikaisella tarkastuksella on. Tästä johtuen mittaustulosten raportointiin ja analysointiin kehitetyillä järjestelmillä ja toiminnoilla on ratkaiseva merkitys haluttaessa joustavuutta mittaukseen. (MET-julkaisu 1987, 39.)



Jotta virheiden ennalta ehkäisevä toiminta olisi mahdollista, tarvitaan merkittäviä investointeja mittaus- ja ohjausjärjestelmiin ja mittaustulosten keräilyyn sekä analysointiin. Investointeja ei voida perustella pelkästään alentuneilla hylkäys- ja ohjauskustannuksilla, vaan ne vaativat myös tarkastuskustannusten alentamista tai tarkastustehokkuuden merkittävää kasvua. Kun normaaliin tarkastustoimintaan saadaan nimenomaan joustavuutta ja resurssien tehokasta käyttöä, pitäisi kustannussäästöjen olla mahdollisia. (MET-julkaisu 1987, 39.)

### **3.4 Mittausten suunnittelu**

Mittaus- ja tarkastustöiden tulokset riippuvat siitä, kuinka hyvin työt valmistellaan ja suoritetaan oikeaoppisella tavalla. Tämä koskee mittauslaitteita, mittauksen suorittajaan ja ympäröiviä olosuhteita. Mittausten, kalibrointien ja muiden tarkastustöiden suunnittelu alkaa ja loppuu asiakaskontaktiin, sillä nimenomaan asiakkaan vaatimukset määrittävät mittaustarpeen ja vaadittavan mittaustarkkuuden. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että mittauslaitteen tarkkuuden tulee olla  $1/5 \dots 1/10$  kappaleelle vaaditusta toleranssista. (MET-julkaisu 1987, 62.)

### **3.5 Mittauslaitteiden kalibrointi**

Mittauslaitteiden kalibrointi on niihin liittyvää testausta ja mittausta, jonka tarkoituksena on selvittää mittauslaitteella saavutettava mittausepävarmuus. Käytännössä, mittauslaitteelle määritetty tai vaadittu tarkkuus todennetaan ja mittauslaite säädetään uudestaan tai hävitetään kokonaan, mikäli sen tarkkuus ei vastaa alkuperäistä vaadittua tarkkuutta. Kalibrointeja suoritetaan mittauslaitteille säännöllisin välein, jotka ovat mittauslaittekohtaisesti määritetty. Kalibrointiväliin vaikuttaa mm. mittauslaitteen käyttöaste, vaadittava tarkkuus ja mitattavien kohteiden kriittisyys tuotteen kannalta. Säännöllisen ja systemaattisen kalibrointitoiminnan tavoitteina on minimoida virhekustannuksia, hallita laadunvarmistusta ja huolehtia mittavälineiden kunnosta. Tällä pyritään siihen, ettei yrityksessä käytetä väärin näyttäviä mittavälineitä. Kalibrointitoiminnan tarkoituksena on siis varmistaa yrityksen omien mittausten oikeellisuus ja varmistaa osaltaan tuotteille määrätty laatuvaatimukset.

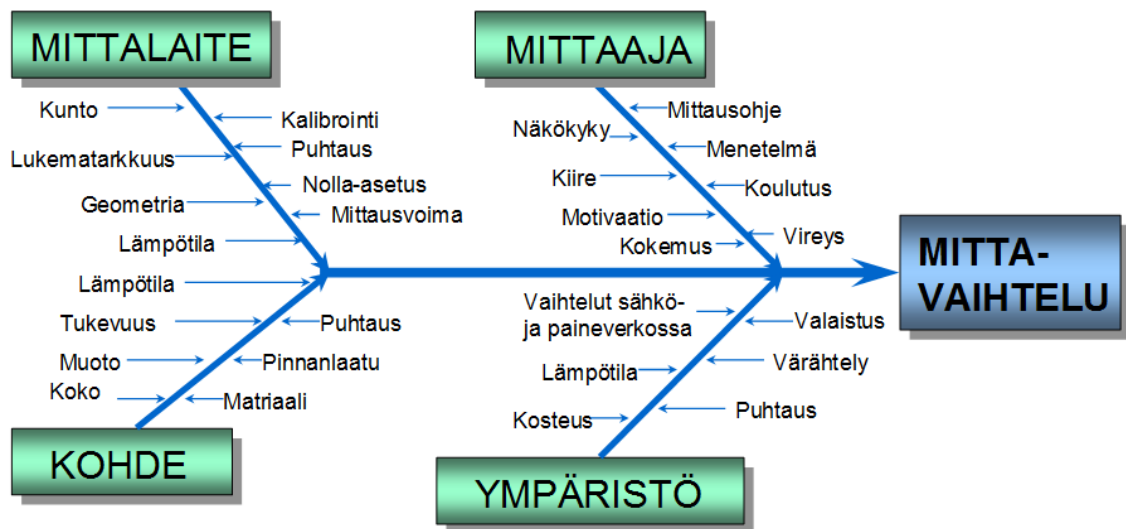
Yksinkertaisimpien mittauslaitteiden kalibroinnin suorittaa yleensä yrityksen oma kalibroija ja yleensä yrityksen mittanormaalien kalibroinnit suorittaa akkreditoitu kalibrointilaboratorio. Kalibroinnista mittauslaite saa kalibrointitodistuksen, jossa ilmenee kalibrointiin oleelliset liittyvät asiat, kuten kalibroinnin paikka, aika, suorittaja, kalibrointitulokset, mittausepävarmuudet, käytetyt menetelmät ja laitteet sekä yhtenä tärkeimmistä niiden jäljitettävyys. (Andersson & Tikka 1997, 169.)

### **3.6 Jäljitettävyys**

Kansainvälinen ISO 9000 -laatujärjestelmä vaatii mittaustulosten jäljitettävyyttä, sillä teollisuustuotteiden tulee olla vaihtokelpoisia ja kansainvälisesti vertailtavia. Jäljitettävyys takaa mittausten oikeellisuuden ja edellyttää mittauslaitteiden sekä mittausjärjestelmien mittausepävarmuuden tuntemista. Jäljitettävyysketju koostuu kalibroitavasta mittauslaitteesta aina kansallisten mittanormaalien kautta kansainvälisiin mittanormaaleihin ja suureisiin saakka. Kullekin mittauslaitteelle on voitava osoittaa, mistä jäljitettävyys tulee. Käytännössä tuotannossa käytettävä mittauslaite on aina epätarkin mittaväline koko ketjussa, jolloin sen kalibrointi tapahtuu aina tarkempaan mittausvälineeseen. Kalibroinnissa käytettävät mittausvälineet taas ovat epätarkempia, kuin mittausvälineet joilla ne vastaavasti kalibroidaan. Jäljitettyyden tulee olla yksisuuntainen ja katkeamaton. Jäljitettävyysketjun jokaisessa siirrossa mittausepävarmuus kasvaa, joten ketju tulee pitää mahdollisimman lyhyenä. (Andersson & Tikka 1997, 157.)

### **3.7 Mittaustarkkuus ja virhelähteet**

Mittausta ei voida koskaan tehdä täysin virheettömästi. Jokaisessa mittauksessa mittaustulokseen syntyy virhettä, sillä mittaukseen osallistuvat tekijät eivät ole täydellisiä. Mittaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa mittausolosuhteet, mittaaja, mittauslaite, mittaustapa ja mittauksen kohde. Kuviossa 5 on esitetty tarkemmin edellä mainitut mittausvaihteluun ja mittausepävarmuuteen vaikuttavat tekijät. Kuvioista huomataan, että on olemassa lukematon määrä erilaisia muuttujia, jotka vaikuttavat mittaustuloksen luotettavuuteen.



Kuvio 5. Mittauksen epävarmuuden syy-seuraus-diagrammi (Andersson & Tikka 1997, 139).

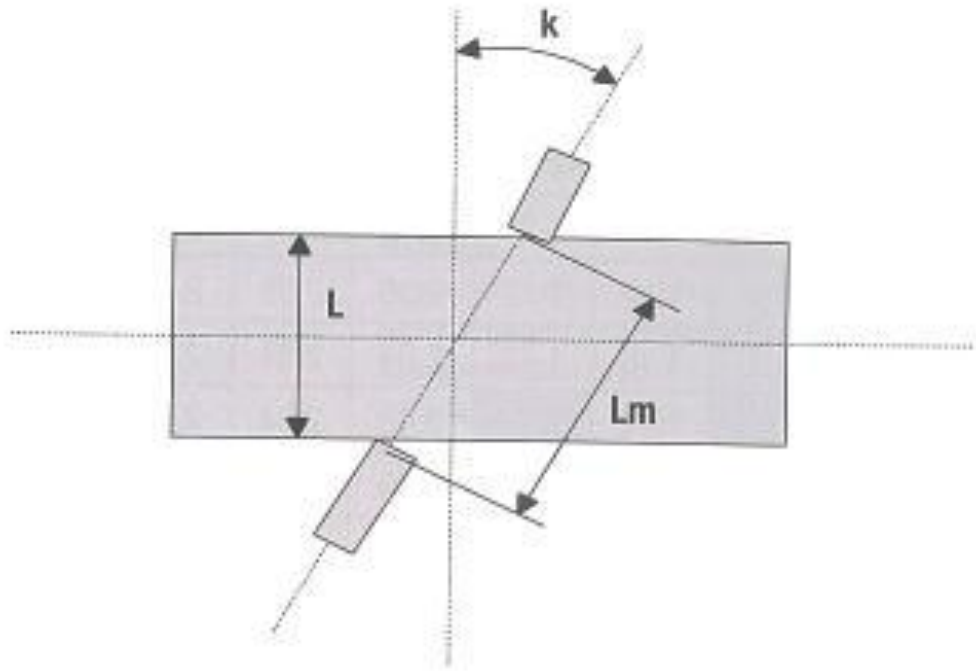
Ennen mittaustulosten pohjalta tehtäviä johtopäätöksiä on oleellista selvittää, kuinka suuri mittaasepävarmuus kyseisessä mittauksessa esiintyy. Käytännössä ei siis riitä, että mittaustulos on toleranssialueella. Mittauksessa syntyvä mittaasepävarmuus on otettava huomioon mittaustuloksissa, jolloin mittaustuloksen tulee olla toleranssialueella vielä mittaasepävarmuus mukaan luettuna. Näin ollen mittaasepävarmuus pienentää käytettävissä olevaa toleranssialuetta. Tästä syystä mitään valmistusprosessia ei kyetä säätämään sen tarkemmin kuin sitä pystytään olemassa olevilla mittauslaitteilla mittaamaan. Oikeaoppisessa mittaustuloksessa tulee ilmoittaa mukana myös kyseisen mittaustapahtuman mittaasepävarmuus. (Esala 2003, 56.)

Mittauksissa vallitsevan lämpötilan tulisi olla vakio. Mittaukseen aiheutuu kuitenkin mittaasepävarmuutta usein lämpötilan muutoksien kautta. Tällöin sekä mittauslaite että mitattava kohde muuttavat mittojaan lämpötilan muuttuessa. Teoriassa nämä muutokset voidaan eliminoida laskennallisesti lisäämällä tai vähentämällä kappaleen pituuden lämpötilakertoimen aiheuttamat muutokset eli toisin sanoen kompensoimaan mittaustulosta. Dimensioihin liittyvissä mittauksissa standardilämpötila on +20 °C, johon lämpötilasta aiheutuvaa mittaasepävarmuutta verrataan. Käytännössä lämpötilakompensointi on vaikeaa, sillä lämpötilaeroja on mittauskohteen ja mittauslaitteen eri osissa. Isoilla kappaleilla voi kappaleen pinnanlämpötila lisäksi olla eri mitä kappaleen keskimääräinen lämpötila. (Andersson & Tikka 1997, 139–144.) Konepajaolosuhteissa kappaleeseen siirtyy lämpöä muun muassa hitsauksessa ja koneistuksessa, jolloin kappaleen

tulisi antaa jäähtyä tarpeeksi kauan, jotta sen lämpötila ja hallissa vallitseva lämpötila olisivat samansuuruiset. Lämpötilaeroja voi syntyä myös mittajaan käsistä mittalaitteeseen, valaistuksesta tai jos mitattava kappale tuodaan ulkoa sisätiloihin. Isoille kappaleille lämpötilojen tasaantumisaikat voivat olla useita tunteja. Teräksille lämpötilanpitenemiskerroin on yleisesti  $0,000012 \text{ mm} / ^\circ\text{C}$ . Tästä voidaan havaita, että esimerkiksi 100 mm halkaisijalla olevan reiän halkaisijamitta muuttuu lämpötilan noustessa  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$   $0,012 \text{ mm}$ , joka on tarkoissa mittauksissa hyvinkin merkittävä mittaepävarmuustekijä. Normaaleissa konepajaolosuhteissa lämpötilaeroista johtuvat virheet ovat vähintään suuruusluokkaa  $\pm 0,02 \text{ mm/m}$ . (Esala 2003, 57.)

Mittaukseen liittyvät voimat aiheuttavat keskeisen virhelähteen eli ne tuovat mittaustuloksiin mittaepävarmuutta. Näiden virheiden havaitsemisen ja määrittämisen ongelmina on tavallisesti se, että paitsi itse voimat, myös mittaukseen liittyvät parametrit ovat tuntemattomia. Voimien aiheuttamat virheet voidaan yleensä jakaa kahteen eriryhmään voiman vaikutussuunnan mukaan: Taivuttaviin voimiin ja mittauksen suuntaisiin voimiin. Taivuttavia voimia aiheuttaa kappaleen oma paino, joka muuttaa sen muotoja. Tästä syntyvät virheet ovat merkittäviä etenkin pitkillä kappaleilla. Kappaleiden riittäväällä tuennalla voidaan vähentää taipumisesta aiheutuvaa virhettä. On kuitenkin muistettava tukea kappaleet jokaisessa mittauksessa samalla tavalla, jotta tuennan muutoksista ei pääse syntymään mittavaihteluja. Mittausvoimat aiheuttavat taipumia muun muassa mittakellonjaloille, mikä johtuu usein mittalaitteiden liian hennosta rakenteesta. (Andersson & Tikka 1997, 133–134.)

Työkappaleen ja mittausvälineen keskinäisen asennon aiheuttamat virheet ovat vaikeasti havaittavissa. Työkappaleen pinnanlaadulla on suuri vaikutus esimerkiksi käännettoja mitattaessa, jolloin mittaus tapahtuu helposti väärästä kohtaa ja väärässä kulmassa. Reikien halkaisijamittojen mittaus sisämittausvälineillä on myös yksi ongelmallisimmista tapauksista, joissa tapahtuu helposti asento- ja suuntavirheitä. Siinä mittauskärjet eivät voi olla sen muotoisia, että mittaväline oikenisi oikeaan asentoon mittausvoiman vaikutuksesta. Tästä syystä mittalaite voidaan asemoida mittajaan toimesta huolimattomasti, jolloin mittaukseen tulee kosinivirhettä. Tämän virhetyypin ongelmallisuus on siinä, että mittajaa tietää virheen olemassa olon, mutta esimerkiksi mittakellomittauksessa kellon karan kohtisuoruuden kulmaa hän ei voi kompensoida pois lopputuloksesta, sillä kulman määrittäminen on mahdotonta. (Andersson & Tikka 1997, 137–138.)



Kuvio 6. Kosinivirheen vaikutus mittaustulokseen halkaisijan mittauksessa (Esala 2003, 59).

Muita yleisiä virheiden aiheuttajia on muun muassa mittauspintojen laadusta eli pinnankarheudesta ja puhtaudesta aiheutuvat virheet. Reikien mittauksessa voi itse kappaleesta tulla geometriavirheitä, joihin vaikuttaa reiän kartiomaisuus, kolmiomaisuus, soikeus ja myös pinnanlaatu. Näiden virheiden havainnointi perusmittavälineillä on erittäin haastavaa. Tarvitaan joko koordinaattimittauskone tai jokin optinen mittausväline, että nämä muotovirheet voidaan havaita.

#### 4 Koordinaattimittaus

Koordinaattimittaus tarkoittaa koordinaattien määrittämistä avaruudessa tai joissain tapauksissa tasossa. Koordinaattimittauksista voidaan tehdä monilla eri menetelmillä, kuten GPS, fotogrametria, laserkeilain, laserseurain, laserskanneri, kaksoisteodoliittilaitteisto, takymetri, vaakituskone, monikamerakuvaus ja konenäkö, digitaaliset nauhamitat kolmiomittauksessa, holografia, viistokuvamittaus, laserskannaus, elektronimikroskopia, röntgenmittaus, tomografia ja koordinaattimittauskone. Edellä mainituista koordinaattimittausavoista vain murto-osaa käytetään osana konepajamittauksia, sillä suurin osa mainituista mittausavoista on

tarkoitettu alun perin hyvin erilaisille toimialoille ja kohdevalikoimalle. Tässä työssä käsitellään ainoastaan koordinaattimittauskoneita, laserskannausta, fotogrametriaan ja monikamerakuvaus ja konenäkö sovelluksia ja esitellään niiden erityyppisiä mittauslaitteistoja. (Tikka 2007, 16.)

Nykyään tietotekniikan kehittymisen myötä on suurten kappaleiden mittaukseen ja optisen digitoinnin ja mallinnuksen tarpeisiin kehitetty jatkuvasti uusia sovelluksia. Nämä sovellukset käyttävät hyväkseen laserskannausta, fotogrametriaan ja monikamerakuvaus ja konenäkön erilaisia sovelluksia. Koordinaattimittauskoneissa mekaniikka ei muutu ajan kuluessa, mutta niissä käytettävä ohjelmisto päivittyy tietotekniikan kehittyessä. Vastaavasti edellä mainitut optiseen mittaukseen perustuvat mittauslaitesovellukset kehittyvät jatkuvasti. (Tikka 2007, 16.)

#### **4.1 Koordinaattimittauskoneet**

Koordinaattimittauskoneen voisinkin luokitella erikoiskoneeksi, mutta sen soveltuvuus hyvin erilaisten kappaleiden mittaamiseen tekee siitä yleismittakoneen. Koordinaattimittauskoneella (KMK) määritetään joko mekaanista tai optista-anturia liikuttamalla kohteesta koordinaatit tasossa tai avaruudessa. Koordinaattimittauskoneet ovat käsikäyttöisiä nivelvarsimittakonetyyppisiä, motorisoitujat tai yleisimmin numeerisesti ohjattuja. Käsikäyttöisiä nivelvarsimittakoneita on käytössä laajasti sen hinnan ja liikuteltavuuden johdosta. Nämä mekaaniset koneet vaativat kuitenkin aina mittajaan työpanoksen ja ajan käyttöönsä. Numeerisesti ohjatun (NC) mittauskoneen tarkoitus on automaattisesti mitata työkappale ilman koneen käyttäjää, jolloin mittaustapahtuma on hyvin nopea ja tarkka. (Tikka 2007, 25.)

Optiset videomittauskoneet ovat NC-ohjattuja koordinaatinmittauskoneita. Kaikissa näissä on käytettävissä kappaleohjelma, jolla muodostetaan kappaleesta kappalekoordinaatisto. Saatujen mittauspisteiden avulla luodaan geometrioita, joiden avulla lasketaan muotovirheet ja verrataan tuloksia toleransseihin. Kappalegeometria muodostetaan aina mitatuista yksittäisistä pisteistä, mutta eri menetelmillä hieman eri tavalla. Koskettavalla kärjellä tai laservalolla saadaan mittapisteet aina kappaleen pinnasta. Videomittauksessa pisteet saadaan tyypillisimmin kontrastieroihin perustuen

kappaleiden reunoilta eli särmistä. Tästä syystä eri menetelmillä tehdyillä mittauksilla mittaustulokset ovat aina hieman erilaiset. (Tikka 2007, 25.)

Koordinaattimittauskoneet käyttävät mittaustulosten tekemiseen tietokoneohjelmistoja. Ilman tietokoneohjelmistoa pelkkä koordinaattimittauskone antaisi vain pisteitä avaruudesta. Ohjelmistot laskevat ja muuttavat pisteet geometrisiksi muodoiksi, joista pystytään lukemaan saadut mittaustulokset. Ohjelmistoilla on lukuisia erilaisia ominaisuuksia, kuten esimerkiksi 3D- ja CAD-kuvien luku ja käyttäminen ohjelmoinnissa ja tulosten analysoinnissa. (Tikka 2007, 165.)

#### **4.1.1 Portaalityyppinen koordinaattimittauskone**

Portaalikoordinaattimittauskoneet ovat yleisimmin käytössä olevia koordinaattimittauskoneita, kun vaaditaan tarkkoja mittauksia. Tässä työssä käsitellään tarkemmin portaalikoordinaattimittauskoneita, jotka soveltuvat myös suurien kappaleiden mittaamiseen. Portaalikoordinaattimittauskoneen koordinaatisto on kiinteä mahdollisimman suorakulmainen, ja –johteinen referenssikoordinaatisto. Mitattavalle kappaleelle määritetään mittaamalla oma koordinaatisto tai useita eri koordinaatistoja, joissa saadut mittaustulokset ilmoitetaan. Koordinaatiston valinta ja etenkin origopisteen paikan määrittäminen vaikuttavat oleellisesti mittaustuloksiin ja niiden arvioimiseen. (Tikka 2007, 31.)

Portaalikoordinaattimittauskoneiden toimittajia on maailmanlaajuisesti useita. Koneiden mittaustavat, rakenteet, luoksepääsevyydet, tilantarve, koko, tarkkuus ja automaatioaste ovat hyvinkin erilaisia kuten myös mittausohjelmat ja käyttöolosuhteet. Käytännössä mittauskoneen hankinta on kaikkien edellä mainittujen asioiden kompromissi. Tästä syystä toimittajat tarjoavat useita erilaisia konevariaatioita, joissa on erilaisia antureita, automaatiota, tarkkuuksia ja mittausohjelmistoja. Samasta mittauskoneesta voidaan saada hyvin erilainen kokonaisuus mittaustarpeen mukaan. Tästä syystä koneiden ja toimittajien vertailu on vaikeaa. (Tikka 2007, 32.)

Toimittajilla on tarjolla yleisesti noin 0,5 m x 0,5 m kappalaista aina 10 m x 20 m kappalaille soveltuvia portaalikoordinaattimittauskoneita. Toisin sanoen portaalikoordinaattimittauskoneelle ei kappaleen koosta aiheudu juuri minkäänlaisia

rajoitteita. Koneisiin on saatavilla useita erilaisia mittausvariaatioita. Yleisimmin koneissa on koskettava mittauspää, joita on saatavilla eripituisina ja monipäisinä. Nykyään koneisiin on saatavilla myös erilaisia skannerimittauspäitä, joilla mitattavat kappaleet saadaan mallinnettua kauttaaltaan.

Portaalikoordinaattimittauskoneet ovat tarkkoja mittauskoneita. Yleisesti koneiden mittaustarkkuudet ovat noin 0,002–0,01 mm. Koneiden tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti niiden koko ja mittausnopeus. Esimerkiksi kappaleen, jonka koko on 2 m x 5 m, mittauskoneen tulee olla kooltaan suuri. Tämän kokoisten kappaleiden mittauksessa portaalikoordinaattimittauskoneella päästään mittaustarkkuuteen, joka on noin 0,003 mm–0,01 mm riippuen koneesta. Toimittajien välillä ei ole merkittäviä eroja koneiden tarkkuudessa, mutta koneiden hinta nousee merkittävästi mentäessä tarkimpiin mittaustarkkuuksiin, jolloin myös koneiden mittausnopeus hidastuu.



Kuva 2. Ison kokoluokan portaalikoordinaattimittauskone (COORD3 2013).



#### **4.2.2 Portaalikoordinaattimittauskoneen hankinta**

Koska mittauskonemarkkinat ovat valtavan suuret, tulee koneen valinta tehdä huolella. Portaalikoordinaattimittauskoneen hankinnassa tärkeimpänä asiana on selvittää tarve, mihin käyttöön kone hankitaan. Millaisia kappaleita aiotaan mitata, kappaleiden vaatimukset, toleranssit, muodot ja kappaleiden määrä. Hankinnassa toisena suurena edellytyksenä on asiantuntemus mittauskoneita arvioitaessa ja hankintasopimusta tehtäessä. Tästä syystä koneen toimittajan roolista tulee tärkeä, mikäli asiakkaalla ei ole aikaisempaa kokemusta kyseisestä laitteesta. On sovittava muun muassa koulutuksesta, huolloista, kalibroinneista ja lisäksi koneen mittauskykyä koskevista hyväksymisrajoista. (Tikka 2007, 326.)

Portaalikoordinaattimittauskone vaatii yleensä sille tarkoitettun oman tilan, jota kutsutaan mittaushuoneeksi. Tämän tila tulee olla puhdas, ilmastoitu huone tai koppi tuotannon läheisyydestä, jossa lämpötila pysyy vakiona. Koneelle joudutaan rakentamaan myös omat perustukset, jotka vaimentavat ulkopuolelta tulevat värinät. Näin taataan koneen mittauskyky ja tuloksien tarkkuus. Konevalmistajat kehittävät jatkuvasti mittauskoneiden ympäristön sietokykyä, jotta ne soveltuisivat paremmin huonompiin olosuhteisiin. Näin säästetään vaivaa ja rahaa, kun erillistä mittaushuonetta ei välttämättä tarvitse rakentaa. (Tikka 2007, 48.)

Koordinaattimittauskoneiden mittausepävarmuutta varten on olemassa omat standardit. Valmistajat käyttävät yleisesti standardia ISO 10360, joka antaa ohjeet koskettavan mittauskoneen mittausepävarmuuden selvittämiseksi. Lisäksi on olemassa tämän standardin laajennus (10360-7) laser- ja optisten mittauslaitteiden mittausepävarmuutta varten

## **5 ATOS Triple Scan II-3D-skanneri**

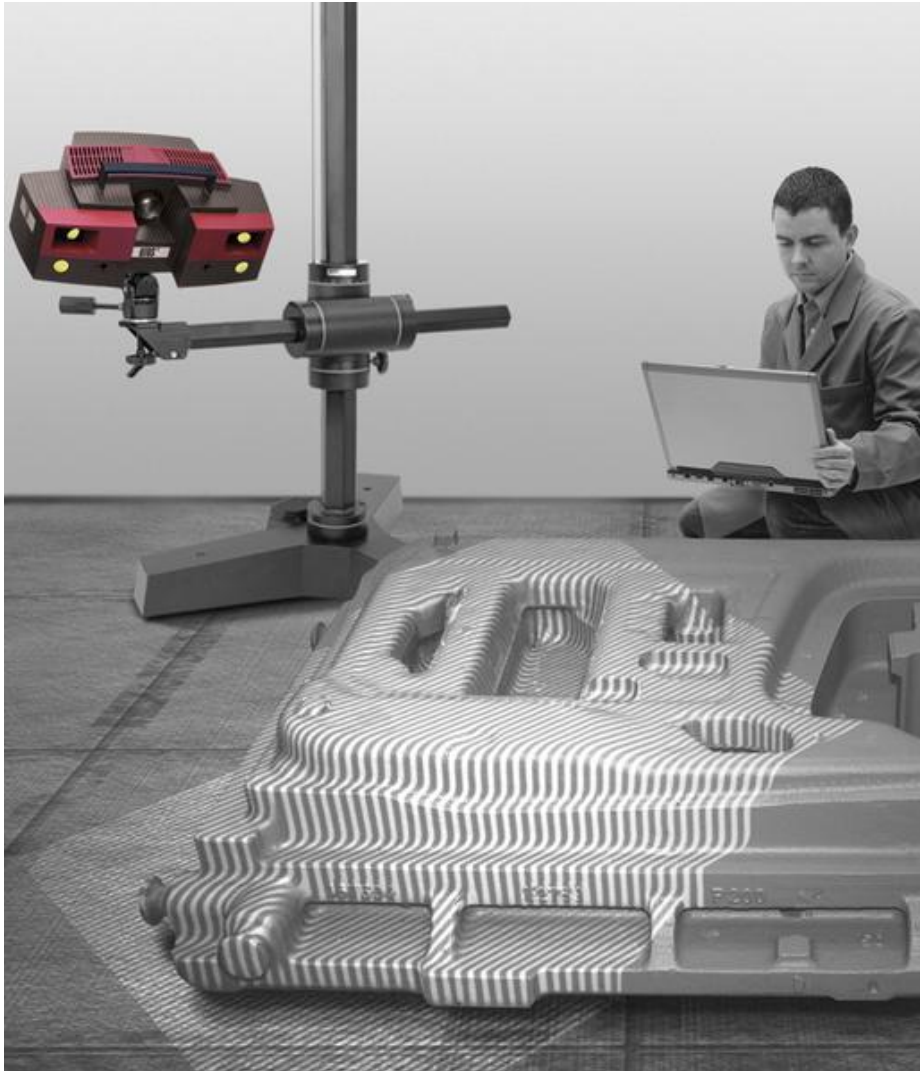
Atos 3D-skannerin toimintaperiaate perustuu kolmiomittaamiseen, jossa käytetään apuna kahta kameraan ja yhtä valonlähdettä eli projektoria. Laitteessa oleva projektori projisoi valokuovaston mitattavan kappaleen pintaan, jonka kamerat havaitsevat. Tämän

jälkeen tietokone laskee automaattisesti, optisiin muunnosyhtälöihin perustuen, 3D-koordinaatit jokaiselle kameran pikselille. Koska kameroiden resoluutiot ovat hyvin tarkat, saadaan kappaleen pintaa pienelle alueelle paljon pikseleitä, jolloin mittauksesta tulee vastaavasti erittäin tarkka.



Kuva 3. ATOS Triple Scan II-3D-skanneri laitteisto (GOM 2013).

ATOS Triple Scan II-3D-skannerissa on kaksi 5 Megapikselin kameraa, joiden resoluutio on 2448 x 2050 ja projektori, joka tuottaa sinistä LED-valoa. Kaikki kyseiset komponentit on integroitu samaan järjestelmään. Sinisen LED-valon ansiosta kappaleen pinnasta tulevat heijastukset esimerkiksi maalatussa tai koneistetussa pinnassa, eivät pääse vaikuttamaan mittaustulokseen verrattuna käytettäessä normaalia valkoista valoa. Samoin ympäristönvalaistuksen vaikutus mittaustulokseen on pienempi. Tästä syystä kyseinen mittalaite sopii sellaisenaan konepajaolosuhteisiin.



Kuva 4. Mittausjärjestely, jossa valojuovat on projisoitu kappaleen pinnalle (GOM 2013).

Kuvassa 4 esitetään kuinka mittauslaite toimii. Projektori projisioi valojuovaston kappaleen pintaan ja kamerat kaappaavat kuvia, jolloin ne näkevät valojuovien kulun muutokset kappaleen pinnassa. Kun kameroiden väliset kulmat ja etäisyys tiedetään, osaa skanneri laskea valojuovien pinnalta havaittujen pisteiden koordinaatit skanneriin nähden ja luoda näin pistepilven tietokoneelle. Mittauslaitetta liikuttamalla tai vastaavasti kappaletta pyörittämällä saadaan skannattua koko kappale. Projisointi pinta-alaa voidaan säätää suuremmaksi tai pienemmäksi tarpeen mukaan. Mitä pienempi projisointi pinta-ala, sitä tarkempi mittauksesta tulee ja vastaavasti, mitä suuremmaksi pinta-ala kasvatetaan, sitä epätarkempi mittaus on. Tämä perustuu siihen, että suuremmalla pinta-alalla pikselien koko kasvaa ja vastaavasti pienemmällä pinta-alalla

pikseleiden koko pienenee, jolloin pienellä alueella on erittäin paljon pikseleitä. Kyseisen mittauslaitteen projisointi pinta-alaa eli mittausvolyymiä voidaan säätää 38 x 29 mm:stä aina 2000 x 1500 mm:iin, jolloin suurien kappaleiden mittaus tapahtuu vähemmällä määrällä otantoja. Suurimmalla mittausvolyymillä mitattaessa mittaustarkkuuden ilmoitetaan olevan 0,01 mm/m. Mitattaessa pienimmällä mittausvolyymillä mittaustarkkuudeksi ilmoitetaan 0,002 mm/m. On muistettava, että tarkimpiin mittaustarkkuuksiin pääseminen vaatii stabiilit olosuhteet, kuten mittaushuoneen.

### **5.1 ATOS Triple Scan II-3D-skannerilla mittaaminen**

ATOS Triple Scan II-3D-skannerilla voidaan mittaus toteuttaa kolmella eri tavalla. Nämä mittaustavat soveltuvat erilaisille kappaleille ja niiden vaatimuksille. Ensimmäinen tapa on sijoittaa kappaleen pinnalle tai sen ympäristöön, kuten mittaustasolle, tarralappuja, jotka toimivat referenssipisteinä mittauksessa. Lappujen avulla laite osaa yhdistää skannatut kuvat toisiinsa ja luoda yhden yhtenäisen kuvan koordinaatistoon. Tämä tapa soveltuu etenkin pienille ja tarkoille kappaleille. Toinen tapa on skannata kappale ilman tarralappuja, jolloin ohjelma etsii eri kuvannoista samoja pintoja ja tällä tavoin yhdistää pinnat yhdeksi kuvaksi koordinaatistoon. Kolmas tapa, joka soveltuu etenkin suurille ja vaativille kappaleille on käyttää referenssipisteiden ennalta tallentamiseen Tritop- koordinaattimittauslaitetta, joka on käytännössä järjestelmäkamera. Tämän järjestelmän toimintaperiaate perustuu fotogrammetriaan. Tällöin kuvattavaan kappaleeseen tai sen ympäristöön asennetaan tarvittava määrä koodattuja pisteitä ja mittaussauvat sekä tarralappuja, jonka jälkeen kappaleesta otetaan muutama kuva Tritop-kameralla. Kuvia otettaessa, uusissa kuvissa tulee näkyä ainakin 5 edellisen kuvan referenssipistettä, jolloin tietokone kykenee luomaan kuvat samaan koordinaatistoon. Kuvien ottamisen jälkeen ohjelmistolla luodaan 3-ulotteinen kuva käyttäen apuna saatuja mittapisteitä. Kun kuvatut referenssipisteet ovat tietokoneella 3D-koordinaatistossa, voidaan saadut pisteet viedä ATOS Triple Scan II-3D-skannerin ohjelmaan referenssipisteiksi. Tämän jälkeen kappaletta aletaan skannata, jolloin skannerin tulee nähdä vähintään kolme Tritop-kameralla kuvattua pistettä. Näin ollen skanneri osaa laskea oman sijaintinsa

avaruudessa suhteessa havaittuihin pisteisiin, jolloin skannatut pinnat asettuvat automaattisesti koordinaatistoon.

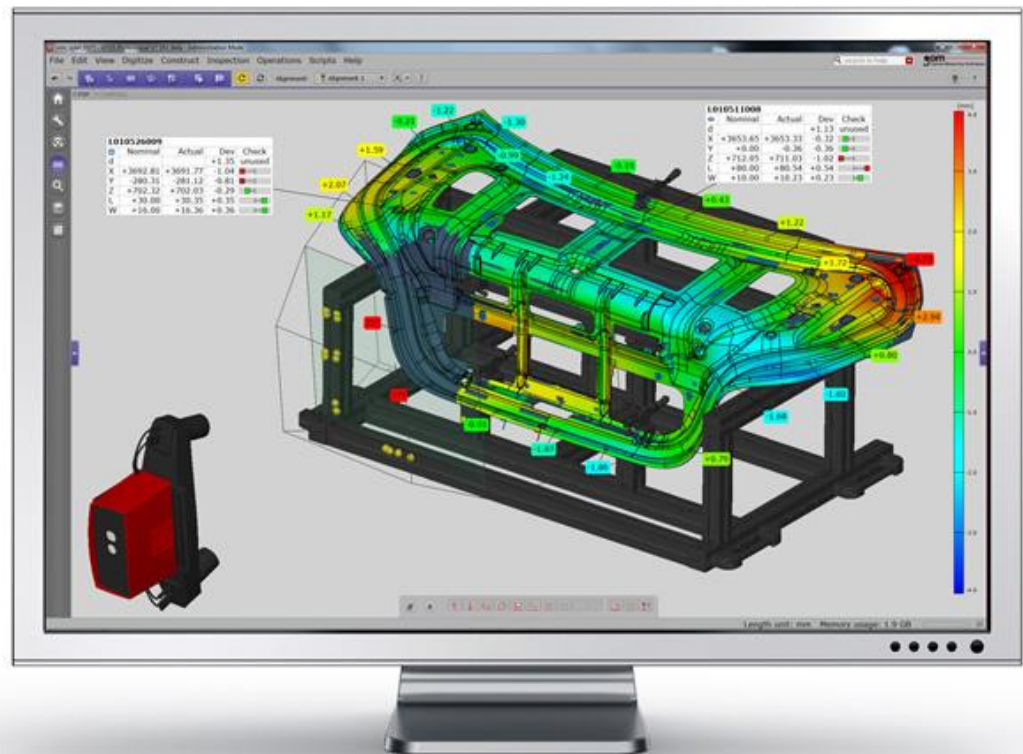


Kuva 5. Fotogrammetriaan perustuva tritop-koordinaattimittausjärjestelmä (GOM 2013).

Käytettävät tarralaput eli referenssipisteet eivät suoraan vaikuta laitteiston mittaustarkkuuteen vaan niiden avulla laitteisto kykenee itse määrittämään mittauksen onnistumisen. Tehdystä mittauksesta laitteisto ilmoittaa mittaasepävarmuuden, joka kyseiseen mittaukseen tulee. Referenssipisteiden avulla laitteisto pystyy skannauksen aikana havaitsemaan, mikäli mittauksessa tapahtuu virheitä. Esimerkiksi kappale tai mittauslaite tärähtää, jolloin mittaustuloksesta ei tule luotettava. Tällä tavoin tiedetään saavutettu mittaustarkkuus ja kyetään havaitsemaan mittauksessa tapahtuvia virheitä. Tämä on oleellista mitattaessa etenkin suurempia kappaleita, joissa joudutaan ottamaan useita eri kuvantoja skannerilla. Ilman referenssipisteitä tapahtuvassa mittauksessa ei tiedetä onko mittaus onnistunut vai ei. Riskinä on, että kappale liikahtaa tai mittauslaite tärähtää juuri kuvaushetkellä jolloin mittauksesta ei tule luotettava. Tätä ei voida havaita, jos mittaus tehdään ilman referenssipisteitä.

## 5.2 Mittaustulosten analysointi

ATOS Triple Scan II-3D-skannerilla mitatuista kappaleista saadaan 3D-malli, jota voidaan verrata CAD-malliin. Vertaaminen tapahtuu esimerkiksi best fit-ominaisuuden avulla, jolloin ohjelmisto asettaa mallit päällekkäin mahdollisimman tarkasti. Tuloksia voidaan analysoida käyttämällä värikarttaa kappaleen virheiden esiintuomiseksi.



Kuva 6. Mitatun kappaleen vertaamisesta CAD-malliin (GOM 2013).

Jokaiselle mitattavalle kappaleelle voidaan 3D-ympäristössä määrittää mitä mittoja siitä halutaan tuoda esille. Ensimmäistä kertaa mitattaessa mittaushjelman luontiin menee paljon aikaa. Kuitenkin kun mittaushjelma on kerran luotu, sitä ei tarvitse seuraavalle samanlaiselle kappaleelle enää tehdä. Tämän jälkeen mittaus tapahtuu ainoastaan skannaamalla kappale, jolloin halutut mittaustiedot tulevat automaattisesti esille mittaushjelmassa. Tätä kautta samoille kappaleille voidaan ohjelmistolla tehdä paljon erilaisia analyysyjä, kuten trendianalyysyjä. ATOS Triple Scan II-3D-skannerin hinta on noin 100 000 euroa. Lisäksi mikäli mitataan suuria kappaleita, on järkevää hankkia skannerin lisäksi edellä mainittu Tritop koordinaattimittauslaite skannerin lisälaitteeksi.

Tritopin hinta on noin 30 000 euroa. Kokonaishintaan tule laskea vielä mukaan erilaiset lisälaitteet, joiden kustannukset ovat noin 15 000 euroa.

ATOS Triple Scan II-3D-skannerin mittaus voidaan myös automatisoida täysin, jolloin skanneri sijoitetaan robottiin. Koska skannerin paikoituksella ei ole tarkkaa merkitystä mittauksen kannalta, riittää robotin paikoitustarkkuus mittauksen suorittamiseen. ATOS-laitteiston toimittaja GOM tarjoaa myös automaattiseen mittaukseen tarkoitettua Scanbox- laitteistoa, jossa ATOS Triple Scan II-3D-skanneri on sijoitettu robottiin ja omaan suljettuun tilaan. Scanboxeja on tällä hetkellä kolmea eri kokoluokkaa, joista suurin on maksimissaan 3m x 3m suuruisille kappaleille. Tämän järjestelmän hinta on noin 250 000 euroa.



Kuva 7. ATOS scanbox-laitteisto (GOM 2013).

## 6 Mapvision Quality gate

Mapvision quality gate on suomalaisen Mapvision Oy:n kehittämä mittausjärjestelmä. Quality gate on monikamerajärjestelmä, jolla mitattavasta kohteesta otetaan kuvia. Kuvista voidaan analysoida kuvattavan kohteen mittasuhteita, hitsejä sekä onko kohteessa tarvittavat komponentit paikallaan. Yleensä optiset- ja koordinaattimittauslaitteet käyttävät hyväkseen vain yhtä mittausteknologiaa. Mapvisionin quality gate ohjelmisto sen sijaan käyttää hyväkseen kolmea eri

mittausteknologian sovellutusta. Quality gate:ssä yhdistyy konenäkö, kuvamittaus eli fotogrammetria ja 3D-suunnittelu.



Kuva 8. Mapvision quality gate 6200 sarjan mittausyksikkö suurille kappaleille (Mapvision 2013).

Quality gate järjestelmä koostuu kuvausympäristöstä, johon on sijoitettu kymmeniä kameroita seinille, kattoon ja lattialle. Kuvausympäristöön on asennettu lisäksi useita LED-valoja, joilla kaappiin saadaan optimaalinen valaistus. Tarkistettava kohde viedään tuotantolinjalta yleensä kuljetinta pitkin kaappiin, jossa kamerat kuvaavat sen kaikista suunnista jokaiselle kuvalle suunnitellulla optimaalisimmalla valaistuksella. Itse kuvausoperaatio kestää vain muutaman sekunnin, koska jokainen kamera ja LED-valo suorittavat tehtävänsä tarkasti määritellyllä syklillä, ottamalla kohteesta tarvittavan määrän kuvia. Quality gate -ohjelmisto toimii järjestelmän aivoina, ja huolehtii kuvausoperaation ohjauksen lisäksi 3D-kuvan mallinnuksen, analysoinnin sekä tallennuksen.





Kuva 9. Kuva mittausyksikön sisältä, jossa näkyy käytettävät kamerat ja valaistus (Aalto 2010).

### 6.1 Järjestelmän ohjelmointi ja mittaustulosten analysointi

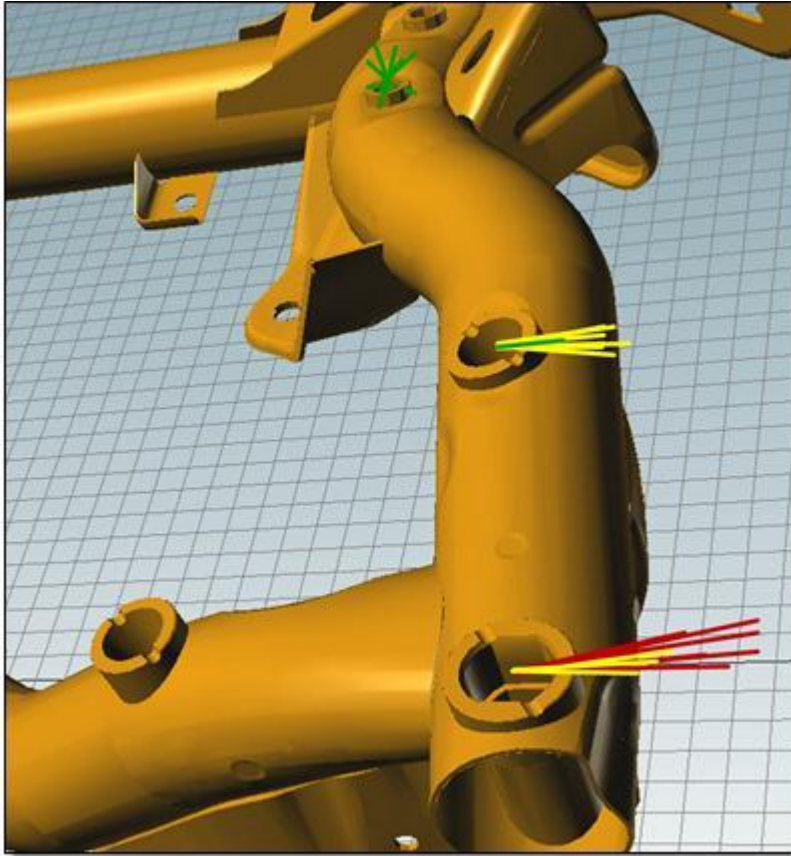
Mitattavasta kohteesta otetuista kuvista voidaan analysoida lähestulkoon mitä tahansa. Ohjelmisto analysoi sille asetetut kohteet käyttäen hyväksi kohteen omaa harmaasävyinformaatiota. Käytännössä saadut mittapisteet ovat mittoja kappaleiden särmistä, ei siis pinnoista niin kuin koskettavissa tai skannaavissa mittausmenetelmissä. Piirteet etsitään siten, että järjestelmälle opetetaan mitattavien piirteiden hahmot jokaisen kyseisen piirteen näkevän kameran näkemänä. Kun piirteet on syötetty ohjelmistoon, toimii järjestelmä automaattisesti, jolloin se hakee halutut piirteet ja luo

niistä mittaustietoa. Kyseiset ohjelmoinnit, kameroiden suuntaamiset ja valaistuksen suunnittelu tehdään kokonaan CAD-ympäristössä, joka nopeuttaa järjestelmän rakentamista ja ohjelmointia huomattavasti. Näin ollen laitteisto voidaan ohjelmoida samanaikaisesti useille erikappaleille ilman, että kameroiden tai valaistuksen paikkaa tarvitse muuttaa. CAD-simuloinnin jälkeen kamerat suunnataan CAD-suuntauksen avulla oikeassa ympäristössä oikeaan paikkaan.



Kuva 10. Autonkorin mittaaminen Mapvision quality gate 6200 sarjan laitteella (Tekes 2013).

Mapvision quality gate -ohjelmistolla saatuja mittaustietoja verrataan kappaleen CAD-malliin, esimerkiksi best fit- ominaisuudella, jonka jälkeen tulokset ilmoitetaan vektoreina halutusta mittauskohdasta.



Kuva 11. Mittaustulosten analysointi vektoreilla (Mapvision 2013).

Vektorit kertovat suunnalla ja värillään kappaleessa olevat mittavirheet. Vihreä vektori tarkoittaa mitan olevan sille asetetussa toleranssissa, keltainen ilmoittaa mitan olevan lähellä toleranssirajaa ja punainen kertoo mitan olevan toleranssirajan ulkopuolella. Vektorin suunta kertoo tarkalleen mihin suuntaan kappaleessa virhe on. Etenkin useiden samanlaisten kappaleiden mittauksen jälkeen systemaattiset virheet on selkeästi havaittavissa vektoreiden avulla, joita tuloksiin ilmestyy yhtä monta, kuin mitattuja kappaleita on ollut. Kuviin voidaan myös jälkikäteen lisätä haluttuja piirteitä, joista saadaan ulos lisää mittaustietoja.

## 6.2 Järjestelmän tarkkuus

Mapvision quality gate järjestelmän tarkkuus perustuu kehittyneeseen ja tarkkaan kalibrointiin, joka on patentoitu. Laitteistolla päästään kappaleen koosta riippuen 0,02 – 0,03 mm:n tarkkuuteen. Usein kappaleet ovat ensiksi mitattu tarkalla koordinaattimittauskoneella, jonka jälkeen saatuja tuloksia käytetään hyödyksi

kompensoitaessa Mapvision quality gate järjestelmän mittaustulokset. Tämä perustuu siihen, että koordinaattimittauskone mittaa kappaleen koskettamalla sen pintaa ja Mapvisionin järjestelmä vastaavasti mittaa kappaleen sen särmistä koskettamatta kyseistä kappaletta. Näillä järjestelmillä saaduissa tuloksissa on pakosti hieman eroa, joten tästä syystä Mapvision quality gate järjestelmä säädetään antamaan samoja tuloksia kuin koordinaattimittauskone antaisi. Tällöin päästää edellä mainittuihin mittaustarkkuuksiin. Tällä menetelmällä mittaustarkkuuden jäljitettävyyys voidaan varmistaa ja saadaan aina luotettavia tuloksia. Ilman tuloksien kompensointia mittaustarkkuus tulee olemaan noin 0,1 mm. Ohjelmisto laskee koko ajan myös omaa kyvykkyyttä, tarkkuutta ja mittausepävarmuuttaan sekä kykenee havaitsemaan, miten tarkasti mittaus on onnistunut.

Mapvision quality gate järjestelmä toimitetaan asiakkaalle avaimet käteen periaatteella. Laitteisto kasataan ja testataan Mapvisionin tuotantotiloissa, jonka jälkeen laitteisto toimitetaan asiakkaalle ja asennetaan se käyttövalmiiksi. Kappaleille tehtävät mittaushjelmat tehdään Mapvisionin toimesta, sillä ohjelmistojärjestelmä, jolla kappaleen piirteet ja kameroiden ja valaistuksen säätäminen ohjelmoidaan, tarvitsee ammattitaitoa. Kaikki ohjelmointi ja säätäminen tehdään etänä, jolloin laitteen koodaajan ei tarvitse mennä laitteen luokse. Tulevaisuudessa Mapvisionilla on tavoitteena saada ohjelmistosta sellainen, jolla loppukäyttäjä voi itse suorittaa kappaleiden ohjelmoinnin alusta loppuun. Suurille kappaleille tarkoitettu Quality gate 6200 laitteisto maksaa asennettuna ja käyttövalmiina noin 400 000–500 000 euroa. Lisäksi laitteiston kalibrointi, ylläpito ja valvonta maksavat noin 12 000 euroa vuodessa. Kun mitattavia kappaleita on useita erilaisia, syntyy lisäkustannuksia kappaleiden ohjelmoinnista noin 1000 euroa per uusia kappale. (Mapvision 2013.)

## **7 John Deere Forestry Oy:n mittauksen nykytila**

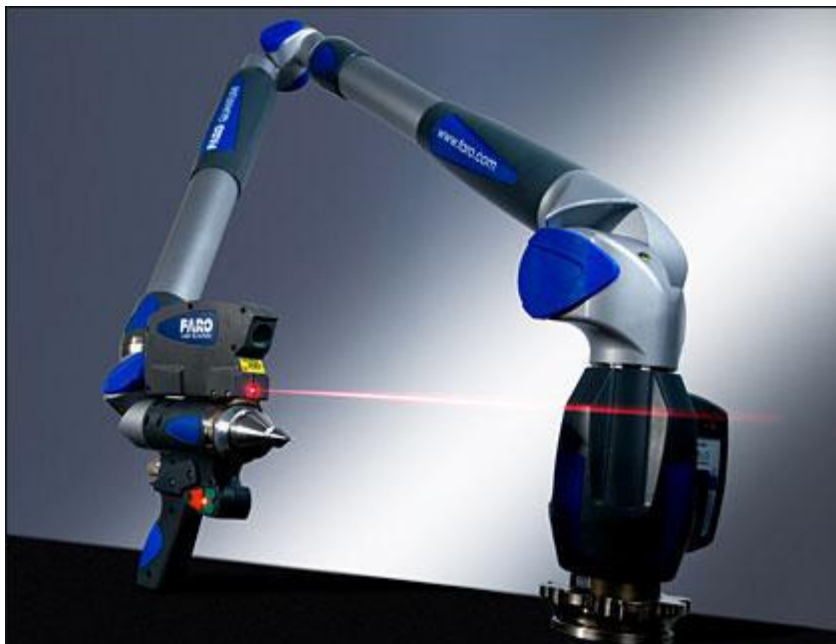
### **7.1 Mittavat kappaleet ja niiden vaatimukset**

John Deere Forestry Oy:ssä mitataan kappaleita tuotannon erivaiheessa. Tuotannossa mitataan metsäkoneiden runkoja, pilareita ja puomeja, sekä tehdään tarkastuksia hitseille. Silloitus vaiheessa hitsarit asettavat kappaleet hitsauskiinnittimissä paikoilleen ja varmistavat silloituksen jälkeen kappaleiden täyttävän hitsatulle rakenteelle määrätyt toleranssit kriittisimpien mittojen osalta. Koneistuksessa vastaavasti koneistajat mittaavat esimerkiksi reikien halkaisijoiden mitat, jotta ne täyttävät niille asetetut toleranssit koneistetuista rungoista. Koneistuksessa käytetään digitaalisia mikrometrejä ja mittakelloja. Mikrometreillä päästään yli 100 mm:n halkaisijoilla olevien reikien mittauksessa 0,005 mm:n ja pienemmissä reiässä 0,002–0,003 mm:n tarkkuuteen.

Tuotannossa toimii yksi mittamies, joka mittaa runkoja, pilareita ja puomeja 3D-varsimittauskoneilla. Kyseisiä koneita yrityksellä on kaksi kappaletta. Koneet ovat Faro Arm Platinum-koordinaattimittauslaitteita, jossa toisessa on lisäksi Faro Laser ScanArm-laserskannuslaite. Näillä laitteistoilla mitataan rungot, puomit, pilarit ja lisäksi toimittajilta tulevia kokoonpano osia. Faro arm Platinum-laite, kykenee 0,04 mm:n tarkkuuteen. Toinen Faro arm-varsimittauskone kykenee koskettavalla menetelmällä 0,03 mm:n tarkkuuteen ja siinä oleva skanneri 0,07 mm:n tarkkuuteen.



Kuva 12. Faro arm Platinum-koordinaattimittauslaite (Faro 2013).



Kuva 13. Faro Laser scanarm-mittauslaite (Faro 2013).

## 7.2 Havainnot mittausten nykytilasta

Hitsattujen rakenteiden tarkkuus tuotannossa valmiiksi hitsatuilla osilla on tarkimmillaan noin 0,5–1 mm ja koneistuksessa reikien toleranssit ovat tarkimmillaan noin 0,03 mm. Varsimittauskoneiden mittaustarkkuudet riittävät mainiosti hitsatuille rakenteille, kokoonpanon osille ja hitsauskiinnittimille. Reikien mittaamiseen käytettyjen mikrometrien tarkkuudet riittävät reikien mittaamiseen. Käytännössä kuitenkin tarkimpiin mittauksiin vaikuttaa niin paljon ulkoisia tekijöitä, joiden seurauksena mittaustulokset eivät ole välttämättä vertailukelpoisia toisiinsa nähden. Yksittäisen rungon koneistettujen reikien mittauksesta saatu tulos on luotettava näillä mittausvälineillä, mutta mikäli runkojen reikien mittaustuloksia aiotaan vertailla toisiinsa eli suorittaa esimerkiksi trendianalyysiä, on saatujen tulosten mittausepävarmuus niin suuri, ettei tuloksia voida vertailla täysin luotettavasti. Karkeasti arvioituna pelkästään konepajaympäristöstä aiheutuva mittausepävarmuus on vähintään 0,02 mm. Tämä mittausepävarmuus aiheutuu pelkästään jo lämpötilan muutoksista. Lisäksi mittausepävarmuuteen tulee ottaa huomioon mittaajan ja kaikkien muiden muuttujien vaikutus. Tästä johtuen tulosten vertaaminen toisiinsa luotettavasti on haastavaa. Näin ollen tuotantotiloihin ei kannata hankkia tarkempaa mittavälinettä, mitä tällä hetkellä on. Koska olipa koneen mittaustarkkuus kuinka tarkka tahansa, aiheuttaa ulkoiset muuttujat mittausten epävarmuuden niin suureksi, ettei tarkasta mittavälineestä ole käytännönhyötyä. Tähän olisi ratkaisuna mittaushuone, jossa ulkoiset ympäristöstä johtuvat muuttujat saataisiin minimoitua.

Tuotannossa tarkastuksia hitsattujen osien mittatarkkuuden osalta tekee päätoimisesti yksihenkilö, käytössä olevalla laitteistolla. Tuotetuista osista kyetään tällä henkilöstöresurssi määrällä ja mittauslaittekannalla mittamaan noin 10 % hitsatuista rungoista, puomeista ja pilareista. Lisäksi tuotannossa mitataan hitsauskiinnittimiä ja kokoonpano-osia, jolloin resurssit ovat kokonaan käytössä. Koneistuksen jälkeiseen jatkuvaan mittaamiseen varsimittauskoneilla resurssit eivät riitä.

Käytössä olevilla varsimittauskoneilla saadaan rungot, pilarit ja puomit mitattua kriittisiltä mitoiltaan melko nopeasti koskettavalla menetelmällä. Tällä menetelmällä mittausraporttiin saadaan vain tiettyjen pisteiden tai reikien välisiä mittoja luettelona. Mikäli rungoista haluttaisiin varsimittakoneella mitata kaikki mahdolliset mitat, aikaa

joudutaan käyttämään huomattavasti enemmän. Tällä tavoin rungon kokonaisvaltainen tarkastelu on haastavaa ja syyt joista mittavirheet johtuvat on vaikea selvittää. Etenkin robottihitsauksessa kappaleeseen syntyviä muodonmuutoksia on vaikea saada mitattua pelkästään koskettavalla menetelmällä verrattuna skannaavaan menetelmään, jossa muodonmuutokset havaitaan 3D-kuvina ja väreinä. Varsimittauskoneella, jossa on lisänä skanneri, voidaan pieniä kokoonpano osia mitata nopeasti ja niistä saadaan selkeät mittausraportit, sillä skannattua kappaletta verrataan CAD-malliin. Tästä saadaan väreillä esitetyt mittavirhekaaviot, joiden analysointi on helppoa. Varsimittauskoneella mitattaessa suuria kappaleita, joudutaan koneen paikkaa vaihtamaan useasti, johtuen lyhyestä varresta. Lisäksi skannaaminen tällä menetelmällä on suhteellisen hidasta, sillä kappaleen jokainen kohta on käytävä läpi käsin.

Nykytilassa varsimittauskoneiden käyttö on maksimaalisella tasolla. Mikäli runkoja, pilareita ja puomeja alettaisiin mitata enemmän, eivät resurssit riittäisi muuhun mittaamiseen. Samoin mikäli kokoonpanon osia alettaisiin mittaamaan enemmän, ei hitsattujen rakenteiden mittaamiseen jäisi resursseja. Etenkin uusien tuotteiden mittaamiseen niiden valmistuksen alkuvaiheessa, joudutaan mittausresurssit siirtämään kokonaan kyseiseen toimintaan. Kun valmistuksen tarkkuus on saatu hiottua sopivalle tasolle, voidaan resursseja siirtää esimerkiksi kokoonpanon osien erinäisiin tarkastuksiin. Mittaukseen ei ole järkevää hankkia lisää henkilöstöä, sillä olemassa olevalla laitteistolla henkilöstön lisääminen ei paranna mittausvolyymiä kovinkaan merkittävästi. Tämä lisää merkittävästi laadunvalvonnan ennalta ehkäiseviä kustannuksia, mutta vastaavasti ei tuo merkittävässä määrin kokonaislaatukustannuksiin säästöä. Ratkaisuna olisi tuotannossa mitattavien runkojen, puomien ja pilareiden mittauksen täydellinen automatisointi, joka nykytekniikalla on helposti toteutettavissa. Tällöin mittaukseen käytettävät henkilöstöresurssit voidaan sijoittaa suuremmissa määrin nimenomaan toimenpiteisiin, joilla esimerkiksi valmistuksen mittatarkkuutta saadaan parannettua. Eli henkilöstöresursseja ei enää käytettäisi itse mittaamiseen vaan mittauksesta saatujen havaintojen avulla valmistuksen kehittämiseen ja korjaavien toimenpiteiden toteuttamiseen. Valmistuksen tarkkuutta voidaan kehittää ainoastaan siitä saatavalla tiedolla.



### 7.3 Toimenpiteitä mittauksen nykytilan parantamiseen

Mittauksen kehittämisen rajauksena John Deere Forestry Oy:ssä on, ettei mittaukseen käytettäviä henkilöstöresursseja tulla kasvattamaan. Yrityksellä on yksi mittaussmiestä ja kaksi varsityyppistä 3D-koordinaattimittauslaitetta, joita käytetään valmistuksessa tuotettujen tuotteiden sekä kokoonpano osien mittaamiseen. Molempia laitteita tulisi käyttää mahdollisimman paljon, jotta laitteista saatava hyöty olisi maksimaalinen.

Koneistuksen jälkeen tehtävissä mittauksissa käytetään käsimitavälineitä. Näillä saatavaan mittaustarkkuuteen ja mittauserävarmuuteen vaikuttaa oleellisesti mittaaja. Koneistajille tulee järjestää jatkuvaa koulutusta liittyen kappaleiden mittaamiseen. Mittavälineille tulisi tehdä gage r&r-analyysejä, joilla saadaan selville mittausprosessin kyvykkyys. Tämä toisi tietoa mittauksen riittävydestä kyseisiin mittauskohteisiin, jolloin mittauksen kehittämisen kohteet tiedetään paremmin. Tätä kautta voidaan selvittää tarvitseeko hankkia uusia tarkempia mittalaitteita, kouluttaa mittaajia vai parantaa mittauksessa vallitsevia olosuhteita. Käsimitavälineillä tehtävässä mittauksessa on otettava aina huomioon mittavaihteluun vaikuttavat tekijät ja niiden vaikutus itse mittaukseen on selvitettävä. Tätä kautta voidaan tehdä korjaavia toimenpiteitä. Yleisellä tasolla mittauksen tarkkuuteen vaikuttavat tekijät on otettava laajemmin huomioon mittauksia tehdessä, mittauksen suunnittelussa ja kehittämisessä.

Valmistuksesta tulisi kerätä mahdollisimman paljon tietoa sen virheistä ja virheiden korjaamiseen kuluneesta ajasta. Jos esimerkiksi hitsattu runko on mitoiltaan väärä, sitä ei voida välttämättä koneistaa. Jotta runko kyetään koneistamaan, joudutaan sen korjaamiseen käyttämään aikaa ja henkilöstöresursseja. Samoin mikäli silloituksesta robottihitsaukseen menevä runko on mitoiltaan virheellinen voi robottihitsauksessa tulla virheitä, jolloin runkoa joudutaan korjaamaan ja hitsaamaan uudelleen. Näistä esimerkkitapauksista ja kaikesta muusta virheiden korjailuista tulee pitää tarkkaa tilastoa. Tilastojen kautta kyetään laskemaan euroissa, kuinka paljon mikäkin valmistuksessa aiheutuva virhe kustantaa kokonaisuudessaan. Saatua euromääriä voidaan valmistusta kehittäessä käyttää mukana, kun lasketaan uusien investointien kannattavuutta ja takaisinmaksuaikaa. Tällöin tiedetään mikä valmistuksen jakso tuottaa virheen sattuessa suurimmat korjauskustannukset. Tätä kautta osataan tehdä korjaavia

toimenpiteitä tai hankintoja virheiden ennaltaehkäisyyn. Tehtävien toimenpiteiden seurauksena laatu- ja kustannuksia kyetään vähentämään kokonaisuudessaan.

Yrityksessä on mittaukseen tehtyjä suunnitelmia, joiden mukaan mittauksia tehdään tuotannossa. Suunnitelmat on jaettu hyvin nykyisille henkilöstöresursseille ja käytettävissä oleville mittauslaitteille. Olemassa olevia suunnitelmia ei kannata muokata suuremmin. Jos esimerkiksi runkojen mittausta lisättäisiin, olisi se heti pois muun muassa kokoonpano osien mittauksesta. Samalla tavalla mikäli kokoonpano-osien mittausta lisättäisiin, olisi se pois runkojen, pilarien ja puomien mittauksesta. Mittauksista saatavaa tietoa tulisi kuitenkin käyttää rohkeammin ja enemmän hyväksi, tehtäessä muutoksia valmistukseen. Mikäli mittavirheitä havaitaan kappaleissa, tulisi ne pyrkiä poistamaan ensisijassa. Pelkkä kappaleiden mittaaminen ei paranna valmistusta ja sen tarkkuutta millään tavoin, vaan nimenomaan mittauksista saatavan tiedon avulla tehdyt toimenpiteet. Yrityksessä voitaisiin ottaa käyttöön käytäntö, jossa pyrittäisiin kuukausittain parantamaan tietyn kohteen tai yksittäisen mitan valmistustarkkuutta. Tätä kautta valmistuksen tarkkuus ja laatu paranisi pikku hiljaa.

Käytettävissä olevaan mittauslaitteistoon hyvänä lisänä olisi GOM:in valmistama ATOS Triple Scan II-3D-skanneri. Kyseisellä laitteistolla kyettäisiin mittaamaan rungot, pilarit, puomit ja kokoonpanon osat nopeasti, tarkasti ja mittaustuloksia pystyttäisiin analysoimaan kattavammin. Laitteisto skannaa mitattavan kappaleen kauttaaltaan ja mittaustuloksesta saadaan 3D-malli, joista mittavirheet tulevat esiin väreillä. Tästä olisi etua hitsauksessa tulevien muodonmuutoksien tutkimisessa ja tehtäessä korjaavia toimenpiteitä. Esimerkiksi rungoista nähtäisiin kaikki osat ja niiden virheet kattavasti. Saatava hyöty korostuisi etenkin alettaessa valmistaa uutta runkomallia. Runko voidaan mitata silloituksen ja robottihitsauksen jälkeen, jolloin mittaustuloksista nähdään heti, mitä näiden valmistusvaiheiden välissä kappaleelle tapahtuu. Tätä kautta korjaavia toimenpiteitä voidaan tehdä nopeammin, kattavammin ja tarkemmin. Näin ollen valmistuksen tarkkuuden hiominen luotettavalle tasolle voidaan toteuttaa huomattavasti nopeammin. Kun valmistus tarkkuuden hiomiseen ei tarvitse käyttää enää niin paljoa aikaa, saadaan selkeitä kustannussäästöjä, virheellisten kappaleiden vähenemisellä ja mittausresurssien siirtämisellä muihin tärkeisiin töihin. Mikäli mittaukset suoritetaan mittaushuoneessa tai muuten optimaalisissa oloissa, tällä laitteistolla päästään tuhannesosien tarkkuuteen.

Faron laser scanarm-mittauslaitteen skannausominaisuudesta on jo saatu hyötyä kokoonpano osien tarkastelussa ja tämä menetelmä on havaittu hyväksi. Faron laitteisto ei kuitenkaan sovellu suurille kappaleille kovinkaan hyvin. ATOS-laitteistolla saavutettaisiin samanlainen hyöty myös suuremmille kappaleille. ATOS-laitteistoa voitaisiin hyödyntää myös kokoonpanon osien mittaamisessa, joissa se olisi nopeudeltaan ja tarkkuudeltaan huomattavasti FARO:a käytännöllisempi. Mikäli tulevaisuudessa haluttaisiin kokoonpano osia tarkastella suuremmalla otannalla eli tehdä vastaanottotarkastusta, ATOS-laitteisto voitaisiin rakentaa täysin automaattiseksi tähän tarkoitukseen. Näin ollen vastaanottotarkastukseen ei tarvittaisi käyttää mittauksen henkilöstöresursseja. Vastaanottotarkastukseen voitaisiin tällä menetelmällä soveltaa myös SPC-analyysejä.

ATOS-laitteiston kokonaiskustannukset tulisivat olemaan noin 150 000 euroa, jolloin siihen kuuluisi apuvälineenä tritop-laitteisto. Tritop-laitteistoa voidaan myös käyttää itseksensä mittauksessa. ATOS-laitteistolla päästään tuotanto-olosuhteissa noin 0,02 mm:n tarkkuuteen ja optimaalisissa olosuhteissa 0,002 mm:n tarkkuuteen. Huonona puolena kyseisessä laitteistossa on mittauksien esivalmistelut, mikäli tuloksista halutaan luotettavia. Kappaleisiin tai sen ympäristöön laitetaan referenssipisteitä, joiden asettaminen ja poistaminen vievät aikaa. Referenssipisteet voidaan kuitenkin asettaa esimerkiksi mittauspöydän pintaan tai rakentaa liikuteltava alumiinikehikko, joihin pisteet sijoitetaan. Tällöin mitattaviin kappaleisiin ei välttämättä tarvitse asettaa lainkaan referenssipisteitä tai ainakin niiden määrää voidaan laskea. Tätä kautta mittauksen suoritus nopeutuu huomattavasti.

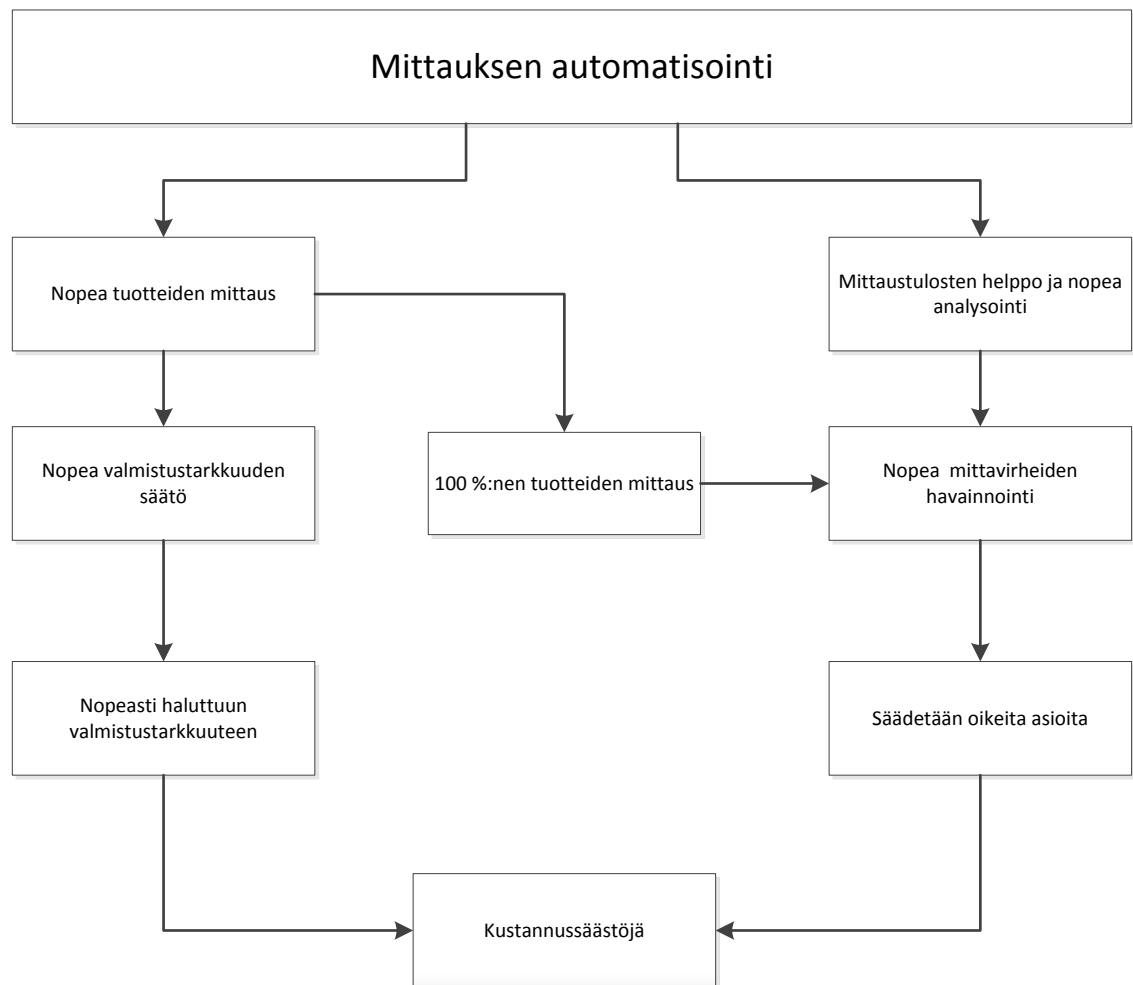
## **8 Valmistettävien osien mittauksen automatisointi**

Nykyään sarjatuotantona tehtävien kappaleiden mittaus on järkevää automatisoida. Etenkin autoteollisuus on jo pitkään käyttänyt mittauksiensa automatisointiin hyvinkin erilaisia järjestelmiä. Automatisoidut mittausjärjestelmät kehittyvät jatkuvasti ja etenkin niiden ohjelmistot päivittyvät monipuolisimpiin ja joustavimpiin versioihin. Automatisoiduilla mittausjärjestelmällä saadaan mitattua 100 % tuotetuista kappaleista. Tuotteiden 100 %:lla tarkastamisella saadaan huomattavia säästöjä virheellisten kappaleiden havaitsemisen johdosta. Toinen merkittävä kustannussäästö tulee, kun

valmistuksen tarkkuus saadaan nopeammin säädettyä vaadittavalle tasolle. Tämä tekijä korostuu etenkin tuotannon alkaessa tai uuden mallin tullessa tuotantoon. Kolmas merkittävä tekijä automatisoidun mittausjärjestelmän eduista on systemaattisten virheiden nopea havainnointi ja tätä kautta virheiden aiheuttajien nopea korjaaminen. 100 %:lla tuotteiden mittaamisella saadaan myös valmistuksen tarkkuutta analysoitua tarkemmin erilaisilla mittareilla.

Mikäli John Deere Forestry Oy:n kaikki tuotteet halutaan mitata, on mittausjärjestelmän oltava täysin automatisoitu. Automatisoitu mittausjärjestelmä sopisi nykyiseen tuotantomalliin ennen koneistusta erittäin hyvin. Mapvisionin kehittämä Quality gate 6200 sarjan mittausjärjestelmä soveltuisi mainiosti tähän tarkoitukseen joustavuutensa ansioista. Kyseisellä laitteistolla kappaleiden mittaaminen veisi kokonaisuudessaan muutaman minuutin. Lisäksi järjestelmällä päästään hitsatuille rakenteille riittävään mittaustarkkuuteen.

Quality gate -mittausjärjestelmä sijoitettaisiin mittaamaan kaikki rungot ja puomit, ennen koneistusta. Laitteiston käyttämiseen ei tarvita omaa henkilöstöä, jolloin runkojen ja puomien mittaamiseen ei käytettäisi enää tuotannon omaa mittausmiestä. Tätä kautta mittauksen henkilöstöresurssit voidaan siirtää vahvemmin saatujen mittaustietojen analysointiin ja sen seurauksena korjaavien toimenpiteiden tekeminen olisi nopeampaa ja kattavampaa. Kun kaikki rungot ja puomit mitattaisiin 100-%:sesti, saadaan niistä huomattavasti enemmän mittatietoa, jolloin korjaavat toimenpiteet ovat aina perusteltuja. Etenkin systemaattiset virheet kappaleissa saadaan selville käyttäen tulosten analysoinnissa Mapvisionin ohjelmistolle ominaista vektoreilla ilmoitettavaa mitta-arvon paikkaa suurella otannalla. Samoin kun aletaan valmistaa esimerkiksi uutta runkomallia, menee sen valmistustarkkuuden saavuttamiseen sarjatuotannossa kauan aikaa ja paljon henkilöstöresursseja. Quality gate-laitteistolla voitaisiin mitata jokainen esisarjan runko silloitus- ja robottihitsauksen jälkeen. Näin ollen uusien tuotteiden valmistustarkkuutta päästään säätämään kattavampien mittatietojen perusteella nopeammin ja monipuolisemmin sekä korjaavat toimenpiteet eivät ole arvailuja vaan voidaan tehdä oikeita asioita. Näistä kaikista edellä mainituista asioista koituu selkeitä kustannussäästöjä.



Kuvio 7. Tuotannon mittauksen automatisoinnin edut.

Mikäli rungoissa tai puomeissa on virheitä etenkin mittojen osalta, kriittisissä kohdissa Mapvision Quality gate laitteistolla havaitaan ne kaikki hyvissä ajoin. Laitteistolla voidaan havaita myös osapuutteita ja hitsien puuttumisia kriittisiltä kohdilta. Kaikki nämä edellä mainitut virhemahdollisuudet voidaan havaita, ennen kuin runko menee koneistukseen ja jatkaa matkaansa kokoonpanoon. Nykytilassa kaikkia virheitä ei kyetä havaitsemaan, jolloin lisäkustannuksia tulee virheellisistä kappaleista. Mittaamalla 100 % kaikista tuotteista saadaan kaikki virheelliset rungot ja puomit havaittua hyvissä ajoin. Tästä on vaikutuksia aina asiakkaalle saakka, sillä on mahdollista, että virheellinen tuote kuluu nopeammin tai hajoaa ennen aikojaan. Jos esimerkiksi runko menee virheellisenä koneistukseen ja vasta kokoonpano vaiheessa havaitaan, etteivät osat sovi paikoilleen, on tällaisien virheiden korjaaminen jälkikäteen kallista. Lisäksi, vaikka rungon mittavirhe havaittaisiin jo koneistusvaiheessa, on siihen mennessä tehty paljon turhaa esivalmistelua, joten siitäkin tulee lisäkustannuksia. Mittaamalla 100 % tuotteista voidaan vähentää muun muassa edellä mainittuja tuotannonhäiriöitä, jolloin

saavutetaan kustannussäästöjä. Lisäksi tuotteiden takuukustannuksissakin tapahtuu säästöä. Mittavirheistä johtuvia takuukustannuksia on kuitenkin vaikea selvittää.

Automatisoimalla mittaus ja mittaamalla 100 %:sesti kaikki kappaleet, menee ennalta ehkäiseviin kustannuksiin rahaa laitteiston, koulutuksen ja muiden siihen liittyvien osioiden toteuttamiseen. Kyseinen Mapvisionin mittauslaitteisto maksaa noin 400 000-500 000 euroa. Vuodessa tulisi lisäksi kalibroinneista, ylläpidosta ja laitteen valvonnasta noin 12 000 euroa lisäkustannuksia. Uusien runkomallien ohjelmointi quality gate -laitteistoon tulee maksamaan karkeasti 1000 euroa per uusi mittausohjelma. Mittausohjelmat tekee Mapvison Oy, jolle lähetetään 3D-kuva mitattavasta tuotteesta. Kaikki ohjelmoinnit voidaan tehdä etänä. Tulevaisuudessa Mapvisionilla on suunnitteilla ohjelmisto, jolla mittauksen ohjelmointi voidaan tehdä itse.

Nykytilassa pitäisi virhekustannukset laskea, kuinka paljon kustannuksia aiheutuu virheellisistä kappaleista ja niiden korjauksesta. Hankittaessa automatisoitu järjestelmä, sillä voidaan seurata kattavasti millainen valmistuksen tarkkuus on ja jatkuvalla seurannalla valmistuksen ongelmakohdatkin tulevat esille nopeasti ja kattavasti.

## **9 Mittauksen tarkkuuden parantaminen**

Mittauksen tarkkuus ja mittausepävarmuus eivät parane konepajaolosuhteissa tarkemmilla mittausvälineillä, sillä mittavaihteluun vaikuttaa niin monta ulkoista tekijää. Mikäli mittaustarkkuutta halutaan parantaa, on luotava sellaiset olosuhteet, joiden vaikutus mittaukseen on mahdollisimman pieni tai on hankittava mittaväline, joka osaa huomioida mittauksissaan ulkoiset muuttujat. Ratkaisuna olisi rakentaa mittaushuone, jossa lämpötila, kosteus ja muut ulkoiset muuttujat saadaan eliminoitua mahdollisimman pieniksi. Lisäksi hankittaisiin mittausväline, joka eliminoisi mittaajasta aiheutuvan mittausepävarmuuden pois mahdollisimman hyvin.

John Deere Forestry Oy:llä on olemassa standardin mukaiset tilat kalibrointiin, jossa kosteus, lämpötila ja puhtaus ovat stabiileja. Perusteltua olisi rakentaa yhteiset tilat, jossa suoritettaisiin mittauslaitteiden kalibroinnit ja tarkkojen mittausten suorittaminen. Kyseiseen tilaan voidaan hankkia erittäin tarkka portaalkoordinaattimittauskone, jonka mittaustarkkuus vaatii kyseiset stabiilit tilat. Ensisijaisena hyötynä näistä tiloista olisi kappaleiden mittauksen mittausepävarmuuden eliminointi minimiin. Muutenkin mittaukset olisi parempi suorittaa mittaajan kannalta rauhallisessa ympäristössä, jossa voidaan keskittyä ainoastaan itse mittaukseen. Tuotannossa tehtävissä mittauksissa tilat ovat rajalliset, mittausasennot eivät ole optimaaliset ja muutenkin ympäristö on häiriöaltis sekä merkittävämpänä mittausepävarmuuden suuruus, vaikuttavat mittaukseen. Mikäli mittavälineiden kalibrointi tapahtuisi samoissa tiloissa, voisi mittavälineiden kalibroija osallistua päivittäiseen kappaleiden mittaamiseen.

Portaalkoordinaattimittauskoneella ja mittaushuoneella saavutettaisiin noin 0,003 mm:n tarkkuus. ATOS Triple Scan II-3D-skannerilla toimittajan mukaan päästäisiin myös lähestulkoon samoihin tarkkuuksiin mittahuoneolosuhteissa. Mittaushuoneella saavutettava hyöty olisi edellisessä kappaleessa mainittujen asioiden lisäksi koneistettujen pintojen ja reikien tarkka mittaaminen. Tätä kautta koneistusprosessia voidaan säätää paremmin, kun saadaan mittaustuloksia, joiden vertailu on luotettavaa.

Portaalkoordinaattimittauskone on erittäin kallis investointi. Pelkkä laitteisto maksaa keskimäärin 500 000 euroa. Lisäksi laitteiston vaatiman ympäristön rakentaminen, jonka toimittaja tai standardi yleensä vaatii, maksaa myös erittäin paljon. Kokonaiskustannukset tällaiselle investoinnille ovat karkeasti arvioituna ainakin 1,5 miljoonaa euroa. Tätä investointia ei suoraan voida perustella saavutettavilla säästöillä, vaan on katsottava kokonaishyötyä, jota koneella saavutetaan. On otettava lisäksi huomioon muun muassa koulutuksen tarve ja tuotteiden kiinnityksen suunnittelu.

Portaalkoorinaamittauskoneella mittaukset saadaan suoritettu melko nopeasti. Tämä vaatii kuitenkin jokaiselle rungolle tehtävän mittausohjelman, jonka tekemiseen menee paljon aikaa. Kun ohjelma on kerran tehty, sitä ei tarvitse samalle kappaleelle tehdä enää uudestaan, vaan kappale voidaan mitata automatisoidusti. Saatu mittatieto on luettelomuodossa, jolloin sen kattava analysointi vie paljon aikaa. Mikäli

Portaalikoordinaattimittauskoneessa mittapäänä olisi skanneri, tuloksien analysointi CAD-mallin avulla olisi nopeaa ja monipuolisempaa.

## **10 Mittausstrategian vaiheet**

### **10.1 Strategian vaihe 1: Mittauksen nykytilan parantaminen**

Mittausstrategian ensimmäinen vaihe on ajallisesti 1–2 vuotta nykyhetkestä. Tänä aikana tehdään käsimittausvälineille gage r&r-analyysit, jota kautta saadaan tietoon nykyisen mittausprosessin riittävyys. Tämä voidaan jatkossa ottaa huomioon hankittaessa uusia mittausvälineitä ja kehitettäessä mittausta.

Tuotannosta aletaan kerätä laajemmin tietoa valmistuksessa tapahtuvien virheiden kustannuksista. Tietoa tulee kerätä etenkin runkojen ja puomien mittaheittojen aiheuttamista virheistä ja tuotannonhäiriöistä. Tätä kautta saadaan laskettua, kuinka paljon valmistuksessa aiheutuu ylimääräisiä kuluja, mikä johtuu muun muassa siitä, että kaikkia runkoja ja puomeja ei kyetä mittaamaan ennen koneistusta. Näin voidaan tulevaisuudessa arvioida mittauksen automatisoinnin kannattavuutta.

Ensimmäisessä vaiheessa hankitaan ATOS Triple Scan II-3D-skanneri. Tämä kyseinen mittausväline sopii erityisen hyvin vastaanottotarkastukseen ja runkojen sekä puomien mittaukseen. Kyseisellä laitteistolla vastaanottotarkastus voidaan suorittaa nopeasti ja vastaanottotarkastukseen kyetään ottamaan mukaan useita eri tarkastuskohteita. Vastaanottotarkastus on tällä laitteistolla mahdollista automatisoida myös kokonaan.

Runkoja ja puomeja saadaan tällä laitteistolla mitattua laajemmin, sillä tuotteet saadaan mitattua kauttaaltaan. Tuotteista saaduilla mittaustuloksilla voidaan valmistusta säätää paremmin. Koska mitattuja osia verrataan CAD-malliin ja mittaheitot tulevat esille värieroina. Tämä antaa paljon uutta tietoa tuotteiden mittatarkkuudesta ja etenkin uusien tuotteiden valmistustarkkuuden säätö saadaan tehtyä kattavammin. Tätä kautta päästään haluttuun valmistustarkkuuteen nopeammin. Hitsausprosessissa aiheutuvat muodonmuutokset kyetään selvittämään laajasti käyttäen skannaavaa menetelmää, jolloin muodonmuutosten hallinta on helpompaa.



## **10.2 Strategian vaihe 2: Tuotannonmittauksen automatisointi**

Mittausstrategian toinen vaihe toteutetaan 2–3 vuoden päästä nykyhetkestä. Tässä vaiheessa hankitaan tuotantoon Mapvisionin Quality gate 6200 sarjan automatisoitumittausjärjestelmä. Tällä laitteistolla tuotannonmittaus saadaan automatisoitua täysin, jolloin yrityksen mittaushenkilön resurssit voidaan sijoittaa muualle mittaukseen. Mittauslaitteisto sijoitetaan ennen koneistusta, jossa mitataan 100-prosenttisesti kaikki rungot ja puomit. Laitteistoa voidaan käyttää hyödyksi myös uusien runko- ja puomimallien valmistustarkkuuden säätämässä, koska sillä kyetään mittaamaan kaikki esisarjavaiheen tuotteet. Tätä kautta valmistustarkkuuden säätäminen nopeutuu huomattavasti. Vaiheessa yksi on alettu laskea valmistuksen häiriöistä aiheutuvia kuluja laajemmin ja tätä kautta tiedetään mittauksista automatisoitaessa saatavat säästöt ja näin ollen voidaan laskea onko automatisointi kannattavaa.

## **10.3 Strategian vaihe 3: Mittaustarkkuuden merkittävä parantaminen**

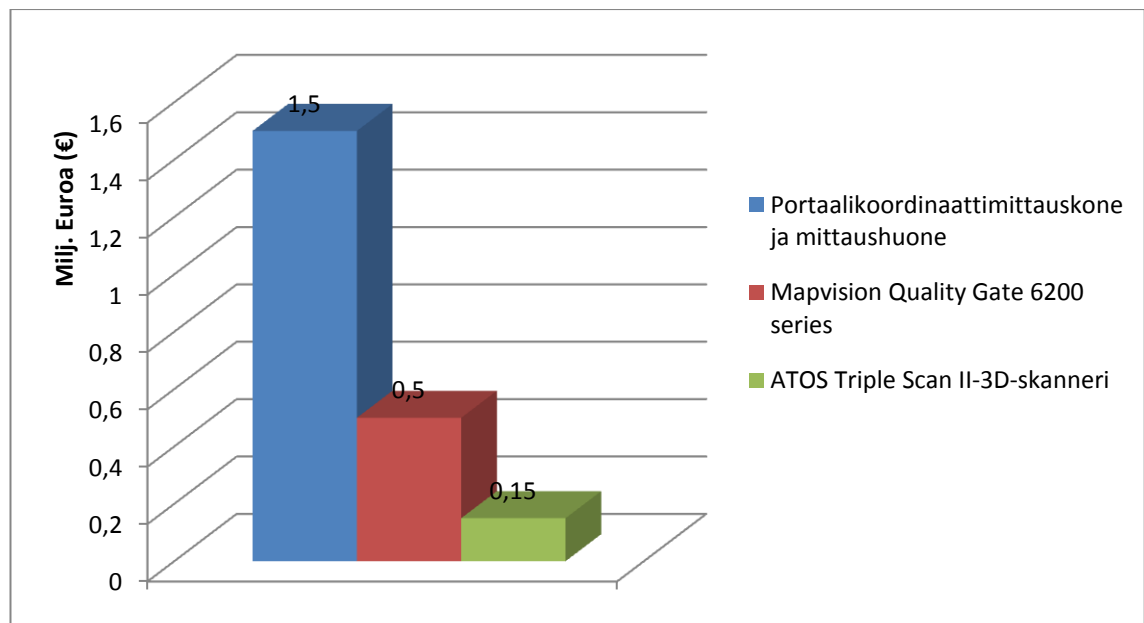
Mittausstrategian kolmas vaihe toteutetaan 3–5 vuoden kuluttua nykyhetkestä. Vaiheessa kolme rakennetaan mittaushuone. Mittaushuoneeseen sijoitetaan portaali-koordinaattimittauskone ja mittavälineiden kalibrointi tai vastaavasti sovelletaan, jo olemassa olevaa mittauslaitteistoa tilan käyttöön. Tilassa lämpötilan ja kosteuden tulee olla vakioita, jolloin ulkopuolisista muuttujista aiheutuva mittausepävarmuus saadaan minimointia ja näin ollen mittaustarkkuutta parannettua merkittävästi. Konepajaolosuhteissa päästään sadasosamillien tarkkuuteen, mutta mittaushuoneessa päästään portaali-koordinaattimittauskoneella millin tuhannesosien tarkkuuteen. Tämä luo edellytykset etenkin koneistettujen kohteiden tarkkaan mittaamiseen ja muiden mittausvälineiden referenssimittojen määrittämiselle.

## **10.4 Mittausstrategian vaiheiden yhteenveto**

Mittausstrategia jaetaan ajallisesti kolmeen eri vaiheeseen. Jokaisessa vaiheessa hankitaan uusia mittausvälineitä ja tätä kautta parannetaan yrityksen mittauksen monipuolisuutta, mittausvolyymiä ja mittaustarkkuutta.

	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3
<b>Aika (vuosina)</b>	2013 - 2015	2015 - 2016	2016 - 2019
<b>Kustannukset (€)</b>	150 000	500 000	1 500 000
<b>Mittaustarkkuus (mm)</b>	0,02	0,02	0,005
<b>Hitsattujen rakenteiden mittausvolyymi (%)</b>	10	100	100

Taulukko 1. Mittausstrategian vaiheiden kustannukset, mitaustarkkuuden paraneminen ja mittausvolyymiin lisäys.



Kuvio 8. Mittauslaitteiden kokonaiskustannuksista.

Ensimmäisessä vaiheessa hankittu mittausväline kustantaa noin 150 000 euroa ja sillä päästään konepajaolosuhteissa 0,02 mm:n tarkkuuteen. Kyseisellä hankinnalla yritys saa monipuolisuutta valmistuksessa valmistettavien osien mittaukseen ja laitteisto mahdollistaa myös vastaanottotarkastuksen aloittamisen suuremmalla otannalla. Toisessa vaiheessa tuotannonmittaus automatisoidaan, joka on nykypäivänä valmistavassa teollisuudessa välttämätöntä kehityksen ja kustannussäästöjen kannalta. Tämä kyseinen vaihe kustantaa noin 500 000 euroa, mutta siitä saatavalla hyödyllä voidaan vähentää kokonaiskustannuksia huomattavasti sekä jakaa mittausresursseja muualle. Kyseisellä laitteistolla päästään 0,02 mm:n mitaustarkkuuteen, joka on täysin riittävä mitattaville hitsatuille rakenteille. Kolmannessa vaiheessa yrityksen mittauksen tarkkuutta parannetaan merkittävästi. Vaihe kustantaa noin 1,5 miljoonaa euroa. Itse portaalikoordinaattimittauskone maksaa noin 500 000 euroa, mutta sille tulee rakentaa

optimaaliset mittaolosuhteet eli tässä tapauksessa mittaushuone. Mittaushuoneesta tulee olemaan hyötyä muihinkin yrityksen tekemiin mittauksiin, sillä se on ainut keino vähentää ulkopuolisista muuttujista aiheutuvaa mittausepävarmuutta. Tämän kyseisen vaiheen jälkeen päästään 0,003 mm:n mittaustarkkuuteen. Mittaushuoneen yhteyteen voidaan sijoittaa muun muassa mittavälineiden kalibrointi.

## 11 Yhteenveto

Työssä tutkittiin erilaisia mittauslaitesovelluksia ja niiden soveltuvuutta toimeksiantajan käyttöön. Työssä käsiteltiin laajasti myös mittaukseen vaikuttavia tekijöitä sekä kuinka mittaamisella voidaan vaikuttaa laatu- ja kustannuksiin. Tutkimusten perusteella laadittiin mittaussuunnitelma, jossa mittaussuunnitelmat on jaksotettu tuleville vuosille. Työssä käytiin läpi kunkin mittauslaitesovelluksen tarkkuudet, kustannukset, henkilöstön tarve ja muita hankitaan ja käyttöön vaikuttavia tekijöitä.

Työssä kävi ilmi, kuinka mittaamiseen vaikuttaa erittäin paljon erilaisia epävarmuustekijöitä. Näitä tekijöitä ei aina osata ottaa huomioon mittauksia suoritettaessa ja uusia mittausvälineitä hankittaessa tarpeeksi hyvin. Työssä havaittiin kuinka tarkkoihin mittauksiin ei päästä pelkästään investoimalla tarkempiin mittausvälineisiin vaan on otettava huomioon etenkin ympäristöstä aiheutuvat mittausepävarmuustekijät. Olosuhteiden stabilointi on ainut keino saada nämä muuttujat minimoitua ja näin ollen mittaustarkkuutta voidaan parantaa.

Nykyään etenkin tuotannonmittaus pyritään automatisoimaan. Työssä käsiteltiin erilaisia menetelmiä ja niiden käytännön hyötyjä, mikäli mittaus halutaan automatisoida. Tuotannon mittauksen automatisoinnilla saavutetaan merkittävää hyötyä laatu- ja kustannuksiin ja mittaukseen käytettävien henkilöstöresurssien sijoittamiseen. Ennen mahdollista tuotannonmittauksen automatisointia tulee laskea kustannuksia, joita mittaamatta jättäminen aiheuttaa. Näiden kustannuksien tarkka laskeminen on haastavaa, mutta se on ainut tapa saada laskettua automatisoinnin konkreettista hyötyä. Automatisoitumittaus on eniten kehittyvä mittaustapa, johon tulee uusia sovelluksia jatkuvasti. Mittauslaitetta hankittaessa on otettava huomioon laitteistojen päivitys

mahdollisuudet ja niiden monipuolisuus. Mikäli toimeksiantajan tuotannonmittaus halutaan automatisoida, antaa työ siihen hyvät lähtökohdat. Mittausstrategia antaa osviittaa, kuinka paljon automatisointi tulee kustantamaan, millaisia hyötyjä automatisoinnilla voidaan saavuttaa sekä millaisia laitteistoja automatisointiin on olemassa. Työssä ei kuitenkaan käsitelty tarkasti, kuinka automatisointi tulee suorittaa käytännössä vaan tuotiin esille erilaisia automatisointi vaihtoehtoja, joiden perusteella toimeksiantaja voi tehdä alustavia johtopäätöksiä automatisointiin ryhtyessään. Toimeksiantaja voi tulevaisuudessa teettää esimerkiksi opinnäytetyön, joka käsittelee pelkästään tuotannonmittauksen automatisointia ja siihen liittyviä asioita. Tämän työn perusteella saadaan hyvät lähtökohdat edellä mainittua opinnäytetyötä tehdessä ja ylipäätään mittausta kehitettäessä.

Opinnäytetyössä päästiin sille asetettuihin tavoitteisiin. Työssä saatiin tutkittua paljon erilaisia mittausmenetelmiä ja niiden vaikutuksia toimeksiantajan käytössä. Tutkimusaiheen laajuudesta johtuen työssä ei kyetty tutkimaan mittauslaitteiden ja mittausresurssien soveltamista käytännössä kovinkaan tarkasti. Etenkin mittausstrategian osiot kaksi ja kolme ovat lähinnä suuntaa antavia. Osiot antavat tietoa kustannuksista, mittaustarkkuudesta ja mittauslaitteistoista, mikäli mittaus halutaan automatisoida tai mittaustarkkuutta merkittävästi parantaa. Osiot eivät myöskään sovelta uusia mittauslaitteiden hankintoja nykyisten jo olemassa olevien mittauslaitteiden ja mittausresurssien kanssa, vaan kertovat suoraan mitä kyseisillä uusilla mittauslaitteilla saavutetaan. Tulevaisuudessa toimeksiantajalle voidaan tehdä esimerkiksi opinnäytetyöt jokaisesta mittausstrategian eri osiosta, joissa tutkitaan ja sovelletaan tarkemmin mittauksen automatisointia ja mittaustarkkuuden parantamista käytännössä. Opinnäytetyöt voisivat tutkia suoraan, kuinka tiettyä yksittäistä mittauslaitetta tulisi hyödyntää toimeksiantajan käytössä.

## Lähteet

- Aalto, T. 2010. Automaattinen kalibrointilaite. Metropolia ammattikorkeakoulu. Automaatiotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
- Andersson, P.H., Tikka, H. 1997. Mittaus- ja laatutekniikka. Porvoo: Wsoy.
- Faro. Faro arm-koordinaattimittauslaite. 2013.  
<http://www.faro.com/products/metrology>. 15.2.2013.
- GOM. ATOS Triple Scan –Revolutionary scanning technique. 2013.  
Verkkodokumentti. <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/atos-triple-scan.html>. 8.3.2013.
- GOOD3. Koordinaattimittauskoneet. 2013. <http://www.coord3-cmm.com/gantry-coordinate-measuring-machines/>. 8.3.2013.
- John Deere Forestry Oy:n kotisivut. 2013.  
[http://www.deere.fi/wps/dcom/fi\\_FI/our\\_company/about\\_us/about\\_us.page?](http://www.deere.fi/wps/dcom/fi_FI/our_company/about_us/about_us.page?) 6.12.2013.
- Laatuakatemia. Laatutyökalut. 2010. <http://www.veini.net/iso.html>. 12.2.2013.
- Lecklin, O. 2006. Laatu yrityksen menestystekijänä. Hämeenlinna: Karisto Oy.
- Mapvision Oy. 2013. Mapvison Quality Gate. Powerpoint-esitys.
- MET-julkaisu. 1987. Konepajan mittausmekaniikka. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus Oy.
- Tekes. 2013. Optinen laadunvalvonta autotehtaiden tuotantolinjoille.  
<http://www.tekes.fi/fi/community/a/403/b/647?name=Optinen+laadunvalvonta+autotehtaiden+tuotantolinjoille>. 3.3.2013
- Tikka, H. 2007. Koordinaattimittaus. Tampere: Tampereen Yliopistopaino Oy,

## **Liite 1**

### **Kysymyslomake bechmarkingiin ja toimittaja vierailuihin**

#### **Mittauskone**

Minkä tyyppinen mittauskone on käytössä?

Millaisille kappaleille soveltuu/ei sovellu?

Kyseisen mittauskoneen edut/huonot puolet?

Millainen mittatarkkuus/mittaepävarmuus?

Millaiset resurssit käyttö vaatii?

Millaiset tietotaidot koneen käyttö vaatii?

Millaisia investointeja koneen hankinta vaatii? (koneen lisäksi)

Kuinka paljon koneen hankinta maksaa? (noin)

#### **Mittaahuone**

Yleistä tietoa mittahuoneesta?

Onko käytetty jotain standardia?

Mitä kaikkea mittahuoneinvestointi vaatii?

Mittaahuoneesta saatava käytännön hyöty?

Millaisia resursseja mittahuoneen käyttö vaatii?

Kuinka paljon mittahuoneinvestointi tulee maksamaan? (noin)