

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Konetekniikan koulutus

Dominique Eichelberger

HARVESTERIN OSAKOKOONPANON VAIHTELUN SEURANTA

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2021



OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2021
Konetekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Dominique Eichelberger

Nimeke
Harvesterin osakokoonpanon vaihtelun seuranta

Toimeksiantaja
John Deere Forestry Oy

Tiivistelmä

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin metsäkoneen valmistusprosessissa tapahtuvaa vaihtelua ja prosessin suorituskykyä. Tarkastus kohdistettiin koskemaan harvesterin takarungon hitsausprosessin kahta ensimmäistä silloitushitsauspistettä.

Opinnäytetyötä lähdettiin tekemään PDCA-syklin mukaisesti laatimalla ensin projektin suunnitelma. Suunnitelman perusteella toteutettiin hitsauskiinnittimien tarkastus, säätö ja tuotteiden mittaus koordinaattimittauskoneen avulla. Tuotteista mitattiin seitsemän kappaleen otannat, joiden perusteella laadittiin mittausohjelmiston omalla SPC-työkalulla raportit. Raporteista saatiin selvitettyä mitattujen piirteiden keskiarvoiset mittapoikkeamat ja vaihtelut sekä prosessin suorituskykyluvut C_p ja C_{pk} . Työn edetessä, tuotteiden mittausprosessin aikana, säädettiin hitsauskiinnittämiä saatujen mittaustulosten perusteella ja seurattiin muutosten vaikutusta hitsattavien osien istuvuuteen kokoonpanoprosessissa.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin määritettyä kahden ensimmäisen työvaiheen keskimääriset poikkeamat sekä vaihtelut. Lisäksi selvitettiin prosessin nykyiset suorituskykyluvut ja mahdollisesti lisäkehitystä vaativat kohteet.

Kieli
Suomi

Sivuja 49
Liitteet 1
Liitesivumäärä 1

Asiasanat

statistinen prosessin ohjaus, silloitushitsaus, 3d-mittaus, vaihtelu,



THESIS
April 2021
Degree Programme in Mechanical Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author
Dominique Eichelberger

Title
Inspection of the Variation in Harvester Frame Assembly

Commissioned by
John Deere Forestry Oy

Abstract

In this thesis the goal was to clarify part variation and process capability during tack welding in forestry machine manufacturing process. The inspection process was made on harvester rear frame and the first two tack welding places of its manufacturing process.

The inspection process was made by using PDCA-cycle as a guideline. The project started with planning and followed up with welding fixture inspection and adjustment. A total of seven frames were measured with a coordinate measuring machine and the measuring results were analyzed with the measuring software's SPC-tools. From the gathered data we were able to determine the average part dislocation part variation and process capability values C_p and C_{pk} . During the project, welding fixtures were re-adjusted based on the gathered data. The effect of change was monitored visually and by measuring the regarded part assembly.

As a result of this work, average dislocation, part variation and process capability were determined for the first two tack welding places of the manufacturing process. The inspection process also revealed future targets for development and improvement.

Language

Finnish

Pages 49

Appendices 1

Pages of Appendices 1

Keywords

statistical process control, tac welding, 3d-measurement, part variation

Sisältö

1	Johdanto	5
2	John Deere	5
3	Teoria.....	6
3.1	PDCA.....	6
3.1.1	Plan - suunnittele	7
3.1.2	Do - toteuta	8
3.1.3	Check - tarkista.....	8
3.1.4	Act - toimi.....	8
3.2	SPC – statistinen prosessin valvonta.....	9
3.2.1	Valvontakortti	10
3.2.2	I-MR-valvontakortti.....	12
3.2.3	Toleranssirajat, USL, LSL	13
3.2.4	Suorituskykyluku, C_p ja C_{pk}	14
3.2.5	Prosessin vaihtelu, jakauma ja hajonta	14
3.2.6	Tietotekniikka ja SPC	16
3.3	Hitsauskiinnitin	17
3.4	Koordinaattimittaus.....	18
3.4.1	Nivelvarsikoordinaattimittauskoneen toimintaperiaate	18
3.4.2	Koordinaattimittaus John Deerellä.....	19
3.5	Mittausepävarmuus	20
3.6	Yleiskuvaus osavalmistuksen prosessista	21
4	Toteutus	22
4.1	Plan - Lähtökohdat	22
4.2	Plan - Suunnitelma	23
4.3	Do - Mittausepävarmuuden määrittäminen nivelvarsimittakoneelle.....	24
4.4	Do - Hitsauskiinnittimen tarkastus.....	25
4.5	Do - Hitsauskiinnittimen mittaus	25
4.5.1	Valmistussolu 1.1 ja 1.2	26
4.5.2	Valmistussolu 2.....	28
4.5.3	Valmistussolu 2:n hitsauskiinnitin	28
4.5.4	Apukiinnitin 1.....	29
4.5.5	Apukiinnitin 2.....	29
4.6	Do - Tuotteen mittaus	30
4.6.1	Tuotteet 1.1 ja 1.2	30
4.6.2	Tuote 2.....	31
5	Mittaustulokset	32
5.1	Mittaus ja analysointi	32
5.2	Check – Tuote 1.1	33
5.3	Check – Tuote 1.2.....	33
5.4	Tuotteiden 1.1 ja 1.2 yhteiset keskiarvot.....	34
5.5	Check - Tuote 2.....	35
5.5.1	Yläpinta hitsauksen sovituksella.....	35
5.5.2	Yläpinta koneistuksen sovituksella	36
5.5.3	Alapinta hitsauksen sovituksella.....	37
5.5.4	Alapinta koneistuksen sovituksella	39
5.5.5	Leveys ja symmetria	40
5.6	Check - Muutokset hitsauskiinnittimeen.....	41
6	Yhteenveto mittaustuloksista	42
6.1	Act – Tuote 1.1 ja 1.2	42
6.2	Act – Tuote 2.....	43
7	Pohdinta.....	46
	Lähteet	49

1 Johdanto

Opinnäytetyöni toimeksiannon sain John Deere Forestry Oy:ltä. Toimeksiantajalla oli tarve selvittää metsäkoneen rungon osakokoonpanojen pintojen vaihtelu kasaus- ja hitsausprosessin aikana ja selvittää prosessin nykyinen suorituskyky. Tarkastelusta saatujen tulosten perusteella oli mahdollista kehittää prosessia vastaamaan tulevaisuuden haasteita. Prosessin läpiviemiseksi sovellettiin PDCA-ongelmanratkaisun mallia. Prosessin suorituskyvyn ja vaihtelun määrittämiseen käytettiin SPC:n, statistisen prosessin valvonnan, työkaluja. Mittaukset suoritettiin nivelvarsikoordinaattimittakoneella, ja statistinen prosessin valvonta koordinaattimittakoneen mittausohjelmistoon integroidulla työkalulla.

Tarkastelun kohteeksi valittiin harvesterin takarunko, koska kyseisen mallin tuotantomäärät ovat runsaat. Tuotteeseen liittyviä kokoonpanoja oli hyvin saatavilla mittatarkastuksia varten ja lisäksi kyseisessä runkotyyppissä oli esiintynyt erinäisiä tuotannollisia haasteita valmistuksen ajan. Haluttiinkin selvittää, mistä nämä kyseiset haasteet mahdollisesti johtuivat.

2 John Deere

John Deere -yhtiö on Yhdysvalloissa vuonna 1837 perustettu maatalouden, nurmikonhoidon, maanrakennuksen ja metsänhoidon koneita valmistava yritys. John Deere toimii maailmanlaajuisesti ja sillä on toimipisteitä yli 40 maassa. Yhtiön palveluksessa työskentelee noin 70 000 työntekijää. (Deere 2021.)

Vuonna 2000 John Deere osti Joensuussa metsäkoneita valmistaneen Timberjack Oy:n, ja vuodesta 2006 asti metsäkoneita on valmistettu John Deeren nimellä. Tuotetarjoama koostuu pyöräalustaisista harvesterista ja kuormakoneista puun kaatoon ja kuljetukseen. John Deere Forestry Oy:n pääkonttori sijaitsee Tampereella ja tehdas Joensuussa. Tampereen pääkonttorilla toimii noin 250

työntekijää tuotekehityksen, tuotetestauksen sekä myynnin ja markkinoinnin saralla. Joensuussa työskentelee noin 430 työntekijää valmistuksessa, kokoonpanossa sekä testauksessa. (Deere 2021.)

3 Teoria

3.1 PDCA

PDCA on menetelmä ongelmanratkaisuun ja kehittämiseen. Lyhenne PDCA muodostuu toiminnan neljän eri osa-alueen alkukirjaimista:

Plan – suunnittele
Do – toteuta
Check – tarkastaminen
Act – käyttöönotto. (Kehmet 2021.)

PDCA-menetelmän sykli muodostuu edellä mainituista neljästä osa-alueesta, jotka seuraavat toisiaan. Ongelmanratkaisu alkaa suunnitelmalla, johon listataan eri toimenpiteitä, mitä ongelman ratkaisemiseksi tarvitaan. Suunnitelman jälkeen toteutetaan suunnitellut toimenpiteet. Toimenpiteiden jälkeen tarkastetaan toimien tulokset ja tehdään mahdollisia korjauksia ennen laajempaa käyttöönottoa. PDCA-sykliä kierretään toistuvasti siten, että jokainen kierros vie lähemmäksi asetettua tavoitetta. PDCA-menetelmä perustuu siis pieniin parannuksiin, joiden vaikutusta prosessiin seurataan ja tehdyistä muutoksista saatavalla informaatiolla edelleen kehitetään prosessia, kunnes lopputulos on halutulla tasolla. (Kehmet 2021.)

3.1.1 Plan - suunnittele

Suunnittele-vaihe koostuu käytännössä kolmesta eri vaiheesta:

1. Ongelman tunnistaminen.
2. Ongelman analysointi.
3. Kokeiluasetelman kehittäminen. (MCS 2021.)

Ongelman tunnistamisessa olisi hyvä kiinnittää huomiota kustannusten suuruuteen suhteessa ongelman kokoon nähden. Onko tarvetta lähteä selvittämään ongelman juurisyytä ja vaikutuksia tarkemmin, vai voidaanko ongelmasta aiheutunut virhe hyväksyä sellaisenaan? Mikäli ongelman selvitykselle on tarve, tulisi selvittää ongelman vaikutusalueet sekä korjaavien toimenpiteiden mahdolliset vaikutukset prosessiin. (MCS 2021.)

Ongelman analyysin osalta tärkeää on ymmärtää ongelman juurisyitä, eli perimmäinen aiheuttaja. Tämän takia onkin usein tarpeen selvittää jo olemassa oleva tiedon määrä ja tarvitaanko sitä mahdollisesti lisää. Ongelman analysoinnissa on hyvä myös haastatella henkilöitä, jotka ovat tietoisia asiasta ja joilla saattaa olla tarkempia tietoja aiheeseen liittyen. Kun on todettu, että tietoja on riittävästi ongelman ratkaisuun, on hyvä vielä selvittää ongelman taloudellisuutta sekä käytännöllisyyttä saatujen lisätietojen pohjalta. (MCS 2021.)

Vaihtoehtoisia ratkaisuja ongelman ratkaisemiseksi valitaan kokeiluasetelman kehittämisessä. Vaihe on erityisen tärkeä, mikäli ongelman ratkaisu vaatii kalliita investointeja. Koeasetelmalla voidaan karsia vaihtoehtoisia ratkaisuja ja päätyä käytännöllisyyden ja taloudellisuuden puolesta parhaimpaan ratkaisuun. Koeasetelman kehittämisessä tulee määrittää, kuka siitä on vastuussa ja ketkä siihen osallistuvat. On hyvä myös selvittää, mitkä ovat koeasetelman tulosodotukset, käytettävät resurssit sekä toteutettavat ratkaisut. (MCS 2021.)

3.1.2 Do - toteuta

Suunnitelman toteuta-vaiheessa testataan valitut ratkaisut käytännössä. Testaukset pienessä testiympäristössä ovat yleensä halvempia ja nopeampia toteuttaa kuin kokeilut varsinaisessa ympäristössä. (MCS 2021.)

Tehdyistä muutoksista olisi tässä vaiheessa hyvä kerätä mittaus- ja muita tietoja myöhemmän päätöksenteon tueksi. Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, olivatko muutokset haluttuja tai riittäviä, vai onko tarvetta lisämuutoksille. (MCS 2021.)

3.1.3 Check - tarkista

Tarkista-vaiheessa keskeisenä tehtävänä on todentaa, että toteuta-vaiheen muutokset ovat toimivia ja ne vastaavat asetettuja tavoitteita. On hyvä selvittää, saavutettiinkö muutoksella asetetut tavoitteet. Tähän vaikuttaa se, kuinka realistiset tavoitteet on asetettu toteuta-vaiheessa. On myös hyvä selvittää, mitkä asiat toimivat, mitkä eivät ja mitä opittiin testauksesta. Tarkista-vaiheessa tulisi selvittää, onko muutos johtanut parempaan lopputulokseen.

Vaikka tavoitteet olisikin saavutettu, eivät muutokset välttämättä johda parempaan lopputulokseen prosessin kannalta. Lopputulosten kannalta olisi hyvä selvittää, onko havaintojen tueksi tehty riittävästi kokeilua ja testausta, vai tuleeko sitä jatkaa. Mahdollisten lisäselvitysten jälkeen tulee tehdä uudelleenarvioinnit saatujen tulosten perusteella. Lopuksi on hyvä todentaa tehtyjen ratkaisujen taloudellisuus ja käytännöllisyys ja ovatko ne pysyneet edelleen toteutuskelpoisina. (MCS 2021)

3.1.4 Act - toimi

Kun muutoksella on saavutettu halutut lopputulokset koeasetelmassa, voidaan niitä soveltaa laajemmassa mittakaavassa toimi-vaiheessa. Mikäli käy niin, ettei

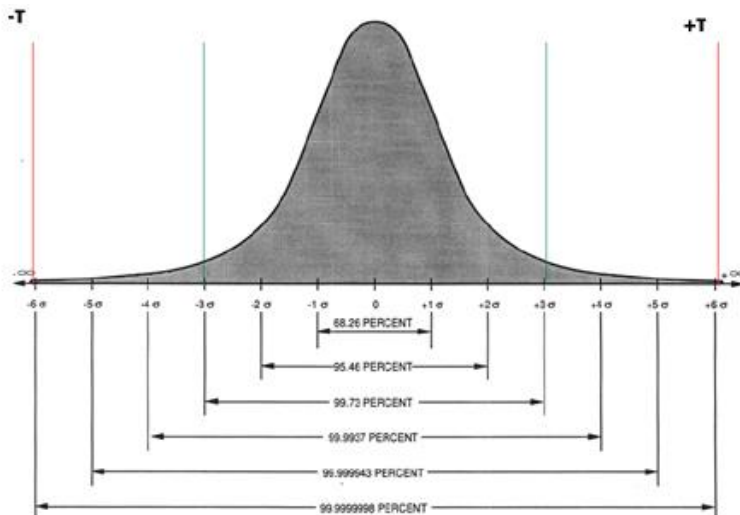
kokeilu anna positiivisia tuloksia, on tarpeen toteuttaa PDCA-sykli uudella suunnitelmalla. Tässä vaiheessa on tärkeää keskittyä seuraaviin aiheisiin, kuten resurssien uudelleenmäärittämiseen ja mahdollisen lisäosaamisen tarpeeseen, jotta parannus voidaan toteuttaa kokonaisuudessaan ja päästä toivottuun lopputulokseen. (MCS 2021.)

Toimi-vaiheessa tulee myös seurata muutoksen ylläpidettävyyttä ja selvittää kuinka vaikutuksia voidaan mitata ja seurata. Onnistuneen toimi-vaiheen jälkeen voidaan selvittää, onko muita aihealueita, joita voisi parantaa. Voidaan myös miettiä mahdollisten ratkaisujen toimivuutta ja hyötyjä muissa prosesseissa. (MCS 2021.)

3.2 SPC – statistinen prosessin valvonta

Walter A. Shewhart loi yleismaailmallisen teorian, jossa selitetään teollisuus- ja palveluprosesseissa oleva vaihtelu. Kyseinen teoria perustuu tilastollisiin menetelmiin ja niitä käytetään prosessin ohjaukseen. SPC eli Statistical Process Control tarkoittaa tilastollista prosessin valvontaa. SPC:llä on kaksi päätehtävää laadun ohjauksessa. Se kertoo, milloin prosessia tulee säätää tai korjata, jotta sen ennustettavuus säilyy. Lisäksi SPC:tä voidaan käyttää prosessin analysointiin ja parantamiseen. (Laatutieto 2021.)

Tutkittaessa laadunvalvonnan tuloksia tilastollisesta näkökulmasta ja voidaan havaita tulosten käyttäytyvän normaalijakauman mukaisesti (kuvio 1). Ongelmat prosessissa johtuivat useimmiten liian suuresta vaihtelusta. Prosessin säätäminen yksittäisten tulosten perusteella sai aikaan vain lisää vaihtelua. Toisaalta huonossakin prosessissa pystyi syntymään hyvä tuote, mutta se on normaalijakauman lakeja noudattava sattuma. Vastaavasti hyvässäkin prosessissa saattoi syntyä yllättäen normaalijakauman ylittävä huono tuote. Hyvän prosessin häiriöt johtuivatkin prosessin ulkopuolelta tulleesta häiriöstä ja se oli tunnistettavissa ja poistettavissa. Häiriöiden poiston jälkeen tilanne normalisoitui. (Salomäki 2003, 170.)

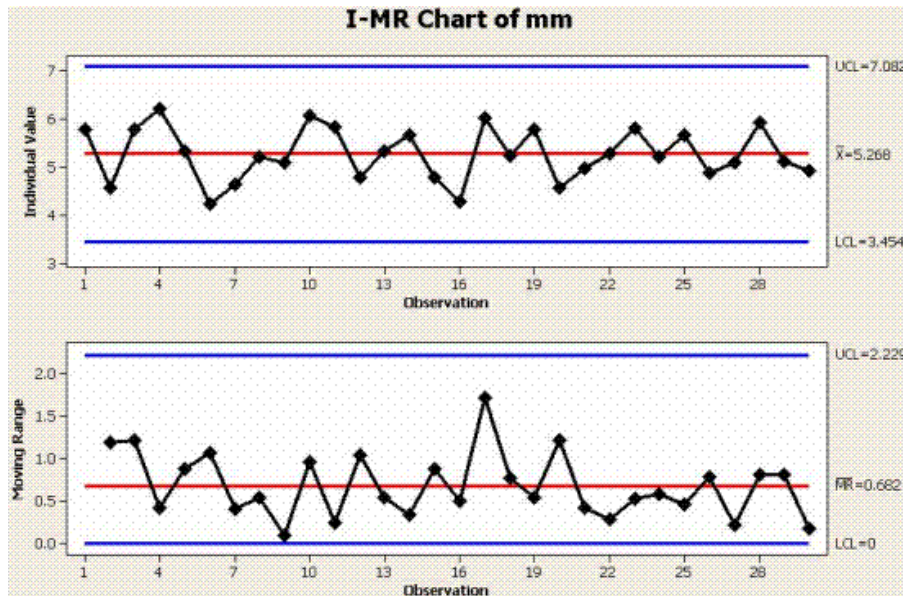


Kuvio 1. Normaalijakauma. (Six sigma 2021).

Shewhart laati ensimmäiset valvontakortit, joiden avulla hän todisti ongelmille olevan yleisiä ja erityisiä syitä. Huonoa prosessia oli vaikea kehittää, mikäli säättöjä tehtiin jokaisen virheellisen tuotteen perusteella. Prosessia tuli säätää vaihtelun keskiarvon mukaan, ja prosessin suorituskykyä mitata vaihtelun leveyden avulla. Prosessia tuli kehittää niin pitkään, että vaihtelu mahtui vaatimusten sisään. Kun prosessi oli riittävän suorituskykyinen, mahtui normaali vaihtelu prosessin vaatimukseen ja poikkeavat tapaukset johtuivat erityisistä. Selvittämällä nämä syyt ja poistamalla ne saatiin prosessi palautettua normaaliksi. (Salomäki 2003, 171.)

3.2.1 Valvontakortti

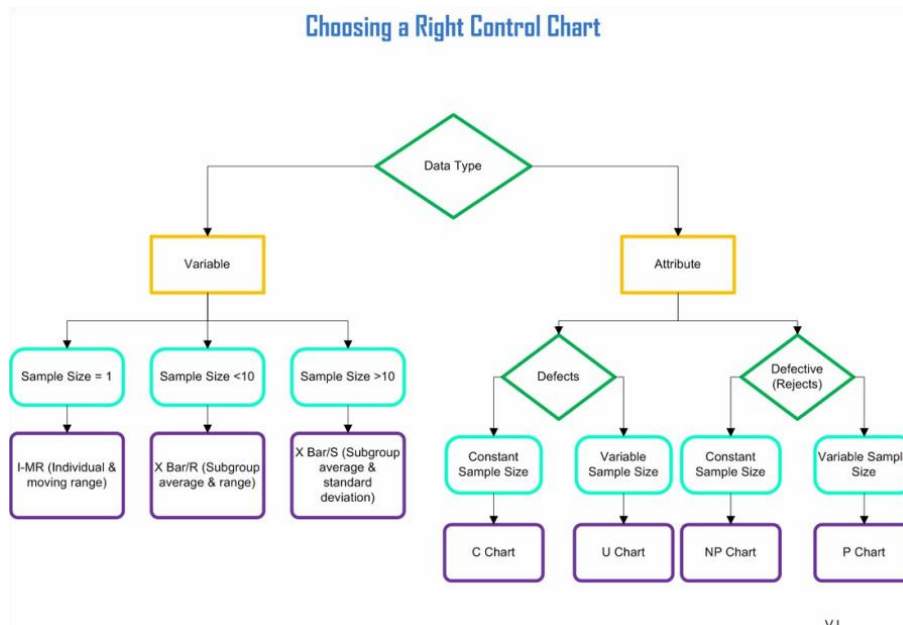
Valvontakortti on kortti mittaustuloksien kirjaamiseen. Kirjattuja tuloksia havainnollistaa graafinen kuvaaja (kuvio 2). Kuvion 2 esimerkissä on I-MR-kortti, joka koostuu kahdesta eri kuvaajasta. Ylempi kuvaaja, I-chart, näyttää yksittäisten mittausten tuloksen ja mittaustulosten keskiarvon. Alempi kuvaaja, MR-chart, näyttää perättäisten mittausten välisen vaihtelun sekä mittatulosten vaihtelun keskiarvon. Valvontakorttien avulla voidaan laskea myös prosessin tunnuslukuja. Nykyisin valvontakortit ovat useimmiten sähköisessä muodossa, koska niiden laatiminen taulukkolaskentaohjelmalla tai SPC-ohjelmalla on vaivatonta. (Salomäki 2003, 212–214.)



Kuvio 2. Esimerkki I-MR valvontakortista. (Six sigma material 2020).

Valvontakortti valitaan tilanteen mukaan. On olemassa raporttivalvontakortteja, joilla kerätään tietoja prosessin toteutumista. Säätovalvontakorteilla kuvataan mittaustuloksia ja keskiarvoja prosessista, ja niiden käyttötarkoitus on prosessin säätäminen kohti tavoitearvoa. Kokeiluvalvontakorteilla analysoidaan aineistoa, joka on koottu ennen ja jälkeen kokeen. Kortilla pyritään selvittämään kokeen vaikutukset prosessiin. Seurantavalvontakortteja käytetään usein kokeiluvalvontakortin kanssa rinnakkain antamaan lisätietoa muutoksesta. Jatkuvan parantamisen valvontakortit on suunniteltu pitkäaikaiseen käyttöön. Ne on suunniteltu prosessin tärkeimpien muuttujien seuraamiseen. (R. Salomäki 2003, 212–214.)

Muuttujakortteja käytetään mitattavan suureen analysointiin tuotteesta tai prosessista. Suure voi olla yksittäisen kappaleen mitta tai mikä tahansa mitattavissa oleva arvo, joka voi saada minkä tahansa arvon mittausalueen rajoissa. Muuttujakortteja on monia eri tyyppisiä, ja ne valitaan tapauskohtaisesti käyttötarkoituksen mukaan (kuvio 3). (R. Salomäki 2003, 212–214.)



Kuvio 3. Valvontakortin valinta. (Kuvio: Six sigma training 2021).

Muuttajakortin valintaan vaikuttava tekijä on mitattavan tuotteen eräkoko. Eräkoon ollessa 1, valitaan I-MR-kortti. Mikäli eräkoko on alle 10 kappaletta, valitaan \bar{x} /R-kortti ja eräkoon ylittäessä 10, valitaan \bar{x} /S-kortti. (R. Salomäki 2003, 212–214)

3.2.2 I-MR-valvontakortti

I-MR-kortti on Walter Shewhartin kehittämä valvontakortti jatkuvan mittaustiedon analysointiin. Korttia kutsutaan myös joskus Shewhart-kortiksi. Se koostuu kahdesta kuvaajasta, josta toinen kuvaaja, I-chart, kertoo yksittäisten (englanniksi individuals, I) mittaustulosten arvot ja niiden keskiarvon. MR-chart kuvaa vaihtelun määrää mittaustuloksissa. (What is six sigma 2019.)

Molempia kortteja tulisivin käyttää rinnakkain, jolloin vältetään virheellisiltä prosessin tulkinnoilta. I-kortilla pyritään seuraamaan prosessin trendiä ja siirtymää ajan saatossa. Tämä auttaa hahmottamaan, onko vaihteluun vaikuttava tekijä sisäinen vai ulkoinen tekijä. MR-kortilla taas pyritään seuraamaan prosessin vaihtelua. Korttia seuraamalla voidaan tutkia prosessin vakautta ja havaita erityisyyden vaikutukset prosessiin. (What is six sigma 2019.)

Vaihteluvälillä tarkoitetaan mittaustulosten suurimman ja pienimmän tuloksen välistä erotusta. Vaihteluväli voidaan laskea näyte-eräkohtaisesti (engl. *range*, R) erän suurimman ja pienimmän arvon erotuksena tai vaihtelua voidaan tarkastella liukuvana vaihteluvälinä (engl. *moving range*, MR), joka on itseisarvo näytteen ja edellisen näytteen erotuksesta tai itseisarvo näyte-erän keskiarvon ja edellisen näyte-erän keskiarvon erotuksesta. (R. Salomäki 2003, 180.)

3.2.3 Toleranssirajat, USL, LSL

Mitattavalle suurelle on määriteltäviä tietyt raja-arvot, jonka ylittävät tai alittavat tuotteet on hylättävä. Näitä rajoja kutsutaan toleranssirajoiksi. SPC:ssä näitä rajoja merkitään lyhenteillä USL (ylätoleranssiraja) ja LSL (alatoleranssiraja). Tuotteelle on mahdollista myös määrittää vain toinen raja, jolloin kyseessä on minimi- tai maksimiraja. (R. Salomäki 2003, 183.)

Tavoitearvo ja sen toleranssirajat saadaan useimmiten työkappaleen piirustuksesta suunnittelijan määrittelemänä. Piirustuksessa voi olla myös mittoja ilman toleranssiarvoa, jolloin raja-arvot valitaan työtapakohtaisista standardeista. Esimerkiksi hitsauksen standardista SFS-EN ISO 13920 saadaan määritykset hitsatun kappaleen pituus ja kulmamitoille, sekä muoto ja sijaintitoleranssit. (A. Pere 2012, 20–118.)

Tavoitearvo on lukuarvo, joka pääsääntöisesti sijaitsee toleranssirajojen keskellä. Mikäli käytössä on yksipuoleinen toleranssi, tavoitearvo sijaitsee mahdollisimman kaukana rajasta. Tavoitearvon asetteluun voivat vaikuttaa myös taloudelliset syyt, jolloin arvo on voitu asettaa mahdollisimman lähelle tai kauas toleranssirajasta. Tilastollisilla menetelmillä voidaan määrittää, kuinka lähelle prosessin toleranssirajaa voidaan turvallisesti ohjata. (R. Salomäki 2003, 184.)

3.2.4 Suorituskykyluku, C_p ja C_{pk}

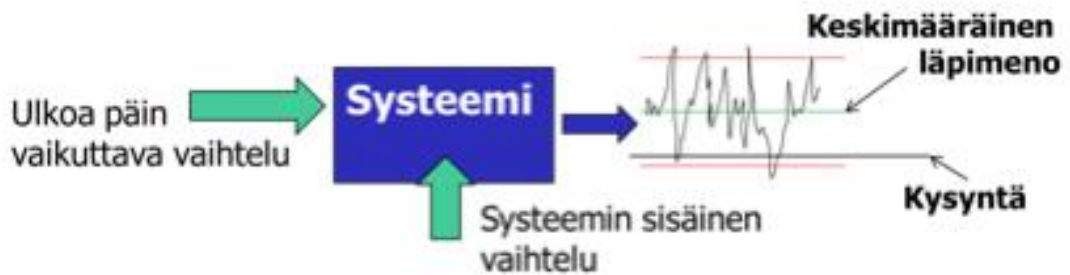
Suorituskykyluku on statistisen prosessin ohjauksen luku, joka kertoo, kuinka hyvin prosessilla on kyky tuottaa vaatimusten mukaisia tuotteita. Suorituskykyä mitatessa tarkastellaan tuloksia suhteessa vaatimukseen, eli toleranssiin (R. Salomäki 2003, 184). Keskeisiä suorituskykylukuja ovat C_p ja C_{pk} . Maksimisuorituskykyluku C_p kuvaa, mihin prosessi teoriassa pystyy suhteessa toleranssivaatimukseen, eli prosessin vaihtelua. Maksimisuorituskykyluku ei kuitenkaan ota kantaa, ovatko mittatulokset toleranssialueen sisällä. Suorituskykyluku C_{pk} ottaa huomioon myös prosessin vaihtelun, ja tämä kuvaakin mittatulosten keskiarvon sijainnin poikkeamaa toleranssialueen keskeltä, eli kuinka lähellä tavoitearvoa ollaan. (R. Salomäki 2003, 195–196.)

Prosessin kannalta tulisi pyrkiä C_p - ja C_{pk} -luvun osalta yli 1,33, jolloin prosessin vaihtelu on riittävän pientä ja mittaustulokset ovat riittävän lähellä toleranssialueen keskustaa. Mikäli C_{pk} on alle 1,00, prosessin tilanne on heikko ja tämä näkyy jatkuvina toleranssin ylityksinä. Suorituskykyluvun ollessa 1,00 ja 1,33 välillä, prosessin tilanne on huono ja pienikin muutos prosessiin voi johtaa toleranssin ylitykseen. C_{pk} :n ollessa välillä 1,33–1,50, prosessin tilanne on kohtuullinen ja se sallii pienet muutokset ilman toleranssien ylityksiä. Suorituskykyluvun ollessa yli 1,50, on kyseessä luotettava prosessi ja muutokset ovat havaittavissa herkästi. (R. Salomäki 2003, 197–198.)

3.2.5 Prosessin vaihtelu, jakauma ja hajonta

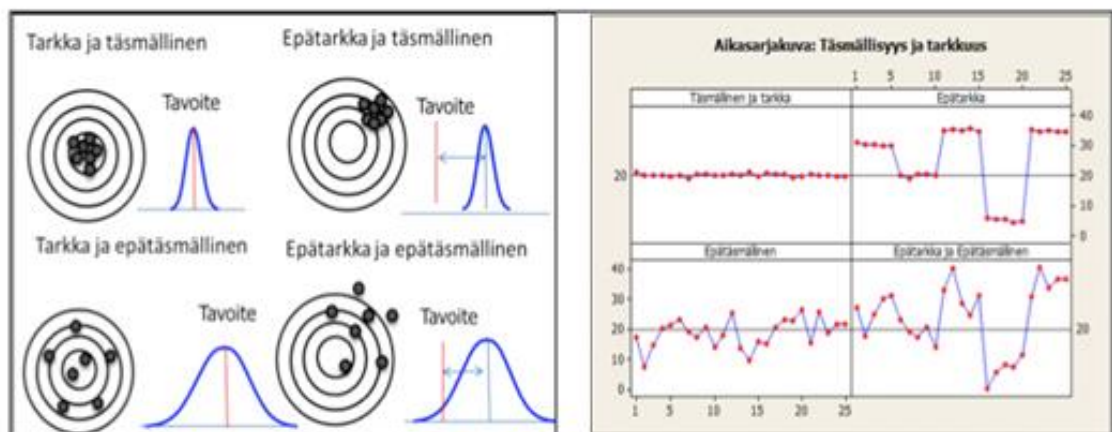
Prosessin vaihtelu, jakauma ja hajonta ovat statistisen prosessin ohjauksen tunnuslukuja, jotka saadaan selville mittaamalla prosessia. Saadut mittatulokset eivät koskaan ole samanlaisia, vaan ne jakaantuvat prosessin tavoitearvon ympärille. Nämä tunnusluvut määrittävätkin, kuinka mittaustulokset jakautuvat suhteessa tavoitearvoon. (R. Salomäki 2003, 185.)

Vaihtelun hallinta on keskeinen osa prosessin hallintaa. Vaihtelua esiintyy kaikkialla ja sitä tulee prosessiin systeemin ulkoa ja sisältä (kuvio 4). Vaihtelu vaikuttaa tuotantosysteemin suorituskykyyn siten, että mitä suurempi vaihtelu, sitä pienempi suorituskyky. Vaihtelua pienentämällä voidaan kasvattaa tuotantosysteemin suorituskykyä. (Six sigma 2021.)



Kuvio 4. Vaihtelu prosessissa. (Six sigma 2021).

Vaihtelun pienentämiseen on olemassa erinäisiä menetelmiä. Jotta vaihtelua voidaan pienentää, vaatii se jatkuvaa parantamista käyttäen apuna tilastollisia ja ei-tilastollisia menetelmiä ja työkaluja. Vaihtelu voidaan jakaa kahteen eri luokkaan, jotka ovat täsmällisyys ja tarkkuus (kuvio 5). Tarkkuus tarkoittaa ryhmien välistä keskiarvoista poikkeamaa ja täsmällisyys vastaavasti ryhmien sisäistä poikkeamaa. Tavoitteena on saavuttaa täsmällinen ja tarkka prosessi, jolloin suorituskyky on paras. (Six sigma 2021.)



Kuvio 5. Vaihtelun luokitus. (Six sigma 2020).

Hitsausprosessissa vaihtelua voisi kuvata esimerkiksi valmiiden kappaleiden mittavaihteluna. Tuotteen mittaan vaikuttavat sisäisinä tekijöinä hitsauskiinnittimen mitat ja kunto ja ulkoisina tekijöinä hitsattavien osien mitta- ja muotovaihtelut sekä hitsarin kokemus ja ammattitaito. Mikäli hitsauskiinnitin ei ole kaikkien osien suhteen mitoillaan, mutta osien paikoittamisen toistotarkkuus on hyvä, saavutetaan epätarkka ja täsmällinen vaihtelu. Korjaamalla kaikkien hitsattavien osien paikointus tavoitemittaansa, saavutetaan tarkka ja täsmällinen vaihtelu. Kun edellä mainittuun lisätään ulkoiset tekijät, kuten osien mitta- ja muotovaihtelut ja yksittäisen hitsarin kokemus sekä ammattitaito, päästään lopullisen tuotteen mittavaihteluun.

3.2.6 Tietotekniikka ja SPC

SPC perustuu tiedon käsittelyyn ja matematiikkaan. Tällöin tietotekniikan ja tietokoneiden käytöstä on suurta etua. SPC:n toimintaohjeet ja aineisto voidaan julkaista verkkoympäristössä, jolloin se on helposti kaikkien saatavilla. Tiedonkeruu on nopeampaa ja inhimilliset virheet jäävät vähemmälle, kun mittaustulokset voidaan siirtää mittausasemasta suoraan tietokantaan ja sieltä valvontakortteihin tai muuten analysoitavaksi. (Salomäki 2003, 176.)

Laatutekniikan ohjelmistoissa on suurta kehitystä viimeisen 20 vuoden aikana. Ohjelmat ovat tehostuneet ja integroituneet yhteen perustoimisto-ohjelmien kanssa. Yksi tunnetuimmista ohjelmistoista datan käsittelyyn on Minitab, joka sisältää lähes kaiken, mitä tarvitaan datan tilastolliseen ja mittaussysteemin analyysiin, prosessin ohjaukseen sekä koesuunnitteluun (Minitab 2021). Tietokoneohjelmissa, kuten esimerkiksi 3d-mittaukseen soveltuvissa ohjelmissa voi olla jo valmiina SPC:lle työkaluja. Näillä työkaluilla saadaan toistuvien mittausten tulokset kerättyä suoraan valituille valvontakorteille ja määritettyä prosessin suorituskyky. (Innovmetric 2021.)

John Deerellä käytössä olevasta 3d-mittaushjelmasta Innovmetric Polyworks Inspector löytyy SPC ominaisuus, mutta tätä ei vielä olla hyödynnetty 3d-mittauk-

sen saralla. Opinnäytetyössä onkin tarkoitus käyttää sekä mittausohjelman mahdollistamaa SPC-ominaisuutta mittaustiedon analysointiin että Minitabia mittavälineen mittausepävarmuuden laskentaan.

3.3 Hitsauskiinnitin

Hitsauskiinnitin on laite, jolla paikoitetaan, pidetään paikallaan ja tuetaan työkalupaleita hitsauksen aikana. Hitsauskiinnittimet ovat olennainen osa automatisoitua valmistus-, tarkastus- ja kokoonpanoprosessia (kuva 1). (Nee, Tao & Kumar 2004, 1.)



Kuva 1. Hitsauskiinnitin. (Indiamart 2021).

Hitsauskiinnittimen on oltava sellainen, että osat paikoittuvat toisiinsa nähden oikein hitsauksen tai kokoonpanon kannalta, Hitsauskiinnittimessä osien on pysyttävä paikoillaan koko valmistusprosessin ajan, jotta lopputuote olisi mahdollisimman lähellä haluttua muotoa. (Nee ym. 2004, 1–2)

Hitsauskiinnittimien osat voidaan jakaa pääsääntöisesti neljään eri ryhmään:

- paikoittimet
- puristimet
- tuet
- runko. (Nee ym. 2004, 1–2.)

Paikoittimet ovat hitsauskiinnittimen kiinteitä osia, joita käytetään kohdistamaan työkalupaleen sijaintia ja asentoa rajoittamalla työkalupaleen liikettä. Paikoitinta

voidaan kutsua myös vasteeksi. Puristimet ovat työkaluja, joilla työkappale kiinnitetään hitsauskiinnittimeen. Puristimen voima tulee olla riittävän suuri, jotta käsiteltävä kappale pysyy varmasti paikoillaan siihen kohdistuvista ulkoisista voimista riippumatta koko prosessin ajan. Tuet ovat säädettäviä hitsauskiinnittimen osia, joilla työkappaletta voidaan tarvittaessa tukea esimerkiksi puristimien puristusvoimaa vastaan, jottei siihen syntyisi ei-toivottuja muodonmuutoksia kiinnityksen aikana. Runko on hitsauskiinnittimen tukirakenne, johon paikoittimet, puristimet sekä tuet kiinnitetään siten, että työkappaleet saadaan halutuille paikoille toisiinsa nähden ja tukevasti kiinnitettyä. (Nee ym. 2004, 1–2.)

3.4 Koordinaattimittaus

Koordinaattimittauksella tarkoitetaan koordinaattien määrittystä kolmiulotteisessa avaruudessa. Joskus kyseessä voi olla myös kaksiulotteinen taso, jossa koordinaatit määritetään. Koordinaattien määrittämiseen voi tehdä monilla eri tavoilla, kuten esimerkiksi GPS, laserkeilain, laserseurain, laserskanneri, monikamerakuvaus ja konenäkö ja koordinaattimittauskone. (Tikka 2007, 16.)

Koordinaattimittakoneet voidaan luokitella monella eri tavalla. Mittausmenetelmän mukaan jaettaessa, voidaan koordinaattimittakoneet jakaa koskettavaan-, video-, lasermittaukseen, tai niiden yhdistelmään. Jaon voi suorittaa myös koneen koon, rakenteen, mittaustarkkuuden, mittausepävarmuuden, automaatioasteen, ympäristön siedon ja hinnan mukaan. (Tikka 2007, 16.)

3.4.1 Nivelvarsikoordinaattimittauskoneen toimintaperiaate

Nivelvarsikoordinaattimittauskonetta voi verrata robottiin, jonka nivelvarressa on 6–7 niveltä. Nivelissä ei ole moottoreita, vaan ne kiertyvät, kun mittakoneen käyttäjä liikuttaa mittauspäättä käsin. Nivelien kulma-asennot välitetään yhdessä mittauskärjen anturin signaalin kanssa mittausohjelmistolle, joka laskee mittauskärjen paikan XYZ-koordinaatistossa. (Tikka 2007, 59.)

Laitteita on eri kokoisia ja hintaisia. Kokoero johtuu nivelten välissä olevista eri pituisista putkimaisista varsista. Varret pyritään rakentamaan mahdollisimman kevyiksi ja lämpöpitenehämisen kannalta muuttumattomiksi. Laitteen tarkkuus muodostuu nivelien pulssiantureiden resoluutiosta ja mittavarren pituudesta. Peruseriaate on, että mitä pidempi nivelvarsi, sen epätarkempi laite. (Tikka 2007, 59–60.)

Nivelvarsikoordinaattimittakoneet on tehty siirrettäviksi, ja ne on helppo kuljettaa mitattavan kohteen luo kuljetuslaukussa. Laitteet voidaan kiinnittää omaan mittapöytään, siirrettävään jalustaan tai magneettijalkaan. Laitetta on mahdollista siirtää mittauksen aikana pisteverkko avulla ja näin ollen liikuttaa suuren kappaleen puolelta toiselle menettämättä sijaintia alkuperäisessä koordinaatistossa. (Tikka 2007, 61.)

3.4.2 Koordinaattimittaus John Deerellä

John Deerellä on laatuosaston päivittäisessä käytössä kaksi Faro:n valmistaa nivelvarsikoordinaattimittakoneita koskettavaan mittaukseen (kuva 2). Mittakoneita käytetään päivittäisissä tarkastuksissa osavalmistuksen sekä kokoonpanon puolella. Näillä laitteilla monimuotoisten kappaleiden tarkastaminen on vaivatonta verrattuna perinteisiin mittausmenetelmiin. Toisessa koneessa on myös mahdollisuus laserskannaukseen ja tämä soveltuukin erittäin hyvin ohutlevyosien mittaukseen kosketusvapaan mittaustavan takia. Laserskannaus mahdollistaa myös kappaleen kokonaisvaltaisemman tutkimisen siitä saatavan suuremman mittatiedon määrän takia verrattuna koskettavaan mittaukseen. Toisaalta laserskannaus vaatii enemmän aikaa mittauksen osalta kuin koskettava mittaus. Onkin hyvin tapauskohtaista, kumpaa mittaustapaa tulee käyttää.

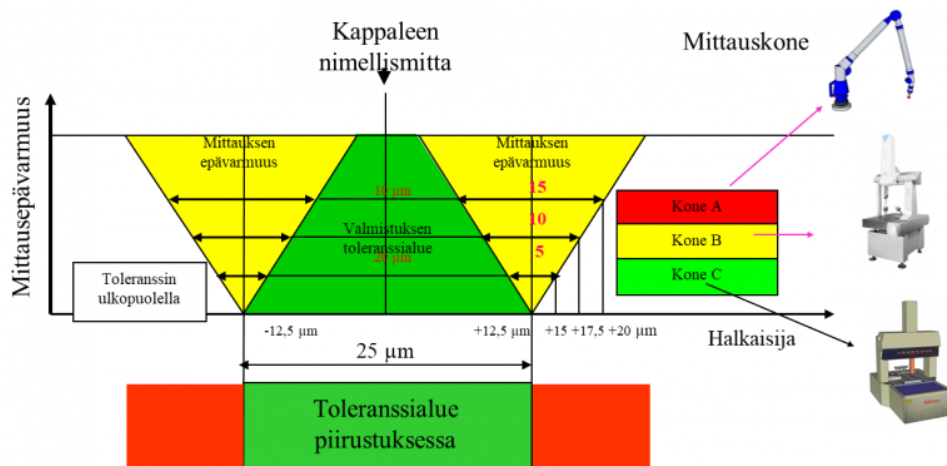


Kuva 2. Faro nivelvarsikoordinaattimittakone. (Kuva: Rentschler 2021).

Mittausohjelmistona John Deerellä on käytössä Innovmetric Polyworks Inspector, joka on monipuolisuutensa perusteella valikoitunut yhtiön käyttöön. Ohjelmisto ei ole laitteistoriippuvainen, vaan siihen on saatavana useimmille eri valmistajien laitteille ohjelmarajapinta. Tämä mahdollistaa tulevaisuudessa mahdollisten uusien laitehankintojen teon joutumatta luopumaan käytössä olevasta mittausohjelmasta. Mittausohjelmiston SPC, statistisen prosessin tarkastelun, ominaisuudet tuovat mittausdatan kertyessä lisäarvoa mahdollistaen muun muassa prosessin vaihtelun ja suorituskyvyn tutkimisen ([Innovmetric 2021](#)).

3.5 Mittausepävarmuus

Mittausepävarmuudella tarkoitetaan mittalaitteesta ja mittaustapahtumasta johtuvan vaihtelun vaikutusta mittaustulokseen. Määrittämällä mittausepävarmuus mahdollistetaan valmistusprosessille suurempi toleranssialueen käyttö, koska silloin on tiedossa, kuinka suuri mittauksesta johtuvaa virhe keskimäärin on mittaustuloksesta. Valitsemalla mittauksen toleranssiin nähden tarpeeksi tarkka mittaväline, voidaan pienentää mittausepävarmuutta (kuvio 6). (JAMK 2020.)



Kuvio 6. Mittausepävarmuuden vaikutus valmistuksen toleranssiin. (JAMK 2020).

Mittausepävarmuuden määrittäminen voidaan tehdä joko laskennallisesti tai koemittauksilla. Koemittausmuotona mainittakoon R&R-testit, josta on olemassa eri muotoja. R&R-testien perustana ovat toistomittaukset. Mitataan tietyllä mittavälineellä normaaleissa mittausolosuhteissa valittu määrä kappaleita valitun kertamäärän verran. (JAMK 2020.)

Niin kutsutusta lyhyestä testistä saadaan tuloksena mittausprosessin tai -järjestelmän kokonaisepävarmuuden prosenttilukemana. Alle 10 % arvoilla mittausjärjestelmä on hyväksyttävissä. Kokonaisepävarmuuden ollessa 10 % ja 30 % välillä, voidaan mittausjärjestelmä tapauskohtaisesti hyväksyä. Yli 30 % kokonaisepävarmuus ei ole hyväksyttävä ja mittausjärjestelmä vaatii parannusta. (JAMK 2020.)

Pitkällä testillä voidaan eritellä myös mittajaan, mittavälineeseen, mitattavien kappaleiden ja mittausprosessin kokonaisvaihtelu. Itse mittaus suoritetaan samoin kuin lyhyessäkin testissä, mutta tulosten laskenta on monivaiheisempaa. (JAMK 2020.)

3.6 Yleiskuvaus osavalmistuksen prosessista

Osavalmistuksen valmistusprosessi on pilkottu LEAN:n mukaisesti pienempiin valmistussoluihin. Pilkkomalla osavalmistuksen tuotanto pienempiin osiin, saavutetaan pienempi tuotteen läpimenoaika verrattuna perinteiseen valmistukseen,

jossa tuote kasataan alusta loppuun samalla työpisteellä, ja näin ollen prosessin tuottavuus paranee (K. Tuominen, R. Tuominen & Malmberg 2009, 72). Tuotannon pilkkominen asettaa hitsaukselle kuitenkin omat haasteensa. Tuotteen suunnittelussa on otettava huomioon tuotteen keston ja toiminnallisuuden lisäksi eri osakokoonpanojen yhdistämisen vaatimukset. Rakenteiden tulisi olla sellaisia, että osien yhdistäminen olisi vaivatonta ja lopputuotteen muoto riittävän tarkka. Toistotarkkuus prosessissa tulisi olla riittävän hyvä, että välttyttäisiin kokoonpanoa haittaavalta liian suurelta vaihtelulta.

Osakokoonpanoista saatavien tuotteiden mittatarkkuudella on suuri vaikutus lopullisen tuotteen kasaukseen ja sitä myöden robottihitsauksen onnistumiseen, viimeistelyn määrään ja lopulta valmiin tuotteen koneistukseen. Pienentämällä vaihtelua osakokoonpanossa helpotetaan suoraan osien sovittamista seuraavissa työpisteissä, vähennetään osien sopimattomuuksista johtuvia jännityksiä hitsattavassa rakenteissa ja mahdollisten pohjaushitsausten tarvetta ennen robottihitsausta. Nämä edellä mainitut asiat vaikuttavat myös suoraan tuotteen laatuun sekä työpisteellä käytettyyn aikaan.

4 Toteutus

4.1 Plan - Lähtökohdat

Opinnäytetyön tarkastusprosessi kohteeksi valittiin harvesterin takarunko. Koko valmistusketjun pituudesta johtuen tarkastusprosessi kohdistettiin kahteen ensimmäiseen valmistussoluun. Näin saatiin työmäärä vastaamaan opinnäytetyön laajuutta.

Kokoonpanon haasteena oli osien paikoituspintojen muuttuminen eri työpisteiden välillä. Tämä toi prosessiin automaattisesti ulkopuolista vaihtelua osien mitta- ja muotomuutosten kautta. Mittauksessa tulikin selvittää, kuinka tämä vaikutti toisen työvaiheen jälkeiseen kokoonpanoon.

4.2 Plan - Suunnitelma

Vaihtelun tarkastaminen aloitettiin PDCA-syklin mukaisesti plan-vaiheella. Tarkastusprosessista laadittiin suunnitelma. Hitsauskiinnittimien ja tuotteiden mitaukset suoritettiin nivelvarsikoordinaattimittakoneella. Ennen mittauksia tuli todentaa mittalaitteen mittausepävarmuus Gage R&R-testillä. Tällä varmistettiin mittalaitteen kyvykkyys suoritettaviin mittauksiin.

Tarkan prosessin kannalta tuli sisäisten vaihtelujen määrä minimoida. Sisäistä vaihtelua hitsausprosessiin aiheuttivat hitsauskiinnittimen mittatarkkuus ja kunto. Ensimmäiseksi tulikin tarkastaa visuaalisesti hitsauskiinnittimen kunto. Mikäli hitsauskiinnitin vaikutti silmämääräisen tarkastuksen perusteella olevan hyväksyttävässä kunnossa, tuli se mitata nivelvarsikoordinaattimittauskoneella. Hitsauskiinnittimen tulisi olla säädön jälkeen mahdollisimman lähellä nimellismittaa, jotta siitä saatavat tuote olisi yhdenmukainen suunnittelijan laatiman piirustuksen kanssa.

Mittauksen yhteydessä tulisi myös selvittää hitsauskiinnittimen rungon taipuma, kun kiinnittimen päälle oli asetettu valmistettavan tuotteen massa. Näin saatiin tieto tarvittavien ennakoiden osalta hitsauskiinnittimen säädettäviin pintoihin. Ennakoilla pyrittiin kompensoimaan kiinnittimen muodonmuutokset massan alla. Säädettävillä hitsauskiinnittimillä valmistettiin useita eri tuotteita, joten paikoittimien säädön yhteydessä oli huomioitava säätöjen vaikutus kaikkien tuotteiden valmistukseen.

Hitsauskiinnittimien säädön jälkeen mitattiin niistä saatavat tuotteet nivelvarsikoordinaattimittauskoneella. Mittaukseen laadittiin tuotekohtaiset mittausohjelmat. Valmiiden mittaohjelmien avulla toistettiin mittaustapahtumaa mahdollisimman tarkasti eri kappaleiden mittausten välillä. Tällä pyrittiin minimoimaan itse mittaustapahtumasta syntyvää vaihtelua. Saatujen mittaustulosten perusteella voitiin todentaa tuotteen mittojen oikeellisuus. Mikäli mittausten aikana havaittiin selviä mittapoikkeamia, tuli hitsauskiinnittimiä säätää tarpeen mukaan.

Mittaustietojen karttuessa laadittiin Polyworks Inspector:lla SPC-raportti, josta nähtiin valmistusprosessin vaihtelu ja suorituskyky. Saatujen tulosten perusteella voitiin todeta tarkastettujen valmistussolujen valmistusprosessin tila, ja tehdä päätöksiä jatkotoimia silmällä pitäen. Mikäli prosessi todettiin riittävän suorituskykyiseksi, voitiin kokoonpanojen valmistusta jatkaa samalla tekniikalla. Mikäli prosessin suorituskyky todettiin alhaiseksi, voitiin miettiä parannustoimia prosessin kehittämiseksi.

4.3 Do - Mittausepävarmuuden määrittäminen nivelvarsimittakoneelle

Hitsauskiinnittimen mittaukseen oli käytettävissä siirrettävä nivelvarsikoordinaattimittauskone Faro Platinum ja Innovmetric Polyworks Inspector mittausohjelmisto. Faro:n ilmoittama mittatarkkuus yksittäiselle pisteelle kyseisellä mittakoneella oli 0,043 mm. Yleisesti pidetään mittavälineen tarkkuutta riittävänä, kun mittaväline kykenee 1/10 tarkkuuteen mitattavan piirteen toleranssialueesta (1factory 2020).

Mittavälineelle suoritettiin Gage R&R testi lyhyen menetelmän mukaan, jolla voitiin todentaa mittauksen aiheuttama kokonaisepävarmuus. Testi suoritettiin kahden eri mittajaan toimesta. Molempien mittajien toimesta mitattiin opinnäytetyön tarkastelun kohteena olevaa tuotetta 1.1. Testiin valittiin kaksi kappaletta ja näitä mitattiin viisi kertaa. Kummastakin kappaleesta mittauskertoja tuli 10 kappaletta ja kokonaisuudessaan 20 mittauskertaa. CAD-malli sovitettiin jokainen kerta, kuten tarkastusmittauksessa, ennalta määrättyjen referenssipisteiden avulla ja tuotteen alapinnalta mitattiin yksi pintapiste mittausvaihtelun tarkastamiseksi. Tästä pisteestä mitatut arvot syötettiin Minitab-ohjelmistoon. Gage R&R testin tuloksena saatiin mittaustapahtuman kokonaisepävarmuudeksi 4,43 % \pm 1 mm toleranssialueella. Testin tulokset ovat nähtävissä taulukossa 1 ja mittaustulokset kokonaisuudessaan liitteessä 1. Mittalaite todettiin kykeneväiseksi \pm 1 mm ja sitä suuremman toleranssialueen tarkasteluun. Arvoa 4,43 % käytettiin jatkossa mittaushjelmiston SPC-työkalun mittausepävarmuuslukuna.

Taulukko 1. Gage R&R testin tulokset.

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0,014761	0,088566	10,22	4,43
Repeatability	0,014309	0,085853	9,91	4,29
Reproducibility	0,003626	0,021754	2,51	1,09
Operators	0,003626	0,021754	2,51	1,09
Part-To-Part	0,143613	0,861677	99,48	43,08
Total Variation	0,144369	0,866217	100,00	43,31

4.4 Do - Hitsauskiinnittimen tarkastus

Tehtaalla käytössä olevat hitsauskiinnittimet on mitattu ja säädetty aina käyttöönoton yhteydessä. Tämän jälkeen hitsauskiinnittimen mittauksen tarve arvioidaan tuotannosta tulevien impulssien perusteella. Tarkastelun kohteena olevien hitsauskiinnittimien mittauksesta oli kulunut aikaa, joten PDCA-syklin do-vaihe aloitettiin kiinnittimien tarkastuksella.

Hitsauskiinnittimelle suoritettiin visuaalinen tarkastus, jossa todettiin paikoitinpinnojen kunto riittävän hyväksi. Tämän jälkeen tarkastettiin kaikkien puristimien ja tukien toiminnallisuus sekä kunto. Visuaalisen ja toiminnallisen kuntotarkastuksen jälkeen mitattiin paikoittimet nivelvarsikoordinaattimittauskoneella. Tarpeen vaatiessa paikoittimia säädettiin siten, että ne olisivat mahdollisimman yhtenevät nimellismittaisen hitsauskiinnittimen kanssa. Nimellismittaisella tarkoitettiin sellaista tuotetta, joka vastaa mahdollisimman lähelle suunnittelijan piirtämää tuotetta.

4.5 Do - Hitsauskiinnittimen mittaus

Suunnitteluohjelma PTC Creo:sta saatava tuotteen CAD-malli käännettiin mitausohjelmiston ymmärtämään tiedostomuotoon ja käännetty malli tuotiin mitausohjelmistoon. Mitattava hitsauskiinnitin sovitettiin mallin kanssa valitsemalla

mittausohjelmistoon tuodusta CAD-mallista sopivat piirteet (reikiä, tasoja, pisteitä...) ja mittaamalla vastaavat piirteet hitsauskiinnittimestä nivelvarsimittakoneella. Valittujen piirteiden tulisi kattaa mahdollisimman laaja ala tarkasteltavalta alueelta, jolloin päästään riittävän tarkkaan sovitukseen koko mallin osalta.

Sovituksen jälkeen onkin sitten vaivatonta tarkastaa ja säätää hitsauskiinnittimen eri vasteita vertailemalla CAD-mallista saatavia pintoja nivelvarsikoneen mittakärjen asemaan. Mittausohjelma näyttää poikkeaman mallin oletetun paikan ja mittakärjen paikan välillä. Tarkastusten ja säätöjen jälkeen voitiin olettaa, että hitsauskiinnittimistä saadaan nimellismittaisia tuotteita.

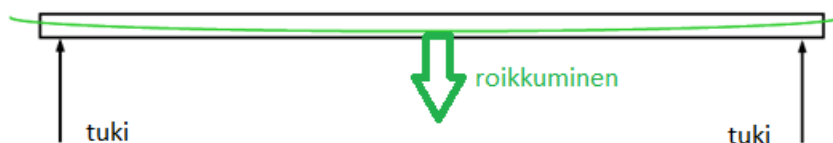
4.5.1 Valmistussolu 1.1 ja 1.2

Valmistussolun 1.1 ja 1.2 hitsauskiinnittimet vastaavat toisiaan, ollen toistensa peilikuvat. Näin ollen molemmille hitsauskiinnittimille suoritettiin samat mittaus ja säätötoimet.

Hitsauskiinnittintä säätäessä oli huomioitavaa, että siinä valmistettiin tutkittavan tuotteen lisäksi myös muita tuotteita. Valmistettavilla tuotteilla oli hitsauskiinnittimessä yhteisiä paikoittimia, mikä toi lisähaastetta säätöön. CAD-mallin sovitus-pisteet tuli valita siten, että molemmat valmistettavat tuotteet sijoittuivat niiden sisäpuolelle. Hitsauskiinnittimestä mitattiin neljä reikää, joiden mukaan hitsauskiinnittimen CAD-malli sovitetiin mittakoneen koordinaatistoon niin kutsutulla best-fit-sovituksella. Tällöin mittausohjelma pyrkii sovittamaan mallin mitattuun tietoon siten, että jokainen piste poikkeaa mahdollisimman vähän koordinaatiston jokaisessa suunnassa.

Edellä mainitulla sovituksella varmistettiin se, että molemmista päistä tuetun hitsauskiinnittimen matalin kohta tulisi hitsauskiinnittimen keskivaiheelle. Pitkästä jännevälistä johtuen hitsauskiinnittimet roikkuvat usein kiinnittimen keskivaiheelta. Tätä roikkumista jouduttiin myös kyseisessä hitsauskiinnittimessä kompensoimaan laskemalla reunalla olevia paikoittimia alaspäin hitsauskiinnittimen

rungon roikkumisen verran, jotta saatiin vaakasuuntainen paikoituspinta mahdollisimman suoraksi (kuva 3).



Kuva 3. Hitsauskiinnittimen roikkuminen.

Hitsattavan kappaleen paikoittavien pintojen mittaus suoritettiin mittausohjelmiston dynaamisella mittaustoiminnolla. Kuljetettaessa mittakärkeä, mittaohjelma tunnisti automaattisesti sitä lähimmän CAD-mallin pinnan ja näytti näiden kahden välisen poikkeaman suuruuden koordinaatiston eri akseleilla. Tällä vertailulla pintojen tarkastus oli nopeaa ja vaivatonta. Paikoitinpintojen alla oli yhden millimetrin paksuisia säätölevyjä kuusi kappaletta. Levyjä lisäämällä tai poistamalla saatiin paikoitinpintaa säädettyä haluttuun suuntaan. Säättöön käytetty yhden millimetrin materiaali mahdollisti paikoittimen säädön $\pm 0,5$ millimetrin sisään suunnitellusta. Säädön jälkeen tasoista otettiin raportointia varten mittapisteet, joka kertoivat säädön jälkeiset poikkeamat CAD-malliin.

Säädön jälkeen tuotteen tuli asettua suunnittelijan suunnitelman mukaisesti hitsauskiinnittimeen. Tässä vaiheessa ei kuitenkaan vielä tiedetty, kuinka paljon osien hitsaus tulisi vaikuttamaan lopulliseen tuotteeseen, joka saatiin säädetystä hitsauskiinnittimestä

Säädön jälkeen asetettiin kokoonpantavat osat hitsauskiinnittimen päälle ja mitattiin koordinaattimittakoneen avulla kiinnittimen rungon taipumaa kuorman alla. Hitsauskiinnittimen rungosta mitattiin pintapiste jännevälän keskivaiheilta. Taipuma hitsauskiinnittimen keskiosan kohdalla oli noin yhden millimetrin suuruusluokka, ja tämän todettiin olevan riittävän pieni valmistuksen kannalta.

4.5.2 Valmistussolu 2

Valmistussolu 2:ssa yhdistetään edellisen työvaiheen tuotteet alihankkijan valmistamien osien kanssa kokonaisuudeksi. Hitsauskiinnittimen säädössä oli huomioitava, että osien paikoitukseen käytettiin apukiinnittimiä. Nämä tuli myös tarkastaa ja säätää hitsauskiinnittimen säädön yhteydessä, jotta eri apukiinnittimistä johtuva vaihtelu ja poikkeama olisi mahdollisimman pientä.

Mittauksen haasteena olivat hitsauskiinnittimen pitkä jänneväli sekä muiden valmistettävien tuotteiden huomioiminen säädön aikana. Hitsauskiinnittimen roikkuminen tuli selvittää ja kompensoida keskialueen paikoitinpintoja nostamalla. Yhteiset paikotinpinnot tuli säätää siten, että ne soveltuivat kaikille kyseistä pintaa käyttäville tuotteille.

4.5.3 Valmistussolu 2:n hitsauskiinnitin

Valmistussolu 2:n hitsauskiinnittimen kunto tarkastettiin visuaalisesti ja toiminnallisuus kokeiltiin liikkuvien osien osalta. Lisäksi tarkastettiin kyseisellä pisteellä käytettävät apukiinnittimet. Tämän jälkeen hitsauskiinnitin ja apukiinnittimet mitattiin koordinaattimittakoneella. CAD-mallin sovituksessa tuli ottaa huomioon hitsauskiinnittimen pituus ja suuresta jännevälistä johtuvaa taipuma kiinnittimen keskialueella. CAD-malli sovitettiin kiinnittimen rungon mukaan mahdollisimman pitkältä alalta. Hitsauskiinnittimestä mitattiin päärunгон palkista kaksi pintapistettä palkin molemmilta sivuilta. Näillä piirteillä sovitettiin CAD-mallin X-suunta. Lisäksi mitattiin palkin päältä neljä pistettä, joilla haettiin mallin sovitukseen Y-suuntainen sovitus. CAD-mallin viimeinen vapausaste, Z-suunta, lukittiin mittaamalla palkin yläpinnalta reikä ja käyttämällä tätä pelkästään pituussuuntaiseen paikoitukseen. Tällä sovituksella saatiin hitsauskiinnittimen taipuma hitsauskiinnittimen rungon puoleenväliin ja päädyt lähelle tavoitemittaa. Mallin sovituksen jälkeen kokoonpanon paikoittimet säädettiin tavoitemittaan dynaamisen mittauksen avulla. Säädetyistä pinnoista otettiin raportointia varten pintapisteet.

4.5.4 Apukiinnitin 1

Apukiinnitin 1:een suoritettiin visuaalinen kunnan tarkastus, jossa tarkastettiin paikoittavien pintojen kunto ja toiminnallisuus. Kokemuksen perusteella paikoitin tuli säätää kaksi millimetriä nimellismittaa leveämmälle. Tällä hitsausennakolla kompensoitiin robottihitsauksen aiheuttamaa kutistumaa rakenteelle ja taattiin kokoonpanon onnistuminen.

Kolme apukiinnitintä tarkastusmitattiin kukin vuorollaan hitsauskiinnittimeen asetettuna ja säädettiin, mikäli havaittiin heittoja. Apukiinnitintä säädettäessä paikoitinpintoja nostettiin keskimäärin noin neljä millimetriä. Korkeussuunnan säädöllä kompensoitiin valmistussolu 2:n hitsauskiinnittimen rungon roikkumista.

4.5.5 Apukiinnitin 2

Apukiinnitin 2:n avulla paikoitetaan osa symmetrisesti kokoonpanon keskilinjaan nähden. Apukiinnittimessä oli myös pystysuuntaisen asennon säätömahdollisuus. Asentoa olikin säädetty siten, että paikoitettavan osan yläreuna poikkesi alareunan asemasta 2 mm. Tällä säädöllä kompensoitiin rungon hitsausvääntymää ja mahdollistettiin koneistuksen onnistuminen tuotteelle.

Kolme apukiinnitintä tarkastusmitattiin hitsauskiinnittimeen kiinnitettynä ja säädettiin mikäli sille nähtiin tarvetta. Apukiinnittimestä mitattiin tuotteen kiinnitysreiän paikoitin, sekä pienempi paikoitustappi reikä-piirteinä. Näistä saatiin symmetriatieto koordinaatistoon nähden. Tasopintaan vastaavat paikoittimet mitattiin dynaamisella mittauksella ja säädettiin tarpeen mukaan. Säädetyistä tasopinnoista otettiin pintapisteet raportointia varten.

4.6 Do - Tuotteen mittaus

Tarkastusprojektin seuraavassa vaiheessa mitattiin hitsauskiinnittimillä valmistetut tuotteet. Toimeksiantajan kanssa sovittiin, että mitattaisiin seitsemän kappaletta tuotteita 1.1, 1.2 ja 2 riittävän otannan saamiseksi. Jotta prosessin suorituskyky saataisiin todennettua, tuli tuotteet mitata niiden pintojen osalta, jotka vastasivat hitsauskiinnittimen paikoittimiin. Lisäksi tuotteista 1.1 ja 1.2 mitattiin seuraavan työpisteen paikoittimien kohdat. Tällä mittauksella haluttiin todentaa, kuinka paljon kyljen asemointi voisi mahdollisesti muuttua seuraavassa työvaiheessa ja nähtiin, kuinka paljon paikoittavien pintojen vaihtaminen kesken prosessin vaikuttaa sen suorituskykyyn. Valmistussolu 2:n tuotteesta mitattiin myös seuraavan työvaiheen kannalta kriittiset pinnat.

Tuotteet mitattiin Faro Platinum nivelvarsikoordinaattimittakoneella. Tarkastettavien tuotteiden pienin todennettava toleranssi oli ± 1 mm, joten mittaus voitiin suorittaa kyseisellä mittalaitteella, kuten kohdassa 4.3, mittausepävarmuuden todentaminen, tuli todettua.

4.6.1 Tuotteet 1.1 ja 1.2

Tuotteet 1.1 ja 1.2 olivat toistensa peilikuvia, joten mittaus suoritettiin molempiin kokoonpanoihin samalla tavalla. CAD-malli sovitettiin hitsauskiinnittimen paikoittavilta pinnoilta. Sovituspisteet mitattiin tuotteesta pintapisteinä. Referenssipisteet A1-A6 sovittivat CAD-mallin koordinaatiston X-suunnassa. Referenssipisteet B1-B3 sovittivat CAD-mallin koordinaatiston Y-suunnassa, ja referenssipiste C1 sovittaa CAD-mallin koordinaatiston Z-suunnassa. Tällä sovituksella saatiin malli sovitettua mitattavaan tuotteeseen siten, että vastaisi mahdollisimman lähelle hitsauskiinnittimen paikoitusta.

Seuraavaksi mitattiin tuotteesta kolme pintapistettä niiltä kohdin, mistä tuote asemoidaan valmistussolu 2:ssa. Näiden mitattujen pintapisteiden mittavaihteluilla on suora vaikutus siihen, kuinka hyvin osat paikoittuvat seuraavalla työpisteellä. Mikäli tuotteen paikoituspinnat poikkeavat liiaksi, voi se asettua väärin, tai sitä ei

saada mahdollisesti asennettua ollenkaan seuraavan työpisteen hitsauskiinnittimeen.

4.6.2 Tuote 2

Valmistussolu 2:n tuote mitattiin ja CAD-malli paikoitettiin, kuten edellä tuotteiden 1.1 ja 1.2 mittauksessa, hitsauskiinnittimen paikoittavilta pinnoilta. Tuotteen paikoittavina pintoina olivat apukiinnittimien ohjaavat pinnat. Paikoittamalla CAD-malli näiltä pinnoilta, haettiin seuraavan valmistussolun tilannetta, jossa tuote paikoitetaan kyseisiltä pinnoilta. Kokoonpanon pintojen tulisi vastata riittävän tarkasti suunniteltua tuotetta, että seuraava työvaihe on mahdollinen toteuttaa.

Apukiinnittimestä mitattiin pohja, molemmat sivut ja etummainen pinta tasoina. Näiden kahdeksan tason mukaan tehtiin best-fit sovitus, määräämällä kuitenkin piirteen paikoitussuunta pinnan normaalin mukaan. Pohjan tasot lukitsivat korkeussuuntaisen vapausasteen. Sivutasoilla lukittiin sivusuuntainen vapausaste ja päätyjen tasoilla lukittiin pituussuuntainen vapausaste. Tätä sovitusta käytettiin kuvaamaan hitsauksen paikoitusta.

Mitattaviin piirteisiin lisättiin myös valmistussolu 1.1 ja 1.2 vastepinnat, jolloin näiden pintojen vaihtelua voitiin verrata lähtötilanteeseen. Kyseisten pintojen mitta- vaihtelut ja mittaheitot ovat kriittisiä koneistuksen kannalta, koska kyseisellä pinnalla on koneistettavia tasopintoja viiden millimetrin työvaralla. Tasojen kokonaiskorkeus lähtötilanteessa oli 10 millimetriä. Näin ollen rungon yläpinnan taso ei saisi olla teoriassa alle viisi millimetriä tavoitemitasta, jotta koneistettava tasopinta puhdistuisi. Yläpinnan taso ei myöskään saisi olla teoriassa 5 millimetriä yli tavoitemitan, koska siinä tapauksessa 10 millimetriä paksu osa koneistettaisiin kokonaan pois.

CAD-malli sovitettiin tuote 2:een myös siten, että se vastaisi mahdollisimman lähelle koneistuskiinnittimen kiinnitystä. Kyseisellä sovituksella pyrittiin selvittämään yläpinnan asemaa koneistuksen kannalta. Apukiinnitin 2:n korkeussuuntainen paikoittava taso korvattiin tuotteiden 1.1 ja 1.2 pinnalta mitattuihin pisteisiin.

Nämä pisteet olivat samalla kohtaa, kuin koneistuksen korkeussuunnan paikoittimet.

5 Mittaustulokset

5.1 Mittaus ja analysointi

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää metsäkoneen rungon osakokoonpanojen pintojen vaihtelu kasaus- ja hitsausprosessin aikana ja selvittää nykyinen prosessin suorituskyky. Toimeksiantajan edustajan kanssa sovittiin, että mitataan seitsemästä harvesterin rungosta kahden perättäisen työvaiheen jälkeiset kokoonpanot riittävän otannan saamiseksi. Mittatarkastelun pääasiallisena kohteena olivat valmistussolu 1.1 ja 1.2 tuotteiden pintojen asema ja niiden muutos prosessin aikana. Mitatut piirteet olivat pintapisteitä (surface point), jotka ilmaisivat mitatun pisteen poikkeaman CAD-malliin. Lisäksi valmistussolu 2:n kokoonpanosta tarkasteltiin tuotteen välimittaa hitsauskiinnittimen vasteiden kohdalta, sekä tuotteen keskilinjan poikkeamaa, symmetriaheittoa.

Mittaustulokset käsiteltiin Polyworks Inspectorissa, ohjelman omalla SPC-työkalulla. Mitattuja tuotteita käsiteltiin yksittäisinä kappaleina, joten näyte-erän koko oli 1. Näin ollen mittausohjelman SPC-työkalu määritti automaattisesti valvontakorteiksi I-kortin (engl. *I-chart*) ja MR-kortin (engl. *MR-chart*). Näistä I-kortti kuvaa mittatuloksen keskiarvoa ja MR-kortti mittatuloksen vaihtelua. Suorituskyvyn lukujen, C_p - ja C_{pk} , rajaksi valittiin 1,33, jolloin vaihtelu on riittävän pientä ja jakauman keskiarvo riittävän lähellä toleranssialueen keskikohtaa. Mittaustapah-tuman mittausepävarmuus oli 4.43 % yksittäiselle mittapisteelle.

5.2 Check – Tuote 1.1

Tuotteesta mitattiin kolme pistettä, jotka olivat vastaavat kohdat, mistä seuraavassa työvaiheessa kyseinen kappale paikoitetaan. Mittapisteiden vaihteluvälin raja-arvot, USL ja LSL, määritettiin tuotteen piirustuksen mukaan ± 1 mm.

Keskimääräiset alapinnan poikkeamat mittauspisteittäin olivat:

- surf pt 1 -1,320 mm
- surf pt 2 -0,422 mm
- surf pt 3 -0,786 mm

Alapinnan kolmen pisteen poikkeaman keskiarvo oli -0,843 mm.

Keskimääräiset vaihtelut alapinnan mittapisteissä olivat:

- surf pt 1 0,388 mm
- surf pt 2 0,349 mm
- surf pt 3 0,367 mm

Alapinnan kolmen pisteen vaihtelun keskiarvo oli 0,368 mm.

Yksittäisten mittauspisteiden suorituskykyluvut olivat:

- surf pt 1 C_p 0,969 C_{pk} -0,310
- surf pt 2 C_p 0,956 C_{pk} 0,552
- surf pt 3 C_p 0,909 C_{pk} 0,194

Alapinnan yhteenlasketut suorituskykylukujen keskiarvot olivat C_p 0,945 ja C_{pk} 0,145.

Mittaustapahtuman aiheuttama mittausepävarmuus oli 4,43 %.

5.3 Check – Tuote 1.2

Tuotteesta mitattiin kolme pistettä, jotka olivat vastaavat kohdat, mistä seuraavassa työvaiheessa kyseinen kappale paikoitetaan. Mittapisteiden vaihteluvälin raja-arvot, USL ja LSL, määritettiin tuotteen piirustuksen mukaan ± 1 mm.

Keskimääräiset alapinnan poikkeamat mittauspisteittäin olivat:

- surf pt 1 -0,832 mm
- surf pt 2 -0,438 mm
- surf pt 3 -1,153 mm

Alapinnan kolmen pisteen poikkeaman keskiarvo oli -0,808 mm.

Keskimääräiset vaihtelut alapinnan mittapisteissä olivat:

- surf pt 1 0,448 mm
- surf pt 2 0,454 mm
- surf pt 3 0,589 mm

Alapinnan kolmen pisteen vaihtelun keskiarvo oli 0,497 mm.

Yksittäisten mittauspisteiden suorituskykyluvut olivat:

- surf pt 1 C_p 0,840 C_{pk} 0,141
- surf pt 2 C_p 0,828 C_{pk} 0,465
- surf pt 3 C_p 0,639 C_{pk} -0,098

Alapinnan yhteenlasketut suorituskykylukujen keskiarvot olivat C_p 0,769 ja C_{pk} 0,169.

Mittaustapahtuman aiheuttama mittausepävarmuus tuloksiin oli 4,43 %.

5.4 Tuotteiden 1.1 ja 1.2 yhteiset keskiarvot

Tuotteiden 1.1 ja 1.2 samankaltaisuuden takia yhdistettiin niistä saadut mittaus-tulokset suuremman otannan saamiseksi. 14 mitatun tuotteen keskiarvot on esi-tetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tuotteiden 1.1 ja 1.2 yhdistetyt keskiarvot.

Poikkeaman keskiarvo	-0,826 mm
Vaihtelun keskiarvo	0,433 mm
C_p	0,857
C_{pk}	0,157

Mittaustapahtuman aiheuttama mittausepävarmuus tuloksiin oli 4,43 %.

5.5 Check - Tuote 2

Tuotteesta 2 mitattiin kolme pistettä ylä- ja alapinnalta sekä molemmilta sivuilta neljä pistettä sivusuuntaisten paikoittimien kohdalta. Ylä- ja alapinnan tarkastelut tehtiin sekä hitsauksen, että koneistuksen kannalta eri CAD-mallin sovituksia käyttäen.

Yläpinnan pisteet oli mitattu vastaavilta kohdilta, kuin tuotteiden 1.1 ja 1.2 hitsauskiinnittimen paikoituspinnat olivat. Näin pystyttiin todentamaan muutos lähtötilanteeseen nähden. Mittapisteiden vaihteluvälin raja-arvot määritettiin yläpinnan koneistuksen työvarojen mukaan. Yläpinnan tasoissa on 10 mm paksut tasot, joista koneistetaan teoriassa viisi millimetriä ainetta pois. Jotta tasopinta puhdistuisi koneistuksessa, kyljen yläpinta ei saisi olla neljää millimetriä nimellistä korkeutta alempana. Toisaalta yläpinta ei saa olla yli kolmea millimetriä nimellistä korkeutta korkeammalla, koska muuten ei koneistuksen jälkeen jäisi tasosta riittävästi materiaalia jäljelle. Näin ollen toleranssialueen raja-arvoiksi määritettiin -4 mm / +3 mm.

5.5.1 Yläpinta hitsauksen sovituksella

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna mittauksien keskimäärinen yläpinnan poikkeama mittapisteittäin oli:

- surf pt 3	-3,659 mm
- surf pt 7	-3,491 mm
- surf pt 13	-1,227 mm
- surf pt 14	-1,782 mm
- surf pt 15	-1,203 mm
- surf pt 16	-0,936 mm

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden yläpinnan pisteen yhteenlaskettu poikkeaman keskiarvo oli -2,050 mm.

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna yläpinnan mittapisteiden vaihtelun keskiarvo oli:

- surf pt 3	0,972 mm
- surf pt 7	1,312 mm
- surf pt 13	0,435 mm
- surf pt 14	1,170 mm
- surf pt 15	1,117 mm
- surf pt 16	0,671 mm

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden yläpinnan pisteen vaihtelun keskiarvo oli 0,964 mm.

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna yksittäisten yläpinnan mittauspisteiden suorituskyky oli:

- surf pt 3	C_p 1,353	C_{pk} 0,132
- surf pt 7	C_p 1,003	C_{pk} 0,146
- surf pt 13	C_p 3,025	C_{pk} 2,397
- surf pt 14	C_p 1,125	C_{pk} 0,713
- surf pt 15	C_p 1,178	C_{pk} 0,941
- surf pt 16	C_p 1,961	C_{pk} 1,717

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden yläpinnan pisteen suorituskykytulokset olivat C_p 1,608 ja C_{pk} 1,008.

Mittaustapahtuman aiheuttama mittausepävarmuus tuloksiin oli 1,27 %.

5.5.2 Yläpinta koneistuksen sovituksella

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna mittauksien keskimääräinen yläpinnan poikkeama mittapisteittäin oli

- surf pt 3	-3,752 mm
- surf pt 7	-3,336 mm
- surf pt 13	-1,185 mm
- surf pt 14	-1,494 mm
- surf pt 15	-0,794 mm
- surf pt 16	-0,816 mm

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden yläpinnan pisteen yhteensä laskettu poikkeaman keskiarvo oli -1,896 mm.

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna mittauksien keskimääräinen vaihtelu yläpinnan pisteissä oli:

- surf pt 3	0,865 mm
- surf pt 7	1,193 mm
- surf pt 13	0,387 mm
- surf pt 14	0,834 mm
- surf pt 15	0,665 mm
- surf pt 16	0,837 mm

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden yläpinnan pisteen vaihtelun keskiarvo oli 0,797 mm.

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna yksittäisten yläpinnan mittauspisteiden suorituskyky oli:

- surf pt 3	C_p 1,522	C_{pk} 0,108
- surf pt 7	C_p 1,103	C_{pk} 0,209
- surf pt 13	C_p 3,405	C_{pk} 2,738
- surf pt 14	C_p 1,578	C_{pk} 1,129
- surf pt 15	C_p 1,978	C_{pk} 1,800
- surf pt 16	C_p 1,573	C_{pk} 1,441

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden yläpinnan pisteen suorituskykyluvut olivat C_p 1,860 ja C_{pk} 1,238.

Mittaustapahtuman aiheuttama mittausepävarmuus tuloksiin oli 1,27 %.

5.5.3 Alapinta hitsauksen sovituksella

Alapinnan pintapisteet mitattiin valmistussolujen 1.1 ja 1.2 hitsauskiinnittimen paikoituspintojen kohdalta. Tällä mittauksella pyrittiin todentamaan tuotteiden aseointi valmistusolu 2:ssa, koska korkeussuuntaan paikoittavana piirteenä valmistussolu 2:n hitsauskiinnittimessä oli alapinnan pinta. Mittauksen avulla pystyttiin myös selvittämään, kuinka paljon hitsauskiinnitin mahdollisesti muuttaa muotoaan kuorman alla ja aiheuttaa itse tuotteeseen muodonmuutoksia. Toleranssialueeksi valittiin kyljen piirustuksen mukaisesti ± 1 mm.

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna mittauksien keskimääräinen alapinnan poikkeama pisteittäin oli:

- surf pt 4 1,192 mm
- surf pt 8 1,649 mm
- surf pt 9 1,072 mm
- surf pt 10 1,179 mm
- surf pt 11 0,142 mm
- surf pt 12 0,365 mm

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden alapinnan pisteen yhteenlaskettu poikkeaman keskiarvo oli 0,933 mm.

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna mittauksien keskimääräinen vaihtelu alapinnan pisteissä oli:

- surf pt 4 0,628 mm
- surf pt 8 1,097 mm
- surf pt 9 0,567 mm
- surf pt 10 0,540 mm
- surf pt 11 0,217 mm
- surf pt 12 0,549 mm

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden alapinnan pisteen vaihtelun keskiarvo oli 0,600 mm.

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna yksittäisten alapinnan mittauspisteiden suorituskyky oli:

- surf pt 4 C_p 0,598 C_{pk} -0,115
- surf pt 8 C_p 0,343 C_{pk} -0,223
- surf pt 9 C_p 0,664 C_{pk} -0,048
- surf pt 10 C_p 0,696 C_{pk} -0,124
- surf pt 11 C_p 1,733 C_{pk} 1,487
- surf pt 12 C_p 0,685 C_{pk} 0,435

Hitsauksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden alapinnan pisteen suorituskykytulokset olivat C_p 0,687 ja C_{pk} 0,255.

Mittaustapahtuman aiheuttama mittausepävarmuus tuloksiin oli 4,43 %.

5.5.4 Alapinta koneistuksen sovituksella

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna mittauksien keskimäärinen alapinnan poikkeama pisteittäin oli:

- surf pt 4	1,254 mm
- surf pt 8	1,503 mm
- surf pt 9	1,047 mm
- surf pt 10	0,945 mm
- surf pt 11	-0,014 mm
- surf pt 12	0,001 mm

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden alapinnan pisteen yhteenlaskettu poikkeaman keskiarvo oli 0,789 mm.

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna mittauksien keskimääräinen vaihtelu alapinnan pisteissä oli:

- surf pt 4	0,618 mm
- surf pt 8	0,926 mm
- surf pt 9	0,583 mm
- surf pt 10	0,273 mm
- surf pt 11	0,124 mm
- surf pt 12	0,125 mm

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden alapinnan pisteen vaihtelun keskiarvo oli 0,442 mm.

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna yksittäisten alapinnan mittauspisteiden suorituskyky oli:

- surf pt 4	C_p 0,608	C_{pk} -0,154
- surf pt 8	C_p 0,406	C_{pk} -0,204
- surf pt 9	C_p 0,645	C_{pk} -0,031
- surf pt 10	C_p 1,376	C_{pk} 0,075
- surf pt 11	C_p 3,024	C_{pk} 2,983
- surf pt 12	C_p 3,016	C_{pk} 3,013

Koneistuksen mukaan CAD-malli sovitettuna kuuden alapinnan pisteen suorituskykyluvut olivat C_p 1,513 ja C_{pk} 0,947.

Mittaustapahtuman aiheuttama mittausepävarmuus tuloksiin oli 4,43 %.

5.5.5 Leveys ja symmetria

Valmistussolu 2:n jälkeisestä kokoonpanosta mitattiin myös tuotteiden 1.1 ja 1.2 sivusuuntainen asema suhteessa kokoonpanon keskilinjaan. Mittapisteet otettiin tuotteen 2 sivuista, hitsauskiinnittimen paikoittimien kohdilta. Vastakkaisilta puolilta otetuista pisteistä mitattiin välimitta, sekä pisteiden välille luotiin keskiarvopiste, jonka pitäisi asettua rungon keskilinjalle. Rungon välimitalle saatiin toleranssi hitsauksen yleistoleranssista SFS-EN ISO 13920-bf, rajan asettuessa ± 4 mm:n. Keskiarvopisteen toleranssialueeksi valittiin puolet välimitan toleranssialueesta, joten raja asettui ± 2 mm:n. Tarkastelua ei suoritettu erikseen hitsauksen ja koneistuksen kesken, koska eri CAD-mallin sovituksilla oli vaikutusta vain korkeussuuntaisen aseman muutokseen. Näin ollen sivuttaissuuntaiset välimitat olivat samat molemmilla sovitustavoilla.

Keskiarvoinen leveys oli:

- distance 1 (pääty 1) 1152,651 mm
- distance 2 (pääty 2) 1150,802 mm

Keskiarvoinen vaihtelu leveydessä oli:

- distance 1 (pääty 1) 1,463 mm
- distance 2 (pääty 2) 2,053 mm

Välimittojen suorituskyky oli:

- distance 1 (pääty 1) C_p 1,028 C_{pk} 0,347
- distance 2 (pääty 2) C_p 0,649 C_{pk} 0,519

Keskiarvoinen keskipisteen asema oli:

- Keskipiste, pääty 1 0,500 mm
- Keskipiste, pääty 2 0,691 mm

Keskiarvoinen vaihtelu keskipisteiden asemassa oli:

- Keskipiste, pääty 1 1,488 mm
- Keskipiste, pääty 2 1,204 mm

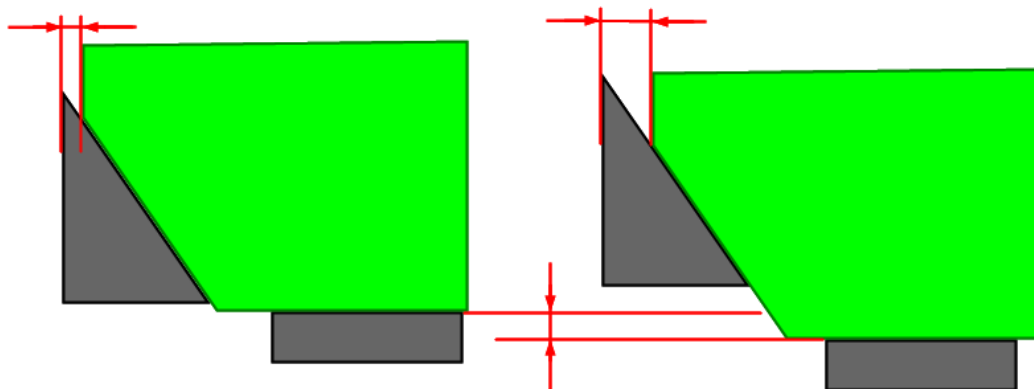
Keskipisteiden suorituskyky oli:

- Keskipiste, pääty 1	C_p 0,505	C_{pk} 0,379
- Keskipiste, pääty 2	C_p 0,625	C_{pk} 0,409

Mittaustapahtuman aiheuttama mittausepävarmuus tuloksiin oli 1,09 %.

5.6 Check - Muutokset hitsauskiinnittimeen

Viiden mitatun tuotteen jälkeen tuotteiden 1.1 ja 1.2 mittapisteet tarkastettiin mittausohjelman SPC-työkalulla ja niistä havaittiin, että pituussuuntaisessa paikoituksessa oli poikkeamaa, vaikka hitsauskiinnitin oli säädetty lähelle tavoitemittaa. Virheen syyksi tarkemmassa tarkastelussa selvisi, että tuotteen hitsauskiinnittimen säädön yhteydessä korkeussuunnan paikoitinpinnat säädettiin noin viisi millimetriä tavoitemittaa alemmas. Tuotteen paikoitus tapahtui kahdelta vinolta pinnalta, sekä yhdeltä suoralta pinnalta, jotka säädettiin tavoitemittaan (kuva 4). Säädössä ei kuitenkaan huomioitu sitä, että kun paikoitettavaa osaa laskettiin viisi millimetriä alaspäin, se liukui samalla myös koneen kulkusuunnassa taaksepäin. Tätä ei huomioitu hitsauskiinnitintä säädettäessä.



Kuva 4. Korkeusaseman muutoksen vaikutus pituussuuntaiseen paikoitukseen.

Osavalmistuksen hitsauskiinnitinvastaavan kanssa totesimme, että tuote oli yli-paikoitettu. Kyseisen osan paikoitukseen käytettiin kolmea eri vastetta. Kaksi vastetta oli vinolla pinnoilla ja yksi pystysuoralla pinnalla. Osan pituussuuntaiseen paikoitukseen riittäisi yksi paikoitinpinta ja näin ollen vinolta pinnalta paikoittavat

vasteet poistettiin hitsauskiinnittimestä ja pystysuoralta pinnalta paikoittava vaste jätettiin paikalleen.

Muutoksen jälkeen mitattiin vielä kaksi tuoteparia, joissa todettiin korjaustoimenpide onnistuneeksi. Myös hitsareilta saatiin positiivista palautetta osien sopivuudesta. Tämän myötä muutos otettiin tuotannon käyttöön PDCA-syklin act-vaiheen mukaisesti.

6 Yhteenveto mittaustuloksista

6.1 Act – Tuote 1.1 ja 1.2

Tuotteen 1.1 mittaustuloksista oli huomattavissa, että alapinnasta mitatut pintapisteen olivat pääosin negatiivisia. Tämä tarkoitti sitä, että mitattu piste oli CAD-mallin pinnan sisällä. Kun CAD-malli oli sovitettu yläpinnan mukaan ja mitattu yläpinta oli mallin kanssa samassa tasossa, voitiin todeta, että kokoonpano oli pääsääntöisesti liian kapea. Tähän tulokseen vaikuttivat kokoonpantavien osien mitat ja se, kuinka kovasti hitsauskiinnittimen painimilla painetaan kokoonpanoa kasaan valmistusprosessin aikana. Tuotteen 1.2 alapinnan mittaustulokset vastaavat hyvin lähelle tuotteen 1.1 mittaustuloksia.

Tuotteen 1.1 keskiarvoinen vaihtelu oli 0,368 mm ja tuotteen 1.2 vastaavasti 0,497 mm. Toleranssialueen ollessa tuotteen korkeudelle ± 1 mm, keskimääräinen korkeus tulisi asettua mittapisteiden osalta $\pm 0,5$ mm sisään tavoitearvosta. Tällöin ei toleranssin ylityksiä pitäisi esiintyä enää kuin satunnaisesti. Tämä vaatisi toleranssien uudelleen määrittämisen mittapiirustukseen. Mittatarkemman osan valmistaminen lisää kuitenkin kustannuksia ja valmistettavuus vaikeutuu. Tuleekin pohtia, onko tähän tarvetta, vai onko nykyinen tarkkuus riittävä.

6.2 Act – Tuote 2

Tuotteesta 2 tehtiin tarkastelut hitsauksen kannalta ja koneistuksen kannalta. Hitsauksen sovituksessa CAD-malli oli sovitettu hitsauskiinnittimien mukaan apukiinnittimien paikoittavilta pinnoilta. Tällä pyrittiin selvittämään kokoonpanon osien istuvuutta seuraavassa työvaiheessa.

Koneistuksen sovituksessa CAD-malli muutettiin toisen apukiinnittimen korkeussuuntainen paikoittava pinta tuotteiden 1.1 ja 1.2 pinnalle. Tällä mallin sovituksella haettiin paras mahdollinen vastaavuus koneistuskiinnittimen kiinnityspisteisiin.

Yläpinnan tarkastelua tehtäessä huomio kiinnittyi siihen, että pinnasta mitatut pintapisteet olivat arvoiltaan negatiivisia. Tämä johtuu siitä, että tuotteiden 1.1 ja 1.2 korkeussuunnan paikoittava puoli vaihtuu yläpuolelta alapuolelle siirryttäessä valmistussolusta 1 valmistussoluun 2. Tuotteiden 1.1 ja 1.2 ollessa keskimäärin 0,826 mm kapeat, näkyy vastaava heitto yläpinnalla. Hitsauksen sovituksen ja koneistuksen sovituksen välillä erot olivat hyvin marginaaliset.

Yläpinnan pintapisteistä toisen päädyn pintapisteissä oli mittapoikkeamaa huomattavasti enemmän kuin keskikohdalla tai vastaavasti toisessa päädyssä. Tämä poikkeama johtuu siitä, että hitsauskiinnitin joustaa pitkän jännevälän takia. Kuorman ollessa päällä tuotteiden 1.1 ja 1.2 korkeussuuntaiset paikoittimet eivät ole riittävän tukevia pitääkseen tuotteita suorassa. Korkeuspaikoittimen jalassa on myös kokoonpanon muille osille paikoitinruuvi. Mikäli kyseisellä ruuvilla puristetaan voimakkaasti, vaikuttaa tämä myös korkeusvasteen asemaan.

Yläpinnan keskimääräinen vaihtelu ensimmäisen tuotteessa 2 oli hitsauksen mukaan sovitettaessa 0,946 mm ja koneistuksen mukaan sovitettaessa 0,797 mm. Tuotteisiin 1.1 ja 1.2 verrattuna vaihtelun määrä oli kaksinkertaistunut.

Tuotteen 2 alapinnan tarkastelussa näkyivät samansuuntaiset mittapoikkeamat, kuin yläpinnalla, tosin mittapoikkeama oli positiiviseen suuntaan. Tämän perus-

teella voitiin päätellä, että mitattu piste oli CAD-mallin pinnan ulkopuolella. Kokoonpanon muodonmuutos johtuu hitsauskiinnittimen joustosta. Hitsauskiinnitin oli säädetty ilman kuormaa lähelle tavoitemittaa tuotteiden 1.1 ja 1.2 korkeussuuntaisista paikoittimista. Mikäli hitsauskiinnitin olisi riittävän tukeva, ei alapinnan pintapisteiden arvojen pitäisi poiketa positiiviseen suuntaan. Mikäli pintapistteet saisivat negatiivisen arvon, paikoitettava kappale ei ole vastannut hitsauskiinnittimen paikoittimeen.

Sovitettaessa kokoonpano koneistuksen mukaan, huomio kiinnittyi kahden mitatun pintapisteen pieneen keskimääräiseen mittapoikkeamaan ja vaihteluun sekä hyviin C_p ja C_{pk} lukuihin. Pienet poikkeamat ja vaihtelut johtuvat siitä, että kyseisiä pisteitä on käytetty kokoonpanon sovituksessa CAD-malliin. Toisin sanoen, mitausohjelmisto pyrkii asettamaan kyseiseltä kohdalta mitatut pisteet mahdollisimman lähelle CAD-mallin vastaavaa kohtaa. Pienet poikkeamat sovituksessa johtuvat rakenteen tasomaisuusheitoista.

Kuten yläpinnan mittapisteen analysoinnissa todettiin, hitsauskiinnitin joustaa pitkän jännevälän takia, tai tuotteiden 1.1 ja 1.2 korkeussuuntainen paikoitin joustaa paineen alla. Näiden mittauksen perusteella voisi yrittää kompensoida joustoa korottamalla tuotteiden 1.1 ja 1.2 toisen päädyn vastetta 1,5–2 mm ja todentaa mittauksilla mahdollinen muutos rakenteeseen. Mikäli tällä muutoksella saataisiin tuotteet 1.1 ja 1.2 suurempaan kokoonpanoon vaakatasoon nähden, keskimääräinen mittapoikkeama saataisiin lähemmäksi tavoitemittaa, ja sitä kautta parannettua prosessin C_p -lukua.

Tuotteen 2 leveyttä tarkastellessa huomio kiinnittyi päädyn 1 keskimääräiseen välimittaan, joka oli 2,651 mm tavoitemittaa leveämpi. Tuotteiden 1.1 ja 1.2 sivusuuntainen vaste oli säädetty nimellismittaan, joten kokoonpanon leviäminen johtuu sivusuuntaisen paikoittimen joustosta. Kokoonpanon massa yhdistettynä kokoonpanon muiden osien paikoitinruuvien työntövoimaan, siirtävät kyljen paikoittavaa pintaa ulospäin ja näin ollen mahdollistavat kokoonpanon leviämisen toisesta päädyistä. Vastaavaa ongelmaa ei ole havaittavissa pääty 2:n sivusuuntaisissa vasteissa, koska vasteessa ei ole muita sivusuuntaan paikoittavia tai

työntäviä ruuveja. Toisen päädyn keskimääräinen mittapoikkeama nimellismittaan onkin vain 0,802 mm.

Keskimääräinen leveyden vaihtelu kokoonpanon välimitassa oli suhteellisen suurta. Kokoonpanon päädyssä 1 keskimääräinen vaihtelu oli 2,316 mm ja vastaavasti päädyssä 2 1,463 mm. Tästä voitiin vetää johtopäätös, että valmistussolu 2:n hitsauskiinnittimen osien asettelussa oli paljon ulkoisia tekijöitä, jotka vaikuttavat tuotteiden 1.1 ja 1.2 asemointiin, kuten esimerkiksi kiinnitysjärjestys. Lisäksi sivusuuntaiset paikoittimet olivat liian joustavat, ja mahdollistavat tuotteiden asettumisen liian leveälle.

Välimittojen suorituskykyluvut olivat päädyille 1 C_p 1,028 ja C_{pk} 0,347. Vastaavat luvut päädyille 2 olivat C_p 0,649 ja C_{pk} 0,519. Vaikka keulan välimitta poikkesi enemmän tavoitemitasta kuin takaosan välimitta, niin keskimääräinen vaihtelu oli takaosassa suurempaa. Tämän saman pystyi havaitsemaan päädyn 1 välimitan suuremmasta C_p -luvusta ja pienemmästä C_{pk} -luvusta verrattuna päädyn 2 vastaaviin lukuihin.

Sivusuuntaisten vasteiden jousto olisi hyvä ottaa huomioon tulevaisuudessa uusia hitsauskiinnittimiä suunnitellessa. Rakenteen jäykkyys tulisi olla riittävä, mikäli samaan rakenteeseen liitetään painimia, joiden työntövoimat ovat samansuuntaisia, kuin paikoittavan vasteen pinta.

Tuote 2:n kokoonpanon keskipisteen keskimääräinen poikkeama päädyssä 1 oli 0,500 mm. Pääty 2:n vastaava poikkeama oli 0,691 mm. Nämä mittausohjelmiston ilmoittamat keskiarvoiset poikkeamat olivat kuitenkin hieman harhaanjohtavat, koska keskipiste voi saavuttaa, joko positiivisen, tai negatiivisen arvon koordinaatistossa. Jotta keskimääräisen poikkeaman sai todennettua oikein, tuli mittapisteiden arvoja käsitellä luvun itseisarvoina. Näin laskettuna pääty 1:n keskimääräinen poikkeama oli 0,978 mm ja pääty 2:n 0,926 mm. Yksittäisiä kokoonpanoja tarkastellessa kahdessa tuotteessa on selvä yli kahden millimetrin poikkeama keskipisteen sijainnissa. Toinen keskipisteen poikkeama oli päädyssä 1

ja toinen päädyssä 2. Tämän perusteella voitiin todeta, että myös peräosan sivusuuntaiset vasteet joustivat, kun niihin kohdistettiin riittävän suuri sivusuuntainen voima.

Keskimääräinen tuotteiden 1.1 ja 1.2 välisen keskipisteen vaihtelu päädyssä 1 oli 1,488 mm ja päädyssä 2 1,204 mm. Tämän myötä prosessin suorituskykyluvut olivat pääty 1:n keskipisteelle C_p 0,505 ja C_{pk} 0,379 ja pääty 2:n keskipisteelle C_p 0,625 ja C_{pk} 0,409.

Valmistusolu 2:n apukiinnitin 2:ssa oli havaittavissa samansuuntaista poikkeamaa symmetriassa kuin tuotteessa 2. Säättämällä apukiinnittimet lähemmäksi symmetriakeskilinjaa, voitaisiin mahdollisesti vaikuttaa kokoonpanon symmetrisyyteen. Ennen säätöä tulee kuitenkin pohtia, onko tarpeellista säätää noin 0,5 millimetrin poikkeamaa näin isossa rakenteessa.

7 Pohdinta

Opinnäytetyön aiheena oli seurata osavalmistuksen hitsausprosessin aikaisia mittamuutoksia osakokoonpanoissa. Tarkoituksena oli selvittää, mikä nykyinen taso on vaihteluiden sekä suorituskyvyn osalta. Haasteelliseksi tarkastelun kohteeksi valikoituneen kokoonpanon vaihteluiden tarkastamisen teki se, että hitsausprosessin aikana eri työpisteillä kappaleen paikoittavat pinnat muuttuivat yläpinnalta alapinnalle. Tämän takia tarkastelut tehtiinkin hitsauksen ja koneistuksen näkökulmasta valmistusolu 2:n kokoonpanolle.

Mittamuutoksia tarkasteltiin vain valmistusprosessin aikana, joten irrallisia osia ei tarkastettu ennen kasausta ja näin ollen ei tiedetä, mikä on osien vaihtelun vaikutus prosessin kokonaisvaihteluun. Vastaavaa tyylistä tarkastelua olisi mahdollista tehdä myös esimerkiksi osakokoonpanon aikaisemmassa vaiheessa, jolloin tarkastelu aloitettaisiin irto-osan tasolta, osan mitoista ja mittavaihteluista ja seu-

rattaisiin osan paikoittumista ensimmäisellä osakokoonpanopisteellä. Tällöin voisimme paremmin todeta yksittäisten osien mittaheittojen vaikutuksen kokoonpanoon. Tähän ei kuitenkaan ryhdytty, ettei opinnäytetyö menisi liian laajaksi.

Myöskään ulkoisten tekijöiden vaikutusta prosessiin ei lähdetty selvittämään opinnäytetyön työmäärän rajaamiseksi. Osakokoonpanoja olisi mahdollista lähteä tarkastamaan jopa työntekijätasolla. Tällöin mitattaisiin vain yhden työntekijän valmistamia tuotteita ja mittauksista saatuja tuloksia verrattaisiin kaikkien työntekijöiden valmistamiin tuotteisiin. Saadusta erosta olisi mahdollista päätellä työntekijöiden keskimääräisen vaikutuksen prosessiin.

Koneistuksen kannalta tarkastelua olisi hyvä suorittaa myös robottihitsauksen jälkeen kokoonpanoon. Opinnäytetyössä suoritettu tarkastelu näytti vain keskenräisen valmistusprosessin tilanteen valmistussolu 2:n jälkeen. Tarkastelun kohteena olleiden kokoonpanojen mittaustuloksista sai suuntaa antavan tuloksen vaihtelun kasvamiselle. Näiden kahden työpisteen välillä vaihtelun määrä kaksinkertaistui. Pienentämällä valmistusketjun alkupään vaihtelun määrää, voidaan suoraan vaikuttaa lopputuotteen kokonaisvaihteluun.

Mittaukset tarkastettaville tuotteille suoritettiin kahden eri mittaajan toimesta. Gage R&R testi suoritettiin samojen mittaajien toimesta kuin tuotteiden mittaukset. Testissä kopioitiin tuotteen 1.1 ja 1.2 mittausmenetelmää, niin mittauksen, kuin CAD-mallin sovituksen osalta, ja testin tuloksena saatiin ± 1 mm toleranssi-alueella mittausepävarmuudeksi 4,43 %. Alle 10 % mittausepävarmuus on six sigman mukaan hyväksyttävä, joten mittaustuloksia voidaan pitää riittävän luotettavina toleranssialueen ollessa minimissään kaksi millimetriä. Tarkasteltavien tuotteiden pienin toleranssi oli ± 1 mm.

Pintapisteillä CAD-mallin sovittaminen osoittautui mittausten aikana erittäin hyväksi tavaksi kappaleen sovittamiseen. Sovitustapa oli nopea ja mittaushjelmisto ohjasi koko sovitusprosessin ajan mittaajaa. Toistettavuus on myös riittävän hyvällä tasolla, kuten Gage R&R tuloksista voitiin päätellä. Kyseistä sovitusmenetelmää onkin hyvä käyttää jatkossa tuotteiden mittauksen apuna.

Opinnäytetyön tekeminen oli kaikkiaan mielenkiintoinen ja opettava projekti. John Deere Forestry Oy:ltä saatu aihe sivusi jo valmiiksi omaa työnkuvaa koordinaattimittauksen osalta, mutta muutoin eri kokoonpanojen vaihtelujen seuranta projektiluontoisesti oli uutta. Lisäksi pääsin soveltamaan koordinaattimittausohjelmiston omaa SPC-työkalua käytännössä ja analysoimaan systemaattisen mittauksen tuloksia.

Opinnäytetyön projektin perusteella statistisella prosessin valvonnalla saavutetaan selkeää hyötyä prosessin seurannassa ja parantamisessa. Suhteellisen pienellä otannalla sai prosessista suuntaa antavan kuvan ja pystyi havaitsemaan suurimmat toistuvat poikkeamat. Näistä korjattiinkin jo opinnäytetyön aikana tuotteiden 1.1 ja 1.2 paikoitusvirhe. Toinen selvä poikkeama oli tuotteiden 1.1 ja 1.2 paikoituksessa valmistussolu 2:ssa. Kyseisestä poikkeamasta olisikin hyvä tehdä jatko projekti ja tutkia, kuinka kyseisen poikkeaman saisi poistettua.

Lähteet

- Indiamart. 2021. Welding fixtures. <https://www.indiamart.com/proddetail/frame-welding-fixture-11605355048.html>. 4.3.2021.
- Innovmetric. 2021. Polyworks Inspector. <https://www.innovmetric.com/products/polyworks-inspector>. 3.3.2021
- Jyväskylän ammattikorkeakoulu JAMK. 2020. Mittausepävarmuuden parempi hallinta tavoittelemisen arvoista. <https://blogit.jamk.fi/techtothefuture/2020/02/24/mittausepavarmuuden-parempi-hallinta-tavoittelemisen-arvoista/>. 18.3.2021.
- John Deere kotisivu. 2021. <https://www.deere.com>. 3.3.2021.
- Karjalainen, T. 2006. Taustaa six sigmalle. <http://www.sixsigma.fi/index.php/fi/artikkelit/taustaa-six-sigmalle/>. 7.3.2021.
- Kehmet. 2021. PDCA-sykli. <https://kehmet.hel.fi/menetelmalaari/pdca-sykli/>. 28.2.2021.
- Laatutieto. 2021. Tilastolliset menetelmät. https://www.laatutieto.fi/product_catalog.php?c=46&s=3. 1.3.2021
- Management Consulting Services Oy MCS. 2021. PDCA-malli ja jatkuva parantaminen. <https://mcs.fi/pdca-malli-ja-jatkuva-parantaminen/>. 2.3.2021.
- Minitab. 2021. Minitab statistical software. <https://www.minitab.com/en-us/products/minitab/>. 2.3.2021)
- Nee, A, Y, C & Tao, Z, J & Kumar, A, S. 2004. Advanced treatise on fixture design and planning. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Pere, A 2012. Koneenpiirustus 1&2. Espoo: Kirpe Oy.
- Rentschler, M. 2021. Ausrüstung mit höchster Präzision. <https://www.mobile3d-ivr.de/ausruestung>. 3.3.2021).
- Salomäki, R. 2003. Suorituskykyiset prosessit – Hyödynnä SPC. Tampere: Tammer-Paino Oy
- Six sigma. 2021. Vaihtelu ja PDCA. <http://www.sixsigma.fi/index.php/fi/lean/vaihtelu-ja-pdca/>. 28.2.2021.
- Six sigma free training. 2021. Choosing a right control chart. <http://www.sixsigmatrainingfree.com/choosing-a-right-control-chart.html>. 7.3.2021.
- Six sigma material. 2020. I-MR-charts. <https://www.six-sigma-material.com/I-MR.html>. 11.3.2021.
- Tikka, H 2007. Koordinaattimittaus. Tampere: Tampereen Yliopistopaino Oy.
- Tuominen, K & Tuominen, R & Malmberg, L 2009. Lean – kohti täydellisyyttä. Helsinki: Oy Benchmarking Ltd.
- What is six sigma. 2019. Individuals–Moving Range Charts (I-MR). <https://www.whatissixsigma.net/imr/>. 25.3.2021
- 1factory. 2020. A guide to process capability analysis Cp, Cpk, Pp, Ppk. <https://www.1factory.com/quality-academy/guide-to-process-capability-analysis-cp-cpk-pp-ppk.html>. 12.2.2021

Gage R&R tulokset

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for Mittaustulos

Gage name: Faro Platinum
 Date of study: 25.3.2021
 Reported by: DE
 Tolerance: 0,043
 Misc:

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Parts	1	0,206451	0,206451	1951,33	0,014
Operators	1	0,000336	0,000336	3,18	0,325
Parts * Operators	1	0,000106	0,000106	0,50	0,489
Repeatability	16	0,003375	0,000211		
Total	19	0,210268			

α to remove interaction term = 0,05

Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Parts	1	0,206451	0,206451	1008,35	0,000
Operators	1	0,000336	0,000336	1,64	0,217
Repeatability	17	0,003481	0,000205		
Total	19	0,210268			

Gage R&R

Variance Components

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0,0002179	1,05
Repeatability	0,0002047	0,98
Reproducibility	0,0000131	0,06
Operators	0,0000131	0,06
Part-To-Part	0,0206246	98,95
Total Variation	0,0208425	100,00

Process tolerance = 2

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0,014761	0,088566	10,22	4,43
Repeatability	0,014309	0,085853	9,91	4,29
Reproducibility	0,003626	0,021754	2,51	1,09
Operators	0,003626	0,021754	2,51	1,09
Part-To-Part	0,143613	0,861677	99,48	43,08
Total Variation	0,144369	0,866217	100,00	43,31

Number of Distinct Categories = 13

Probabilities of Misclassification

Joint Probability

Description	Probability
A randomly selected part is bad but accepted	0,011
A randomly selected part is good but rejected	0,012

Conditional Probability

Description	Probability
A part from a group of bad products is accepted	0,054
A part from a group of good products is rejected	0,015

Gage R&R for Mittaustulos