

Pekka Väyrynen

**DIM-JÄRJESTELMÄN HYÖDYNTÄMINEN SUUNNITTELUSSA,
VALMISTUKSESSA JA MITTAUKSESSA**

**DIM-JÄRJESTELMÄN HYÖDYNTÄMINEN SUUNNITTELUSSA,
VALMISTUKSESSA JA MITTAUKSESSA**

Pekka Väyrynen
Opinnäytetyö
Kevät 2022
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Pekka Väyrynen

Opinnäytetyön nimi: DIM-järjestelmän hyödyntäminen suunnittelussa, valmistuksessa ja mittauksessa

Työn ohjaaja: Jari Viitala

Työn valmistuslukuksi ja -vuosi: kevät 2022

Sivumäärä: 85 + 1 liite

Opinnäytetyössä tutkittiin Dimensional Management -järjestelmän (DIM) soveltuvuutta suunnitteluun, valmistukseen ja 3D-mittaukseen Proventia Oy:llä. Työssä oli tavoitteena kehittää yrityksen käyttöön DIM-suunnitteluohje ja selvittää mahdollisuuksia parantaa 3D-mittausprosessia malliperusteista tuotemäärittelyä eli MBD:tä apuna käyttäen sekä kokeilemalla käsivaraisen 3D-skannerin soveltuvuutta 3D-skannauksessa Proventian laadunvarmistusosastolla.

Proventialla oli tarvetta DIM-ohjeelle, sillä yrityksellä ei sellaista vielä ollut. Proventialla sovelletaan DIM-järjestelmää jo joiltakin osin, ja ohjeen avulla yritys voisi ottaa järjestelmän käyttöön aiempaa laajemmin. Yritys voi myös hyödyntää ohjetta uusien työntekijöiden perehdytyksessä. Innoituksena tässä toimi Proventian yhteistyöyrityksen kokemukset DIM-järjestelmästä. DIM:n avulla saadaan kappaleille ja työkaluille laadittua yhtenäinen paikoitusjärjestelmä peruselementtien avulla, jolloin kaikilla tuotantovaiheilla on sama proseduurit. Näin saadaan tuotanto hallintaan hyvin, kun eri tuotantovaiheiden välillä on yhteinen kieli. Näin ollen tilastollinen prosessinohjaus helpottuu.

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi teoriaa 3D-mittauksesta, DIM-järjestelmästä ja siihen läheisesti liittyvästä ISO GPS -järjestelmästä eli geometrisesta tuotemäärittelystä. GPS-järjestelmästä käydään läpi erityisesti geometrisiä toleransseja, peruselementtijärjestelmää sekä 3-2-1-menetelmää. Lisäksi esitellään MBD pääpiirteittäin. MBD:tä käytettäessä luovutaan 2D-piirustuksista eli tuotteen valmistustieto määritellään suoraan 3D-malliin. Mallissa oleva data voidaan viedä työstökoneisiin ja laadunvarmistusohjelmiin STEP AP242 -tiedostomuodon avulla. 3D-mittausprosessin kehittämiseen liittyvissä osioissa esitellään laserskannerin testaus sekä MBD:n hyödyntäminen mittauksista varten.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi yrityksen käyttöön DIM-suunnitteluohje. Ohje sisältää DIM-järjestelmän esittelyn, tapausesimerkin työkappaleen paikoittamisesta hitsausjigiin ja kehitysideoita, kuten mittapistepiirustuksia. Ohjeessa käydään läpi DIM-järjestelmän soveltamista suunnittelun, valmistuksen ja mittauksen näkökulmista. Myös alihankkijan ja asiakkaan näkökulmaa on otettu työssä huomioon. Ohje sai positiivisen vastaanoton, ja työ toimi alkusysäyksenä järjestelmän aiempaa laajamittaisemmalle hyödyntämiselle. Järjestelmä aiotaan ottaa käyttöön, koska siinä nähtiin runsaasti hyviä puolia. Järjestelmä lisää prosessin suorituskykyä, parantaa laatua ja pienentää läpimenoaikaa. DIM-suunnitteluohjeen lyhennetty versio löytyy tästä opinnäytetyöstä liitteenä.

Asiasanat: DIM, MBD, 3D-skannaus, paikoitus, peruselementti, geometrinen toleranssi, 3-2-1-menetelmä.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Program in Mechanical Engineering, Option of Machine Automation

Author(s): Pekka Väyrynen

Title of thesis: Utilization of DIM System in Design, Manufacturing and 3D-measurement

Supervisor(s): Jari Viitala

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2022

Number of pages: 85 + 1 appendix

The purpose of this thesis was to do research on the utilization of the Dimensional Management System in a product development, production and quality control at Proventia Oy. The main task was to create a DIM design guide to the needs of Proventia. The instruction was intended to provide basic information about the DIM system and the ISO GPS system, which is closely related to the DIM. The company could then take advantage of this guide for a wider deployment of the system. The DIM system allows to create an unambiguous datum system, which is used at all the stages of production. When this kind of alignment system is used, all phases of production speak the same language.

The thesis included a part concerning of the development of 3D-measurement system. In this section, a handheld 3D-laser scanner was tested to obtain some information on the suitability of that scanner for the Proventia quality department. The SolidWorks MBD was used to gather information about ability to import manufacturing information into measurement software.

This thesis includes a theory of 3D-scanning, the DIM system and the ISO GPS system. In particular, geometric tolerances, the datum system and the 3-2-1 method are considered. In addition, the outline of the model-based definition is presented. The thesis describes the stages, content and final result of the design instruction. The testing phases of the laser scanner and the utilization of the MBD for measurement are also presented.

As a result of the thesis, the DIM guide was made for the company. Proventia wanted the design guide for DIM because the company did not have one before. With this guide, the company can start to implement the DIM system on a greater scale and use it for employee orientation. The incentive for this was the experience of the Proventia partner company in the DIM system. In the DIM system, a uniform alignment system is created for workpieces. The datum system or the 3-2-1 system is applied to all functions, it is the basis of all actions. When the alignment is carried out in the right way, errors occur elsewhere on the surface of the part, so the error is not in the alignment. A censored version of the DIM design guide can be found in the appendix to this thesis.

Keywords: DIM, MBD, alignment, datum system, geometric tolerance, 3-2-1 principle

ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö on tehty Proventia Oy:lle Oulunsalossa. Opinnäytetyön toimeksiantajayrityksen edustajana toimi tuotantojohtaja Tomi Palovaara ja ohjaavana opettajana Oulun ammattikorkeakoulun puolelta lehtori Jari Viitala. Kiitän työn aiheen tarjoamisesta Proventia Oy:tä ja kiitän kaikkia opinnäytetyöprojektiin osallistuneita henkilöitä ja tahoja. Kanssanne on ollut ilo työskennellä, ja annan vielä erityiskiitokset mukavasta työyhteisöstä ja positiivisesta työilmapiiristä.

-Pekka Väyrynen

19.5.2022

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ..... | 3 |
| ABSTRACT..... | 4 |
| SANASTO..... | 8 |
| 1 JOHDANTO..... | 10 |
| 2 TOIMEKSIANTAJA PROVENTIA OY..... | 12 |
| 3 ERILAISET 3D-SKANNAUSMENETELMÄT..... | 13 |
| 3.1 3D-skannausmenetelmien luokittelu..... | 13 |
| 3.2 Passiivisten ja aktiivisten skannerien erot..... | 14 |
| 3.3 Skannausteknologioita..... | 14 |
| 3.3.1 Koskettava 3D-mittaus..... | 14 |
| 3.3.2 Ei-koskettava 3D-mittaus..... | 15 |
| 4 3D-SKANNAUSPROSESSI..... | 21 |
| 4.1 3D-skannaus Proventialla..... | 21 |
| 4.1.1 Skannattavan kappaleen alkuvalmistelut..... | 21 |
| 4.1.2 Kappaleen skannaus..... | 23 |
| 4.1.3 Kappaleen mittaus ATOS Professional -mittausohjelmassa..... | 25 |
| 4.1.4 Mittausraportin laatiminen..... | 28 |
| 4.2 HandySCAN-laserskannerin testaus..... | 28 |
| 4.2.1 Skannauksen vaiheet HandySCAN-käsiskannerilla..... | 29 |
| 4.2.2 Loppupäätelmä HandySCAN-testauksesta..... | 33 |
| 4.3 Virtual Assembly eli virtuaalivalmistus mittauksen apuna..... | 33 |
| 4.4 Live-tilan hyödyntäminen..... | 34 |
| 5 YHTENÄISEN PAIKOITUSJÄRJESTELMÄN SOVELTAMINEN SUUNNITTELUUN, HITSAUKSEEN JA MITTAUKSEEN..... | 35 |
| 5.1 Standardit ja GPS-järjestelmän perussäännöt..... | 36 |
| 5.2 Peruselementit ja 3-2-1-menetelmä..... | 37 |
| 5.2.1 Peruselementin ja todellisen peruselementin määritelmä..... | 37 |
| 5.2.2 Peruselementtijärjestelmän määritelmä ja kappaleen vapausasteiden lukitseminen..... | 38 |
| 5.2.3 Datum Target ja 3-2-1-menetelmä..... | 40 |
| 5.3 Mitoitus..... | 42 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.3.1 | Toleranssit | 43 |
| 5.3.2 | Toleranssianalyysi | 44 |
| 5.3.3 | Pituusmittojen tolerointi | 48 |
| 5.3.4 | Geometriset toleranssit | 51 |
| 5.4 | Tilastollinen prosessinohjaus (SPC) | 55 |
| 5.4.1 | SPC-ohjauskortit | 55 |
| 5.4.2 | Prosessin kyvykkyys | 56 |
| 5.4.3 | Lean Six Sigma | 59 |
| 5.4.4 | Mittaussysteemin analyysi (MSA) | 61 |
| 6 | SOLIDWORKS MBD (MALLIPERUSTEINEN TUOTEMÄÄRITTELY) | 63 |
| 6.1 | Mallintamisen nykytilanne ja vaatimukset MBD:hen siirryttäessä | 63 |
| 6.2 | MBD-malli | 64 |
| 6.3 | MBD:n hyödyntäminen Proventiaalla | 65 |
| 7 | DIM-SUUNNITTELUOHJEEN TOTEUTUS | 66 |
| 7.1 | Tapausesimerkin valinta DIM-suunnitteluohjetta varten | 66 |
| 7.2 | Ohjeen sisällön määrittäminen | 67 |
| 7.3 | ISO GPS -järjestelmään liittyvät standardit | 67 |
| 7.4 | Peruselementit | 67 |
| 7.5 | Mitat, toleranssit ja toleranssianalyysi | 69 |
| 7.6 | Geometrinen tolerointi | 69 |
| 7.7 | Tapausesimerkki: mikserin robottihitsaus hitsausjigissä | 70 |
| 7.8 | Laadunvarmistus | 71 |
| 7.9 | Mittapistepiirustukset | 72 |
| 7.10 | Asiakasnäkökulma | 73 |
| 8 | TYÖN TULOKSET | 75 |
| 9 | YHTEENVETO | 76 |
| | LÄHTEET | 78 |
| | LIITTEET | 86 |

SANASTO

| | |
|--------------|--|
| actual | aktuaalidata eli skannatun kappaleen data, ts. todellisen kappaleen mittaustiedot |
| CAD | Computer Aided Design eli tietokoneavusteinen suunnittelu |
| DIM | Dimensional Management eli mittojen hallinta |
| DoF | Degrees of Freedom, vapausasteet, joita on kappaleella yhteensä kuusi |
| GPS | Geometrical Product Specifications eli geometrinen tuotemäärittely |
| ISO | International Organization for Standardization eli kansainvälinen standardisointijärjestö |
| MBD | Model Based Definition eli malliperusteinen tuotemäärittely |
| mesh | joukosta pieniä kolmioita koostuva kolmioverkko, joka muodostaa skannatun pinnan muodon |
| nominal | nominaalidata eli CAD-mallin nimellinen data |
| PDM | Product Data Management eli tuotetiedon hallinta |
| PMI | Product Manufacturing Information eli tuote- ja valmistustieto |
| prealignment | alkulinjaus mittauksessa, jossa poikkeama jakautuu tasaisesti ympäri kappaletta |
| RPS | Reference Point System eli paikoituksessa käytettävä referenssipistejärjestelmä |
| STEP | Standard for the Product Data Exchange eli tiedostomuoto, jolla siirretään 3D-CAD-tiedostoja eri ohjelmien välillä |
| STL | Standard Triangle Language eli tiedostomuoto, jossa 3D-mallin geometria on määritelty kolmioverkkona |

TED

Theoretically Exact Dimension eli teoreettisesti tarkka mitta

1 JOHDANTO

Laadunvalvonta näyttäytyy tärkeänä osana tuotteen valmistusprosessia nykyaikana. Laadunvalvontaan on käytettävissä monia erilaisia mittalaitteita, kuten optisia 3D-skannereita, koordinaattimittauskoneita, laserskannereita ja perinteisiä mittavälineitä, kuten rullamitta ja työntömitta. Yrityksillä on luonnollisesti myös erilaisia laadunhallintajärjestelmiä. Keskeinen laatustandardi on ISO 9001. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii työkonoiden päästönhallintajärjestelmiin keskittynyt Proventia Oy. Vietin kesän 2021 Proventialla kesätöissä 3D-mittaajana laadunvalvontaosastolla ja kesätyö johti lopulta opinnäytetyöhön. Opinnäytetyöprojekti alkoi yrityksessä lokakuussa 2021.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, voiko Proventialla hyödyntää DIM-järjestelmää suunnittelussa, valmistuksessa ja mittauksessa. DIM tarkoittaa Dimensional Managementia eli mittojen hallintaa. DIM:n pääperiaatteeseen kuuluu luoda yhtenäinen ja yksiselitteinen paikoitusjärjestelmä koko tuotteen valmistusketjun ajaksi. DIM-järjestelmä on tarkoituksena ottaa käyttöön heti suunnittelun alkuvaiheesta lähtien ja sama järjestelmä olisi käytössä niin suunnittelussa, hitsauksessa kuin mittauksessakin. Lisäksi DIM-ketjun pitäisi säilyä myös alihankkijalla ja asiakkaallakin. DIM-järjestelmää käytettäessä määritellään peruselementit siten, että ne pysyvät aina samana jokaisessa eri tuotantovaiheessa. DIM-järjestelmässä on tapana käyttää erityisesti 3-2-1-menetelmää kappaleen paikoituksessa.

Ensisijaisena tehtävänä on kehittää yritykselle käyttökelpoinen DIM-suunnitteluohje, joka tehdään Proventian projektin X robottihitsausprosessin pohjalta. Tässä tapausesimerkissä käydään läpi, miten DIM toteutuu kyseisessä prosessissa tällä hetkellä ja miten sitä voisi kehittää DIM-periaatteiden mukaisesti. Ohjeen on tarkoituksena jäädä yrityksen käyttöön projektin valmistuttua. Sitä apuna käyttäen yritys voi ottaa järjestelmän käyttöön muissakin yrityksen prosesseissa, joissa sitä ei ole vielä hyödynnetty. Tavoitteena on myös kehittää olemassa olevaa 3D-mittausprosessia nykyistä paremmaksi. Tässä osuudessa on tarkoituksena hyödyntää mallipohjaista tuotemäärittelyä mittauksen apuna ja selvittää, sopiiko käsivarainen Creaform HandySCAN -laserskanneri yrityksen käyttöön.

Yhtenäinen paikoitusjärjestelmä tuo selvää hyötyä suunnitteluun, valmistukseen ja laadunvarmistukseen. Tämä yhdenmukainen toimintatapa paikoituksen toteuttamisessa tuo viat ilmi ja tekee

ongelmien analysoimisesta mahdollisimman helppoa. Oikeanlaisesti tehty paikoitus siirtää kappaleessa esiintyvän virheen muualle kappaleen pinnalla eli vika ei lopulta ole itse paikoituksessa. Tätä kyseistä paikoitusmenettelyä käytetään laajalti muun muassa ajoneuvoteollisuudessa, esimerkkeinä Ponsse, Porsche ja Valmet Automotive.

2 TOIMEKSIANTAJA PROVENTIA OY

Proventia Oy on oululaislähtöinen, maailmanlaajuisesti toimiva teknologyhtiö. Proventia tarjoaa tuotteita ja palveluita moottori-, ajoneuvo- ja työkoneteollisuuteen ilmastonmuutoksen torjumiseksi ja ilmansaasteongelman ratkaisemiseksi. Proventia kehittää ja valmistaa ajoneuvoteollisuuteen modulaarisia testauskeskuksia sähkö- ja hybridiajoneuvojen, niiden voimalinjojen ja akustojen tuotekehitykseen ja testaamiseen. Proventia kehittää ja valmistaa myös työkoneneiden ja raskaiden ajoneuvojen voimalinjojen energiatehokkuutta parantavia järjestelmiä ja -komponentteja. Näihin kuuluvat päästöjen puhdistusjärjestelmät, lämpöeristekomponentit ja sähköiset voimalinjakomponentit ja akustot. (1.)

Proventian Oulunsalon toimipisteellä (kuva 1) suunnitellaan ja valmistetaan pakokaasun puhdistusjärjestelmien prototyyppejä työkoneneisiin, kuten traktoreihin. Prototyypit menevät sitten sarjatuo-
tantaan Proventian Tšekin tehtaalla Kuřimissa, Brnon kupeessa. Lisäksi Proventialla on Oulunsalossa modulaarisia testiyksiköitä nopeasti kehittyvää ajoneuvoteollisuutta varten. Proventialla tehdään myös jälkiasennuksia jo liikenteessä oleviin ajoneuvoihin, kuten Lontoon busseihin. Tätä liiketoiminta-aluetta kutsutaan Retrofitiksi. Oulun Limingantullissa Proventialla on lämpöeristekomponentteihin keskittynyt tehdas eli PTC-liiketoiminta-alue (Proventia Thermal Components). (1.)



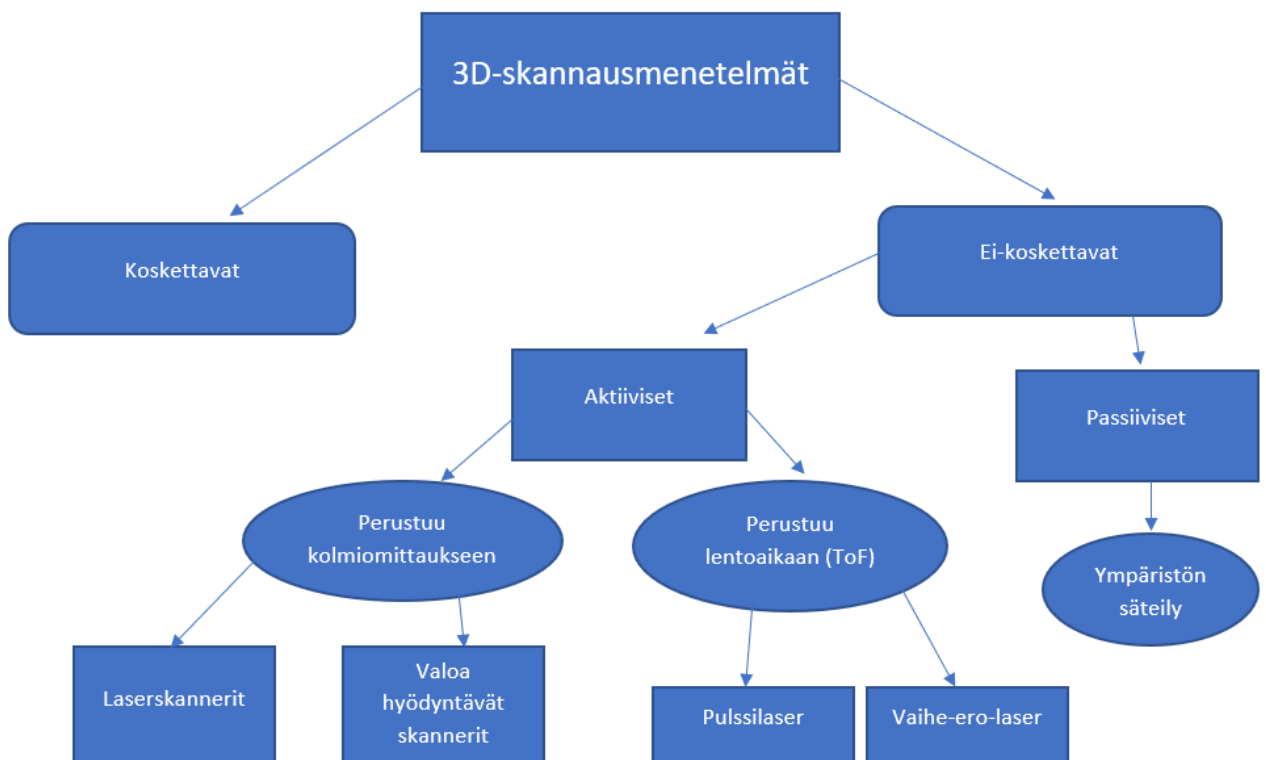
KUVA 1. Proventia Oy:n Oulunsalossa sijaitseva toimipiste (1)

3 ERILAISET 3D-SKANNAUSMENETELMÄT

Tässä osiossa käydään läpi teoriaa 3D-mittauksesta, joka voidaan suorittaa usealla eri tavalla. 3D-skannauksen perusperiaatteena on kerätä skannausdataa kuvattavasta kohteesta, oli kohteena sitten objekti, ympäristö tai ihminen. 3D-skannauksia voidaan käyttää hyväksi CAD-ohjelmien kanssa ja myös 3D-tulostuksessa. 3D-skannaus on erinomainen tapa takaisinmallinnuksessa, jota kutsutaan termillä reverse engineering. 3D-skannausta käytetään hyödyksi monilla eri teollisuuden aloilla, kuten vaikkapa ajoneuvo-, ilmailu-, hammas- sekä videopeliteollisuudessa. (2.)

3.1 3D-skannausmenetelmien luokittelu

3D-skannaus voi perustua erilaisiin fyysisiin periaatteisiin ja ne voidaan luokitella koskettaviin ja ei-koskettaviin skannereihin. Nämä luokitellaan passiivisiin ja aktiivisiin skannereihin ja ne edelleen alakategorioihin kuvassa 2 olevan kaavion mukaisesti. (3.)



KUVA 2. Kaavio skannerityypeistä (3)

3.2 Passiivisten ja aktiivisten skannerien erot

Passiiviset skannerit eivät omatoimisesti lähetä säteilyä, vaan ne ottavat tarvitsemansa valon ympäristöstään. Tämän takia nämä passiiviset skannerit ovatkin 3D-skannereista yksinkertaisimpia. Passiiviset skannerit toimivat samaan tapaan kuin vaikkapa matkapuhelimen kamera. (4.)

Aktiiviset skannerit taas toimivat täysin eri tavalla, koska ne tuottavat itse säteilyä, esimerkiksi sinistä valoa, ja sen heijastuminen kappaleesta tallennetaan skanneriin tai skannerin kanssa toimivaan mittausohjelmaan. Valonnopeuden ollessa vakio on hyvin helppoa laskea valonsäteen edestakaisin kulkema matka suhteessa aikaan. Näin saadaan tietoon kappaleen pinnalla olevan heijastuspisteen etäisyys skannerista. (4.)

Aktiivisetkin skannerit voidaan vielä jakaa kahteen eri kategoriaan, itsepaikantaviin ja merkkipaikantaviin skannereihin. Merkkipaikantavat skannerit vaativat kohteeseen tai kohteen ympäristöön kiinnitettäviä referenssipisteitä, joiden avulla skanneri pystyy paikantamaan itsensä ja laskemaan kohdekappaleen mittasuhteet. Itsepaikantavat skannerit eivät näitä merkkipisteitä vaadi, vaan ne tietävät sijaintinsa jatkuvan skannauksen ansiosta. Tämä on uudempaa tekniikkaa 3D-skannauksessa. (4.)

3.3 Skannausteknologioita

Tässä osiossa käydään läpi yleisimpiä skannausteknologioita koskettavien sekä ei-koskettavien mittalaitteiden kategorioista. Seuraavaksi esiteltävät teknologiat perustuvat fyysiseen kosketukseen, laserkolmiomittaukseen, strukturoituun valoon ja valokuvaan sekä lasersäteiden lentoaikaan.

3.3.1 Koskettava 3D-mittaus

CMM-mittauslaitteet eli koordinaattimittauskoneet ovat koskettavia mittauslaitteita. Metodilla mitataan kohdetta pisteiden avulla pinnasta käyttäen mittapäätä eli probea, joka voi olla mekaaninen, optinen tai fyysinen. (5.) Yleensä tämä mittakärki on pallomainen ja valmistettu rubiinista. Mitattavan kappaleen mahdollinen värähtely on eliminoitu käyttämällä massiivista graniittipöytää mittausalustana. Alustan materiaalina on graniitti sen takia, sillä sen muoto pysyy muuttumattomana ajan

kuluessa eikä siihen vaikuta lämpötilanmuutokset. (6.) Koskettava 3D-mittaus tunnetaan myös 3D-digitointina (5).

Koskettavat 3D-mittalaitteet tutkivat kohteen fyysisesti koskettamalla esineen pysyessä tukevasti paikallaan. Kosketusanturia siirretään pitkin kappaleen pintaa 3D-datan tallentamiseksi. Kosketusanturi liikkuu X-, Y- ja Z-suunnissa. Anturi on joskus kiinnitetty nivelvarteen (kuva 3), joka pystyy liikkumaan vapaammin kuin CMM-laitteeseen (kuva 3) kiinnitetty mittapää. Tämä on kätevämpi tapa, jos kappaleessa on sellaisia kohtia, joihin ei perinteisellä CMM-laitteistolla pääse käsiksi. Muuten toimintaperiaate on sama kuin CMM-laitetta käytettäessä. (5.)



KUVA 3. Vasemmalla Mitutoyon koordinaattimittauskone (CMM) ja oikealla Kreon-nivelvarsimitauskone (7; 8)

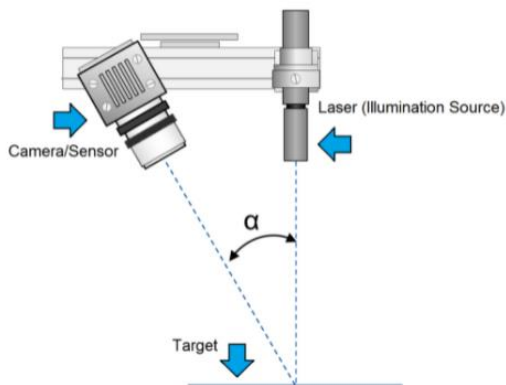
Koskettavaa 3D-mittausta käytetään laajalti laadunvalvontaan valmistuksen jälkeen tai huoltotoimenpiteiden aikana. Tämän skannausmenetelmän etuina ovat sen tarkkuus ja kyky skannata läpinäkyviä tai heijastavia pintoja, toisaalta sen hitaus ja kyvyttömyys työskennellä orgaanisten ja vapaamuotoisten muotojen kanssa aiheuttavat haasteita. (5.) Koska tämä mittaustapa vaatii aina fyysisen kosketuksen kappaleeseen mittapäällä, aivan herkimpiä ja pehmeitä kappaleita, kuten joi-takin muoveja, tällä tavalla ei voi luotettavasti mitata. Mittapää saattaa taivuttaa herkkiä muovilaa-tuja, ja se vääristäisi mittaustuloksia. (6.)

3.3.2 Ei-koskettava 3D-mittaus

Ei-koskettavassa 3D-mittauksessa luodaan pistepilvi eli digitaalinen malli skannatusta kappaleesta. Se on kokoelma 3D-pisteitä, jotka tuotetaan 3D-sensoreilla, kuten esimerkiksi strukturoidulla valolla, laservalolla tai laserkeilaimella. Laitteen lähettämää valokuviokimppua kutsutaan

rasteriksi. Säteet kimpoavat kohteesta takaisin vastaanottimeen. Näin saadaan kohteen etäisyys, intensiteetin muutos selville ja pystytään myös laskemaan mittauspisteen tarkat koordinaatit. 3D-skannauksen yhteydessä muodostuu kolmiulotteisia pisteitä, joita voi olla useita miljoonia. Kun nämä pisteet yhdistetään tietokoneella, saadaan pistepilvi. Näin hahmottuu lopulta skannatun kohteen pinta. (9.)

Laserkolmiomittaus: laserskannerin sensori lähettää lasersäteen kohti kappaleen pintaa ja mittaa lasersäteen muodonmuutoksen. Kun laservalo heijastuu pois skannatusta 3D-objektista, sen alkuperäinen liikerata muuttuu ja sensori poimii heijastuneen säteen. (10.) Laserkolmiomittaukseen perustuvat 3D-skannerit käyttävät yleensä joko laserviivaa tai laserkuviota skannatakseen kohteen. Trigonometrisen kolmiomittauksen avulla järjestelmä voi laskea mitattavan pisteen etäisyyden, kun tiedossa on laservalolähteen ja kameran välinen etäisyys eli baseline sekä lasersäteen ja baselinen välinen kulma (kuva 4). (11.) Laskettu kulma on suoraan yhteydessä kohteen ja skannerin väliseen etäisyyteen. Kun 3D-skanneri kerää tarpeeksi etäisyyksiä, se pystyy kartoittamaan kohteen pinnan luodakseen sen uudelleen 3D-muodossa. (5.)



KUVA 4. Laserkolmiomittauksen perusperiaate (12)

3D-skannauksen laserkolmiotekniikan tärkeimmät edut ovat sen korkea resoluutio ja tarkkuus. Laserskannerilla on mahdollista ottaa tuhansia tai jopa miljoonia mittauksia sekunnissa, joten skannaus on nopeaa ja hyvin toistettavaa verrattuna koordinaattimittaukseen, joka on aikaa vievää. (13.) Laserskanneri ei välttämättä tarvitse mattamaista kehitettä kuvattavan kappaleen pinnalle. Kanadalaisella Creaformilla on laaja valikoima laserskannereita, esimerkiksi käsivaraiset HandySCAN- ja MetraSCAN-skannerit (kuva 5), joita käytetään laajalti teollisuuden laadunvarmistuksessa. Huonoja puolia laserkolmiomittauksessa ovat toisaalta ympäröivän valon vaikutus skannukseen ja monimutkaisten kappaleiden skannaamisen vaikeus sekä korkeahko hinta. Ympäröivä

valo voi häiritä laserskannerilla skannausta, sillä se voi sekoittaa laservaloon ja alentaa skannauksen tarkkuutta. Ympäröivä valo voi aiheuttaa kohinaa skannaukseen tai se voi jopa tehdä skannauksesta käyttökelvottoman, riippuen häiriön vakavuudesta. Siksi olisi hyvä skannata erillisessä mittaushuoneessa, missä valon määrää ja muita muuttujia voidaan kontrolloida helposti. Monimutkaisten geometrioiden, kuten syvien reikien skannaaminen on laserskannerilla vaikeaa. Reiän pinta muodostuu epätarkaksi ja reiän ympärille voi muodostua laserpilkkuja. (13.)



KUVA 5. *Creaform HandySCAN* (laserskanneri) vasemmalla ja *Creaform MetraSCAN* (kannettava CMM-laserskanneri) oikealla (14; 15)

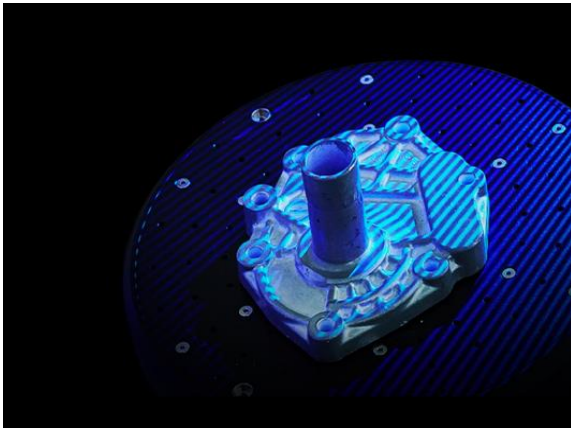
Strukturoitu valo: perustuu valokuvion muodonmuutoksen mittaukseen valon osuessa pintaan, näin saadaan mitattua pinnanmuoto. Strukturoitua valoa hyödyntävät skannerit käyttävät trigonometristä kolmiomittausta, mutta eivät ole riippuvaisia laserista. Sen sijaan ne projisoivat sarjan lineaarisia kuvioita esineeseen, jotka voidaan tuottaa joko LCD-projektorilla tai jollakin muulla valonlähteellä. Projektorin vieressä voi olla yksi tai useampi kamera, jonka suunta poikkeaa projektorista hieman (kuva 6). Kamera tutkii valokuvion jokaisen viivan reunat ja viivojen muodonmuutokset sekä laskee etäisyyden skannerista kohteen pintaan. (16.)



KUVA 6. *Gom ATOS Core* -skanneri, jollainen on käytössä myös *Proventialla* (17)

3D-skannaukseen käytettävä projisoitu strukturoitu valo voi olla valkoista tai sinistä, ja se voidaan tuottaa monentyyppisillä projektoreilla, kuten Digital Light Processing (DLP) -tekniikalla. Projisoitu kuvio on yleensä sarja valonsäteitä (kuva 7), mutta se voi olla myös satunnaistettu pistematriisi.

Strukturoidun valotekniikan tärkeimmät edut 3D-skannaukseen ovat sen nopeus ja tarkkuus, ja sen haitatonta valoa voidaan käyttää myös 3D-kehoskannauksessa. (5.)



KUVA 7. Kappale skannattavana strukturoitua valoa hyödyntävällä skannerilla (18)

Strukturoitua valoa hyödyntävät 3D-skannerit ovat kuitenkin erityisen herkkiä valaistusolosuhteille, ja niillä on vaikeuksia skannata ulkona kirkkaassa päivänvalossa tai kirkkaassa tehdashallissa (5). Kiiltävien pintojen kuvaaminen tällä menetelmällä ei onnistu, vaan tällöin täytyy käyttää skannausprayta eli kehitettä, jonka avulla pinta muuttuu valkoisen mattamaiseksi ja skannaus mahdollistuu. Sama ongelma kuin laserkolmiomittauksessa eli syvien onkaloiden kuvaamisen vaikeus on läsnä myös tässä metodissa. Valon on vaikeaa päästä tunkeutumaan tarpeeksi syvälle reikään, ja tämä aiheuttaa skannauksen epätarkkuutta. Tämä voidaan kiertää käyttämällä esimerkiksi kuusiokoloruuveja tärkeissä rei'issä, ruuvin kannan sylinterin saa skannattua tarkasti. Lisäksi ympäröivä, kirkas valaistus voi aiheuttaa kaksoiskuvioita skannaukseen eli niin kutsuttuja haamukuvia, jotka eivät ole todellisia. Nämä täytyy poistaa muodostuneesta mallista manuaalisesti.

Strukturoituun valoon perustuvan skannerin huonot puolet havaitsin itse Proventialla työskennellessäni. Proventialla käyttämäni strukturoitua valoa hyödyntävä Gom ATOS Core -skanneri oli hyvin herkkä valaistusolosuhteille. Kirkkaampien ledivalojen asennuksen myötä mittauspaikalla skannaukseen tuli lisää valaistuksen aiheuttamia ongelmia. Mittaustulokset kärsivät kirkkaiden valojen takia enemmän erityisesti kiiltävien kappaleiden skannauksen aikana. Proventialle ollaan kevään 2022 aikana hankkimassa uusi ja aiempaa tehokkaampi skanneri samalta valmistajalta. Skannausolosuhteisiin on tulossa tiettyjä parannuksia, jolloin kirkkaan valaistuksen häiritsevä vaikutus eliminoiduu.

Fotogrammetria: fotogrammetria on mittausta valokuvien perusteella. Fotogrammetrian periaate on analysoida useita staattisesta kohteesta otettuja valokuvia eri näkökulmista. Näistä kuvista luodaan lopulta 3D-aineisto. Tekniikkaa voidaan käyttää kaupunkisuunnittelun apuna tai vaikkapa historiallisten kohteiden digitaalista esittelyä varten. (19.)

Fotogrammetrisen 3D-skannaustekniikan tärkeimmät edut ovat sen nopeus ja kyky poimia värejä ja tekstuureja. Fotogrammetrisella tekniikalla pystyy myös rekonstruoimaan suuressa mittakavassa kohteita, kuten esimerkiksi valokuvausdronella maasta tai ilmasta kuvattuja maisemia tai monumentteja. Dronekuvaus on luultavasti fotogrammetrian tunnetuin ja käytetyin sovellus. (19.) Fotogrammetriatekniikan tuottamien tulosten laatu riippuu syötettyjen valokuvien resoluutiosta. Alueen mallintamista varten otetaan jopa kymmeniä tuhansia valokuvia, joista tietokone luo pisteilven ja näin voidaan rakentaa alueesta fotorealistinen 3D-malli. (20.)

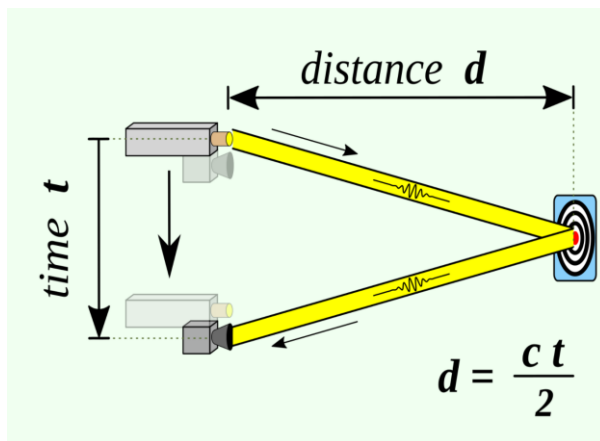
Pulssilaser: perustuu lasersäteen lentoaikaan (Time of Flight, ToF). Lasersäde heijastetaan pinnalle ja otetaan talteen anturin avulla. Laserin kulkuaika sen lähdön ja vastaanoton välillä luo pinnan geometrisen informaation 3D-skannerille. Laserpulsripohjaiset 3D-skannerit, jotka tunnetaan myös nimellä Time-of-Flight-skannerit tai LiDAR-skannerit, mittaavat, kuinka kauan laserilla kestää osua kohteeseen ja palata takaisin. Koska valon nopeus tiedetään tarkasti, aika, joka kuluu laserin palaamiseen, antaa tarkan etäisyyden 3D-skannerin ja kohteen välillä. Jotta etäisyys voidaan mitata tarkasti, 3D-skanneri laskee miljoonia laserpulsseja pikosekunnin tarkkuudella (5.)

LiDAR-skannerit (Light Detection and Ranging) on tarkoitettu pääasiassa maanmittaukseen tai kokonaisten rakennusten 3D-skannaukseen. Jotkut laserpulsiskannerit sisältävät myös dynaamisia SLAM-algoritmeja, jotka parantavat niiden kykyä tunnistaa ympäristönsä. (5.) Kuvassa 8 on esimerkki maanmittaukseen käytettävästä LiDAR-skannerista.



KUVA 8. Leica ScanStation P40 / P30 Lidar -laserkeilain (21)

ToF-3D-skannereiden luokkaan kuuluvat sekä laserpulssi- että vaihe-ero-laserit. Vaihe-ero-skannerit ovat laserpulssiskannerien alaluokka. Laserin pulssoinnin lisäksi vaihe-ero-järjestelmät moduloivat myös lasersäteen tehoa. Vaihe-ero-laserit tarjoavat paremman yleisen suorituskyvyn. Laserpulssiskannerien tärkein etu on niiden kyky 3D-skannata erittäin suuria kohteita ja ympäristöjä sekä myös kaukana olevia kohteita. Niiden toiminta on kuitenkin melko hidasta ja skannauksen tarkkuus on suhteellisen heikkoa. (5.) Kuvassa 9 on esitetty lentoaikaan perustuvan laseretäisyysmittauksen perusperiaate sisältäen kaavan.



KUVA 9. ToF-skannerin periaate sekä kaava, jossa d =matka valonlähteestä kohteeseen, c =valonnopeus ja t =laserpulssin pituus (22)

4 3D-SKANNAUSPROSESSI

Quality eli laadunvarmistusosasto suorittaa Proventialla 3D-mittauksen ja reklamaatiokäsittelyt. Proventialla on käytössään saksalaisvalmisteinen Gom ATOS Core -mallinen optinen 3D-skanneri, jolla skannaaminen suoritetaan. ATOS Core skannaa 3D-pintoja tarkasti, kyseinen skanneri sopii hyvin yksityiskohtaisiin mittaustarkoituksiin, käänteissuunnitteluun ja 3D-tulostamiseen. ATOS Core -skannerit soveltuvat erityisesti pienten objektien tarkkaan mittaamiseen. (17.)

Kun skanneriin laitetaan virrat päälle, sen täytyy antaa lämmitä 20 minuuttia. Skannausohjelma huomauttaa tästä, jos skannerilla yritetään alkaa kuvaamaan liian aikaisin, ja se näyttää jäljellä olevan, vaadittavan lämmitysajan. Ajan kuluttua loppuun voi aloittaa skannaamisen. Skanneri tulee myös kalibroida säännöllisin väliajoin, jotta skannaustarkkuus säilyy riittävän hyvänä. Ohjeellinen kalibrointiväli on yksi kuukausi, mutta tästä voidaan poiketa, jos skanneri esimerkiksi tärähtää tai kolahtaa johonkin tai sitten jos skannaaja huomaa mittatarkkuuden muuten vain heikentyneen. Kalibrointiin käytetään Gomin omaa kalibrointilevyä. Skannausohjelmassa on suoraviivainen ohje laitteen kalibrointiin.

4.1 3D-skannaus Proventialla

Proventian Oulunsalon toimitiloissa toimii protopaja, jossa eri tuotteiden prototyyppijä valmistetaan. Protopajalla valmistetaan paljon erityyppisiä päästöjenhallintaosia ja hitsausjigejä. Sieltä tulee erilaisia osia, jigejä ja järjestelmiä laadunvarmistuksen 3D-mittaukseen. Myös alihankkijoilta saapuvia tuotteita sekä asiakasreklamaatiokappaleita tarkastetaan 3D-skannaamalla. Nämä tuotteet skannataan ja tutkitaan mittaustuloksien perusteella poikkeamat nimellismittoihin nähden.

4.1.1 Skannattavan kappaleen alkuvalmistelut

Seuraavaksi kuvaillaan, miten mittausprosessi etenee: ensiksi valitaan mitattava kappale mittauspaikalta, sitten siirretään kappaleen CAD-malli ATOS Professional -mittausohjelmaan STEP-tiedostona. Tämän jälkeen valmistellaan kappale mittausta varten eli kiinnitetään kuusiokoloruuvit kiinnitysreikiin (vain osassa tuotteista), ja käydään maalaushuoneessa suihkuttamassa skannausprayta kappaleen pinnoille. Erityisesti ruostumattomasta teräksestä valmistetut, kiiltäväpintaaiset

kappaleet tarvitsevat tätä käsittelyä pinnan muuttamiseksi mattamaiseksi. Erityisen haastavia kappaleita skannauksen kannalta ovat kokoonpanot, joihin on liitetty PTC-lämpösuojakuori. Se heijastaa voimakkaasti valoa ja tarvitsee runsaasti sprayta skannauksen onnistumiseksi.

Seuraavaksi kappale asetellaan mittauspöydälle tai pöydällä olevan mittausjigin päälle (kuva 10). Tarvittaessa kappale kiinnitetään jigii magneeteilla. Isommat hitsausjigit voi kuvata lattiallakin. Sitteen asetellaan referenssipisteet kappaleeseen ja aloitetaan skannaus. Jos kappale on pieni, referenssipisteet pöydässä ja mittausjigissä riittävät eli mitattavaan kappaleeseen ei tarvitse enää kiinnittää referenssipisteitä.



KUVA 10. Proventian 3D-mittauspaikka Quality-osastolla, kuvassa vasemmalla skanneri ja oikealla mittauspöytänä käytettävä pyöröpöytä, jossa on voimakkailla magneeteilla kiinnitetty mittausjigi, jigissä ja pöydässä on valmiina referenssipisteitä

4.1.2 Kappaleen skannaus

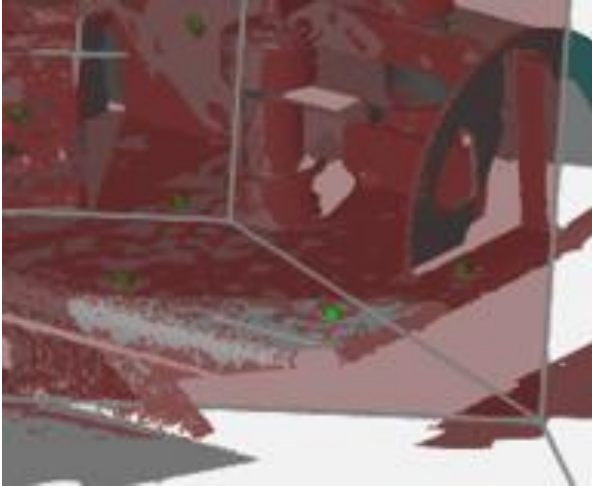
Skannaus alkaa skannaustemplaten valinnalla. Tässä voi valita, minkä tyyliä kappaleita on tarkoituksena kuvata. Template-vaihtoehtoina ovat esimerkiksi levyrakenteet, valukappaleet ja siipi-profiilit. Myös skannauslämpötila valitaan. Seuraavaksi alkaa skannausvaihe. Skannataan kappale kultaaltaan tai niistä kohdista, mitä erityisesti halutaan tutkia. Suurikokoisia järjestelmiä ei ole tarvetta skannata kokonaan, vaan ainoastaan ne alueet, mitkä ovat kriittisen tärkeitä. Kuvassa 11 on esitetty yleinen skannausprosessi Gom ATOS -järjestelmällä.



KUVA 11. Yleinen 3D-skannausprossi Gom ATOS -järjestelmällä

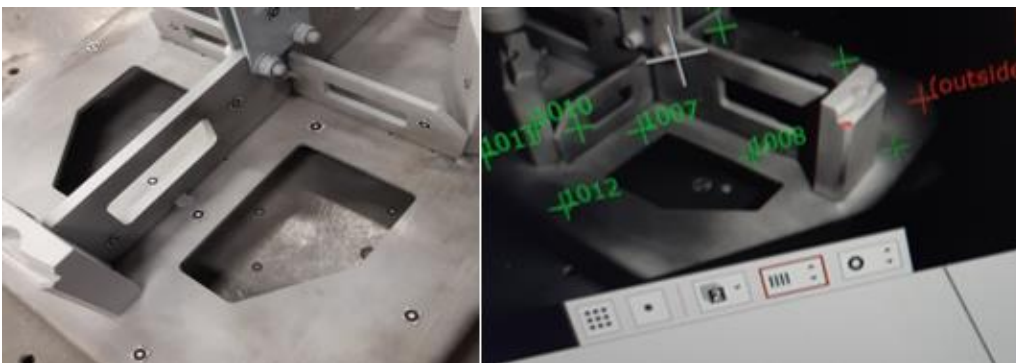
Kuvauksen edetessä Gom ATOS -mittausohjelmaan muodostuu pistepilvi eli digitaalinen malli skannatusta kappaleesta. Uudet, skannatut pinnat välähtävät mittatiedossa punaisina, näin skannaaja tietää, mitkä pinnat on kuvattu juuri kyseisellä napinpainalluksella. Muodostuneessa mallissa näkyy referenssipisteitä vihreällä. Sinertävät alueet ovat piilossa olevia alueita kappaleen pinnan

alla, jotka peittyvät, kun skannattua dataa tulee sen päälle. Harmaareunainen laatikko on kuvaus-
alue (measuring volume), jonka tilavuus riippuu skannerin mallista (kuva 12). Tämän alueen sisällä
3D-pisteet ovat laskettavissa. Skannauksen aikana voidaan hyödyntää kätevää laserosoitinta, jota
käyttämällä kuvat voi ottaa skannattavan kappaleen vieressä. Skannattavista elementeistä, esi-
merkiksi rei'istä tai lieriöistä pitää kuvata yli 50 %, jotta nimellisten piirteiden linkittäminen skannat-
tuihin piirteisiin voidaan tehdä onnistuneesti.



*KUVA 12. Kappale skannattavana, näkyvissä jo aiemmin skannattu data harmaalla, juuri skannattu
alue punaisella, joka muuttuu harmaaksi hetken kuluttua*

Jokaisella kuvauskerralla skannerin kummankin kameran pitää nähdä vähintään kolme referenssi-
pistettä, joiden avulla skanneri voi paikantaa itsensä. Kameranäkymässä pisteet näkyvät aluksi
vihreinä risteinä ja kun skanneri on tunnistanut ne, niille annetaan numerokoodi, joka ilmoittaa,
monesko piste se on. 1. piste saa tunnukseseen "1000" (kuva 13).



*KUVA 13. Vasemmalla magneettiset referenssipisteet kiinnitettynä kappaleeseen ja oikealla refe-
rensipisteitä skannerin kameranäkymässä*

Skannauksen edistyessä yhä useampia pisteitä tunnistetaan. Jos pisteitä tulee kuvaan liian vähän tai ei ollenkaan, skanneri antaa virheilmoituksen referenssipisteiden puuttumisesta. Tällöin on yrittävä kuvata uudestaan niin, että kuvaan tulee kolme tai sitä enemmän referenssipisteitä. Punaisella merkityjä ristejä ei voi tunnistaa niiden liian kaukaisen etäisyyden tai liian pienen tai suuren kontrastin vuoksi. Skannerin valotusaikaa voi olla tarvetta muuttaa, jos pisteitä ei onnistu saamaan kuvaan. Kun ensimmäinen kuva kappaleesta on saatu, kappaletta ei enää saa liikuttaa paikaltaan, eikä referenssipisteiden paikkoja saa muuttaa. Näitä pisteitä voi poistaa tai lisätä, huomioiden kuitenkin sen, ettei kappale pääse liikahtamaan. Mittauspöydällä kuvattaessa kappaletta voi pyörittää ympäri pyöröpöydän avulla. Tämä on kätevää, sillä silloin skanneria ei tarvitse liikutella koko pöydän ympäri.

Kun kappale on skannattu, poistetaan trimmaustyökalulla tarpeettomat osaset ja roskat pois mitta-datasta, kuten kuvaan tulleet pinnat kiinnittimistä tai mittauspöydästä. Kun trimmaus on tehty, seuraavana vaiheena on ”Polygonize Mesh” eli muodostetaan tarkempi kolmioverkotettu pintamalli eli mesh. Tämä vaihe vie aikaa skannauksen koosta riippuen muutamasta sekunnista useisiin minuutteihin. Alussa voidaan valita, kuinka tarkkaresoluutioinen pintamallista halutaan. Tämän vaiheen jälkeen pintamalli on valmis ja voidaan aloittaa skannatun kappaleen vertailu CAD-malliin.

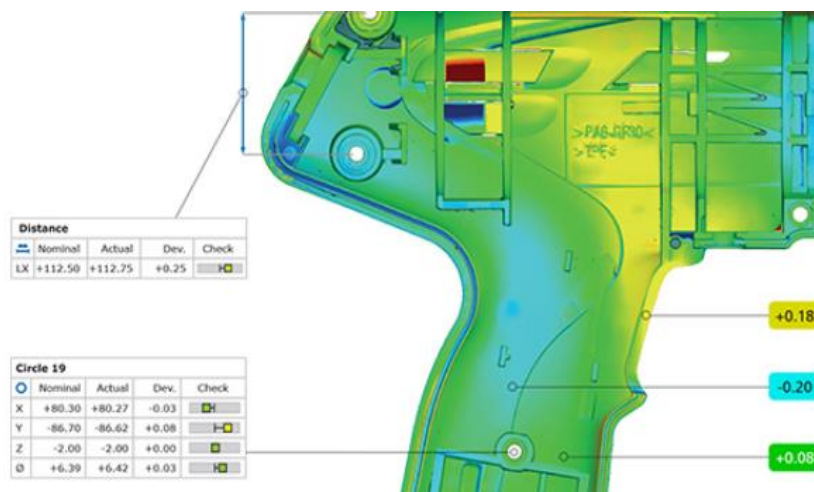
4.1.3 Kappaleen mittaus ATOS Professional -mittausohjelmassa

Alkuvaiheessa on original alignment -linjaus eli sekä CAD-malli että mallia vastaava, skannattu kappale, ovat samalla ruudulla, mutta eri koordinaatistossa. Mittausohjelmaan tuotavan CAD-mallin on oltava STEP-tiedostomuodossa. Seuraavaksi luodaan alustava linjaus eli prealignment. Tämä paikoitus tuo skannatun kappaleen CAD-mallin päälle samaan koordinaatistoon niin, että poikkeamat nimellismitoista ovat jakautuneet tasaisesti ympäri osaa. Alkulinjaus tunnetaan myös nimellä global best-fit. Joskus kappaleiden muodot aiheuttavat sen, ettei ohjelma osaa muodostaa prealignment-paikoitusta. Tällöin on paikoitus tehtävä manuaalisesti, apupisteitä apuna käyttäen eli valitaan CAD-mallista jokin tietty piste ja pintamallista samasta kohtaa piste, jotta ohjelma osaa laittaa kappaleet päällekkäin. Apupisteiden käyttäminen on yleensä tarpeellista suurikokoisten järjestelmien ja kappaleiden alkulinjauksen luomisessa.

Kun prealignment on määritelty onnistuneesti, voidaan alkaa luomaan tarvittavia piirteitä mittaushjelmaa varten construct-toiminnoilla: muodostetaan esimerkiksi tarvittavat tasot, sylinterit ja pisteet nominal-puolelle eli CAD-malliin. Sitten linkitetään samat piirteet actual-puolelle eli skannattuun kappaleeseen. Monesti piirteet eivät muodostu skannattuun kappaleeseen riittävän hyvin, vaan tällöin piirteet pitää muodostaa manuaalisesti eli valitaan tarvittavat piirteet skannatusta datasta itse ja linkitetään ne CAD-mallin vastaaviin.

Kun tarvittavat piirteet on luotu ja linkitykset on tehty oikein, voidaan alkaa luomaan mittoja ja geometrisiä toleransseja ohjelmaan. Pääsääntöisesti tapana on laittaa ohjelmaan piirustuksessa määritellyt toleroidut mitat ja geometriset toleranssit. Piirustus löytyy yrityksen PDM:stä eli tuotetiedon hallintajärjestelmästä PDF-muodossa. PDM:ssä näkyy haetun nimikkeen mallitiedosto ja piirustus-tiedosto sekä PDF-tiedosto piirustuksesta. Lisäksi on muita tärkeitä tietoja, kuten osan nimi, revisio ja itse osan nimiketieto. Mittausohjelmassa voidaan luoda elementille mitat ja poikkeamat näyttävä laatikko. Tässä mittalaatikossa näkyy elementin nimi, nominal- ja actual-mitat, mahdolliset toleranssit ja muut vaatimukset. Laatikossa on myös check-kohta, jossa on värikoodein ilmaistu indikaattori. Jos toleranssi on ylitetty, kuvio näkyy punaisena. Toleranssirajaa lähestyessä kuvio on keltaisena, ja kun ollaan toleranssin sisällä, kuvio näyttäyty vihreänä.

Seuraavana tai ennen piirteiden muodostamista voidaan luoda värikarttakuva, josta selviää pinnan muodon vaihtelut eli jos materiaalia on jossakin kohdassa liikaa, kartta näyttää punaista kyseisessä kohdassa. Jos materiaalia on sopivasti, kartta näkyy vihreänä kyseisessä kohdassa ja jos materiaalia on taas liian vähän, sinisen sävyinä. Värikarttaan kannattaa lisätä pisteitä, joissa näkyy poikkeaman suuruus eli deviaatio millimetreinä plus- tai miinusarvoina juuri siinä kohdassa, minne piste on asetettu (kuva 14). Värikarttakuvan voi muodostaa joko actual- tai nominal-mallin päälle.



KUVA 14. Värikarttakuva Gomin mittaushjelmassa piirteineen ja poikkeamamerkkeineen (23)

Voidaan myös luoda section-osuus, joka tekee kappaleesta poikkileikkauskuvan. Poikkileikkauksen kohdalle voidaan lisätä poikkeaman ilmaisevia pisteitä kuten värikartassakin, leikkauspinta toimii siis samoin kuin värikarttakuvakin. Ohjelmaan on mahdollista lisätä käyriä, joilla voi ilmentää jonkin tietyn kohdan toimintaa. Tästä saa hyvin tilastollista dataa SPC:tä varten. Tällä tarkoitetaan tilastollista prosessinohjausta (Statistical Process Control).

Kun alkulinjaus on tehty ja värikarttakuva sekä piirteet toleransseineen luotu, on mahdollista laatia muun tyyppisiä paikoituksia kappaleelle riippuen siitä, millä tavalla kyseistä kappaletta halutaan tutkia. Seuraavaksi on esitelty eri paikoitusratkaisuja, joita esimerkiksi Proventialla käytetään mitauksissa:

- **Local best-fit:** maalataan aktuaaliosasta tietty alue pinnalta punaiseksi, esimerkiksi lieriön pääty, tämä maalattu alue asettuu nolaksi eli tässä kohdassa ohjelma yrittää saada poikkeaman nolkaan millimetriin tai mahdollisimman lähelle sitä. Tämä linjaus on siis paikallisesti parhaiten sopiva paikoitus. Tämä kohdistusmenetelmä on erityisen käyttökelpoinen putkenhitaussijgeissä, joissa putkea pitävät paikoillaan jigissä olevat levyleikkeet, ja joissa on yleensä vielä koholla olevia nastoja. Nämä nastat kohdistetaan nimellisen mallin kanssa, jolloin nähdään jigin toiminnallisuus paljon paremmin kuin global best-fitillä.
- **Plane-line-point:** muodostetaan ensin taso, joka muodostuu kolmesta pisteestä, sitten kahden pisteen välinen viiva ja yksi piste, jotka lukitsevat kappaleen liikkeen kaikista kuudesta vapausasteesta. Melkein sama asia kuin 3-2-1-paikoitus. Tason pisteitä ei välttämättä tarvitse määritellä erikseen, vaan taso muodostuu automaattisesti CAD-malliin CTRL-näppäin pohjassa jollakin sovituskriteerillä, ja se linkitetään skannattuun kappaleeseen. Skannatun kappaleen mallin poikkeama hakeutuu nolkaan millimetriin näistä kohdista ja lukitsee kaikki kuusi vapausastetta.
- **Alignment By Geometric Elements:** tehdään kappaleeseen paikoitus geometrinen elementtien eli piirustuksessa määriteltujen peruselementtien mukaan hierarkkisesti, esimerkiksi ensin paikoitetaan sylinteri kohdilleen, sitten taso ja sitten piste. Tällä tavalla lukitaan kappaleen liike, ja näiden elementtien poikkeama nimellismitoista yrittää asettua nolkaan millimetriin. Tätä kohdistusmenetelmää voidaan käyttää esimerkiksi putkien paikoittamisessa.

- **RPS:** luodaan referenssipistejärjestelmä eli valitaan kappaleesta pisteitä, joissa poikkeama asettuu nollassi. Esimerkkinä vaikkapa kappaleen päädyssä oleviin kiinnitysreikiin voidaan määritellä referenssipisteet hierarkkisessa järjestyksessä. Tätä tapaa hyödynnetään erityisesti DIM-järjestelmää käytettäessä. Kun se on käytössä, piirustuksessa on esitetty paikoitus rajoitettujen peruselementtien avulla. Mittaaja katsoo tässä piirustuksessa olevien datum target -symboleiden perusteella ne kohdat, mihin RPS-pisteet tulee sijoittaa. Rajoitetut peruselementit piirustuksessa toimivat siis RPS-pisteinä mittausohjelmassa. 3-2-1-peruselementtijärjestelmän mukaisesti luodut rajoitetut peruselementit ovat DIM-järjestelmän mukaisia.

4.1.4 Mittausraportin laatiminen

Kun mittausohjelma on valmis, siitä luodaan mittausraportti, johon lisätään suunnittelijan haluamat tulokset mittauksesta, kuten vaikkapa värikarttakuvat, elementtien mitat ja toleranssit vaadittavine paikoituksineen. Raportissa on hyvä ilmaista selkeästi, mistä elementeistä kukin paikoitus koostuu. Raportin tulee olla selkeä ja ymmärrettävässä muodossa niin, että ATOS-ohjelmaa käyttämätönkin henkilö ymmärtää, mitä raportissa on kerrottu. Yrityksen toimintatavan mukaan raportti kirjoitetaan joko englanniksi tai suomeksi. Proventialla kirjoitetaan mittausraportit englanniksi. Mittausraportti lähetetään kyseisen tuotteen suunnittelijalle, projektipäällikölle ja tarvittaessa projektiin kuuluville muille henkilöille, jotka haluavat tietoja mittaustuloksista.

Kun raportti on valmis jostakin tietystä osasta tai järjestelmästä, voidaan seuraavat mittaukset tehdä samanlaisista tuotteista nopeammin, sillä mittaohjelmia ei tarvitse enää erikseen tehdä, vaan ohjelma osaa mitata samaan sarjaan kuuluvat osat automaattisesti olemassa olevan mittaohjelman perusteella. Toki täytyy pitää huoli, että skannaukset sisältävät tarvittavat piirteet riittävällä tarkkuudella, jotta ohjelma osaa laskea kaikki mitat oikein. Jos raporttiin ilmestyy erikoisia tuloksia, on syytä tarkistaa ohjelma ja korjata mahdollisia virheellisiä piirteitä ohjelmasta manuaalisesti.

4.2 HandySCAN-laserskannerin testaus

Opinnäytetyöhön otettiin mukaan alustavaa selvitystä siitä, soveltuisiko kanadalaisen Creaformin valmistama HandySCAN Black Elite -laserskanneri Proventialle 3D-skannaukseen nykyisen Gom ATOS Core -skannerin tilalle. Lainasin kyseisen skannerin Oulun ammattikorkeakoululta. Tämä

kannettava laserskanneri ei tarvitse skannausprayta Gomin skannerin tapaan, joten se pystyy siis skannaamaan kiiltäviäkin kappaleita ongelmitta. Koska skanneri on käsissä pidettävä ja pienikokoinen sekä ergonomisesti muotoiltu, sillä pääsee skannaamaan vaikeistakin paikoista. Myös skannerin mukana tulevan skannausohjelman käyttöliittymä on helppokäyttöinen, se ei vaadi kuu-kausien pituista opettelua, vaan jopa vasta-alkajakin osaa sitä käyttää lyhyen tutustumisepisodin jälkeen. Taulukossa 1 on esitetty Proventialla käytettävän ATOS Core -skannerin sekä testattavana olevan HandySCAN-skannerin teknisiä tietoja.

TAULUKKO 1. Gom ATOS CORE 500:n ja HandySCAN Black Eliten vertailu (24)

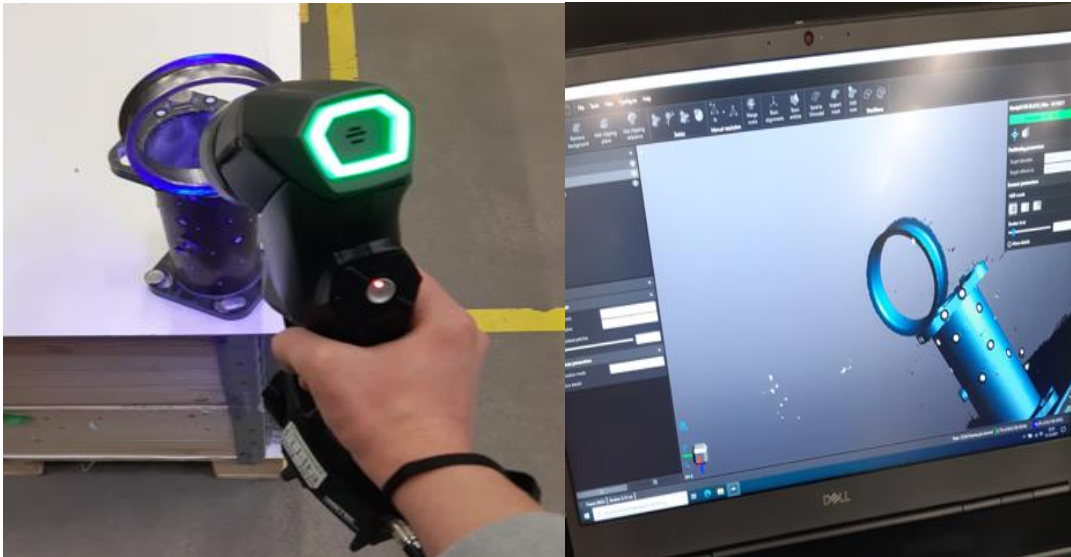
| Vertailukohde | Gom ATOS CORE 500 | Creaform HandySCAN Black Elite |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Max. tarkkuus | - | 0.025 mm |
| Max. resoluutio | 0.19 mm | 0.1 mm |
| Mittausnopeus | - | 1 300 000 mittapistettä/s |
| Skannausalue | 500 x 380 mm | 310 x 350 mm |
| Kappaleen koko (suositeltu) | Max. 500 mm | 50–4 000 mm |
| Mitat | 361 x 205 x 64 mm | 142 x 79 x 288 mm |
| Paino | 2.9 kg | 0.94 kg |
| Operointilämpötila | 5-40 °C | 5–40 °C |
| Skannausteknologia | Strukturoitu valo | Laserkolmiomittaus |
| Hinta | - | 60 000 € |
| Status | Valmistus lopetettu | Saatavilla |
| Valmistusmaa | Saksa | Kanada |
| Kategoria | Kiinteä (jalustalla) | Käsivarainen |

4.2.1 Skannauksen vaiheet HandySCAN-käsiskannerilla

Ensimmäisenä viritellään skannausläppäri ja skanneri valmiiksi skannausta varten. Skannerin mukana tulee VXElements-skannausohjelma, jota käytettiin skannauksen aikana ja skannausdatan käsittelyssä. Skanneri yhdistetään virtalähteeseen ja läppäriin. Kun skanneri on kytketty, aloitetaan

skannerin kalibrointi, johon menee aikaa 1–2 minuuttia. Käytössä on kalibrointilevy, kuten Gomilla-kin. Kalibroinnin jälkeen voi laittaa referenssipisteet skannattavaan kappaleeseen tai jigiin ja sitten voikin alkaa skannaamaan.

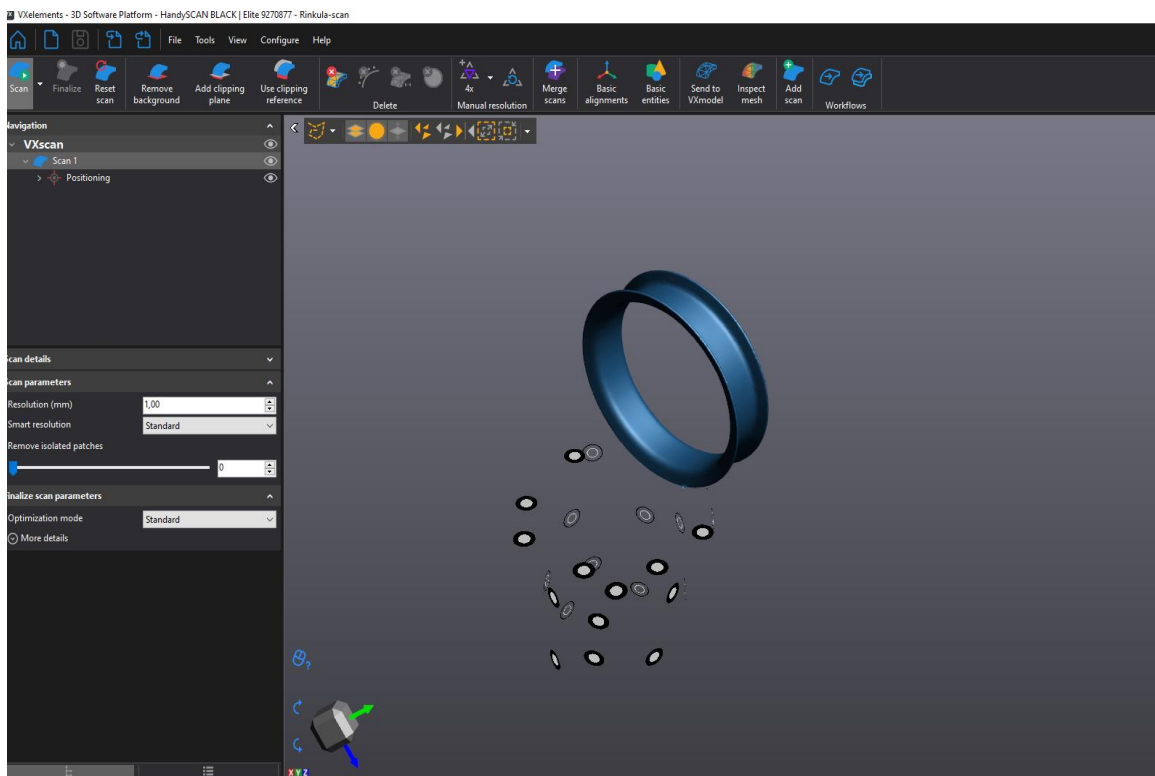
Skannerissa on painike, jolla kontrolloidaan skannerin tilaa eli onko skannausmoodi päällä vai pois päältä. Kappaletta skannattaessa pitää kuvata kappaleeseen sijoitettuja mustavalkoisia referenssipisteitä, jotta skanneri tietää sijaintinsa. Lisäksi skannerin tulee olla oikealla etäisyydellä skannattavasta kappaleesta. Skannerissa on väri-indikaattori, joka näyttää värikoodein etäisyyden kappaleesta (kuva 15). Punainen väri kertoo, että skanneri on aivan liian lähellä kappaletta. Kun skanneria viedään vähän kauemmaksi, väri muuttuu keltaiseksi, tällöinkin skanneri on vielä liian lähellä. Seuraavaksi väri muuttuu vihreäksi, tällöin skanneri on oikealla etäisyydellä kappaleesta; skanneria tulisi pyrkiä pitämään tällä vihreällä etäisyydellä. Jos skanneria vie vielä kauemmaksi, väri muuttuu vaaleansiniseksi, ja sitten se voi muuttua tummansiniseksi. Tällöin skanneri on jo liian kaukana kohteesta. Kun skanneria vie vielä kauemmaksi, tummansininen valo sammuu eli skanneri hukkaa sijaintinsa. Samoin käy, jos ei kuvaa tarpeeksi montaa referenssipistettä. Vähintään kolme pistettä pitää olla näkyvissä, jottei skanneri hukkaisi itseään avaruuteen.



*KUVA 15. Kappale skannattavana, skanneri juuri oikealla etäisyydellä ja skannausohjelmaan piir-
tynyt data kappaleesta; referenssipisteet kiinnitettynä jigiin ja kappale kiinnitetty jigiin voimakkailla
magneettinappuloilla*

Skannerilla skannataan kappale kauttaaltaan niin, että tarvittavat piirteet tulevat skannattua. Edis-
tymistä voi seurata läppärin näytöltä VXElements-ohjelmassa, jonne 3D-malli kappaleesta piirtyy

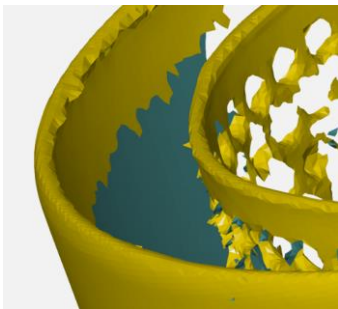
vähitellen. Kun kappale on saatu skannattua tarpeeksi hyvin, poistetaan turhat asiat eli vaikkapa kuvaan mukaan tullut skannauspöytä, jigi ja muut skannaukseen ilmestyneet roskat. Sitten kappaleesta luodaan kolmioverkotettu pintamalli. Sitä voi sitten alkaa mittaamaan VXInspect-ohjelman puolella samaan tapaan kuin Gom ATOS Professional -ohjelmassa. Itse en tämän kokeilun aikana testannut tätä VXInspect-ohjelmaa, vaan vietiin skannausten pintamallit ATOS-ohjelmaan ja tutkittiin skannaustuloksia siellä. Skannerin testausta varten valittiin kolme erilaista kappaletta skannattavaksi, jotka vaihtelivat kooltaan. Skannattavina kappaleina olivat rengas, laippa ja mikseri. Tähän osioon on otettu esittelyyn rengas ja mikseri eli päästönhallintajärjestelmässä käytettävä urean sekoitin. Kuvassa 16 on yksi skannatuista kappaleista.



KUVA 16. Skannattu kappale VXElementsissä, tässä luotu skannausdatasta mesh eli on painettu ylävasemmalla näkyvää "Finalize"-nappia; lisäksi kuvassa näkyvät referenssipisteet, jotka olivat kiinnitetty mittausjigiin

Mikserin skannauksen aikana esiintyi eniten haasteita kaikista testikappaleista. Työkappaleen mittausasennosta johtuen pieni kaistale putkesta jäi skannaamatta, vaikka tuota kohtaa yritettiin skannata moneen otteeseen. Putki oli sijoitettu alaviistoon. Jos putki olisi osoittanut suoraan ylöspäin, olisi putken sylinteri silloin tullut skannattua helposti kokonaan, mutta tällainen asento olisi sitten

kuitenkin estänyt muiden tärkeiden piirteiden, kuten ruiskun laipan, skannauksen. Kuvassa 17 näkyy otos putkenpäästä, jonka kanssa oli ongelmia. Putken ympärille muodostui skannauksen aikana paljon roskaa, ne sai kuitenkin siistittyä suurimmaksi osaksi pois. Mutta lisää ongelmia ilmeni skannauksen tarkastelun aikana, kun ulomman putken reuna oli suhteellisen epätarkasti skannautunut eikä reikäputken reunankaan tarkkuudessa ollut kehumista. Lisäksi skanneri näki reikäputken jotenkin väärin ja muodosti putkesta ulospäin lähteviä piikkejä, joita ei ole oikeasti olemassa. Varmasti putken reikäisyys ja putken sijainti alhaalla vaikutti tähän. Valaistuksen vaikutus tähän on epäselvä.



KUVA 17. Kuva mikserin putken päästä

Kuvassa 18 on ruiskun laipan alue. Tässä on jäänyt isomman sylinterin ja pienten sylinterien pinnat skannaamatta. Tätä kohtaa yritettiin kauan aikaa skannata, mutta sylintereille ei siltikään tullut tarpeeksi pintaa. Ison reiän paikka löytyi kuitenkin, kun maalasi manuaalisesti lisää pintaa sylinterin elementille. Sylinterin aktuaalimitat eivät ole kovinkaan tarkat, kun sylinteristä on alle puolet skannattuna. Pieniin M6-kierrereihiin olisi voinut laittaa kuusiokoloruuvit, jolloin reikien sijainnit olisi voinut määrittää tarkasti pulttien sylinterien avulla. Huomattavissa on myös epätarkkuutta koholla olevan tason reunoissa. Skannausdataan jäi myös pieniä epämääräisiä roskia, joista kaikki eivät lähenteet pois, vaikka mallia yrittikin siivota. Nämä eivät tosin vaikuttaneet kappaleen paikoittamiseen mallin päälle.



KUVA 18. Mikserin ruiskun laipan sylinterit eivät ole myöskään tulleet kuvaan kunnolla

4.2.2 Loppupäätelmä HandySCAN-testauksesta

Kokeilun aikana tehtiin niin, että luotiin pintamallista STL-tiedosto, joka vietiin Gom ATOS -ohjelmaan ja tutkimme 3D-mittaajan kanssa mikserin skannaustuloksia. Päädyimme skannaustuloksien pohjalta siihen päätelmään, että HandySCAN-skanneri ei sovi Proventian tarkoituksiin kunnolla. Taulukossa 2 on esitetty skannaustestin tulokset.

TAULUKKO 2. Käsiskannerin testauksen aikana havaitut hyvät ja huonot puolet

| Hyvät puolet | Huonot puolet |
|--|--|
| Helppo asennus ja kalibrointi nopeaa | Etäisyyden hallinta skannattaessa vaikeaa |
| Skannaus piirtyy näytölle reaaliaikaisesti | Vaatii paljon referenssipisteitä kappaleeseen |
| Skannaus on kätevää skannerin pienen koon ja keveyden vuoksi | Kappaleen puolelta toiselle siirtyminen haastavaa |
| Skannausohjelma vaikutti helppokäyttöiseltä | Jotkin kohdat kappaleista eivät tahtoneet skannautua kunnolla |
| Valo-indikaattori on hyvä skannausetäisyyden seuraamisessa, vaikka oikean etäisyyden pito on vaikeaa | Ruudulle tullut malli on aluksi liian karkea, liian isoja pikseleitä |
| Skanneri on ergonominen | Ei sovellu isommille kappaleille, joita Proventialla on paljon |
| Ei tarvitse lainkaan skannausprayta, kiiltäväpintaisten kappaleiden kuvaaminen onnistuu | Tekee paljon roskaa kappaleen ympärille sekä epätarkkaa jälkeä joihinkin kohtiin |
| Skannaaminen on helppoa, ei ole liikaa erilaisia nappuloita | Lopulta skannatusta datasta luotu mesh on paljon karkeampi kuin Gomin vastaava. |

4.3 Virtual Assembly eli virtuaalivalmistus mittauksen apuna

Gom ATOS -mittausohjelmassa kokoonpano on mahdollista toteuttaa virtuaalisesti, ja tällä tavalla on mahdollista tutkia kokoonpanon onnistumista jo ennen fyysistä kokoonpanovaihetta. Ensin operaattori skannaa osakokoonpanon osat yksitellen. Jopa joustavat osat, jotka on kiristettävä ennen

mittausta, voidaan saattaa oikeaan, pakotettuun asentoon virtuaalisen kiinnityksen avulla. GOM-ohjelmassa oleva "Virtual Clamping" simuloi osien kiinnitystä jigissä ja antaa käyttäjän laskea mitaustulokset kiinnitettyssä tilassa sekä jännitysvapaassa tilassa. Tämä toteutetaan universaalilla mittausjigillä, joka on monipuolisesti modifioitavissa erimallisia mittauskappaleita varten. Tämä ratkaisu poistaa tarpeen käyttää useita erilaisia ja kalliita kiinnittimiä mitattaessa erilaisia osia. (25.)

Käyttäjä voi kohdistaa yksittäisten osien mittausdatan referenssipistejärjestelmän (RPS) mukaisesti mittausohjelmassa. Tällä tavalla jokainen osa tulee täysin määritellyksi. Seuraavaksi käyttäjä voi analysoida virtuaalisesti, missä määrin kokoonpanon osat tulevat sopimaan liitettäväksi keskenään. Visualisoidussa kokoonpanossa käyttäjä näkee heti, menevätkö skannattujen osien pintamallit päällekkäin vai ovatko osat liian kaukana toisistaan eikä niitä voi siten liittää toisiinsa. (25.)

Käyttäjä voi seuraavaksi muuttaa osien kohdistusta. Ohjelma näyttää välittömästi, voivatko kohdistusmuutokset johtaa muihin ongelmiin kokoonpanossa. Näin käyttäjä voi tehdä vaihtelevia ja perusteltuja päätöksiä siitä, missä korjauksia on tehtävä. (25.)

4.4 Live-tilan hyödyntäminen

Normaalin skannauksen lisäksi ATOS-järjestelmiä voidaan hyödyntää myös liikkeiden ja poikkeamien reaaliaikaisessa mittauksessa. Seuranta perustuu stereokameraperiaatteeseen yhdessä GOM:n referenssipistejärjestelmän kanssa. Yksittäisiä pisteitä sekä kokonaisten kappaleiden geometrioita voidaan seurata avaruudessa. (26.)

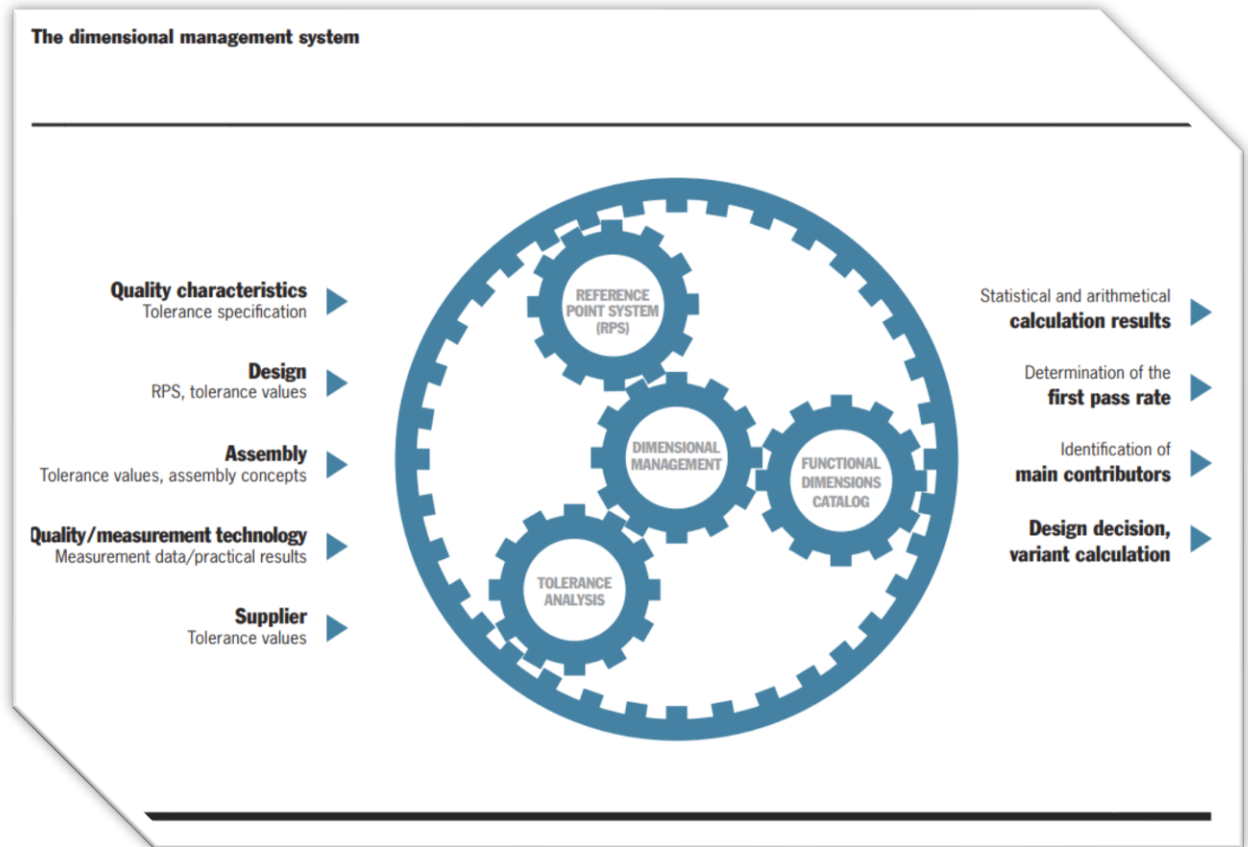
ATOS-järjestelmällä voidaan myös mitata ja seurata suorana osan kohdistusta tai asennon poikkeamaa nimellisasennosta. Tämä helpottaa osien virtuaalisen kohdistuksen siirtämistä todellisuuteen. (26.)

5 YHTENÄISEN PAIKOITUSJÄRJESTELMÄN SOVELTAMINEN SUUNNITTELUUN, HITSAUKSEEN JA MITTAUKSEEN

Opinnäytetyön päätehtävänä oli kehittää Proventian käyttöön suunnitteluohje Dimensional Management -järjestelmän käyttöä varten. Tässä luvussa käsitellään DIM:iin liittyvää teoriaosuutta, joka toimii perustana DIM-suunnitteluohjeen luomiselle.

Ajoneuvoteollisuudessa käytetään laajalti mittojenhallintajärjestelmää visuaalisten ja toiminnallisten vaatimuksien täyttämisen varmistamisessa, ja se toimii ennaltaehkäisevänä laadunvarmistusmenetelmänä. Tämän järjestelmän käyttö tekee mahdolliseksi sen, että mahdolliset ongelmat voidaan välttää jo ennen kuin niitä ilmenee. Pää tavoitteena tässä on korkean laatutason saavuttaminen ilman korjaustöitä. Yhä vaativammat laatuvaatimukset tuotteille, kuten autoille, saivat aikaan sen, että alettiin kehittämään mittojenhallintajärjestelmää, joka takaa toiminnallisuuden sekä valmistettavuuden aikaisessa vaiheessa suunnitteluprosessia. (27, s. 1–2.)

Dimensional Management -järjestelmän rajapintoihin kuuluvat suunnittelu, tuotekehitys, kokoonpanon suunnittelu, ostosien laatu, toimittaja, tuotanto ja mittausteknologia. Jotta järjestelmästä saataisiin kaikki hyöty irti, olisi välttämätöntä tuoda järjestelmä käyttöön jo aikaisessa vaiheessa tuotekehitysprosessia. Ne työntekijät, joilla on kokemusta DIM-järjestelmästä, olisi otettava mukaan tuotekehitysprosessiin jo konseptivaiheessa. He voivat toimia konsultointiapuna liittyen RPS- ja kokoonpanokonsepteihin. Tuotantovaiheessa, jossa alustavat mittaustiedot ovat jo olemassa, voidaan syöttää mittadata toleranssianalyysiin olettamusten vahvistusta varten. Järjestelmän käytettävyys ei rajoitu pelkästään OEM-tuotantoon, joka siis tarkoittaa alkuperäistä laitevalmistajaa, vaan myös yksittäisten osien sekä kokoonpanojen toimittajat voivat hyötyä koko DIM-järjestelmän käytämisestä. (27, s. 6.) Pitemmällä aikavälillä kustannukset laskevat, kun tarve korjaustoimenpiteille vähenee. Kuvassa 19 on lueteltu DIM-järjestelmään kuuluvia osa-alueita.



KUVA 19. Dimensional Management -järjestelmään kuuluvat osa-alueet (27, s. 5)

5.1 Standardit ja GPS-järjestelmän perussäännöt

Dimensional Management -järjestelmään liittyy ISO GPS -järjestelmä (SFS-EN ISO 1101:2017), jota käytetään kuvaamaan työkappaleen ominaisuuksia suunnittelussa, valmistuksessa ja laadunvarmistuksessa. GPS:llä tarkoitetaan geometristä tuotemäärittelyä, johon sisältyy mitan, sijainnin, suunnan, muodon sekä heiton toleranssit. GPS:n perussäännöt on esitetty standardissa SFS-EN ISO 8015: Geometrinen tuotemäärittely, perusteet, käsitteet, periaatteet ja säännöt. Peruselementteihin liittyvä standardi on ISO 5459:2011. Muita tärkeitä GPS-standardeja ovat ISO 14405-1:2016 (mittatoleranssit), ISO 2768-1 (pituusmittojen yleistoleranssit), ISO 22081:2021 (yleistoleranssi), ISO 286 (ISO-sovitejärjestelmä), ISO 1302 (pinnankarheuden merkinnät) ja ISO 14253 (mittausepävarmuus). (28, s. 3–4.)

GPS-järjestelmän perussääntöinä voidaan esittää esimerkiksi seuraavat lainalaisuudet, jotka esitetään standardissa ISO 8015:

1. Piirustus määrää -sääntö eli piirustuksessa esiintyvät ominaisuudet ovat velvoittavia. Piirustuksen dokumentaation täytyy olla riittävän kattavasti esitetty, jotta tarvittavat asiat voidaan lopulta valmistaa kunnolla. Jos piirustuksessa ei esiinny jotakin tiettyä mitta tai ominaisuutta, sitä ei ole tarvetta lopulta toteuttaa. Tähän ei ole siis olemassa mitään hyvää konepajakäytäntöä.
2. Piirustuksessa määritellyt ominaisuudet ovat valmiin tuotteen mittoja. Välivaiheet tulee esittää piirustuksessa selkeästi.
3. GPS-toleranssi koskee vain yhtä elementtiä kerrallaan, ellei muuta ole mainittu. Tämä tunnetaan elementtisääntönä.
4. Riippumattomuussääntö: kaikki GPS-toleranssit ovat oletusarvoisesti muista toleransseista riippumattomia, ellei riippumattomuutta ole kumottu esimerkiksi seuraavilla, riippumattomuuden kumoavilla merkinnöillä: M, E, CZ. (29, s. 18.)

5.2 Peruselementit ja 3-2-1-menetelmä

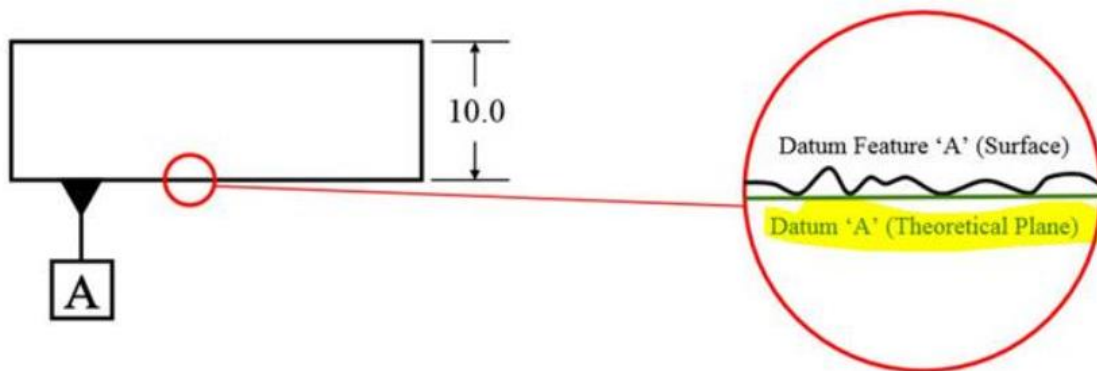
Peruselementti on kappaleen piirteistä muodostettu elementti, johon toleroituja elementtejä verrataan. Peruselementtinä voi olla pinta, viiva tai piste. Nämä peruselementit on muodostettu todellisista peruselementeistä. Esimerkiksi, jos todellisena peruselementtinä toimii lieriö, silloin siitä muodostuva peruselementti on lieriön keskilinjana toimiva viiva. Peruselementeillä määritellään toleranssialueen sijainti sekä suunta ja peruselementeillä kytetään lukitsemaan kappaleen vapausasteita (Degrees of Freedom, DoF). Näitä peruselementtejä on määriteltävä riittävästi, siten kaikki geometriset toleranssit, jotka vaativat viittauksen peruselementtiin, voidaan määritellä yksiselitteisesti. Peruselementit toimivat kappaleen paikoituksen ja mittauksen peruslähtökohtina. (30, s. 20–22.)

5.2.1 Peruselementin ja todellisen peruselementin määritelmä

Peruselementeiksi on mahdollista valita erityyppisiä geometrisiä elementtejä kappaleen todellisista pinnoista muodostettuina. Peruselementtinä voi toimia tasopinta (plane), lieriön (akseli tai reikä) keskiviiva tai kahden yhdensuuntaisen tason välinen keskitaso. Peruselementti on kokonainen rakenteellinen elementti eli kokonainen kohdepinta, ellei muuta ole mainittu. Peruselementtiä on mahdollista rajata tarpeen mukaan, jolloin tuloksena on rajoitettu peruselementti. (30, s. 20, 22.) Peruselementti on teoreettisesti eksakti eli siinä ei ole lainkaan esimerkiksi muoto- ja kulmavirhettä.

Tällainen tilanne ei ole tosimaailmassa tietenkään mitenkään mahdollinen, sillä mallin pohjalta valmistetussa kappaleessa esiintyy aina jonkinlaista virhettä.

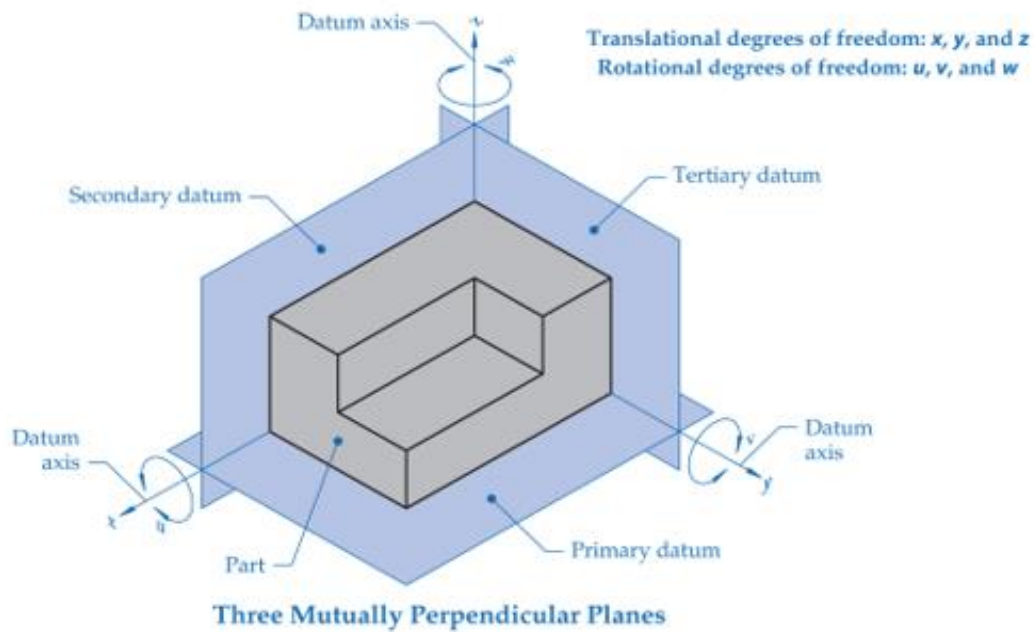
Virheitä voi tulla työkappaleeseen esimerkiksi erilaisten työkalujen, hitsauksen ja lämpötilan aiheuttamana sekä tietysti työntekijöiden mahdollisten virheiden takia. Kappaleeseen voi syntyä esimerkiksi vääntymiä, railoja, rakoja ja liian karheita pintoja. Tätä oikean työkappaleen pintaa, joka sisältää muoto- ja asentovirheitä, kutsutaan todelliseksi peruselementiksi (datum feature). Teoreettisesti oikea peruselementti muodostetaan todellisesta peruselementistä jollakin sovituskriteerillä (kuva 20).



KUVA 20. Peruselementin (datum) ja todellisen peruselementin (datum feature) ero (31)

5.2.2 Peruselementtijärjestelmän määrittely ja kappaleen vapausasteiden lukitseminen

Jos kappaleeseen on määritelty kaksi tai useampia peruselementtejä, tällöin elementit muodostavat peruselementtijärjestelmän (datum system). Peruselementtijärjestelmään kuuluvilla peruselementeillä lukitaan työkappaleen vapausasteita toleranssikehyksessä osoitetussa järjestyksessä. Yleensä kaikki vapausasteet lukitaan kolmella peruselementillä, kuten vaikkapa elementeillä A, B, C. Peruselementtien merkintä CAD-ohjelmassa tapahtuu vetämällä viiteviiva pinnalle, johon peruselementti halutaan. Viiteviivan päässä on mustattu tai avoin kolmio, joka tulee kiinni pinnalle. Yleensä käytetään mustattua kolmiota, joka on Proventian piirustuksissakin käytössä. Kuvassa 21 on esimerkki vapausasteiden lukitsemisesta peruselementtejä käyttäen. Kuvassa siirtymän koordinaattisuunnat ovat XYZ-akselit ja pyöriminen näiden akselien ympäri esitetään kirjaimilla U, V ja W.



KUVA 21. Vapausasteiden lukitseminen peruselementeillä (32)

Asettelemalla kolme tasoa kappaleen pinoille 90 asteen kulmaan keskenään, saadaan aikaiseksi tila, jossa kappale on saatu lukittua paikalleen kokonaan. Tässä tilassa kappaleella ei ole mahdollisuuksia liikkua tai pyörähtää mihinkään suuntaan. Kaikilla kappaleilla on vapausasteita; tällä tarkoitetaan sitä, että kappale pystyy liikkumaan eri suuntiin. Kolmiulotteisessa avaruudessa olevalla vapaasti liikkuvalla jäykällä kappaleella on kuusi eri vapausastetta eli XYZ-akselien suuntainen liike ja pyörähdys näiden akselien ympäri (33).

Vapausasteet jaetaan seuraavanlaisesti:

Liikkumisen/siirtymän (translaatio) vapausasteet:

- siirtymä eteen ja taakse (X-suunta)
- siirtymä oikealle ja vasemmalle (Y-suunta)
- siirtymä ylös ja alas (Z-suunta).

Pyörimisen (rotaatio) vapausasteet:

- pyöriminen U-suunnassa
- pyöriminen V-suunnassa
- pyöriminen W-suunnassa.

Pitää kuitenkin huomioida se, että näitä esityksiä vapausasteiden lukitsemisesta on monenlaisia. Monissa esityksissä ei ole pyörimiselle määritetty erikseen U-, V- ja W-suuntia, vaan niissä käytetään samoja koordinaattisuuntien kirjaimia kuin translaatiOSSakin. Seuraavaksi esitetään vapausasteiden lukitseminen peruselementtien avulla. Käytetään tässä translaatiolle XYZ-suuntia ja rotaatiolle UVW-suuntia:

1. peruselementti eli primäärielementti, joka on määritelty kappaleen alapinnalle, pystyy lukitsemaan kolme vapausastetta.

Primäärielementti lukitsee

- siirtymän Z-suunnassa
- pyörimän U-suunnassa
- pyörimän V-suunnassa.

2. peruselementti eli sekundäärielementti, joka on määritelty kappaleen yhdelle sivupinnalle, pystyy lukitsemaan kaksi vapausastetta.

Sekundäärielementti lukitsee

- siirtymän Y-suunnassa
- pyörimän W-suunnassa.

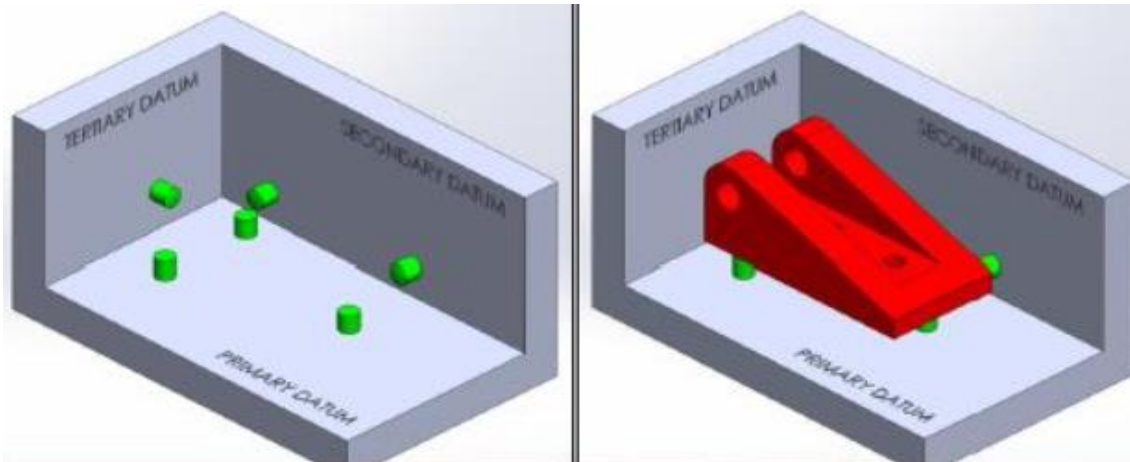
3. peruselementti eli tertiäärielementti lukitsee viimeisen vapausasteen. Tämä elementti on määritelty kappaleen toiselle sivupinnalle.

Tertiäärielementti lukitsee:

- siirtymän X-suunnassa.

5.2.3 Datum Target ja 3-2-1-menetelmä

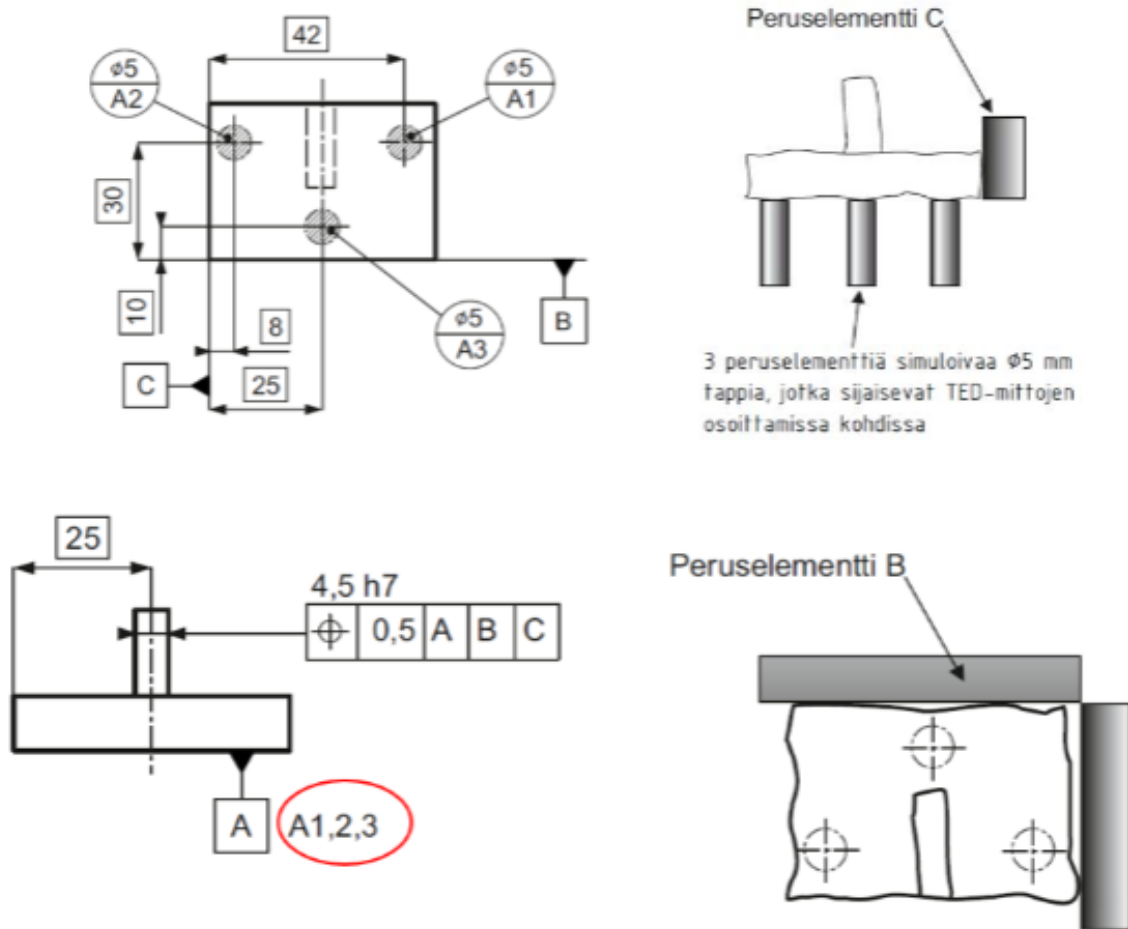
3-2-1-menetelmällä tarkoitetaan sitä, että aiemmin esitetty kappaleen vapausasteiden lukitseminen toteutetaan kiinnityspinnien tai vastaavien avulla. Ensimmäinen perustaso muodostetaan käyttäen kolmea pistettä eli tämä taso muodostuu kolmesta kiinnittimestä. Toinen taso muodostetaan käyttäen kahta pinniä ja viimeiseen tasoon yksi pinni (kuva 22). Pinnien kiinnityskohdat merkitään piirustukseen datum target -symboleilla eli rajoitetuilla peruselementeillä. Nämä kuvastavat sitä, mistä kohdista kappale kiinnittyy jigiin paikoitustapeilla.



KUVA 22. Kappaleen paikoittaminen kiinnitystapeilla 3-2-1-menetelmää käyttäen (34)

Rajoitettuja peruselementtejä käytetään laajalti ajoneuvoteollisuudessa, kuten Ponsella ja Valmet Automotivella. Rajoitetut peruselementit soveltuvat hyvin valuihin ja isoihin levyrakenteisiin tai sellaisiin kappaleisiin, jotka ovat muodoltaan epäsäännöllisiä (30, s. 24). Epäsäännöllisiä muotoja sisältäviin pintoihin ei voi soveltaa kokonaisia peruselementtejä, siksi käytetään rajattuja kohtia peruselementtien muodostamiseen. Kohdat voivat indikoida vaikkapa jigien kiinnitystappien sijaintia, joista kappale paikoittuu. Rajoitettu elementti voi olla alue, suora viiva tai piste.

3-2-1-paikoituksessa kolme pistettä muodostaa tason (plane), kaksi pistettä muodostaa viivan (line) ja viimeinen piste muodostaa yhden pisteen (point). Näiden elementtien mukaan tulisi paikointusmittauksessa. Piirustukseen merkitään myös se peruselementti, joka rajoitetuista peruselementeistä teoriassa muodostuisi (30, s. 23). Esimerkiksi rajoitetuista peruselementeistä A1, A2 ja A3 muodostuisi teoriassa taso A eli tämä pitää merkitä piirustukseen standardin ISO 5459:2011 mukaisesti (kuva 23).



KUVA 23. Peruselementin merkki merkittynä rajoitettujen peruselementtien lisäksi (35, s. 63)

5.3 Mitoitus

Mitoituksen tarkoituksena on saada määritettyä kappaleen koko ja muoto eri sivuilta ja kappaleessa olevien erilaisten piirteiden, kuten reikien, kokojen ja muotojen määrittäminen. Piirustukseen merkitään eri mittalajeihin kuuluvia mittoja, muun muassa toiminnallisia mittoja, apumittoja, tarkastusmittoja sekä valmistus- ja asennusmittoja. Toiminnallinen mitta on jokin tuotteen toiminnallisuuden kannalta tärkeä mitta. Reikien koot ja sijainnit sekä osien sijainnit ja muodot kuuluvat valmistus- ja asennusmittoihin, ne voivat olla myös toiminnallisia. Tarkistusmitta voi olla jonkin työvaiheen valmistusta helpottava mitta, jonka pitää olla juuri siinä vaiheessa oikeanmittainen, mutta valmiin kappaleen määrittelyssä tätä mitta ei välttämättä tarvita. Apumitat eivät välttämättä määrittele kappaleen muotoa, vaan ne voivat määräytyä kappaleen muista mitoista, esimerkiksi tapaus, jossa kappaleen yhden sivun useat eri mitat ovat esitetty summamittana, tällainen mitta merkitään sulkeisiin. (36, s. 2–3.)

Piirustukseen määritellyt mitat toimivat valmistuksen ja laadunvarmistuksen lähtötietoina, kuvissa näkyvät mitat ovat valmiin kappaleen mittoja, eivät siis minkään välivaiheen mittoja vaan lopullisia. Pitää pyrkiä siihen, että annetaan jokin tietty mitta vain yhden ainoan kerran. Jos sama elementti mitoitetaan useammalla mitalla, pitää apumitat merkitä selvästi sulkeilla. Mitoitus täytyy tehdä niin, että piirustuksen lukijalle muodostuu yksiselitteinen kuva kappaleesta. Mitään mittoja ei saa jäädä tulkinnanvaraisiksi. (36, s. 2–3.)

Kukin mitoitus mielellään siihen projektioon, jossa kyseinen kohta näkyy kaikista parhaiten. Kun luodaan mittoja, tulee kiinnittää huomiota selkeään esitystapaan. Jos tilaa on vähän, voidaan mittaluku sijoitella mittaviivan jatkeelle ja mittaluvut on myös mahdollista porrastaa selkeyden vuoksi. (36, s. 11.)

On olemassa erilaisia mitoitusmenetelmiä. Näitä ovat ketjumitoitus, perusviivamitoitus, jatkuva perusviivamitoitus, yhdistetty mitoitus sekä taulukkomitoitus. Mitoituslähtökohta tulee valita tarkoin. Lähtökohtana voi toimia jokin pinta, keskiviiva tai piste, joka on toiminnallisesti tärkeä. Tämä mitoituslähtökohta tulee valmistaa erityisen tarkasti. (36, s. 12–16.)

5.3.1 Toleranssit

Toleranssijattelun edelläkävijänä pidetään yhdysvaltalaisista Colt-revolveritehdasta, joka alkoi kehittää 1800-luvulla vaihtokelpoisia osia. Ennen tätä rikkoutunut osa jossakin koneessa jouduttiin valmistamaan täysin alusta, käyttäen mallina alkuperäistä osaa, sillä varaosia ei ollut. Toleransseja tarvitaan laadunvarmistuksessa. (37.)

Toleransseja tarvitaan osien toiminnan, asennuksen ja vaihtokelpoisuuden varmistamista varten. Lisäksi toleransseilla määritellään sallitut valmistusepätarckkuudet. Koska aivan täydellisiä kappaleita on mahdotonta valmistaa, täytyy sallia tietynlainen epätarkkuus valmistuksessa. Toleranssilla määritellään se virheen suuruus, joka kappaletta valmistettaessa saa tulla ilman, että kappaletta hylätään. Nämä hyväksyttävät rajat määritellään ero- tai rajamitoilla. Esimerkiksi tapin halkaisija saa olla $20 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ eli tapin halkaisija saa lopulta poiketa $0,5 \text{ mm}$ molempiin suuntiin nimellishalkaisijasta. Tappi voi siis olla $19,5 \text{ mm}$ tai $20,5 \text{ mm}$ halkaisijaltaan, tällöin kyseinen tappi ei mene vielä hylkyyn. Tällöin kappaleen toleranssialue on 1 mm . Näiden rajamittojen ylittyessä kap-

pale joudutaan hylkäämään. Ylempää rajaa kutsutaan yläeromitaksi ja alarajaa puolestaan alaromitaksi. (38, s. 2–3.) Toleranssin sisällä kappaleen toiminnallisuus on 100 %, kun taas rajojen ulkopuolella toiminnallisuus on 0 %. Tästä voidaan poiketa silloin, kun hyödynnetään maksimi- ja minimimateriaalin ehtoa. Toleranssi ei tietenkään saa olla liian tiukka eikä löysä, jottei syntyisi ylimääräisiä kustannuksia.

5.3.2 Toleranssianalyysi

Toleranssianalyysilla tarkoitetaan useita eri prosesseja, joita käytetään määrittäessä kokonaisvaihtelua ja vaihtelun vaikutusta tuotteisiin. Vaihtelu johtuu valmistettujen osien epätäydellisyydestä. Toleranssianalyysin päätavoitteena on varmistaa, että kokoonpanon komponenttien mitat ja toleranssit ovat sellaisessa tarkkuudessaan, että komponenttien kokoonpanovaiheessa tämä kokoonpano toimii juuri niin kuin pitääkin. (39.)

Osana toleranssianalyysiprosessia määritetään sekä alkuperäiset vaihtelun lähteet että stack-up eli tietyn kokoonpanon kaikkien osien yhdistetty vaihtelu. Analysoimalla osan ja prosessin vaihtelun vaikutuksia, valmistajat voivat ymmärtää paremmin mittojen vaihtelun lähteen suunnittelussaan ja kitkeä mahdolliset ongelmat jo ennen kuin niistä tulee ongelmia sekä vähentää romutusmääriä, kokoonpanon ongelmia ja vastata asiakkaiden laatuvaatimuksiin. On suositeltavaa optimoida toleranssit, sillä tämä kasvattaa osan toleranssialuetta, ja se auttaa madaltamaan osan valmistuskustannuksia. (40.) Toleranssien stack-up-analyysiä käytetään osien toleranssien optimoinnissa. Metodeja toleranssianalyysin suorittamiseen löytyy useita: pahin tapaus (Worst Case), tilastollinen (RSS), Six Sigma -malli, Monte Carlo -simulaatio ja mitattuun dataan perustuva toleranssianalyysi. Kuvassa 24 on esitetty kaavat neljälle erilaiselle toleranssianalyysimenetelmälle.

| Malli | Pinokaava (Stack) |
|---------------------------------|---|
| Pahin tapaus (Worst Case WC) | $\sigma_{gap} = \sum(T_i)$ |
| Tilastollinen (RSS) | $\sigma_{gap} = \sqrt{\sum\left(\frac{T_i}{3}\right)^2}$ |
| Six Sigma (6s) | $\sigma_{gap} = \sqrt{\sum\left(\frac{T_i}{3C_{pi}(1-k)}\right)^2}$ |
| Mitattu data (Means) | $\sigma_{gap} = \sqrt{\sum\sigma_i^2}$ |

KUVA 24. Toleranssianalyysien malleja ja pinokaavoja (41)

1. Worst Case (WC)-toleranssianalyysi: käyttää hyväkseen yksinkertaisia aritmeettisia keinoja eli yhteen- ja vähennyslaskua optimoitujen toleranssien laskemisessa. Tätä tapaa käyttäessä oletetaan kaikkien komponenttien mittojen olevan toleranssialueen ääriarjoilla. Tämä tapa sopii pieni-muotoisempaan tuotantoon. (40.)

Hyvät puolet: WC-analyysia käytettäessä kaikki kokoonpanot hyväksytään, sillä se olettaa kaikkien osien mittojen olevan hyväksyttävyyden rajoilla (40).

Huonot puolet: Worst Case -analyysi vaatii todella tiukkoja yksilöllisiä toleransseja komponenteille, siksi se yleensä johtaakin kalliisiin tuotanto- ja tarkastuskustannuksiin (40.)

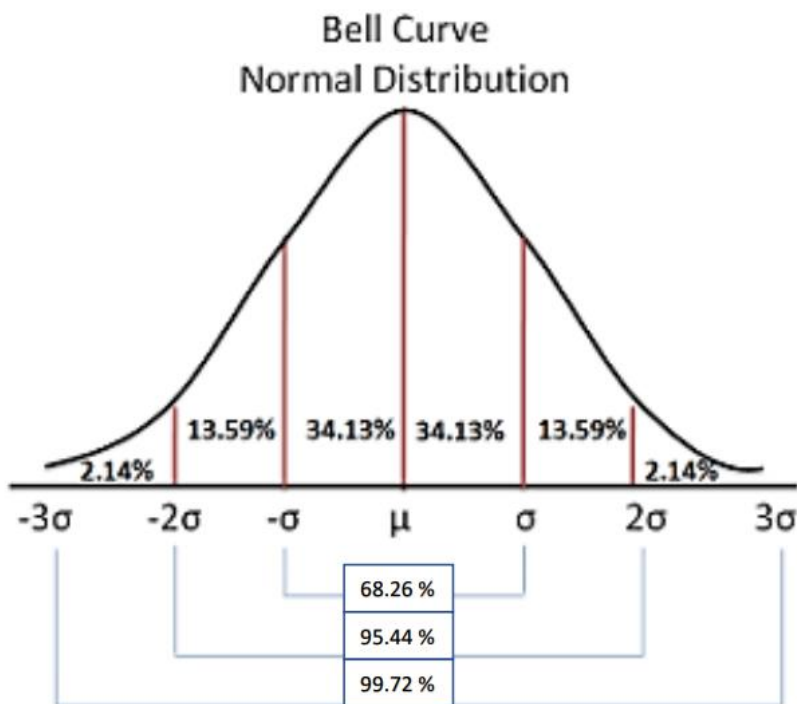
2. Tilastollinen (RSS)-analyysi: neliöllisen keskiarvon Root Sum of Squares -menetelmä perustuu tilastolliseen menetelmään. Se olettaa suurimman osan kappaleista olevan nimellimitoissaan eli keskellä toleranssialuetta. RSS-mallin olettaimus on, että valmistettujen osien mitat noudattavat kellokäyrää eli normaalijakaumaa sen sijasta, että mitat olisivat ääriarjoillaan. (40.)

Hyvät puolet: voidaan käyttää yksittäisille mitoille suurempia toleransseja. Parempi kuin WC-analyysi, sillä on todennäköistä, että valmistettujen osien mitat ovat keskittyneet nimellismitan lähelle. Tämä tuo suunnitteluun joustavuutta. (40.)

Huonot puolet: Kokoonpanoon liittyvien virheiden riski kasvaa, sillä valmistettujen osien mitat voivat mennä yli toleranssirajojen, ja osia joudutaan hylkäämään tästä syystä. Siksi RSS-analyysi ei anna 100 % takuuta kokoonpanon onnistumiselle. Hylättyjen osien määrä on suoraan verrannollinen prosessin kyvykkyyteen, jota kuvataan sigmatasoilla. (40.) RSS:n käyttäessä mitoille vain normaalijakaumaa, se ei ota huomioon olosuhteita tyypillisessä valmistuksessa, kuten työkalun kulumista (42). Huonoja puolia ovat myös seuraavat:

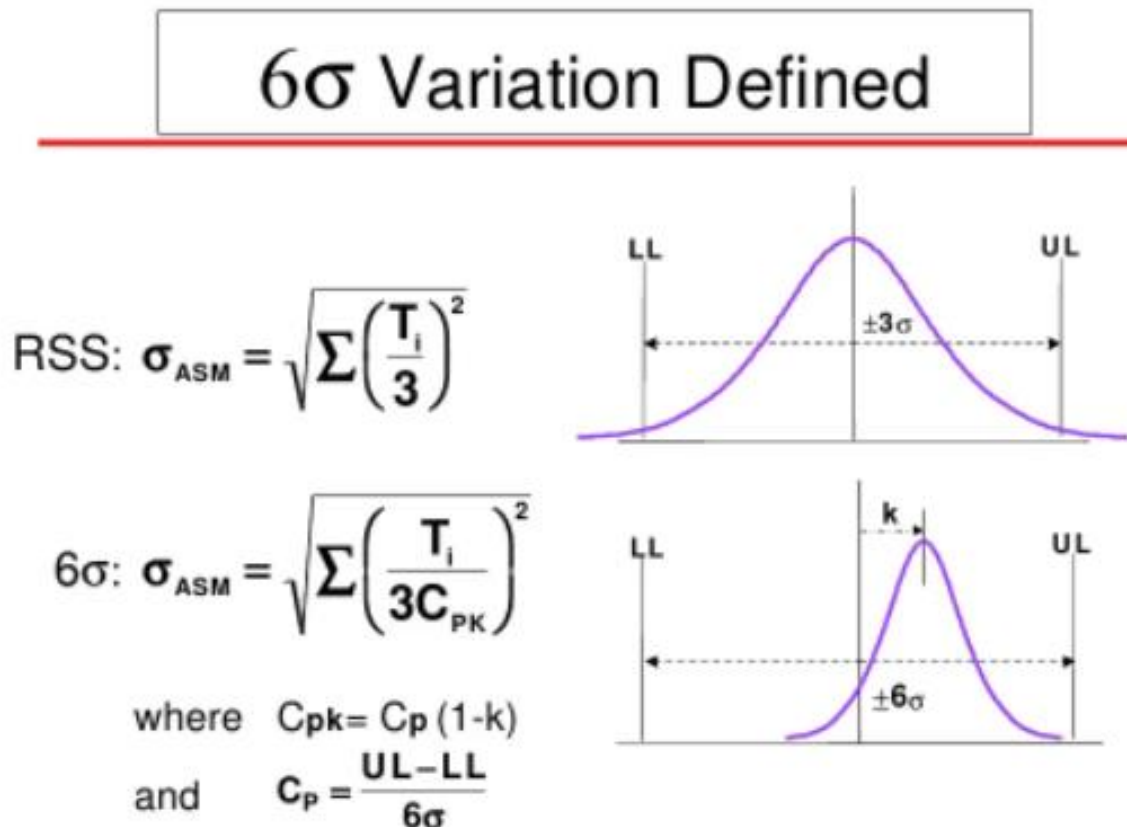
- ”kaikkien mittojen pitää olla normaalijakautuneita
- kaikkien pitää olla riippumattomia toisistaan
- kaikkien keskihajonta ja prosessin suorituskyky pitää olla sama
- kaikkien keskiarvo pitää olla hajonnan keskellä
- koska näin ei todellisuudessa ole RSS antaa liian väljät toleranssit”. (43.)

Kuvassa 25 on esitetty Gaussin kellokäyrä eli normaalijakauma, jossa μ on odotusarvo ja σ on keskihajonta. Keskihajontojen välissä näkyvät niiden väliin sijoittuvat prosentiosuudet.



KUVA 25. Normaalijakauma (40)

3. Six Sigmaan perustuva toleranssianalyysi: kuvassa 26 on esitetty kaavat ja käyrät RSS- ja Six Sigma -malleille. 6 Sigma -menetelmä on muunnos RSS-menetelmästä ja ottaa käytäntöön kaksi parametria (C_p , C_{pk}), joita kutsutaan prosessikykyindekseiksi, dimensioketjujen ongelmien ratkaisemisessa. Näitä kyvykkyyksindeksejä käytetään valmistusprosessin laadun arvioimiseen. (44.)



KUVA 26. Kaavat ja käyrät RSS- ja Six Sigma -malleille (45, s. 6)

Yleisessä suunnittelussa valmistusprosessia on pidetty perinteisesti riittävän tehokkaana tasolla 3 σ . Tämä tarkoittaa arviolta 2 700 hylättyä tuotetta miljoonaa tuotettua kohden. Vaikka tällainen määrä hylättyjä tuotteita suhteutettuna miljoonaan tuotettuun saattaa näyttää ensi silmäyksellä erittäin hyvältä tasolta, sitä pidetään kuitenkin riittämättömänä joillakin tietyillä aloilla. Lisäksi on lähes mahdoton tehtävä pitää prosessin ominaiskäyrän keskiarvo pitkällä aikavälillä tarkasti toleranssi-alueen keskellä. Suurilla tuotantomäärillä prosessin keskiarvo muuttuu ajan kuluessa eri tekijöiden vaikutuksesta, kuten virheelliset asetukset, työkalujen ja jigien kuluminen ja lämpötilan muutokset. 1,5 σ siirtymä ihanearvosta on tyypillistä. Perinteisesti lähestyttävissä prosesseissa 3 σ kyvykkyyksindeksillä tämä merkitsee huonojen tuotteiden määrän kasvua n. 67 000:een per miljoonaa tuotettua. (44.)

On selvää, että valmistusprosessia, jossa on tällainen hävikki, ei voida pitää hyväksyttävänä. Siksi viime aikoina modernia 6 Sigma -menetelmää on käytetty yhä useammin valmistusprosessien laadun arvioinnissa. Menetelmän ideana on saavuttaa sellainen tavoite, että prosessin ominaiskäyrän keskiarvo on 6σ etäisyydellä molemmista toleranssirajoista. Tällaisessa tehokkaassa valmistusprosessissa saavutetaan suhde 3,4 huonoa tuotetta miljoonaa valmistettua kohden jopa odotetun $1,5\sigma$ keskiarvosiirtymän jälkeen. (44.)

6 Sigma -menetelmä on suhteellisen uusi. Siitä tuli melko suosittu vasta 1980- ja 1990-luvuilla. Motorola otti sen käyttöön ensimmäistä kertaa ja sitä käytetään paljon pääasiassa Yhdysvalloissa. Sen hyödyntäminen soveltuu siihen, kun vaaditaan korkeampaa valmistusprosessien laatua ja suuriin tuotantomääriin, joissa prosessin ominaisuuden keskiarvo saattaa siirtyä. C_p -kykyindeksi arvioi valmistusprosessin laatua vertaamalla määritettyjä toleranssirajoja perinteiseen kykytasoon 3σ . 6 Sigma -menetelmän tapauksessa valmistusprosessia, jonka kyvykkyys on $4,5\sigma$, pidetään yleisesti tyydyttävänä. (44.)

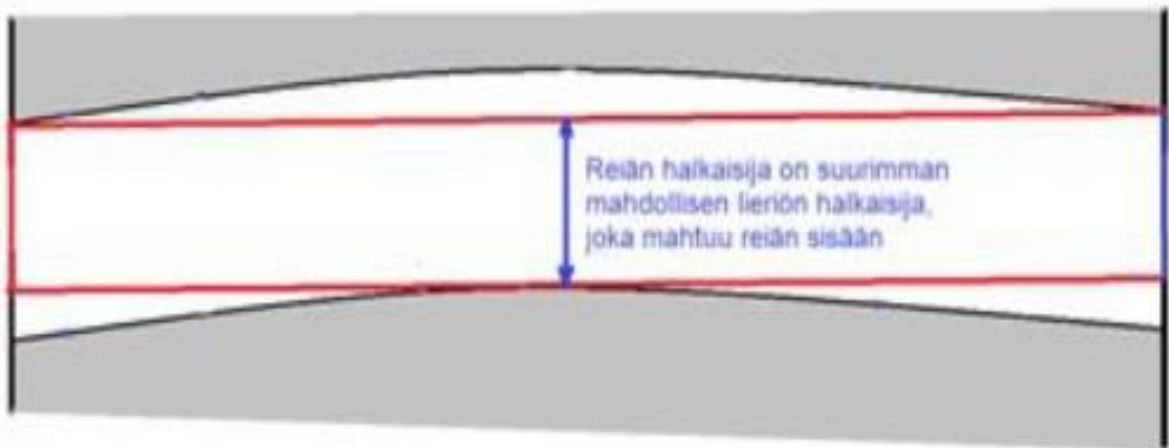
4. Monte Carlo -simulaatio: Monte Carlo -simulaatiossa toistetaan samantapaisia laskelmia useita kertoja peräkkäin käyttäen jotain Monte Carlo -algoritmia. Tulos ei ole täysin tarkka. Sitä käytettäessä virheen todennäköisyys voidaan kuitenkin asettaa halutulle tasolle, mutta tarkkuuden kasvessa myös suoritus aika kasvaa. Monte Carlo -algoritmia käytettäessä tehdään sarja satunnaisia arvauksia eli iteroidaan, jokainen arvaus eliminoi joukon mahdollisia ratkaisuja. Tulos on sitä tarkempi, mitä enemmän arvauksia tehdään. Näitä arvauksia voi olla tuhansia. Periaate on seuraava: määritellään lähtödatan rajat eli mille välille arvausten tulee sijoittua. Generoidaan lähtödata ja suoritetaan sillä tarvittavat laskelmat. Tehdään päätelmiä suoritettujen laskelmien tuloksien perusteella. (46.)

5.3.3 Pituusmittojen tolerointi

Mittoja voidaan ottaa kappaleesta monella tapaa. Tässä käsitellään erilaiset mittatyypit sekä niiden esittäminen piirustuksessa. Näihin liittyvä standardi on ISO 14405-1. Oletusmittatyypinä toimii nykyään kaksipistemitta, merkintänä LP, tätä merkintää ei mainita piirustuksessa sen koskiessa sekä ylä- että alarajamittaa. Kaksipistemitan voi ottaa mistä tahansa kohtaa elementtiä. (47, s. 4.)

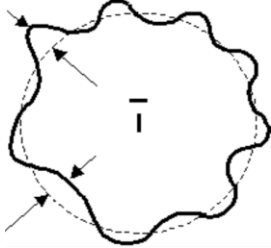
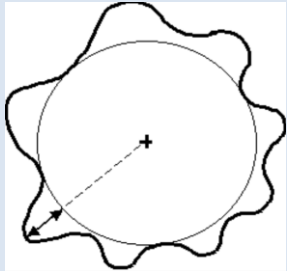
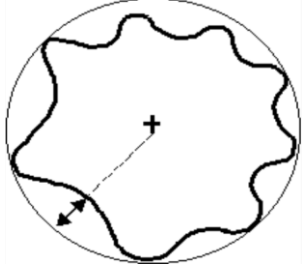
3D-mittausohjelmissa, kuten Gom ATOS -ohjelmassa, on mahdollisuus valita aktuaalielementin mittausmenetelmä. Mitatun elementin, tässä tapauksessa lieriön, halkaisija voidaan määrittää referenssilieriöiden avulla. Esimerkiksi reiän halkaisija voidaan määrittää suurimman sisään piirretyn lieriön mukaisella sovituskriteerillä, josta käytetään muuttujaa GX. Mittausohjelma näyttää reiän halkaisijaksi sen suurimman mahdollisen lieriön halkaisijan, joka mahtuu mitatun reiän sisään. Päinvastainen sovituskriteeri tälle on taas pienimmän ympäröidyn lieriön mukainen sovitus GN. Monesti lieriöiden halkaisijan määrittelyssä käytetään pienimmän neliösumman menetelmää eli Gaussian best-fitä (GG), joka antaa matemaattisesti tarkan tuloksen. Siinä mitatulle lieriölle luodaan keskiarvoistettu referenssilieriö, jonka kummallekin puolelle jää yhtä suuret alueet mitatusta lieriöstä. Joskus käytetään Minimax-sovituskriteeriä (GC), jota kutsutaan myös Chebyshev best-fitiksi. Siinä kaksi samankeskistä ympyrää on asetettu ympäröimään mitattu profiili kummaltakin puolen niin, että säteittäinen poikkeama on minimissään. (48.)

Kuvassa 27 on esimerkki reiän poikkileikkauksesta suurimman sisään piirretyn lieriön kriteerillä mitattuna. Taulukossa 3 on esitetty mittatyypit. Taulukossa on myös esitetty kuvien avulla neljä erilaista sovituskriteeriä lieriölle.



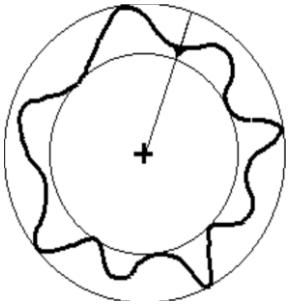
KUVA 27. Suurimman sisään piirretyn lieriön mukaisella sovituksella määräytyvä kokonaismitta (49, s. 21)

TAULUKKO 3. ISO 14405-1:n mukaiset mittatyypit (48; 50)

| Muuttuja | Kuvaus | Esimerkki |
|--------------------------|---|--|
| Paikallinen mitta | | |
| LP | Kaksipistemitta | |
| LS | Pallomitta | |
| ACS; ALS; SCS | Leikkauksen mitta (Any Cross Section, Any Longitudinal Section, Specified Cross Section) | |
| - | Osamitta | |
| Kokonaismitta | | |
| - | Suora kokonaispituusmitta | |
| GG | Pienimmän neliösumman mukainen sovituskriteeri (Gaussian best-fit). Keskiarvoistettu eli mitatun profiilin alueet ympyrän kehän molemmilla puolilla yhtä suuret |  |
| GX | Suurimman sisään piirretyn mitan mukainen sovituskriteeri (Maximum inscribed size). Mitatun profiilin sisään mahtuva mahdollisimman suuri ympyrä |  |
| GN | Pienimmän ympäripiirretyn mitan mukainen sovituskriteeri (Minimum circumscribed size). Mitatun profiilin ulkopuolelle muodostuva ympyrä on mahdollisimman pieni |  |

(jatkuu)

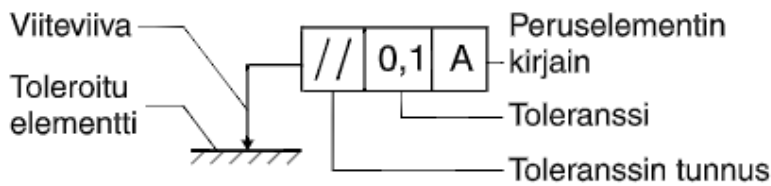
TAULUKKO 3. (jatkuu)

| | | |
|--------------------------------------|--|---|
| GC | Minimax-sovituskriteeri (Chebyshev). Mitatun profiilin sekä sisä-, että ulkopuolelle muodostettu samankeskiset ympyrät säteittäisen poikkeaman ollessa minimissään |  |
| Laskennallinen mitta | | |
| CC | Kehän pituuden mukainen halkaisija | |
| CA | Pinta-alan mukainen halkaisija | |
| CV | Tilavuuden mukainen halkaisija | |
| Luokitettu mitta (Rank order) | | |
| SX | Suurin mitta | |
| SN | Pienin mitta | |
| SA | Keskiarvomitta | |
| SM | Keskimmäinen mitta | |
| SD | Keskimitta | |
| SR | Mittojen vaihteluväli | |
| SQ | Mittojen keskihajonta | |

5.3.4 Geometriset toleranssit

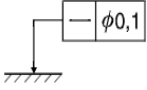
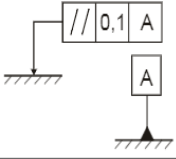
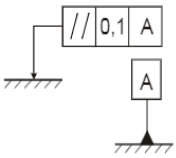
Geometrisilla toleransseilla puolestaan määritellään muodon, suunnan, sijainnin ja heiton sallitut poikkeamat. Näillä geometrisilla toleransseilla voidaan korvata perinteinen mittatolerointi ja niillä voidaan varmistaa osan toimivuus paremmin. Geometrisen toleranssin perustunnus sijoitetaan toleranssikehykseen ensimmäiseksi, toiseksi laitetaan sen lukuarvo eli toleranssialue ja seuraaviin

lokeroihin peruselementtejä indikoivat kirjaimet (kuva 28). Toleranssikehyksestä lähtee viitenuoli, joka indikoi toleranssin suuntaa, ellei toleranssin tunnuksen edessä ole tunnusta \emptyset (51, s. 12).



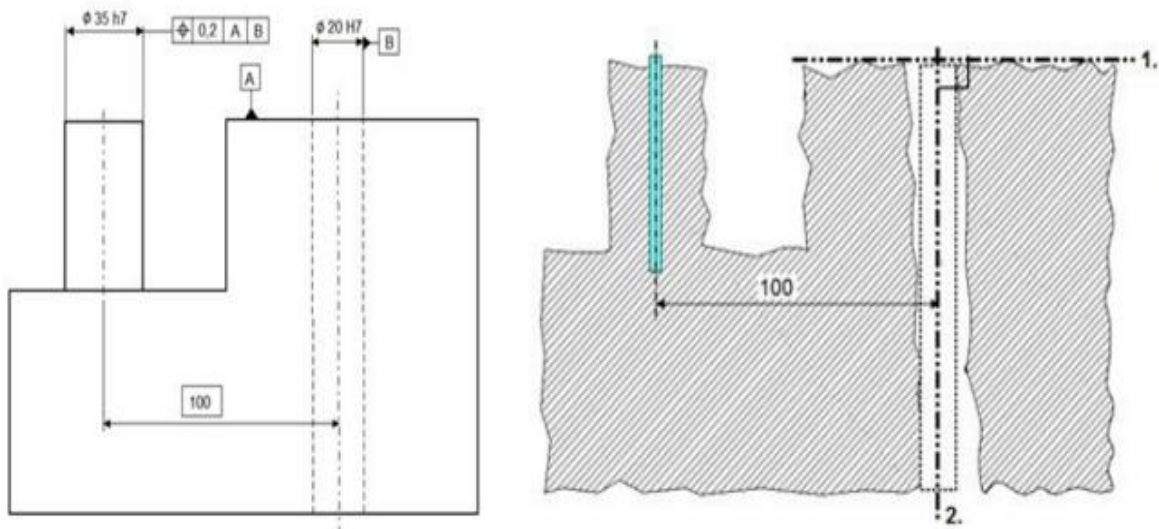
KUVA 28. Toleranssikehyksen merkinnät (51, s. 12)

Osa geometrisistä elementeistä ei vaadi peruselementtiin viittausta, vaan silloin tarkastellaan yksittäisten elementtien ominaisuuksia eli ei verrata peruselementteihin. ”Toisiinsa liittyvissä elementeissä toleroitavaa elementtiä verrataan valittuun peruselementtiin. Toiminnallisista syistä riippuen voidaan peruselementtinä käyttää yhtä tai useampaa elementtiä.” (51, s. 11.) Piirustuksessa ilmoitettu toleranssivaatimus koskee riippumattomuuden säännön perusteella vain yhtä kokonaista elementtiä kerrallaan. Tämä voidaan kumota erilaisilla merkinnöillä. Esimerkiksi merkintä 0,10/100 tarkoittaa sitä, että sallitaan toleranssi 0,10 pituudelle 100 missä kohtaa tahansa toleroidulla elementillä. (51, s. 12.) Kuvassa 29 on esitelty geometriset toleranssit tunnuksineen.

| Toleranssit | Ominaisuus | Tunnus | Peruselementin tarve |
|---|------------------|--------|--|
| Muoto | Suoruus | — | Ei  |
| | Tasomaisuus | | |
| | Ympyrämäisyys | ○ | |
| | Lieriömäisyys | | |
| | Tasoviivan muoto | ⌒ | |
| | Pinnan muoto | ⌒ | |
| Suunta | Yhdensuuntaisuus | // | Kyllä  |
| | Kohtisuoruus | ⊥ | |
| | Kulma-asento | ∠ | |
| | Tasoviivan muoto | ⌒ | |
| | Pinnan muoto | ⌒ | |
| | Sijainti | Paikka | |
| Samankeskisyys (keskipisteille), sama-akselisuus (akseleille) | | ⊙ | Kyllä  |
| Symmetrisyys | | ≡ | |
| Tasoviivan muoto | | ⌒ | |
| Pinnan muoto | | ⌒ | |
| Heitto | | Heitto | ↗ |
| | Kokonaisheitto | ↗ | |

KUVA 29. Geometristen toleranssien symbolit, SFS-EN ISO 1101 (51, s. 11)

Geometriset toleranssit paikoitetaan TED-mitoilla eli teoreettisesti oikeilla mitoilla. Näiden basic-mittojen arvo sijoitetaan laatikon sisään. Kuvassa 30 on määritetty lieriön $\varnothing 35$ h7 toleranssialue peruselementtien A ja B avulla. Peruselementin A ollessa ensisijainen, se rajoittaa peruselementin B suuntaa.

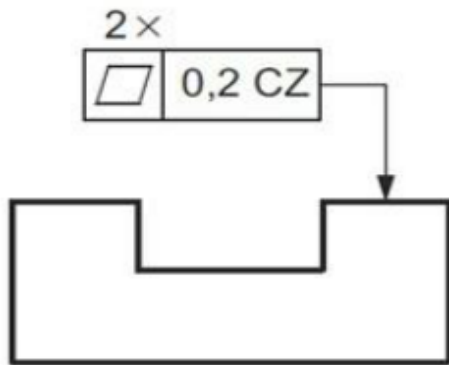


KUVA 30. Vasemmalla piirustusprojektio, jossa esillä peruselementit, geometrinen toleranssi ja TED-mitta, oikealla simuloituna mitattu, ns. oikea kappale, johon on merkitty ideaaliset peruselementit, TED-mitta sekä toleranssialue. (52, s. 18–19.)

Ensisijainen peruselementti 1. on todellista peruselementtiä eli tasoa A sivuava ideaalinen taso. Toissijainen peruselementti 2. on todellisen peruselementin eli reiän B sisään suurimman sisään piirretyn lieriön mukaisella sovituskriteerillä muodostetun lieriön keskiviiva. Tämän keskiviivan tulee olla kohtisuorassa 1. peruselementtiä vasten. Tässä yhteydessä on 90° TED-mitta, mutta sitä ei merkitä piirustukseen, sillä se on implisiittinen. Jotta pysyttäisiin toleranssissa, toleroidun lieriön keskiviivan tulee olla kahden ideaalisen pinnan välissä (merkitty sinisellä). Ideaalisten pintojen keskiviiva on 100 mm:n etäisyydellä 2. peruselementistä. Näiden pintojen etäisyys on toisistaan 0,2 mm. (52 s. 19.) Jos arvon 0,2 mm edessä olisi halkaisijamerkki \varnothing , silloin toleranssialue muuttuisi lieriömäiseksi kahden pinnan sijasta. Tässä on mahdollisuus tulkintavirheille, ja siksi kannattaakin muistaa, että halkaisijamerkillä varustetun geometrisen toleranssin toleranssialue on aina lieriömäinen. Muita lisämerkintöjä on olemassa paljon erilaisia, seuraavaksi käydään pääpiirteittäin läpi yleisimmät. Seuraavat merkinnät kumoavat GPS-järjestelmän säännön elementtien riippumattomuudesta.

Yhdistetty toleranssialue CZ (Combined Zone)

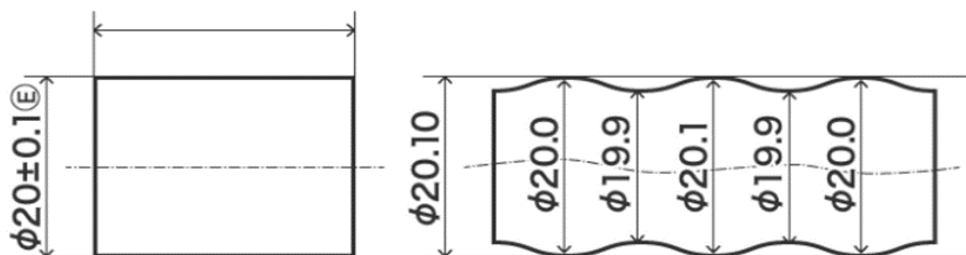
Erillisten elementtien toleranssialueet voidaan yhdistää CZ-muuttujan avulla (kuva 31). Tällöin kahden eri elementin riippumattomuus toisistaan kumoutuu. (53, s. 7.)



KUVA 31. Yhdistetty toleranssialue CZ (53, s. 6)

Verhopintavaatimus (E)

Verhopintavaatimus (Envelope Principle) tarkoittaa sitä, että kappaleen ympärille on luotu täydellinen verhopinta, jota ei saa loukata. Kappaleen tulee siis sopia tämän verhopinnan sisälle kokonaan. Kuvassa 32 on 20 mm halkaisijaiselle akselille määritelty verhopinta symmetrisellä toleranssilla $\pm 0,1$. Kaksipistemitta ei siis saa ylittää ylem্পää tai alem্পaa rajamittaa missään kohdassa. Jos näin tapahtuu, kappale hylätään. (54.)



KUVA 32. Verhopintavaatimuksen tulkinta (54)

Maksimimateriaalin vaatimus (M)

Voi liittyä toleranssivaatimukseen, peruselementtiin tai molempiin. Geometrinen toleranssi voi kasvaa käyttämättä jääneellä mittatoleranssin osalla, kun liittyvän elementin mittatoleranssi ei ole maksimimateriaalimitassaan. Entiseltä nimeltään menorajan periaate. (55, s. 5.)

Vähimmäismateriaalivaatimus (L)

Geometrisen toleranssin voi ylittyä, mutta suunniteltu seinämänpaksuus ei saa alittua (56, s. 59).

Vastavuoroisuuden vaatimus (R)

Mittatoleranssi on mahdollista ylittää, ellei geometrisen toleranssin käytä koko aluettaan. Voidaan käyttää edellisten maksimi- ja minimimateriaalivaatimusten kanssa. (56, s. 60–61.)

5.4 Tilastollinen prosessinohjaus (SPC)

Tilastollinen prosessinohjaus eli Statistical Process Control on tärkeä väline laadunhallinnassa. Laadunohjauksessa SPC:llä on kaksi päätehtävää: kertoa, milloin on tarvetta säätää tai korjata prosessia. Tämän tulisi tapahtua ennen kuin prosessi muuttuu hallitsemattomaksi. SPC:tä voidaan käyttää myös prosessin analysoimiseen ja parantamiseen. Tilastollisessa prosessinohjauksessa on pääideana monitoroida systemaattisesti prosessin kehittymistä ja vähentää variaatiota. SPC:ssä on tärkeänä osa-alueena kontrollikortit eli SPC-kortit, joiden avulla prosessin muutokset pystytään havaitsemaan nopeasti sekä luotettavasti ja voidaan aloittaa korjaustoimenpiteet pian. Näiden korttien tarkoituksena on mitata ja vähentää prosessivaihteluita. Korttien avulla pystytään erottamaan erilaisia vaihtelutyyppisiä eli satunnaisvaihteluita, jotka ovat prosessille ominaisia sekä häiriötilanteet. (57.) Kun saavutettuun tulokseen vaikuttaa ainoastaan satunnaisvaihtelu eli tulokset pysyvät ohjausrajojen puitteissa, on kyseessä tilastollisesti hallittu prosessi. Kun tulokset alkavat mennä ohjausrajojen ulkopuolelle, prosessi ei tällöin ole hallinnassa; joudutaan siis tekemään korjaavia toimenpiteitä. (58.)

5.4.1 SPC-ohjauskortit

Tilastollisen prosessinohjauksen perinteisinä apuvälineinä toimivat Walter A. Shewhartin 1920-luvulla kehittämät prosessin ohjauskortit. Näiden ohjauskorttien käyttö edellyttää SPC-menetelmien tuntemusta. Ohjauskortille kootaan systemaattisesti mittaushavaintoja tutkittavasta prosessista. Ohjauskortilla lasketaan mittaustulosten keskiarvo \bar{x} ja keskihajonta eli σ (**sigma**). Näistä saadaan keskiarvoja tai hajontaa koskevat ohjausrajat LCL (Lower Control Limit) ja UCL (Upper Control Limit). Prosessi on hallinnassa silloin, kun havainnot täyttävät vaatimukset ja asettuvat ohjausrajojen sisäpuolelle. Kun havainto ylittää ohjausrajan, prosessissa on jokin häiriö, jonka syy täytyy selvittää ja on tehtävä tarvittaessa korjaustoimenpiteitä prosessille. Laadun parantaminen merkitsee

hajonnan pienentämistä. Laadun parantuessa ohjausrajoja kiristetään. (58.) Kuvassa 33 on jotakin tiettyä prosessia kuvaava ohjauskortti.



KUVA 33. Esimerkki SPC-ohjauskortista (59)

5.4.2 Prosessin kyvykkyys

Suuri osa kaikenlaisista teollisuuden prosesseista sisältää joko minimi- tai maksimirajat tai molemmat. Konepajalla tuotetut osat eivät saa olla liian pieniä eikä myöskään liian suuria, odotusaika ei saa ylittää sallittua rajaa eikä esimerkiksi meijerillä täytettävän viilipurkin täyttöpaino saa olla liian alhainen tai liian korkea. Sitä, että täyttääkö jokin tietty prosessi vaadittavat spesifikaatiot, toleranssit tai raja-arvot lähitulevaisuudessa, määritellään kyvykkyysanalyysin avulla. Virheprosentti puolestaan kertoo, kuinka paljon prosessissa syntyi virheitä. Tämä kertoo tätä samaa asiaa kuin kyvykkyysanalyysi, mutta menneisyydessä. Kyvykkyysanalyysi antaa näkökulmaa huonosti toimivan prosessin parantamiseen. (60.)

On kehitetty useita erilaisia suorituskykyindeksejä prosessin kyvykkyden tarkkailua varten. Näitä ovat indeksit Cp, Cpk, Pp, Ppk. Varsinkin ajoneuvoteollisuudessa vaaditaan toimittajilta jotakin tiettyä suorituskykyindeksiä, vaikkapa $Cpk > 2$, ennen kuin aletaan miettimään tuotteiden tilaamista toimittajalta. Näin varmistetaan jo etukäteen siitä, ettei virheitä pääse syntymään. (60.) USL tarkoittaa ylempää spesifikaatorajaa ja LSL alemmaa spesifikaatorajaa. Nämä ovat siis toleranssirajoja, jotka ovat määriteltä yrityksen tai asiakkaan toimesta. Näitä ei tule sekoittaa ohjausrajoihin UCL ja LCL.

C_p-indeksi kuvaa prosessin kyvykkyyttä prosessin ollessa täysin keskitetty. Siinä verrataan prosessin hajontaa toleranssialueeseen ilman, että keskiarvon sijaintia otetaan huomioon. (61, s. 8.) C_p-luku lasketaan kaavan 1 mukaisesti.

$$C_p = \frac{(USL - LSL)}{6\sigma} \quad \text{KAAVA 1}$$

USL = ylempi spesifikaatoraja (Upper Specification Limit)

LSL = alempi spesifikaatoraja (Lower Specification Limit)

σ = lyhytaikainen keskihajonta

C_{pk} puolestaan kertoo prosessin kyvykkyyden tällä hetkellä käyttäen samalla arvioitua keskihajontaa. Siinä otetaan siis jakauman sijainti huomioon toleranssialueeseen nähden (kaava 2). (61, s. 8.) C_{pk}:n kaava sisältää sekä alemmaa että ylemmää toleranssirajaa varten tarkoitetut laskelmat. C_{pk}:n indeksiksi valitaan lopulta se arvo, joka on pienempi.

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}, \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma} \right\} \quad \text{KAAVA 2}$$

USL = ylempi spesifikaatoraja (Upper Specification Limit)

LSL = alempi spesifikaatoraja (Lower Specification Limit)

\bar{x} = keskiarvo

σ = lyhytaikainen keskihajonta

min = laskelmista valittu pienempi arvo

P_p eli maksimitoimintakykyyluku kuvaa mihin prosessi pystyy vaatimuksiin nähden teoriassa, P_p:n laskeminen on esitetty kaavassa 3 (61, s. 9).

$$P_p = \frac{(USL - LSL)}{6 \cdot s_{long}} \quad \text{KAAVA 3}$$

USL = ylempi spesifikaatoraja (Upper Specification Limit)

LSL = alempi spesifikaatoraja (Lower Specification Limit)

s_{long} = pitkäaikainen keskihajonta

P_{pk} eli suorituskykyindeksin laskennassa käytetään kaikkia käytössä olevia tuloksia (kaava 4) (61, s. 9). Tässä valitaan C_{pk} :n kaavan tapaan pienempi saatu arvo.

$$P_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \bar{x}}{3 \cdot s_{long}}, \frac{\bar{x} - LSL}{3 \cdot s_{long}} \right\}$$

KAAVA 4

USL = ylempi spesifikaatoraja (Upper Specification Limit)

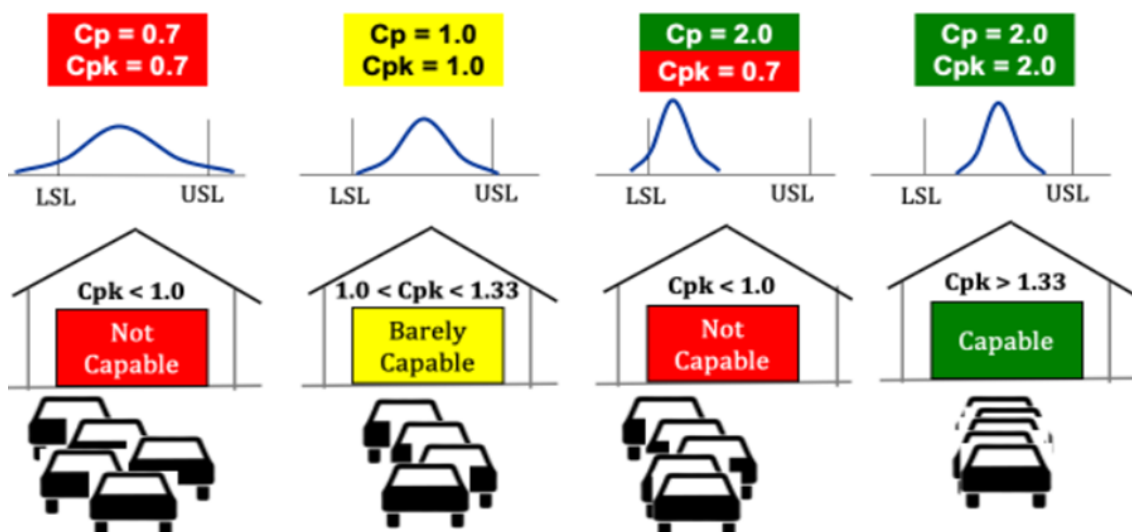
LSL = alempi spesifikaatoraja (Lower Specification Limit)

\bar{x} = keskiarvo

s_{long} = pitkäaikainen keskihajonta

\min = laskelmista valittu pienempi arvo

Kuvassa 34 on esitetty prosessin kyvykkyys kuvaaja- sekä autoesimerkin avulla. Kuvitellaan siis, että kuljettaja yrittää pysäköidä autoansa autotalliin. Jos auto on liian leveä, se ei mahdu talliin. Jos se on kapeampi kuin autotallin aukko, mutta jos se ei ole keskellä aukkoa, se ei pääse sisään - se todennäköisesti raapii tallin ovenkarmia. Autotallin oven reunaan osumisen voidaan kuvitella vastaavan viallisen osan valmistamista. Mutta jos auto on tarpeeksi kapea ja hyvin keskitetty, auto mahtuu talliin. Se on tavoitteena. Halutaan siis valmistusprosessin leveys, joka on kapea ja hyvin keskitetty suhteessa spesifikaatorajoihin. Oletetaan nyt, että auto on oikean levyinen. Se on tarpeeksi kapea ja sen pitäisi aina mahtua. Nyt on kuljettajan taidosta kiinni pysäköiminen ilman, että ovenkarmia raavitaan. Kuvitellaan kuljettaja, joka saapuu kotiin töiden jälkeen joka päivä ja pysäköi autonsa autotalliin. (62.)



KUVA 34. Esimerkki prosessin keskittämisestä (62)

Hyvä kuljettaja tekee näin: keskittää auton aina niin hyvin, että molemmilla puolilla on riittävästi tilaa. Seuraavien 30 päivän aikana hänen ohjaukortsinsa ja histogramminsa ovat molemmat hyvin kapeat. Kaavioista selviää seikka, että hänen on erittäin epätodennäköistä naarmuttaa tai kolhia autoa seiniin. Molemmilla puolilla on runsaasti vapaata tilaa. (62.)

Epävaka kuljettaja tekee näin: epävakaa kuljettaja eli joku, joka opettelee ajamaan, ei välttämättä aina keskitä autoa oikein. Seuraavien 30 päivän aikana hänen ohjaukortsinsa ja histogramminsa ovat erittäin laajat. On hyvin todennäköistä, että hän naarmuttaa tai kolhii autoansa. (62.)

Käytetään samaa ideaa tuotteen valmistusprosessissa. Tallennetaan kunkin tehdyn osan mittaukset, piirretään sitten histogrammi ja ohjaukortsit ja katsotaan, kuinka paljon tilaa on molemmilla puolilla. Mitä kapeampi histogrammin leveys on suhteessa spesifikaatioleveyteen, sitä korkeampi on prosessin suorituskyky. (62.)

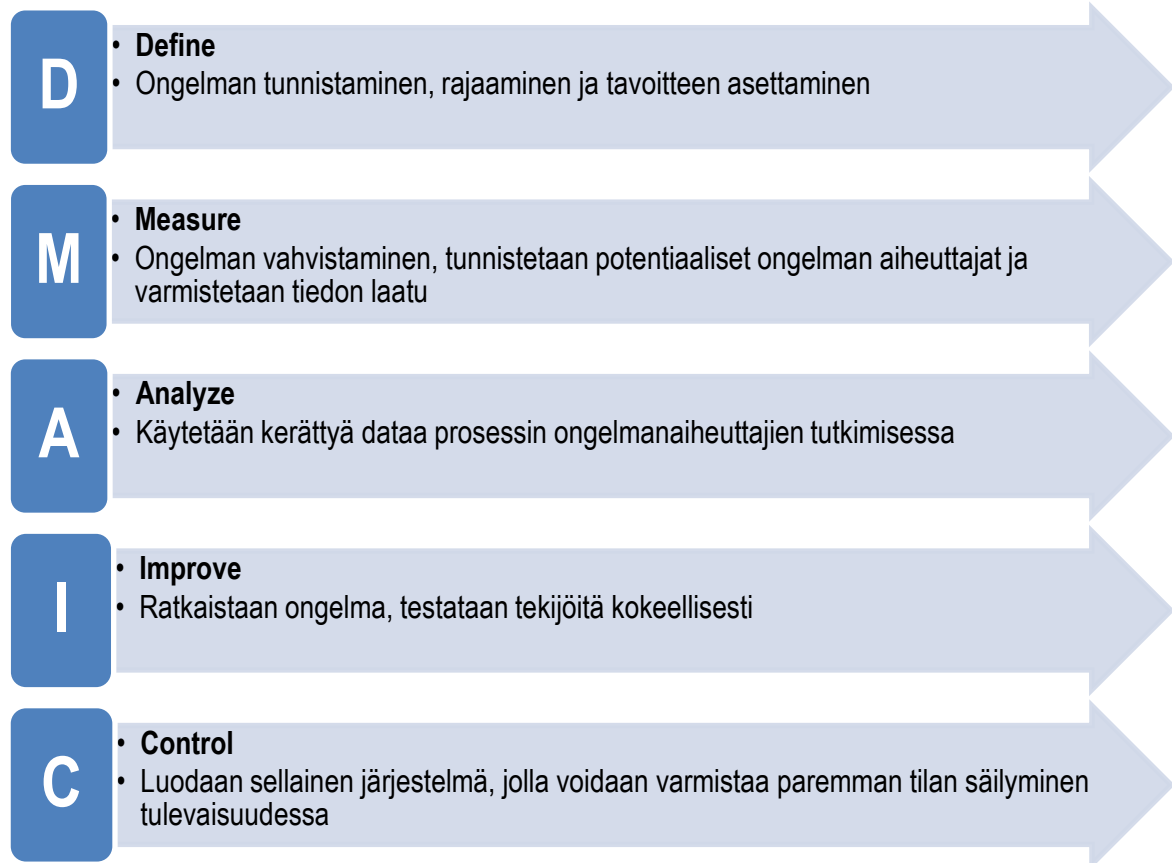
5.4.3 Lean Six Sigma

Lean ja Six Sigma ovat liiketoimintaprosessin parannusmenetelmiä. Niiden kummankin tavoitteena on entistä parempi prosessin suoritusarvo, mutta ne keskittyvät eri elementteihin prosessissa. Six Sigma tarkoittaa käsitteenä systemaattista menetelmää, jonka avulla tuodaan esiin avaintekijät, jotka ohjaavat prosessin suoritusarvoa. Sitten näille kyseisille tekijöille asetetaan parhaat arvot ja näitä arvoja ylläpidetään. Tämä on siis priorisointia, tämä priorisointi toteutetaan tunnistamalla vaihtelu ja tämä vaihtelu pyritään poistamaan eli eliminoimaan. Lean taas on systemaattinen menetelmä, jota käyttämällä prosessin monimutkaisuutta vähennetään ja poistetaan hukkalähteet. Prosessia siis virtautetaan, hukatekijät ovat prosessin virtauksen estäjiä. (63.)

Lean-menetelmällä tutkitaan, mitä ei pidä tehdä, ja kuinka tämä tarpeeton toiminta eli hukka poistetaan. Hukka voi olla esimerkiksi ylituotantoa, liian suuria varastoja, tarpeettomia liikkeitä työtehtävän aikana ja odottelua. Six Sigma -menetelmällä puolestaan katsotaan, mitä täytyy tehdä, ja kuinka tämä tarvittava toiminto saadaan tehtyä oikein heti ja aina tästä eteenpäin. Tämä on siis vaihtelun eliminoimista. Leanissa ja Six Sigmassa on paljon samoja työkaluja, mutta on myös eri työkalujakin. Lopulta näiden menetelmien perusrakenteen havaittiin olevan niin samankaltaiset, että molempien menetelmien yhdistäminen tuottaisi synergiaetua. Katsottiin siis parhaaksi yhdistää

nämä työkalut ja näistä kahdesta syntyi lopulta Lean Six Sigma. Kummassakin pääprosessi on yleisellä tasolla **DMAIC**. (63.) Se etenee taulukon 4 mukaisesti.

TAULUKKO 4. DMAIC-prosessi (63)



”Lean Six Sigma tarjoaa tasapainoisen prosessiperusteisen parannusmenetelmän liiketoiminnan strategiseen parantamiseen. Sen toimivuus on osoitettu lukuisilla tieteellisillä tutkimuksilla ja myös liiketoimintatulokset puhuvat vahvasti sen puolesta.” (63.) Six Sigmalla voidaan verrata prosessien, tuotteiden ja palveluiden laatutasoa toisiinsa. Laatua kuvataan Sigma-tasoina, jotka on esitetty taulukossa 5. (61, s. 3.)

TAULUKKO 5. Prosessin suorituskykyä kuvaavat sigmatasot (61, s. 4)

| Sigmataso | DPMO (viallisia/1 milj.) | Viallisia % | Hyviä % | Lyhytaikainen Cpk | Pitkäaikainen Cpk |
|-----------|-----------------------------|-------------|--------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 691 462 | 69 % | 31 % | 0,33 | -0,17 |
| 2 | 308 538 | 31 % | 69 % | 0,67 | 0,17 |
| 3 | 66 807 | 6,7 % | 93,3 % | 1,00 | 0,5 |
| 4 | 6 210 | 0,62 % | 99,38 % | 1,33 | 0,83 |
| 5 | 233 | 0,023 % | 99,977 % | 1,67 | 1,17 |
| 6 | 3.4 | 0,00034 % | 99,99966 % | 2,00 | 1,5 |
| 7 | 0.019 | 0,0000019 % | 99,9999981 % | 2,33 | 1,83 |

Korkein tasoista on nimensä mukainen Six Sigma -taso. Se korreloi laatutavoitteeseen, joka on erittäin lähellä nollavirhettä "zero defect". Six Sigmassa, kuten Lean-menetelmissäkin, on erittäin tärkeitä analysoida ja ymmärtää nykyistä suoritustasoa, sillä ilman tätä kehittäminen ei onnistu. Six Sigma -menetelmä on monipuolinen ja tehokas työkalu, jossa tilastollisilla ja jatkuvan parantamisen menetelmillä, kuten DMAIC:lla, vuokaavioilla, histogrammeilla, hajontadiagrammeilla ja FMEA-analyyseillä eli vika- ja vaikutusanalyyseillä sekä prosessidatalla on merkittävä asema. (61, s. 2.)

5.4.4 Mittaussysteemin analyysi (MSA)

MSA eli Measurement System Analysis tarkoittaa mittausjärjestelmän analysointia. MSA:n tarkoituksena on tutkia mittausjärjestelmän toimintaa eli mikä on mittajaan vaikutus mittaustulokseen, ja onko mittauksessa käytettävä mittalaite (gage) riittävän tarkka kyseiseen mittaukseen. Analyysissa varmistetaan, että mittalaitteet, jigit ja testilaitteistot ovat tarkoitukseen soveltuvia. MSA sisältää yleensä Gage R&R -menetelmän kriittisille ominaisuuksille eli toistettavuudelle ja uusittavuudelle. Sisältää myös vahvistuksen siitä, että juuri näihin mittauksiin käytettävät mittalaitteet on kalibroitu. Tämä mittauksen virheen erittelyyn perustuva mittaussysteemin analyysi on monilla eri toimialoilla, esimerkiksi ajoneuvoteollisuudessa, asiakasvaatimuksena sekä osana toimittajan hyväksymisprosessia eli PPAP:ia (Product Part Approval Process). (59.)

Gage R&R (Repeatability ja Reproducibility) on tutkimusmenetelmä, joka tutkii mittaussysteemin kyvykkyyttä eli sillä voidaan selvittää variaatiovirheen suuruus. Testissä on tarkoituksena tutkia mittaussysteemin kykyä toistaa ja uusia mittaustuloksia riittävän pienellä hajonnalla. Mittausprosessin satunnaisvirheellä tarkoitetaan tuotteista saatujen mittaustulosten hajontaa. Tämä taas jakaantuu kolmeen eri komponenttiin eli tuotteen mitan todelliseen vaihteluun ja uusittavuuteen, jolla tarkoitetaan eri mittaajien aiheuttamaa vaihtelua sekä itse mittalaitteen virheen aiheuttamaan vaihteluun eli toistettavuuteen. Mittauksen tulisi olla riippumaton mittaajasta ja uusintakerroista eli mitauksessa esille tullut vaihtelu johtuisi kappaleiden todellisista eroista. (59.)

Testissä operaattoreiden eli mittausprosessin hallitsevien työntekijöiden tulisi mitata vähintään 10 sellaista osaa, jotka edustaisivat hyvin prosessin pitkän aikavälin vaihtelua. Operaattoreita tulisi olla vähintään kolme ja jokaisen operaattorin tulisi mitata osat kahteen kertaan. Tutkimuksen suorittaminen täytyisi tapahtua luonnollisissa olosuhteissa, jotta tutkimustuloksesta syntyisi mahdollisimman luotettava. Bias-virheen minimoimisen takia mittaukset pitää suorittaa satunnaisessa järjestyksessä. Tutkimuksen olettamuksiin kuuluu se, että mittalaite on asianmukaisesti kalibroitu ja että osat on valittu stabiilista prosessista. Vähintään yksi spesifikaatio tulee olla määritettynä, jotta mittaussysteemiä voidaan käyttää tuotteiden hyväksymis- tai hylkäämistarkoituksessa. (59.)

Mittausjärjestelmä on riittävän tarkka, jos GR&R-testin tulos on $<10\%$. Tulos $>10\%$ $<30\%$ on vielä poikkeustapauksissa hyväksyttävissä. Tuloksen ollessa $>30\%$, mittausjärjestelmän tarkkuus on riittämätön, jolloin se on suorastaan käyttökelvoton. (59.) Tällöin mittausjärjestelmää on syytä kehittää paremmaksi, mittaajille on annettava lisää mittauskoulutusta tai kehittää uusia mittausmenetelmiä tai hankittava jopa kokonaan uusi mittausväline.

6 SOLIDWORKS MBD (MALLIPERUSTEINEN TUOTEMÄÄRITTELY)

Työssä on selvitetty myös Solidworksin malliperusteisen tuotemäärittelyn eli MBD:n (Model-Based Definition) soveltuvuutta mallin annotaatiotietojen viemisessä Gomin mittausohjelmaan. MBD:tä käsiteltiin pienehkönä osana opinnäytetyötä, eikä siihen ollut tarkoituksena perehtyä kovinkaan syvällisesti. Mallipohjaisen tuotemäärittelyn tarkoituksena on esittää tuotteen geometria ja alun perin piirustuksessa esitetyt vaatimukset pelkästään 3D-mallina eli MBD-malli korvaisi perinteisen tavan, missä luodaan 3D-mallin jälkeen 2D-piirustus mallin pohjalta. Annotaatioilla tarkoitetaan malliin lisättyjä merkintöjä, jotka kertovat tuotteen ominaisuuksista, kuten mitoista, toleransseista ja materiaaleista. Näitä annotaatioita kutsutaan myös käsitteellä PMI-data (Product and Manufacturing Information). MBD-mallissa olevan datan tiedonsiirrossa käytetään STEP AP242 -tiedonsiirtomuotoa. Tämä mahdollistaa MBD-mallin PMI-datan viemisen toisiin ohjelmiin, esimerkiksi mittausohjelmaan tai CAM-ohjelmaan (Computer Aided Manufacturing) eli työstökoneiden ohjausohjelmiin.

6.1 Mallintamisen nykytilanne ja vaatimukset MBD:hen siirryttäessä

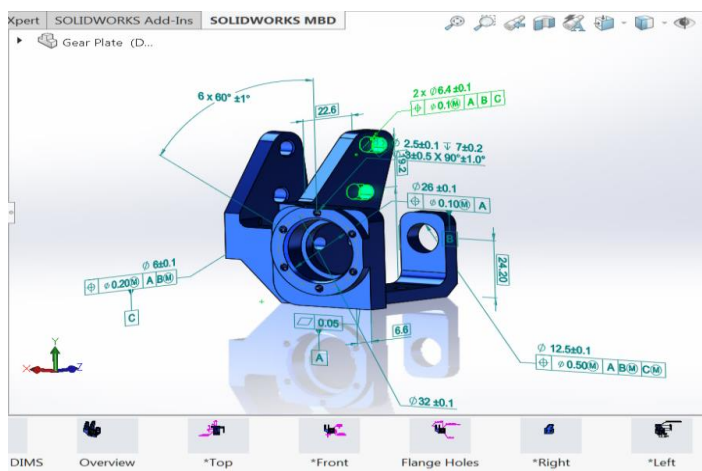
Suomessa MBD ei ole saanut vielä kunnolla jalansijaa. Vaikka suunnittelu on monissa yrityksissä 3D-pohjaista, niin silti lopulta kolmiulotteinen malli latistetaan kaksiulotteiseksi malliksi. 2D-mallin lukeminen saattaa tuottaa hankaluuksia joillekin, ja piirustuksessa on suuri mahdollisuus tulkintavirheille. Lisäksi tutkimuksen mukaan 60 % 2D-piirustuksista ei vastaa täysin 3D-mallia (64).

Mallipohjaiseen suunnitteluun siirtyminen vaatii yritykseltä toimintatapojen muuttamista, uusien taitojen opetteluja ja uusia työkaluja. Suunnittelussa on huomioitava seuraavat seikat siirryttäessä MBD:hen: on koulutettava suunnittelijat malliperusteisen tuotemäärittelyn käyttöön, MBD:n käyttö edellyttää monesti uusia ohjelmamoduuleja ja pitää miettiä, miten tiedonhallinta suunnittelussa muuttuu, kun ei ole enää perinteisiä piirustuksia. Hankintaosaston on pystyttävä avaamaan, lukemaan ja merkitsemään MBD-malleja komponenttien hankintaa varten. Hankintaosasto lähettää näitä malleja alihankintaketjulle osana tarjouspyyntöjä ja tilauksia. Tuotannosuunnittelun pitää osata lukea MBD-malleja, ja niihin on pystyttävä tekemään tarpeen mukaan lisämerkintöjä, muun muassa lisäohjeita. Tuotannosuunnittelun pitäisi osata laatia MBD-mallista erityyppisiä näkymiä ja ohjeita, joita voidaan sitten soveltaa tuotannossa. Tuotantorakenteita voi olla useita, esimerkiksi

eri toimipisteille ja erilaisille tuotantosoluille. Tuotantopuolella CAM-ohjelman pitäisi pystyä lukemaan ja käyttämään MBD-malleja. Tämä saattaa vaatia jotakin lisämoduulia ohjelmaan tai muita päivityksiä. Olisi kiinnitettävä huomiota myös siihen, tukeeko CAM-ohjelma annotaatioiden koneluettavuutta, ja pystyykö se automaattisesti käyttämään tietoa työstöohjelman suunnittelussa. Juuri nyt näyttää siltä, että CAD-ohjelmistoihin integroidut CAM-sovellukset pystyvät tulkitsemaan samalla ohjelmistolla tuotettuja määrittelyitä koneluettavasti. Itsenäisten CAM-ohjelmistojen ominaisuudet taas ovat puutteellisia tältä osin. Tuotannon työntekijöiden olisi kyettävä lukemaan 3D-koonpanomalleja ja niihin liittyviä ohjeita. MBD-malleista voidaan tuottaa erilaista materiaalia tuotanto-ohjeiksi. Näitä voivat olla esimerkiksi 3D-mallit, räjäytyskuvat, tallennetut näkymät, vaihekuvat ja yksinkertaistetut mallit sekä piirustukset. (30, s. 9–10.)

6.2 MBD-malli

Mallin on oltava yksityiskohdiltaan ja tarkkuudeltaan riittävä mittatarkkuuteen, valmistustapaan ja toiminnallisuuteen nähden. Tuotteen numeerinen tarkkuus ei voi olla suurempi kuin mallin. Mallin numeerinen tarkkuus täytyy määrittellä, ja se on ilmoitettava mallitiedostossa. MBD-mallin on sisällettävä kaikki ne geometriat, attribuuttitiedot ja annotaatiot, joita tarvitaan tuotteen täydelliseen määrittelyyn (kuva 35). Poikkeuksena tähän ovat epätäydellisesti mallinnetut mallit, jotka on merkittävä sellaisiksi, esimerkiksi vaikkapa osittain mallinnettu symmetrinen osa. Epätäydellisesti mallinnetut piirteet, kuten pelkkinä reikinä esitettävät kierreleijäät, on annotoitava riittävällä tavalla. Koonpanossa on esitettävä kaikki siihen kuuluvat osat, kuten kiinnityselimet ja liimat. (30, s. 12.)



KUVA 35. Esimerkkikuva MBD-tuotemallista. Annotaatiot on assosioitu geometriaan. Kuvassa on valittu halkaisijaltaan 6,4 mm reiät, näkyvillä vihreällä värillä korostettuna valittu annotaatio ja piirteet, mihin annotaatio on assosioitu (65)

6.3 MBD:n hyödyntäminen Proventialla

Tutkittavaksi aiheeksi valikoitui myös MBD:n hyödyntäminen Proventialla, tavoitteena oli saada vietyä PMI-tietoa 3D-mallista suoraan mittausohjelmaan. Tämä ei ainakaan ennen ole onnistunut Solidworksilla. Creolla, NX:llä ja Catialla tämä PMI:n tuominen mittaukseen on onnistunut, sillä näissä ohjelmissa MBD:n ominaisuuksia on käytössä enemmän. PMI-datan tuominen suoraan mittausohjelmaan nopeuttaisi huomattavasti mittajaan työtä, sillä tarvittavat piirteet olisivat mallissa valmiina, eikä niitä näin ollen tarvitsisi alkaa luomaan yksitellen erikseen, kuten tähän mennessä on tehty. Mittaajalle jäisi ainoastaan piirteiden linkittäminen actual-dataan. Toki ongelmia saattaisi tulla eteen satunnaisesti, jolloin mittaja voi joutua manuaalisesti luomaan piirteet nominal-dataan.

Aiheen tutkimisen jälkeen saatiin selville, että on mahdollista viedä PMI-dataa STEP AP242 -tiedostomuodolla, joka vaatii Solidworksin MBD-lisäosan. Yksi työntekijämme hankki lisenssin tätä kyseistä lisäosaa varten, jotta pystyttäisiin tekemään testejä tästä PMI-tiedon viemisestä mittausohjelmaan. AP242-tiedostomuodon avulla saatiin vietyä annotaatioita eli mittoja, toleransseja ja peruselementtejä sekä mittapisteitä mittausohjelmaan seuraavalla tavalla: sijoiteltiin 3D-malliin annotaatiot, vietiin malli STEP AP242 -muotoon ja siirrettiin tiedosto Gom ATOS Professional -mittausohjelmaan. Normaalisti CAD-malli eli nominaalidata siirretään perinteisen STEP-tiedoston avulla mittausohjelmaan. Ongelmiakin ilmeni, nimittäin mittapisteille Solidworksin puolella määritellyt nimet eivät pysyneet samoina. Esimerkiksi MP1 muuttui Gomiin tuotaessa muotoon "Point 0".

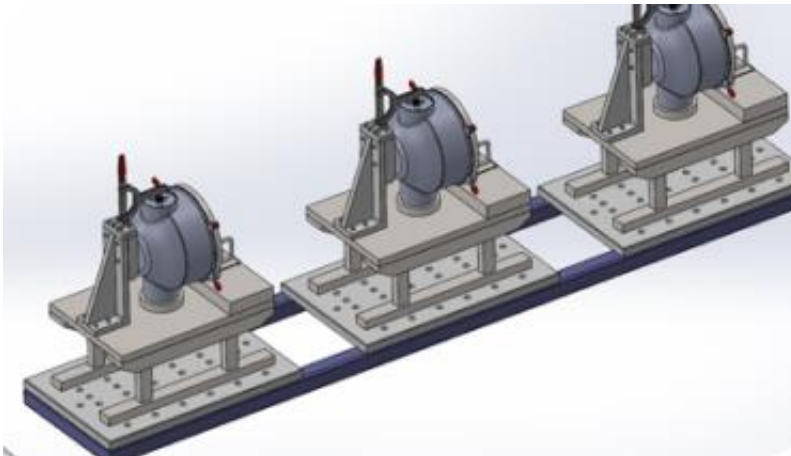
DIM-ohjeessa mainitaan, että on mahdollista siirtyä piirustuksettomaan tuotantoon eli käyttöön otettaisiin MBD, jolloin kaikki malliin liittyvä informaatio on itse mallitiedostossa. Tämä voisi vähentää tulkintavirheitä, kun piirustuksen lukijan ei tarvitsisi enää kuvitella latistettua 2D-piirustusta uudelleen 3D-muotoon päänsä sisällä. Tämä vaatisi tietysti asennemuutoksen eli halua siirtyä pois 2D-piirustuksien luomisesta ja toki uudenlaista osaamistakin tarvittaisiin. Valitettavasti yrityksessä käytössä olevalla Solidworksilla tulee tiettyjä rajoitteita vastaan MBD:n osalta, sen takia MBD:tä ei ainakaan vielä olla ottamassa yrityksessä käyttöön.

7 DIM-SUUNNITTELUOHJEEN TOTEUTUS

Projektsuunnitelman teon jälkeen alkoi perehtyminen erityyppisiin DIM-aineistoihin, GPS-järjestelmään ja standardeihin sekä aiheeseen liittyviin internetsivuihin. Lisäksi oltiin yhteydessä yhteistyöyrityksiin, esimerkiksi Ponsseen, jossa on hyvin kokemusta tästä kyseisestä aiheesta. Tutkailtiin myös projektin X piirustuksia, ja sen jälkeen projektin X hitsausjigettä mittauspaijalla. Testattiin yhtä jigijä niin, että asetettiin siihen kappaleen kokoonpano, ja tutkittiin, mistä kohdista se kiinnittyy jigijä. Sattumalta tapausesimerkiksi valikoituikin lopulta X-projektin hitsausprosessi, jossa näitä hitsausjigettä käytetään. Ohjeen teon aikana sai perehtyä monipuolisesti Dimensional Management -järjestelmään liittyviin osa-alueisiin. Joitakin asioita joutui pyörittelemään kauemmin, sillä ne eivät ihan heti auenneet.

7.1 Tapausesimerkin valinta DIM-suunnitteluohjetta varten

Projektin tapausesimerkkinä toimii X-projektin hitsausprosessi, jonka pohjalta suunnittelin yritykselle yleisen DIM-ohjeistuksen. Päädyimme tähän esimerkkiin sen takia, sillä sen avulla pystyi kertomaan mikserin paikoitusvaiheet ymmärrettävästi ja yksiselitteisesti. Tässä prosessissa on useita eri jigijä alustalla, joissa hitsataan mikseriteitä sekä putkia. Aluksi päätettiin ottaa kaikkien neljän jigijä vaiheet mukaan ohjeeseen, mutta lopulta ohjeessa päädyttiin käsittelemään vain yhdessä jigijä tapahtuvaa mikserin osien paikoitusta hitsausta varten sekä toisessa jigijä hitsattavia putkenpuolikkaita. Myös mikserin hitsausjigijä paikoitusta alla olevaan alustaan tarkastellaan ohjeessa. Kuvassa 36 on minun itseni mallintama, yksinkertaistettu versio robottihitsauskelkasta jigijäineen ja mikserineen. Tässä yksinkertaistetussa mallissa on kolme jigijä.



KUVA 36. Robottihitsauskelkka, jossa on hitsausjigijä ja mikserit

7.2 Ohjeen sisällön määrittäminen

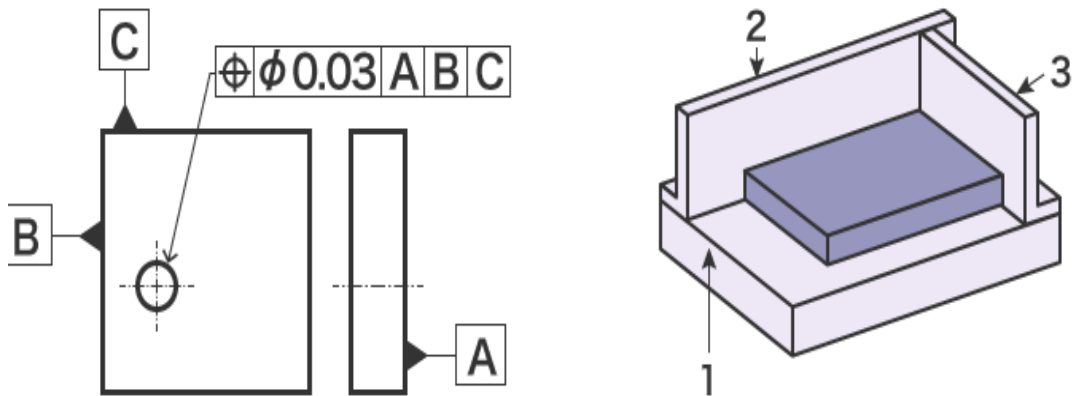
Ohjeeseen valikoituvat seuraavat osa-alueet: standardit GPS-järjestelmästä, peruselementtijärjestelmä ja 3-2-1-peruselementtijärjestelmä, mitat ja toleranssit piirustuksessa, toleranssianalyysi, geometrinen tolerointi, esimerkkitapaus, mikserin ja jigin paikoitus mittauksessa, SPC, mittapiste-piirustukset, alihankinta-osuus ja esimerkki DOC-DPF:n kiinnityksestä traktoriin sekä yhteenveto aiheesta.

7.3 ISO GPS -järjestelmään liittyvät standardit

Tässä osiossa käydään läpi DIM-järjestelmään liittyvän GPS-järjestelmän eli geometrisen tuotemäärittelyn tärkeimmät standardit. ISO GPS -järjestelmässä käydään läpi työkappaleen ominaisuudet tuotteen suunnittelu-, valmistus- ja laadunvarmistusprosessin aikana. Geometrinen tuotemäärittely sisältää mitan, sijainnin, suunnan ja muodon sekä heiton toleranssit. Standardi on SFS-EN ISO 1101-2017. GPS-järjestelmän perussäännöt löytyvät standardista SFS-EN ISO 8015 (Geometrinen tuotemäärittely, perusteet, käsitteet, periaatteet ja säännöt). DIM:iin tärkeänä osana kuuluvien peruselementtien terminologia, säännöt ja menetelmät käydään läpi standardissa SFS-EN ISO 5459. Loput standardit lueteltuna liitteenä olevassa DIM-ohjeessa näiden edellä mainittujen standardien lisäksi.

7.4 Peruselementit

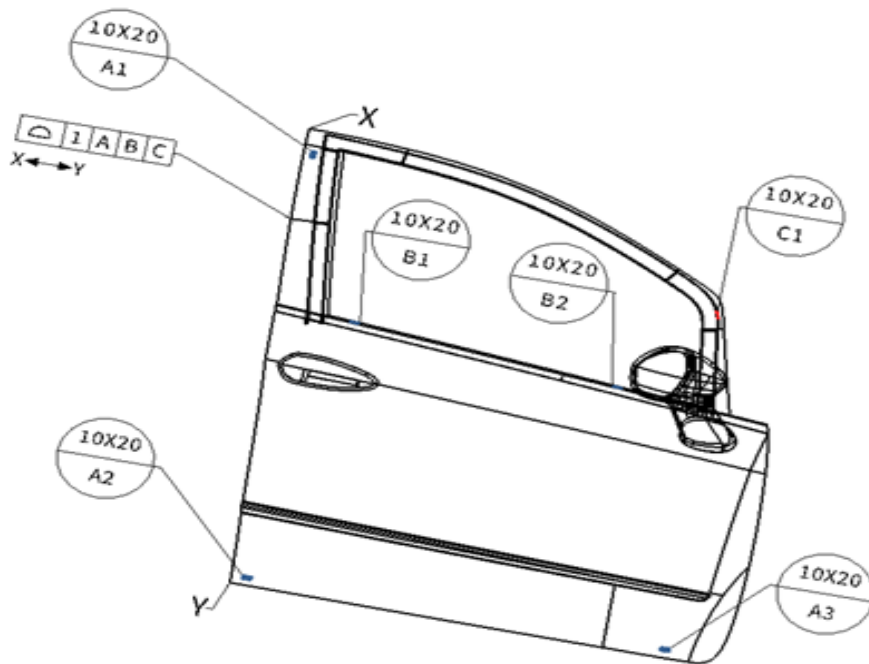
Seuraava osio kertoo perusasiat peruselementtien määrittämisestä sekä referenssipistejärjestelmän luomisesta. DIM:n perustana toimivat peruselementit, ja ne muodostavat peruslähtökohdan mitoille, toleransseille ja paikoitukselle. Peruselementit ovat ne kriittiset pinnat, reiät, akselit tai muut sellaiset, jotka kiinnittyvät vastinkappaleeseen, esimerkiksi jigin kiinnitystappeihin tai asiakkaan tuotteeseen. Kuvassa 37 on esimerkkejä peruselementeistä.



1. Push datum A against target feature
 2. Push datum B against target feature
 3. Push datum C against target feature
- Part (target feature) is completely captured

KUVA 37. Peruselementtijärjestelmä (66)

Käydään myös läpi tilannetta, jossa ei voida käyttää koko peruspintaa datumina, vaan tällöin kukaan astuu rajoitettu peruselementti eli datum target. Rajoitettua peruselementtiä voidaan käyttää muodoltaan epämääräisissä kappaleissa, siinä valitaan vain jokin pienempi alue, piste tai viiva datum targetiksi. Näistä rajoitetuista elementeistä voidaan muodostaa muun muassa referenssipistejärjestelmä eli RPS-paikoitus (Reference Point System). Kuvassa 38 on tyypillinen, epäsäännöllinen sovelluskohde rajoitetulle peruselementtijärjestelmälle.



KUVA 38. 3-2-1-peruselementtijärjestelmä (67)

Suunnittelija vastaa peruselementtien oikeanlaisesta määrittelystä. Paikoitus on riippuvainen näistä elementeistä jokaisessa työvaiheessa, ja paikoituksen tulee tapahtua näistä elementeistä koko valmistusketjun ajan. Suunnittelija määrittelee piirustukseen datum-kolmiolla tai datum target-symbolilla elementit, joista paikoitus tulee tapahtumaan hitsauksessa ja 3D-mittauksessa sekä asiakkaan osaan kiinnitettäessä. Käydään myös läpi normaalin peruselementtijärjestelmän ja 3-2-1-peruselementtijärjestelmän käytännön erot ja käyttökohteet. 3-2-1-menetelmässä paikoitus muodostetaan rajoitetuilla peruselementeillä. Kaikissa paikoitustapauksissa on tarkoituksena lukita kappaleen vapausasteet, joita on normaalitilanteessa kuusi kappaletta. Vapausasteita lukittaessa kappaleen kyky liikkua pois paikoiltaan XYZ-suunnissa rajoittuu sitä enemmän, mitä useampi vapausaste on lukittuna. Kun kaikki on lukittuna, kappale ei pysty liikkumaan esimerkiksi hitsausjigissä mihinkään suuntaan.

7.5 Mitat, toleranssit ja toleranssianalyysi

Mitoista ja toleransseista kerrotaan ohjeessa yleiset periaatteet GPS-järjestelmän mukaisesti. Esitetään muun muassa tärkeä ”piirustus määrää -sääntö”. Tämä tarkoittaa sitä, että piirustuksessa tulee olla kaikki ne mitat, merkinnät ja huomiot, joita tarvitaan kappaleen oikeaoppiseen valmistukseen ja skannaukseen. Lisäksi piirustuksen tulee olla siisti, että siitä saisi selvää, tulkintavirheitä ei saisi tulla. Tässä osiossa mainitaan myös, että on mahdollista siirtyä piirustuksettomaan tuotantoon, jota on rajoitetusti kokeiltukin Proventialla.

Toleranssianalyysistä käytiin ohjeessa läpi sen peruseriaate eli miten toleranssit kasautuvat ja kuinka niitä voi optimoida. Toleranssien stack-up-analyysiin liittyen käytiin läpi kaksi menetelmää eli yksinkertainen aritmeettinen menetelmä, joka tunnetaan Worst Case -toleranssianalyysinä, ja tämän lisäksi esiteltiin tilastollinen eli RSS-toleranssianalyysi. Kummassakin on hyvät ja huonot puolensa. Huomioitavaa kuitenkin on, että WC antaa ylilaatua ja RSS alilaatua. Pitäisi siis analysoida ketjut SPC Six Sigma -menetelmään perustuen.

7.6 Geometrinen tolerointi

Geometrisen toleroinnin osuudessa käydään läpi sen peruseriaatteet eli millaisia geometrisia toleransseja on olemassa ja miksi niitä on hyvä käyttää. Geometriset toleranssit ja peruselementit paikoitetaan piirustuksessa toleroimattomilla laatikkomitoilla eli teoreettisesti oikeilla TED-mitoilla.

Osa geometrisistä toleransseista, kuten kohtisuoruus, vaatii viittauksen peruselementtiin, ja toiset eivät tarvitse peruselementtiä, kuten tasomaisuustoleranssi. Tässä osiossa käydään myös läpi tasomaisen ja lieriömäisen toleranssialueen ero.

7.7 Tapausesimerkki: mikserin robottihitsaus hitsausjigissä

Tapausesimerkkiosuudessa käydään läpi mikserin paikoitus suunnittelun ja hitsauksen näkökulmasta. Tutkittavana kohteena on eräänlainen kelkka, jonka päällä on neljä erilaista hitsausjigiä. Kaksi niistä on tarkoitettu putkien hitsaukseen ja toiset kaksi mikserin hitsaukseen. Alun perin alettiin käymään ohjeessa läpi paikoitukset kaikkien jigien osalta, mutta tästä seurasi se, että ohjeesta alkoi tulla järjettömän pitkä ja sekava. Siispä lopulta päädyttiin käsittelemään paikoitusta vain yhdessä jigissä. Yritykselle laaditussa ohjeessa putkenpuolikkaiden paikoitusta käsitellään kuitenkin alihankkijan näkökulmasta erikseen.

Tässä kyseisessä tarkempaan tarkasteluun otetussa hitsausjigissä hitsataan mikserin kaksi eri puoliskoa yhteen laserrajauksistaan. Nämä osat kiinnitetään jigii eri aikoihin, mutta ohjeessa on selkeyden vuoksi esitetty paikoitusvaiheet siten, että mikseri näkyy kuvissa yhtenäisenä kokonpanona. Paikoitusvaiheet esitetään yksi peruselementti kerrallaan eli kuinka juuri tämä elementti kiinnittyy hitsausjigiin. Kiinnityksen perusvaiheet on esitetty kolmen kuvan avulla, joista ensimmäinen tuo suunnittelunäkökulman mukaan. Ensimmäinen kuva on ote piirustuksesta, johon on merkitty peruselementti, esimerkiksi vaikkapa A-elementti. Toisessa kuvassa on esillä 3D-malli, josta tämä kyseinen elementti on korostettu sinisellä värillä. Viimeisessä kuvassa on jigii malli, josta on värjätty ne pinnat sinisellä, joihin kappaleen korostettu elementti ottaa kiinni eli paikoittuu tähän kohtaan. Toinen ja kolmas kuva ovat ikään kuin sitä hitsauksen näkökulmaa eli näistä kuvista näkee kolmiulotteisesti, mistä kohdista kappale tulee kiinnittää hitsausjigiin.

Kuvien oikeassa alakulmassa on myös koordinaattisuunnat esitetty triadina, jotta lukija saa käsityksen siitä, missä menevät X-, Y- ja Z-suunnat. Kuvien yläpuolella on lueteltuna vaiheen numero ja vaihe selitetty tekstin avulla, on siis kerrottu mitä tässä vaiheessa tapahtuu. Tähän kohtaan on myös lisätty tarpeellisia huomioita, ja ne vapausasteet, mitä kyseinen elementti kykenee lukitsemaan. Mittausnäkökulmaa mikseristä on esitetty omassa laadunvarmistus-kohdassaan. Alun perin esitettiin näissä paikoitusvaiheissa nuolilla ja numeroilla elementit, mutta tässä tilanteessa luettavuus kärsi, eikä ulkopuolinen olisi välttämättä saanut selvää vaiheista. Lisäksi alkuvaiheessa

kerrottiin paikoitusvaiheissa asioita, jotka liittyivät jigien käyttöön, kuten kiinnityslinkkujen kiinnitykseen. Tätä ei koettu tarpeelliseksi tässä ohjeessa, joten ohjeesta poistui nämä kiinnityslinkkujen kiinnitysvaiheet.

7.8 Laadunvarmistus

Laadunvarmistusosiossa kerrotaan mittauksen näkökulmaa tämän mikserin ja hitsausjigin paikoituksesta. Mikserille on kaksi erilaista paikoitusta prealignment-paikoituksen lisäksi: geometristen elementtien mukaan on paikoitettu koko mikseri itsessään eli ABC-paikoitus ja mikserin sisäisille ominaisuuksille on oma paikoituksensa DEF. ABC-paikoituksessa paikoitus tapahtuu piirustukseen merkittyjen elementtien tason A, pisteen B ja pisteen C, mukaisesti. Pisteet ovat rajoitetut peruselementit B1 ja C1, A on normaali perustaso. ABC-paikoituksella mitataan mikserin asennusmitat, nämä ovat tärkeitä asiakkaalle. DEF-paikoitus puolestaan kuvaa mikserin sisäisiä ominaisuuksia, jotka eivät vaikuta itse asennettavuuteen mitenkään. Tässä paikoituksessa elementteinä toimivat ruiskun laipan taso D, laipan reiän piste E eli rajoitettu elementti E1 ja laipalle asetettu viiva F eli rajoitettu elementti F1. DEF-paikoitus on tehty plane-line-point-periaatteen mukaisesti.

Peruselementeistä mikseri paikoittuu eli mittapoikkeama hakeutuu näistä elementeistä nolnaan millimetriin. Virhe tulee näin ollen muualle kuin paikoituskohtaan. Mittaohjelmassa paikoituselementit näkyvät vihreällä värikarttakuvissa ja poikkeaman arvot ovat nolnan lähimaastossa. Näillä paikoituksilla saadaan siis selville mikserin toiminnallisuus. Pelkkä prealignment eli kappaleen keskelle tehty paikoitus ei tässä tilanteessa riitä, sillä tässä poikkeamat on jaettu tasaisesti koko kappaleen alueelle, siksi tästä ei toiminnallisuutta voi kovin hyvin havaita. Kun paikoitetaan peruselementeistä, esimerkiksi ABC-paikoituksella, siitä näkee heti, miten mitat poikkeavat, sillä kappale tulee juuri näistä peruselementeistä kiinni vastinkappaleeseen tai jigisiin.

Jigin paikoitus on hoidettu käyttämällä plane-line-point-paikoitusta. Jigi on paikoitettu pohjalevystä eli sieltä, mistä jigi kiinnittyy alustaan. Jigien mittaus ennen käyttöä on tärkeää, sillä poikkeamat pitää saada tietää. Jos jigi osoittautuu huonoksi laadunvarmistuksen aikana, se täytyy korjata ja mitata korjaustoimenpiteiden jälkeen uudestaan. Paljon mitoistaan poikkeavassa jigissä työkalun paikoitus ei onnistu kunnolla, ja siitä seuraa huonoa jälkeä hitsauksessa.

Laadunvarmistukseen kuuluu SPC eli tilastollinen prosessinohjaus. Kahdessa SPC-diassa käydään läpi SPC:n perusajatus, ohjauskortit ja prosessin kyvykkyyden tunnusluvut eli Cp, Cpk, Pp ja Ppk. Gomin mittausohjelmassa on mahdollista tehdä SPC-analyysiä kappaleen piirteistä. Esimerkkinä on mikserin muutamia mittapisteitä ja piirteiden paikkatoleransseja. Näistä kohdista on laadittu kontrollikortit, joissa on näkyvillä käyrää viimeisistä mittauksista.

7.9 Mittapistepiirustukset

Ohjeeseen on sisällytetty myös kaksi ehdotusta mittapistepiirustuksista, toinen on kokonaisesta mikseristä tehty ja toinen on alihankkijan valmistama syvävedetty putkenpuolikas. Mikserin sisällä oleviin putkiin on sijoitettu jokaiseen mittapiste eli pisteitä on näin ollen kuusi kappaletta. Mittapistepiirustuksia ei ole käytössä Proventialla vielä, kuten muutamalla muulla yrityksellä. Proventialla on tehty mittapisteisiin perustuvia mittausraportteja joistakin tuotteista, mutta virallisia mittapistepiirustuksia ei ole. Mittapistepiirustus toisi selvää hyötyä mittaustapahtumaan, sillä sen avulla mittajan ei tarvitsisi miettiä, mistä kohdista mittoja halutaan ottaa tarkemmin, kun ne näkyvät valmiiksi piirustuksessa. Pisteet on määriteltävä piirustukseen siten, että ensin asetetaan pisteet käsin 3D-malliin 3D-sketsinä. Pisteistä saa otettua XYZ-koordinaatit. Tämän jälkeen luodaan piirustus, johon nämä luodut pisteet voi asettaa näkyville. Pisteiden kohdille laitetaan viiteviivoilla pisteiden tunnukset.

Mittapistepiirustus määrittäisi kappaleeseen pisteet, joista nähtäisiin poikkeama XYZ-suunnissa tarkasti. Ideaalitilanne olisi se, että mittapisteeet voitaisiin tuoda suoraan 3D-mallista mittausohjelmaan, tämä tosin vaatisi MBD:n käyttöä. Mittapisteeet voi toki määritellä manuaalisesti piirustuksen avulla, jossa näkyy kunkin pisteen XYZ-koordinaatit. Tämänhetkisessä mittapistepiirustusehdotuksessa on merkitty projektiioon mittapisteeet tapaan MP1, MP2, MP3... Projektiossa on esillä myös origo, minkä suhteen pisteiden koordinaatit on otettu. Vasemmassa yläkulmassa on taulukko, jossa on määritelty jokaiselle mittapisteeelle XYZ-koordinaatit, toleranssi ja peruselementtjärjestelmä. Toleranssi määräytyy sen pinnan mukaan, missä piste sattuu olemaan. Esimerkiksi jos putken pinnanmuototoleranssi on 4 mm, silloin pisteen toleranssi on ± 2 mm. Jos geometristä toleranssia ei ole pinnalle määritelty, käytetään yleistoleranssia. Jigeihin voi soveltaa samaa periaatetta mittapisteeistä eli tärkeisiin kohtiin luodaan mittapisteeitä, joista otetaan koordinaatit.

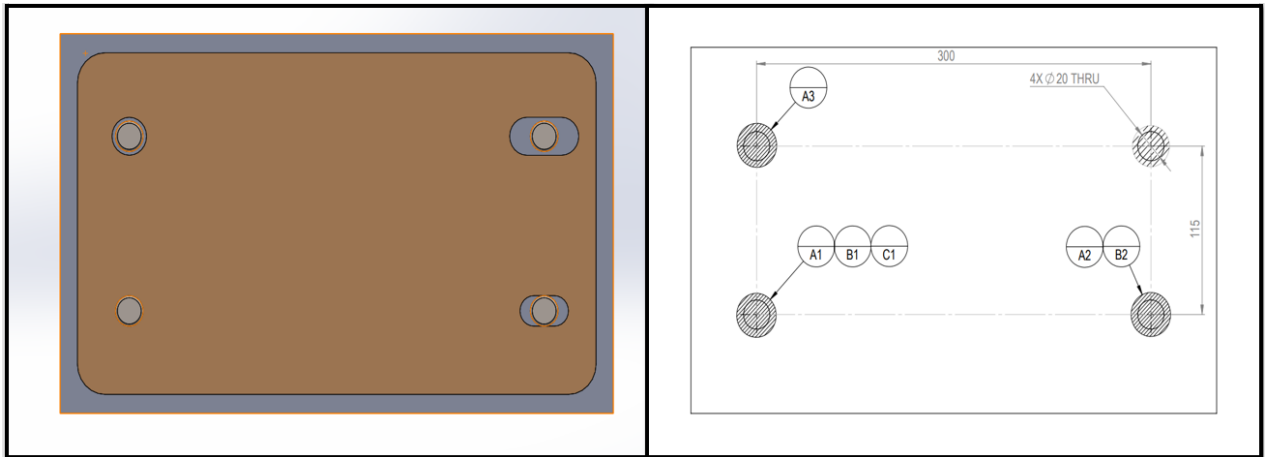
Alihankkijan kappaleen mittapistepiirustuksessa on sama periaate pisteiden kanssa. Tässä putkenpuolikkaan mittapistepiirustuksessa pisteet on sijoitettu rajaukseen eli sen laserleikatuille reunoille, muille pinnoille pisteitä ei tule. Kappale tulkitaan mittatulkijilla, mittapisteeet ovat niissä kohdissa, minne tulkit osuvat rajauksessa. Putkenpuolikkaan paikoitusta on käsitelty suunnittelun ja mittauksen näkökulmasta, ja yhdessä diassa on otettu sen vastinkappale eli toinen putkenpuolikas mukaan. Lisäksi on kerrottu alihankkijan syväveto-osien paikoituksesta heidän yrityksessään.

Mittapistepiirustusta tehtäessä olisi huomioitava se, että piirustukseen tulevassa mittapisteeiden koordinaatit osoittavassa taulukossa pisteet eivät normaalitilanteessa muutu automaattisesti. Kun pisteiden paikkaa muuttaa mallin puolella käsin, ei pisteiden koordinaattilukemat muutu piirustuksen puolella. Tämä pitäisi huomioida automatisoimalla pisteiden koordinaattien muokkaus. Solidworksissa on olemassa attribuuttitieto, jota käyttäen pisteiden koordinaatit taulukossa muuttuisivat sitä mukaa automaattisesti, kun pisteitä siirtelee mallitiedoston puolella.

7.10 Asiakasnäkökulma

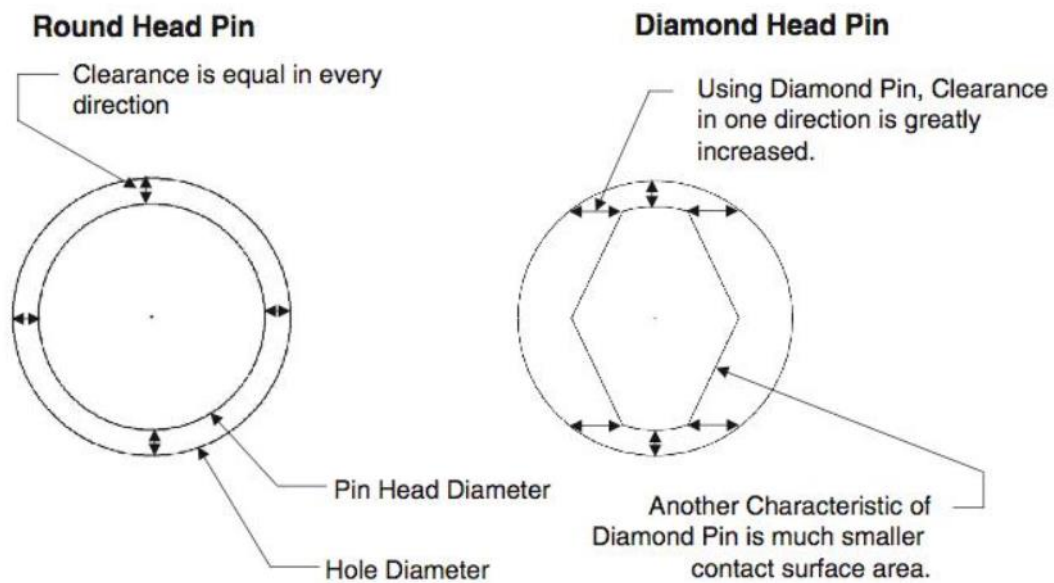
Asiakasrajapinta on huomioitu DOC-DPF:n kiinnitys asiakkaan traktoriin-esimerkillä. DOC tarkoittaa dieselhapetuskatalysaattoria ja DPF dieselhiukkassuodatinta. Tämän kokoonpanon kiinnitys asiakkaan traktoriin tapahtuu pulteilla, jotka kiinnittyvät kiinnittimiin. Kiinnittimien kohdalle on piirustuksessa aseteltu rajoitettuja peruselementtejä: nollakohdassa on A1, B1 ja C1-elementit, toisessa kiinnittimessä A2- ja B2-elementit ja kolmannessa kiinnittimessä A3-elementti. A1, A2 ja A3 muodostavat tason, B1 ja B2 luovat viivakosketuksen ja C1 on yksi piste. Tämä paikoitus on DIM-periaatteen mukainen. Kiinnitys traktoriin tapahtuu neljästä kiinnityskohdasta, mutta paikoitukseen tarvitaan suunnittelussa ja mittauksessa vain kolmea kohtaa.

Kiinnitys on käytännössä hoidettu seuraavalla tavalla: nollapisteestä on tehty tiukka ympyränmuotoinen reikä. Toinen piste on slot-reikä, se on tiukka pystysuunnassa, mutta löysä sivusuunnassa. Seuraava piste on löysä ympyränmuotoinen reikä ja viimeinen piste on löysä slot-reikä kumpaankin suuntaan. Nollapisteeseen ei saa tulla virhettä, 2. pisteeseen saa tulla virhettä sivusuunnassa. 3. pisteessä sallitaan hieman enemmän virhettä joka suuntaan ja loput virheet saa tulla viimeiseen kiinnityspisteeseen eli joka suuntaan löysään olevaan slot-reikään. Tässä on siis tarkoituksena ajaa mahdollisimman paljon virhettä tähän viimeiseen kiinnitysreikään. Tämän kiinnitysmetodin periaate näkyy kuvassa 39.



KUVA 39. Kokoonpanon kiinnitys vasemmalla ja piirustus oikealla

Ruuvikiinnitys olisi mahdollista toteuttaa niin kutsutulla diamond pin -kiinnitintapilla (kuva 40). Timanttimuoto on kriittinen ominaisuus, joka auttaa koneistuksessa syntyvissä epätarkkuuksissa ja paikoitustoiminnassa. Kun kaksi pyöreäpäistä kiinnitystappia asennetaan levyille, tulee näiden kahden pinnan kiinnitysreikien välisen etäisyyden olla erityisen tarkka. Vaikka etäisyys olisi hyvin tarkka, ei työkappale siltikään asetu alustalle yhtä hyvin kuin timanttimuotoista tappia käytettäessä. Kun käytetään pyöreäpäistä kiinnityspinniä, on kiinnitysreiän välitys joka suunnassa sama. Timantin muotoista pinniä käytettäessä reiän välitys kasvaa huomattavasti, ja sen ominaisuuksiin kuuluu myös paljon pienempi kosketuspinta-ala. (68.)



KUVA 40. Pyöreäpäisen ja timanttipäisen kiinnitystapin ero (68)

8 TYÖN TULOKSET

Opinnäytetyön tuloksena syntyi yritykselle käyttökelpoinen DIM-ohje. Ohje sisältää DIM-filosofian mukaisen paikoitusmenettelyn esittelyn ja nykyisen menettelyn paikoitukseen. Tällaista ohjetta Proventialla ei ole vielä ollut, joten tämä tulee yritykselle varmasti tarpeeseen. Tätä opinnäytetyön tuloksena syntyneitä PowerPoint-materiaalia voi käyttää vaikkapa perehdytysmateriaalina aloitteleville suunnittelijoille, mittajille ja hitsaajille. Mukaan otettiin useita eri näkökulmia. Ohjeessa käytiin paikoitusta ja uusia ideoita läpi suunnittelun, hitsauksen, laadunvarmistuksen ja alihankkijan sekä asiakkaan näkökulmasta. Lisäksi tässä ohjeessa sivuttiin malliperusteista tuotemääritystä, tätä yritettiin hyödyntää pienessä mittakaavassa suunnittelussa ja mittauksessa. Saatujen tutkimustulosten mukaan MBD:tä käytettäessä on mahdollisuutena viedä PMI-dataa suoraan mallista mittaukseen, jolloin mittaja säästäisi rutkasti aikaa piirteiden manuaalisen konstruktioinnin poistuksessa. Myös mittapisteitä on mahdollista viedä mittausohjelman puolelle, tosin tässä on vielä varaa kehittymiselle.

Tämä opinnäytetyö voidaan nähdä alkusysäyksenä suuremman mittakaavan DIM-järjestelmän hyödyntämiseen Proventialla. Tämä työ antoi arvokasta tietoa siitä, miten Dimensional Management -järjestelmää voidaan hyödyntää päästöjenhallintajärjestelmissä. Proventia voi halutessaan jatkaa DIM-järjestelmän implementointia omiin tarpeisiinsa. Haasteena on saada DIM-ketju aikaiseksi jokaiseen tuotantovaiheeseen. Se vaatii paljon yhteistyötä eri tahojen eli suunnittelun, laadun, tuotannon ja hankinnan sekä asiakkaan kanssa. Suunnittelija ei voi yksinään päättää, mistä tuote tulee kiinni johonkin, vaan asiasta on keskusteltava muun muassa tuotantopajan ja asiakkaan kanssa, jotta voidaan selvittää, onko juuri tällainen ollenkaan mahdollista.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aiheena oli yhtenäisen paikoitusjärjestelmän soveltuvuuden selvittäminen suunnittelua, valmistusta ja 3D-mittausta varten. Opinnäytetyön aikana kehiteltiin yritykselle DIM-suunnitteluohje, jonka avulla DIM:ä voidaan alkaa implementoida Proventian tarpeisiin. Myös alihankkijan ja asiakkaan näkökulmaa oli ohjeessa otettu huomioon. Ohjeen perustaksi oli valittu tapausesimerkki yhdestä tuotantoprosessista. Ohjeessa esiteltiin tätä esimerkkitapausta, ja sitä, kuinka DIM toteutuu siinä tällä hetkellä, ja miten sitä voisi kehittää eteenpäin. Tavoitteena oli myös kehittää olemassa olevaa 3D-mittausprosessia aiempaa paremmaksi. Tässä osiossa oli tarkoituksena hyödyntää MBD:tä eli malliperusteista tuotemäärittelyä, joka helpottaisi mittausta, kun mittaukseen voisi tuoda MBD:n avulla tuote- ja valmistustiedon, jolloin mittaajan työmäärä vähenisi. Tämä helpottaa tietysti suunnitteluakin. Lisäksi tehtävänä oli selvittää kädessä pidettävän laserskannerin soveltuvuutta Proventian laadunvarmistuksessa.

Aikatauluhaasteita oli jonkin verran, mutta aikataulussa ei jääty pahasti jälkeen. Suunnitelmien muutokset, kehitysehdotukset ohjeeseen ja MBD-osion sekä HandySCAN-testailun mukaantulo sekä myös työtehtävät 3D-skannauksessa vaikuttivat aikatauluihin niin, että jouduttiin miettimään, mihin kannattaa käyttää lopulta eniten aikaa. DIM-ohjeen tekoon ja siihen liittyviin asioihin meni runsaasti aikaa, sillä kyseessä oli laaja kokonaisuus ja oltiin tekemisissä haastavien asioiden kanssa.

Yhteistyö opinnäytetyöprojektissa mukana olleiden henkilöiden kanssa sujui hyvin. Pidimme pienemmällä porukalla sisäisiä viikkopalavereita ja noin kuukauden välein katselmointipalavereita, joissa oli mukana myös opinnäytetyön valvoja yrityksestä ja ohjaava opettaja koululta. Näissä palavereissa käytiin läpi opinnäytetyön senhetkinen tilanne ja esitettiin kehitysehdotuksia sekä mietittiin, mitä tehdään seuraavaksi. Jokaisesta palaverista laadittiin muistio, joka on ollut jokaisen palaveriin osallistujan luettavissa. Lisäksi laadittiin viikkoraportti jokaiselta työviikolta, jotta päästiin näkemään, mitä saatiin aikaiseksi viikon aikana, ja listattiin ne tehtävät, mitä tullaan tekemään seuraavalla viikolla.

Opinnäytetyöprojekti yrityksessä päättyi 31.1.2022, jolloin suunnitteluohje oli jo saatu valmiiksi ja muutkin tehtävät oli viety loppuun asti. Valmis DIM-suunnitteluohje esiteltiin yrityksessä suunnittelu- ja laatuosastolle tammikuun lopussa. Esitys ja itse ohje ja koko opinnäytetyö saivat positiivista

palautetta. Tarkoituksena oli se, että ohje jäisi yrityksen käyttöön. Tämän ohjeen avulla yritys voisi alkaa viemään DIM-järjestelmää eteenpäin muidenkin tuotteiden suunnittelu-, kehitys- ja valmistusprosesseihin. Tähän opinnäytetyöhön tuli liitteeksi tekemäni DIM-suunnitteluohje, jota on kuitenkin jouduttu lyhentämään yrityssalaisuuksien vuoksi. Tähän opinnäytetyöhön liitettyssä DIM-ohjeessa esitetyt 3D-mallit ovat minun mallintamiani, ja niillä on korvattu Proventian salassa pidettävät mallit. Tekemäni mallit ovat yksinkertaisempia kuin Proventian mallit, jotta lukija voisi helpommin käsittää, mistä on kyse. Liitteenä oleva ohje ei sisällä kaikkia kohtia, joita DIM-suunnitteluohjeen toteutusosiossa käytiin läpi.

LÄHTEET

1. Proventia Oy 2022. Osaamisalueemme. Hakupäivä 24.2.2022. <https://www.proventia.com/etusivu>.
2. Wikipedia 2013. 3D-skanneri. Hakupäivä 11.2.2022. <https://fi.wikipedia.org/wiki/3D-skanneri>.
3. Wikipedia 2022. 3D scanning. Hakupäivä 12.1.2022. https://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanning.
4. Oy Mitaten Finland Ab 2015. 3D-skannaus. Hakupäivä 8.2.2022. <http://mitaten.fi/3d-skannerit.html>.
5. Aniwaa Pte. Ltd 2021. 3D scanning technologies and the 3D scanning process. Hakupäivä 24.1.2022. <https://www.aniwaa.com/guide/3d-scanners/3d-scanning-technologies-and-the-3d-scanning-process/>.
6. Huang, Leon 2021. What Is CMM Machine: Components, Uses and Benefits. Rapid Direct. Hakupäivä 4.4.2022. <https://www.rapiddirect.com/blog/what-is-cmm-machine/>.
7. Saloteam Oy 2019. Uusi koordinaattimittakone: lisää nopeutta ja tehokkuutta. Hakupäivä 10.11.2021. <https://www.saloteam.fi/2019/04/25/uusi-koordinaattimittakone-lisaa-nopeutta-ja-tehokkuutta/>.
8. Rensi Finland Oy. Kreon nivelvarsikoneet. Hakupäivä 10.11.2021. <https://www.rensi.fi/tuotteet/mittauskoneet/kreon-nivelvarsimittakone/kreon-siirrettava-mittakone/>.
9. Geotrim Oy 2022. Pistepilvi tutuksi. Hakupäivä 9.2.2022. <https://3d-malli.fi/pistepilvi-tutuksi/>.
10. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG 2021. Laser Triangulation. Hakupäivä 13.12.2021. <https://www.micro-epsilon.com/service/glossar/Laser-Triangulation.html>.

11. Boridy, Raymond 2013. Calibration of 2D Cameras for 3D Inspection. Tech Briefs Media Group. Hakupäivä 4.4.2022. <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/features/application-briefs/16418?start=1>.
12. MoviMED 2018. What is Laser Triangulation? Hakupäivä 10.11.2021. <https://www.movi-med.com/knowledgebase/what-is-laser-triangulation/>.
13. 3 Space 2020. Advantages & Disadvantages of 3D Laser Scanning. Hakupäivä 15.2.2022. <https://3space.com/advantages-disadvantages-of-3d-laser-scanning/>.
14. Creaform Inc 2021. Metrology Solutions. Hakupäivä 10.11.2021. <https://www.creaform3d.com/en>.
15. MLT Machine & Laser Technology Oy. MetraSCAN 3D-skanneri. Hakupäivä 10.11.2021. <https://www.mltfinland.fi/metrascan3d/>.
16. Carlota V. 2019. Laser Scanner vs Structured Light Scanner: which should you choose? 3Dnatives. Hakupäivä 18.3.2022. <https://www.3dnatives.com/en/laser-3d-scanner-vs-structured-light-3d-scanner-080820194/>.
17. Cascade Control 2017. ATOS Core. Hakupäivä 10.11.2021. <https://www.cascade.fi/tuotteet/atos-core/>.
18. Metrología Sariki 2019. The Benefits of Blue Light Over White Light for 3D Scanning. Hakupäivä 18.3.2022. <https://www.sariki.es/en/the-benefits-of-blue-light-over-white-light-for-3d-scanning/>.
19. A1 Media Oy. Fotogrammetriset 3D-mallit. Hakupäivä 16.3.2022. <https://www.a1media.fi/osaamme/fotogrammetria>.
20. 3D Talo Finland Oy 2020. Mittatarkkaa fotogrammetriaa. Hakupäivä 16.3.2022. <https://3dtalo.fi/fotogrammetria>.
21. Wikipedia 2021. Lidar. Hakupäivä 10.11.2021. <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>.

22. Wikipedia 2021. Time of flight. Hakupäivä 10.11.2021. https://en.wikipedia.org/wiki/Time_of_flight.
23. Exact Metrology Inc 2022. GOM Inspect - Evaluation Software for 3D Measurement Data. Hakupäivä 24.2.2022. <https://www.exactmetrology.com/3d-scanner-software/gom-inspect>.
24. Aniwaa Pte. Ltd 2022. Compare 3D scanners. Hakupäivä 20.4.2022. <https://www.aniwaa.com/catalog/3d-scanners/chart/>.
25. Carl Zeiss GOM Metrology GmbH. Efficient virtual check of the subassembly. Hakupäivä 4.5.2022. <https://www.gom.com/en/solutions/metal-forming/assembly-analysis/efficient-virtual-check-of-the-subassembly>.
26. Carl Zeiss GOM Metrology GmbH. Industrial 3D Scanning Technology. Hakupäivä 17.2.2022. <https://www.gom.com/products/3d-scanning>.
27. Mölzer, B. & Strobelt, M. Dimensional Management in Vehicle Development. Porsche Engineering Magazine. Hakupäivä 18.3.2022. <https://www.porscheengineering.com/filestore/download/peg/en/pemagazin-01-2013-artikel-toleranzmanagement/default/5c05a992-c26b-11e4-a19d-001a64c55f5c/Dimensional-Management-in-Vehicle-Development-Porsche-Engineering-Magazine-01-2013.pdf>.
28. Rapinoja, Jukka-Pekka 2021. Webinaari yleistoleranssistandardista ISO 22081. Helsinki: METSTA ry. Hakupäivä 20.4.2022. <https://metsta.fi/wp-content/uploads/2021/05/Yleistoleranssin-ISO-22081-esittely.pdf>.
29. Laaksonen, T., Nieminen, J., Pulkkinen, A., Rapinoja, J-P., Simons, J., Uski, P., Salmi, H. & Vainionpää, M. 2016. Malliperustaisen tuotemäärittelyn (MBD) mahdollisuudet. Helsinki: METSTA ry, Teknologiateollisuus ry & SMACC. Hakupäivä 4.5.2022. https://www.teknologia-info.net/sites/teknologiainfo.net/files/download/MBD_Raportti_2016.pdf.

30. Rapinoja, J-P., Henell, A., Hinkkanen, M., Kellokoski, M., Kähäri, M., Laaksonen, T., Nieminen, J., Pulkkinen, A., Simons, J. & Uski, P. 2021. Opastusta mallipohjaisen tuotemäärittelyn (MBD) käyttöönottoon. Helsinki: METSTA ry. Hakupäivä 18.1.2022. <https://metsta.fi/wp-content/uploads/2021/12/MBD-opas.pdf>.
31. Linguistic Glob 2020. Do the Actual Mating Envelope and Datum mean the same thing for this Feature of Size 10 mm Pin? Hakupäivä 17.3.2022. <http://linguisticglob.blogspot.com/2020/04/is-actual-mating-envelope-and-datum.html>.
32. Chegg 2021. List Degree of Freedom That Each Datum Plane Constrains Datum Axis Translational Degrees. Hakupäivä 21.12.2021. <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/3-list-degree-freedom-datum-plane-constrains-datum-axis-translational-degrees-freedom-x-y--q55708954>.
33. Onit Group srl. What Does 6-Degree of Freedom (6-DoF) Mean? Hakupäivä 14.3.2022. <https://dragonflycv.com/what-does-6-degrees-of-freedom-or-6-dof-mean/>.
34. Mechanical Engineering Basics 2018. 3-2-1 Principle (Arresting Degrees of Freedom). Hakupäivä 27.12.2021. <https://basicstomechanicalengineering.blogspot.com/2018/09/3-2-1-principle-arresting-degrees-of.html>.
35. Lehtimäki, Aarre 2017. Suomalaista koneenpiirtämistä 1916–2016. 2. painos. Tampere: Crano Oy. Hakupäivä 18.3.2022. <https://docplayer.fi/70985492-Suomalaista-koneenpiirtamista.html>.
36. Kontio, E., Viitala, J., Tolonen, H. & Väyrynen, T. TK00BP41 Konetekniikan perusteet 12 op. Opintojakson luennot syksyllä 2018: Tekninen piirustus, Mitoitus 1. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
37. Wikipedia 2016. Toleranssi (valmistustekniikka). Hakupäivä 10.1.2022. [https://fi.wikipedia.org/wiki/Toleranssi_\(valmistustekniikka\)](https://fi.wikipedia.org/wiki/Toleranssi_(valmistustekniikka)).
38. Kontio, E., Viitala, J., Tolonen, H. & Väyrynen, T. TK00BP41 Konetekniikan perusteet 12 op. Opintojakson luennot syksyllä 2018: Tekninen piirustus, Toleranssit. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.

39. Syam, Wahyudin 2021. 2D tolerance stack-up analysis with examples. Wasy Research. Hakupäivä 15.3.2022. <https://www.wasyresearch.com/2d-tolerance-stack-up-analysis-with-examples/>.
40. Smlease Design. Tolerance Stackup Analysis: Worst Case and RSS. Hakupäivä 11.1.2022. <https://www.smlease.com/entries/tolerance/tolerance-stackup-analysis/>.
41. Piirainen, Antti 2015. Miksi toleranssit? Quality Knowhow Karjalainen Oy. Hakupäivä 20.4.2022. <http://www.qk-karjalainen.fi/fi/artikkelit/miksi-toleranssit/>.
42. Sigmetrix 2022. Understanding Statistical Tolerance Analysis. Hakupäivä 5.5.2022. <https://www.sigmetrix.com/case-studies-2/tolerance-analysis-case-studies-white-papers/statistical-tolerance-analysis-2/>.
43. Viitala, Jari 2022. Opinnäytetyöstä saadut kommentit tarkistuksen yhteydessä 12.4.2022. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
44. MITCalc. Tolerance analysis of linear dimensional chains. Hakupäivä 20.4.2022. <https://www.mitcalc.com/doc/tolanalysis1d/help/en/tolanalysis1d.htm>.
45. Panek, A. David 2009. Six Sigma Mechanical Tolerance Analysis. Hakupäivä 19.4.2022. <https://www.slideshare.net/dpanek/six-sigma-mechanical-tolerance-analysis-1>.
46. Wikipedia 2021. Monte Carlo -simulaatio. Hakupäivä 17.2.2022. https://fi.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_-_simulaatio.
47. Effenberger, Gunter 2013. Geometrical Product Specifications – ISO 14405-1, the General GPS Standard for Dimensional Tolerancing of Linear Sizes. TEQ Training & Consulting GmbH. Hakupäivä 22.3.2022. https://www.piq-online.de/fileadmin/mediamanager/PIQ-Artikel/GPS3_en.pdf.
48. AMETEK Inc 2020. What reference circles are there? Hakupäivä 21.3.2022. <https://www.taylor-hobson.com/resource-center/faq/what-reference-circles-are-there>.

49. Hemming, B., Henell, A., Laaksonen, J., Lehto, H., Suhonen, A., Rapinoja, J-P. & Ristonen, T. 2015. ISO GPS-toleranssit 2, Pituusmitat. Helsinki: METSTA ry. Hakupäivä 22.3.2022. <https://slideplayer.fi/slide/3628573/>.
50. Deutsche Gesellschaft für Qualität. ISO-GPS: Tolerierungsgrundsätze. Hakupäivä 5.4.2022. <https://www.dgq.de/fachbeitraege/iso-gps-tolerierungsgrundsaeetze/>.
51. Kivioja, Seppo 2011. Toleranssit ja pinnankarheus. 4. painos. Espoo. Hakupäivä 8.2.2022. <https://docplayer.fi/3003431-Toleranssit-ja-pinnankarheus-seppo-kivioja.html>.
52. Hemming, B., Henell, A., Laaksonen, J., Lehto, H., Suhonen, A., Rapinoja, J-P. & Ristonen, T. 2015. ISO GPS-toleranssit 4, Peruselementit. Helsinki: METSTA ry. Hakupäivä 4.1.2022. <https://slideplayer.fi/slide/3625822/>.
53. Hemming, B., Henell, A., Laaksonen, J., Lehto, H., Suhonen, A., Rapinoja, J-P. & Ristonen, T. 2015. ISO GPS-toleranssit 3, Geometriset toleranssit. Helsinki: METSTA ry. Hakupäivä 7.1.2022. <https://slideplayer.fi/slide/3624947/>.
54. Keyence Corporation 2022. Envelope Requirement. Hakupäivä 7.1.2022. <https://www.keyence.com/ss/products/measure-sys/gd-and-t/advanced/envelope-requirement.jsp>.
55. Hemming, B., Henell, A., Laaksonen, J., Lehto, H., Suhonen, A., Rapinoja, J-P. & Ristonen, T. 2015. ISO GPS-toleranssit 5, Maksimimateriaalin vaatimus. Helsinki: METSTA ry. Hakupäivä 9.2.2022. <https://slideplayer.fi/slide/3629963/>.
56. Saxholm, S., Hemming, B., Esala, V-P. & Palosuo, I. 2010. Standardien hyödyntäminen teollisuuden mittauksissa, Loppuraportti. Mittatekniikan keskus: Espoo. Hakupäivä 10.5.2022. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/2010-J2.pdf>.
57. Liuksiala, Kimmo 2022. Tilastollinen prosessinohjaus (SPC). Quality Knowhow Karjalainen Oy. Hakupäivä 13.1.2022. <http://www.gk-karjalainen.fi/fi/kalenteri/spc>.

58. Tuurala, T 2010. Prosessi, prosessiorganisaatio ja prosessin ohjaus. Laatuakatemia. Hakupäivä 14.1.2022. <http://www.kotiposti.net/tuurala/prosessit.htm>.
59. Pesonen, Matti 2020. Vaatiiko asiakkaasi MSA-tuloksia? Quality Knowhow Karjalainen Oy. Hakupäivä 18.1.2022. <https://sixsigma.fi/vaatiiko-asiakkaasi-msa-tuloksia/>.
60. Karjalainen, Tanja 2016. Kymmenen tilastollista Six Sigman työkalua selitettynä. Quality Knowhow Karjalainen Oy. Hakupäivä 21.3.2022. <https://sixsigma.fi/kymmenen-tilastollista-six-sigman-tyokalua-selitettyna/>.
61. BlackSmith Consulting Oy. Etenemissuunnitelmana Lean Six Sigma jatkuvan parantamisen strategioihin. Hakupäivä 21.3.2022. https://blacksmithconsulting.fi/application/files/8415/8711/9447/BSC_six_sigma_2020.pdf.
62. 1factory Inc 2022. Process Capability Analysis Cp, Cpk, Pp, Ppk - A Guide. Hakupäivä 14.4.2022. <https://www.1factory.com/quality-academy/guide-to-process-capability-analysis-cp-cpk-pp-ppk.html>.
63. Karjalainen, Eero 2007. Lean ja Six Sigma. Quality Knowhow Karjalainen Oy. Hakupäivä 20.4.2022. <https://sixsigma.fi/lean-ja-six-sigma/>.
64. Wu, Oboe 2016. Top 5 Reasons to Use MBD. Engineers Rule. Hakupäivä 10.12.2021. <https://www.engineersrule.com/5-reasons-use-mbd/>.
65. Wu, Oboe 2015. MBD Implementation 10 DOs and 10 DONTs – Introduction. Dassault Systèmes SE. Hakupäivä 28.1.2022. <https://blogs.solidworks.com/solidworks-blog/2015/10/mbd-implementation-10-dos-and-10-donts-introduction.html>.
66. Keyence Corporation 2022. Common Datums and Datum Systems. Hakupäivä 11.11.2021. <https://www.keyence.com/ss/products/measure-sys/gd-and-t/datum/common.jsp>.
67. Faro 2021. GD&T in automotive assembly: using datum to locate surfaces. Hakupäivä 11.11.2021. <https://www.faro.com/en/Resource-Library/Article/gd-t-in-automotive-assembly-use-of-datum-targets-for-precision-location-of-large-surfaces>.

68. Blaszczyk, Chris. Locating Pins and How They Are Used. Misumi USA. Hakupäivä 29.3.2022.
<https://us.misumi-ec.com/maker/misumi/mech/tech/locatingpinshowtheyareused/>.



DIM- suunnitteluohje

*Suunnittelun, hitsauksen,
laadunvarmistuksen, alihankinnan
ja asiakkaan näkökulmasta*

DIM-ohjeen sisältö

- **Esipuhe:** Johdatus DIM-järjestelmän perusideaan
- **Suunnittelu:** Standardit, peruselementit, mitat ja toleranssit sekä geometrinen tolerointi
- **Case-esimerkki:** Mikserin paikoitus hitsausjigiin suunnittelun ja hitsauksen näkökulmasta
- **Laadunvarmistus:** Mikserin ja jigien paikoitus mittausohjelmassa, SPC ja mittapistepiirustus
- **Alihankinta:** Paikoitus syvävedossa
- **Asiakasrajapinta:** Esimerkki DOC-DPF:n kiinnityksestä traktoriin DIM-periaatteen mukaisesti
- **Yhteenveto:** Kiteytys Dimensional Management -järjestelmän ideasta.

Esipuhe

- Tämä suunnitteluohje on laadittu kappaleiden paikoitusta varten Dimensional Management -filosofian mukaisesti. Dimensional Management (DIM) tarkoittaa mittojen hallintaa.
- DIM:n oppien avulla voidaan luoda yhtenäinen paikoitusjärjestelmä, jotta paikoitus voidaan tehdä yksiselitteisesti niin suunnittelussa, hitsauksessa kuin mittauksessakin. Näin menettelemällä saadaan tuotanto hyvin hallintaan, kun jokaisessa työvaiheessa on ”yhteinen kieli” paikoituksen suhteen. (1, s. 3.)
- Paikoituksen ollessa vakio, virhe johtuu aina jostakin muusta kuin paikoituksesta.
- Prosesseihin päästään tilastollisesti käsiksi ja voidaan tehdä hallittuja muutoksia tuotteisiin. (1, s. 9.)
- DIM:iin liittyvää ISO GPS -järjestelmää käydään tässä ohjeessa myös läpi.
- Tämä ohje on tehty projektin X mikserin robottisarjahitsauksen pohjalta. Ohje kuvaa nykyisen paikoitusjärjestelmän eri näkökulmista ja sisältää myös kehitysehdotuksia.



GPS-järjestelmän standardit

- ISO GPS -järjestelmää (SFS-EN ISO 1101-2017) käytetään kuvaamaan työkappaleen ominaisuuksia suunnittelun, valmistuksen ja laadunvarmistuksen aikana. GPS:ään eli geometriseen tuotemäärittelyyn sisältyy mitan, sijainnin, suunnan, muodon sekä heiton toleranssit.
- GPS-järjestelmän perussäännöt: SFS-EN ISO 8015, Geometrinen tuotemäärittely, perusteet, käsitteet, periaatteet ja säännöt.
- ISO 14405: Mittatoleranssit
- ISO 286: ISO-sovitejärjestelmä
- ISO 5459: Peruselementit
- ISO 1302: Pinnankarheuden merkinnät
- ISO 2768: Pituusmittojen yleistoleranssit ja geometriset yleistoleranssit
- ISO 14253: Mittausepävarmuus. (2, s. 7.)

Referenssielementit/pisteet

- DIM:n perustana toimii peruselementtijärjestelmä (datum system) ja referenssipistejärjestelmä (RPS), joka on muodostettu rajoitetuista peruselementeistä. Referenssielementit/pisteet toimivat lähtökohtana kaikille osan tuotantovaiheille alkaen heti suunnittelusta. Nämä referenssielementit luovat perustan toleranssivaatimuksille. (1, s. 5.)
- Referenssielementeiksi valitaan kappaleesta kriittiset piirteet, esim. ne jotka kiinnittyvät kokoonpanossa toiseen kappaleeseen. Eli peruselementit valitaan valmiin kappaleen toiminnallisuuden perusteella.
- Referenssielementit ovat siis kiinnityskohtia, niistä kiinnitetään asiakkaan päässä traktoriin ja Proventian päässä mm. hitsausjigeihin.

- Epämääräisiä muotoja sisältävälle kappaleelle (esim. valukappaleet) on järkevämpi valita rajoitetut peruselementit (datum target), jotka toimivat sitten referenssipisteinä ja niistä voidaan mittauksen aikana luoda RPS-paikoitus. Rajoitetuilla peruselementeillä on mahdollista luoda 3-2-1-peruselementtijärjestelmä. (3, s. 24.)
- Kolme A-pistettä tai aluetta muodostavat tason (plane), kaksi B-pistettä tai aluetta muodostavat viivan (line) ja yksi C-piste tai alue muodostaa yhden pisteen (point) tai alueen. Periaate on siis sama kuin plane-line-point-paikoituksessa.
- Peruselementeillä lukitaan toleranssialueen vapausasteita siinä järjestyksessä, joka on määritelty toleranssikehyksessä. Peruselementtien tarvittava määrä riippuu ko. toleranssista. (2, s. 62.)

- Kun käytetään referenssielementtejä kaikissa työvaiheissa, se tekee juurisyiden analysoinnista yksiselitteistä ja mahdolliset korjaavat toimenpiteet voidaan suorittaa ongelmitta (1, s. 5).
- Muista, että referenssielementit sekä pisteet tulee olla skannattavissa ja mitattavissa, esim. lieriön halkaisijasta täytyy olla skannattuna vähintään 50%, jotta piirteen luominen onnistuu actual-puolella kunnolla.
- 3D-mittauksessa näistä kohdista paikoitetaan eli nämä kohdat menevät siis nollaan poikkeaman suhteen. Kun referenssipisteet/elementit asettuvat paikoituksessa nollaan, virhe tulee muualle. Pyritään ajamaan virhe sinne, missä siitä ei ole haittaa.
- **Pidetään siis paikoitus samana koko valmistusketjun ajan!**

Mitat ja toleranssit piirustuksessa

- Piirustuksessa tulee olla kaikki sellaiset mitat ja merkinnät, mitä tarvitaan tuotteen onnistuneeseen valmistukseen ja kaikki ne mitat, mitä halutaan lopulta skannata. Jos piirustuksesta puuttuu jotakin, sitä ei voi velvoittaa toteutettavaksi muillakaan. Ts. piirustus on määräävä. (2, s. 6.)
- Pidä piirustus siistinä, jotta muilla ei tulisi hankaluuksia lukea sitä tai ettei syntyisi väärinkäsityksiä. Jos piirustukseen sisältyy paljon informaatiota, olisi tällöin järkevää jakaa informaatio usealle eri sivulle.
- Tarkista kaikki mitat huolella ennen kuin aletaan valmistamaan kappaletta. Tutkimusten mukaan 60% piirustuksista ei vastaa täysin 3D-mallia! (4).
- **Model Based Definition (MBD):** STEP AP242 -tiedostoon voi sisällyttää mallin PMI:n eli tuote- ja valmistustiedon. Näin menetelmällä mittaajan ei tarvitsisi luoda kaikkia nominal-piirteitä itse, joten mittaajalla säästyisi aikaa. Vaatii MBD-lisäosan Solidworksiin ja tietysti halua siirtyä 2D-piirustuksista mallipohjaiseen tuotemäärittelyyn (Piirustuksetonta tuotantoa on kuulemma hieman kokeiltukin Proventialla aiemmin... jäänyt kesken ☺).



18.5.2022 9

Toleranssianalyysi

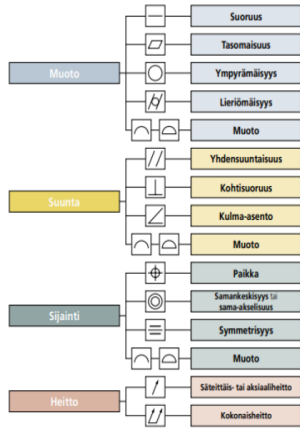
- On suositeltavaa määrittellä optimoidut toleranssit: kasvattaa osan toleranssialuetta ja se auttaa madaltamaan osan valmistuskustannuksia. Toleranssien stack-up-analyysissä käytetään osien toleranssien optimoinnissa. Seuraavia metodeja käytetään yleisemmin:
- **1. Worst Case (WC) -toleranssianalyysi:** Käyttää hyväkseen perinteisiä aritmeettisia keinoja eli yhteen- ja vähennyslaskua optimoitujen toleranssien laskemisessa. Tätä tapaa käyttäessä oletetaan kaikkien mittojen olevan ääriarjoillaan. Tämä tapa sopii pienimuotoiseen tuotantoon.
 - ❖ **Hyvät puolet:** WC-analyysi takaa 100% kokoonpantavuuden ja se hyväksyy kaikki tuotteet.
 - ❖ **Huonot puolet:** Vaatii todella tiukkoja yksilöllisiä toleransseja komponenteille, siksi se kasvattaa yleisesti tuotanto- ja tarkastuskustannuksia. (5.)
- **2. Tilastollinen (RSS)-analyysi:** Neliöllisen keskiarvon Root Sum of Squares -menetelmä perustuu tilastolliseen lähestymistapaan. Se olettaa suurimman osan kappaleista olevan nimellimitoissaan eli keskellä toleranssialuetta. RSS-mallin oletamus on siis se, että valmistettujen osien mitat noudattavat kellokäyrää eli normaalijakaumaa. (5.)
 - ❖ **Hyvät puolet:** Voidaan käyttää yksittäisille mitoille suurempia toleransseja. Parempi kuin WC, sillä on todennäköistä, että valmistettujen osien mitat ovat keskittyneet nimellimitan lähelle. (6, s. 9-18.)
 - ❖ **Huonot puolet:** Kokoonpanon liittyvien virheiden riskin kasvu. Malli ei salli nimellimitan siirtoa, joka on tehty tarkoituksella tai työkalun kulumisen vuoksi. Oletus siitä, että kaikki toleranssit ovat yhtä helposti valmistettavissa, vaikka näin ei oikeasti ole. Osia hylätään ja tämä malli ei anna 100 % takuuta kokoonpanon onnistumiselle. (6, s. 9-18.)



18.5.2022 10

Geometrinen tolerointi

- Pelkkä \pm -mittatolerointi saattaa johtaa epäselviin ja moniselitteisiin tulkintoihin ja näin ollen vaikuttaa negatiivisesti laatuun, siksi onkin hyvä käyttää myös geometrisiä toleransseja. Paikkatoleranssi on varmaankin eniten käytetty alla olevista kuvan 1 tyypeistä.



Huom: EN ISO 1101 Geometriset tuotemääritykset (GPS). Geometriset toleranssit.

KUVA 1. Geometristen toleranssien tyypit (7, s. 38)



5.5.2022 11

- Geometrisesti toleroidut elementit sekä peruselementit paikoidetaan teoreettisesti tarkoilla mitoilla eli TED-mitoilla, näitä kutsutaan yleisesti basic-mitoiksi. Näitä mittoja ei toleroida.
- Kuvassa 2 esimerkki paikkatoleranssista (reikä), joka on paikoitettu basic-mitoilla ja esitetty lieriömäinen toleranssialue (ϕ). Alempana on esitetty kohtisuorustoleranssi tasojen avulla ja näkyvillä viittaus peruselementtiin A.

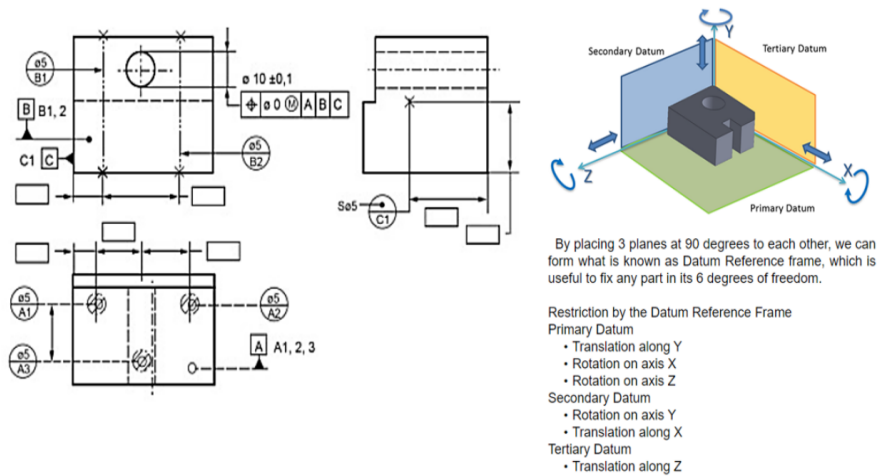
| | | |
|--|--|--|
| | | <p>Mitatun (todellisen) keskiviivan on oltava lieriömäisen alueen sisällä, jonka halkaisija on 0,1 ja jonka akseli on kyseisen reiän teoreettisesti oikeassa paikassa.</p> <p>Teoreettisesti oikea mitta sijoitetaan laatikkoon.</p> |
| | | <p>Tapin mitatun (todellisen) keskiviivan on oltava kahden yhdensuuntaisen tason välissä, joiden keskinäinen etäisyys on 0,1 ja jotka ovat kohtisuorassa perustasoa A vastaan.</p> |

KUVA 2. Paikkatoleranssi piirustuksessa (8, s. 13-14)



5.5.2022 12

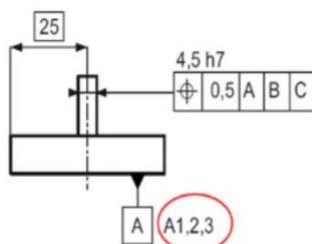
Peruselementtijärjestelmän ja 3-2-1-peruselementtijärjestelmän peruseriaate



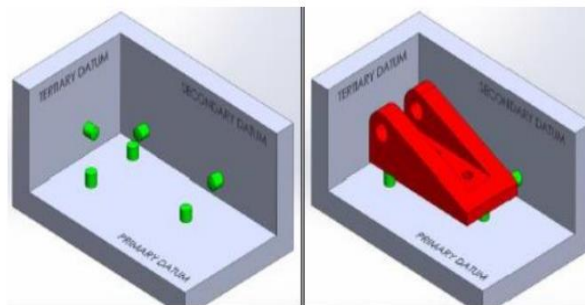
KUVA 3. Peruselementtijärjestelmä ja 3-2-1-peruselementtijärjestelmä piirustuksessa vasemmalla (datum system ja datum target). Vapausasteiden lukitseminen peruselementtejä käyttäen oikealla (9, s. 31-111; 10)

3-2-1-menetelmä

- Periaatteena on kokonaisten peruselementtien sijaan käyttää apuna rajoitettuja elementtejä, kuten vaikkapa jigien kiinnitystappien kiinnityssijaintia kappaleen pinnoilla, kappaleen paikoittamisessa. Näitä tappien kiinnitysmiskoita voidaan helposti kuvata datum target -symboleilla piirustuksessa.
- Ensimmäisen peruselementin muodostamiseen tarvitaan vähintään kolme pistettä, seuraavaan kaksi ja viimeiseen yhden pisteen. Näin voidaan lukita kappaleen kaikki kuusi vapausastetta (Degrees of Freedom, DoF).



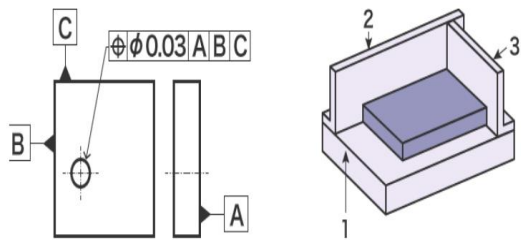
KUVA 4. Peruselementtisympolit ja siihen liittyvät rajoitetut elementit (11, s. 63)



KUVA 5. Kappaleen paikoittaminen kiinnitystapilla 3-2-1-menetelmää käyttäen (12)

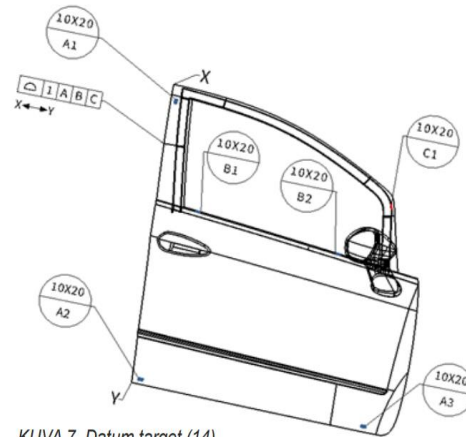
Datum system ja datum target - käytännön esimerkki eroista

- Peruselementti (datum) toimii lähtökohtana, johon toleroituja elementtejä verrataan. Peruselementti muodostetaan työkappaleen todellisista elementeistä (datum feature). Voi olla piste, suora viiva tai taso. Esimerkiksi jos todellisena peruselementtinä toimii lieriö, niin silloin peruselementtinä on suora viiva eli lieriön keskiakseli.
- Rajattua kohtaa (datum target) elementistä voidaan käyttää valujen ja isojen levyrakenteiden kanssa. Käytetään yleisesti ajoneuvoteollisuudessa. Epäsäännöllisiä muotoja sisältäviin pintoihin ei voi soveltaa kokonaisia peruselementtejä, siksi käytetään rajattuja kohtia peruselementtien muodostamiseen, kohdat voivat indikoida vaikkapa jiggin kiinnitystappien sijaintia, joista kappale paikoittuu. Voi olla alue, suora viiva tai piste.



1. Push datum A against target feature
 2. Push datum B against target feature
 3. Push datum C against target feature
- Part (target feature) is completely captured

KUVA 6. Datum system (13)

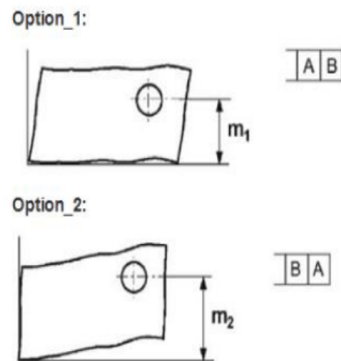


KUVA 7. Datum target (14)



5.5.2022 15

Peruselementtien järjestyksen vaikutus toleranssikehyksessä



KUVA 8. Peruselementtien järjestyksen vaikutus paikoitukseen toleranssikehyksessä (15)

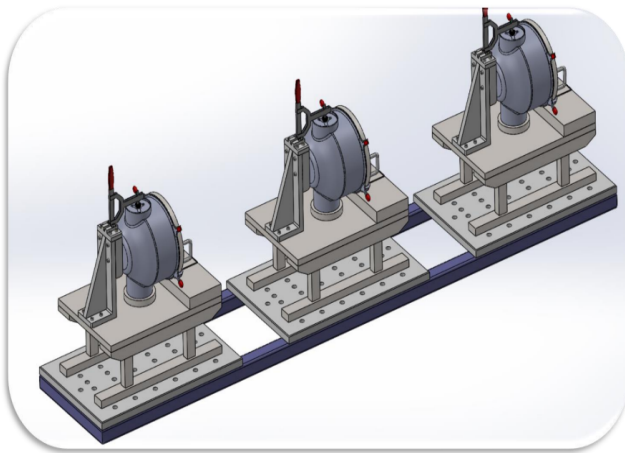


5.5.2022 16

Case-esimerkki

Suunnittelun ja hitsauksen näkökulma

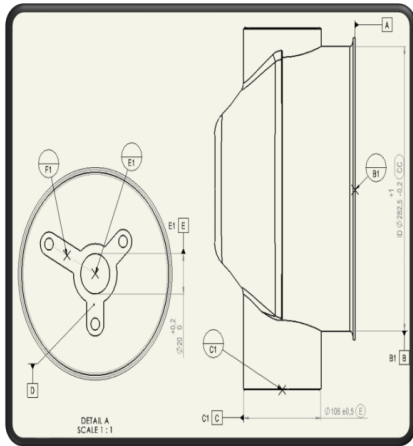
Case-tapaus: Mikserin robottihitsaus



KUVA 9.
Robottihitsauskelkka

- Seuraavilla dioilla esitetään mikserin paikoitus hitsausjigiin suunnittelun ja hitsauksen näkökulmasta.

- Peruselementtijärjestelmä ABC paikoittaa mikserin hitsausjigiin. DEF-paikoitus on mikserin sisäisiä ominaisuuksia varten. Nämä elementit käydään seuraavaksi yksitellen läpi.



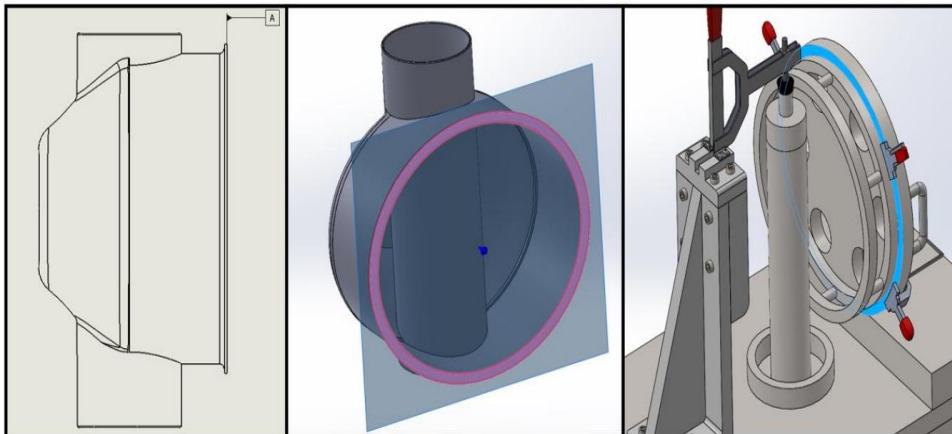
KUVA 10. Mikserin peruselementit



5.5.2022 19

Mikserin paikoitus hitsausjigiin

1. Ensin A-datum kiinni jigiin. Estää siirtymän X-suunnassa sekä pyörimisen Y- ja Z-suunnassa.

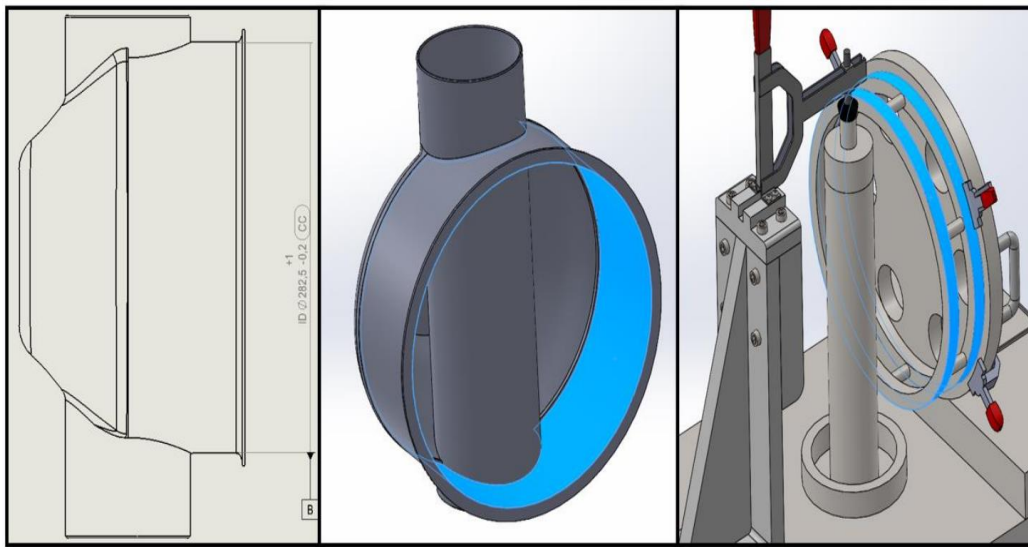


KUVA 11. Vaihe 1



5.5.2022 20

- 2. B-datum eli Housing-kupin sylinteri paikoittuu, sylinteri ottaa kiinni jigin koneistettujen renkaiden sivupintoihin. Estää siirtymän Y- ja Z-suunnissa.

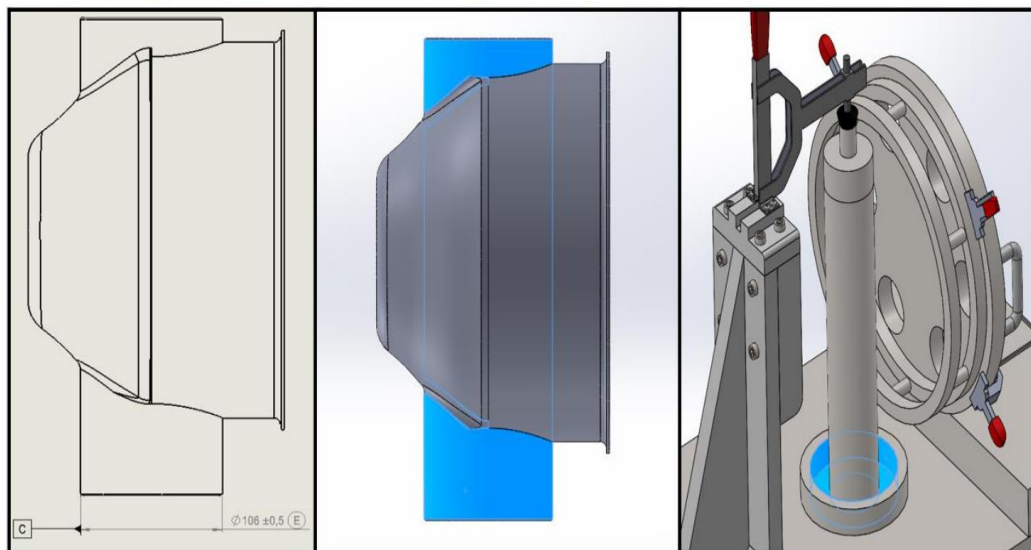


KUVA 12. Vaihe 2

PROVENTIA

5.5.2022 21

- 3. Seuraavaksi putken pää eli C-datum paikoittuu. Pyöriminen X-suunnassa estyy, kun jigin levyssä oleva paikoituskuppi estää liikkeen. Nämä kolme peruselementtiä (ABC) paikoittavat mikserin rungon. Mikserin on nyt mahdotonta liikkua mihinkään suuntaan, sillä kaikki kuusi vapausastetta on nyt lukittu.

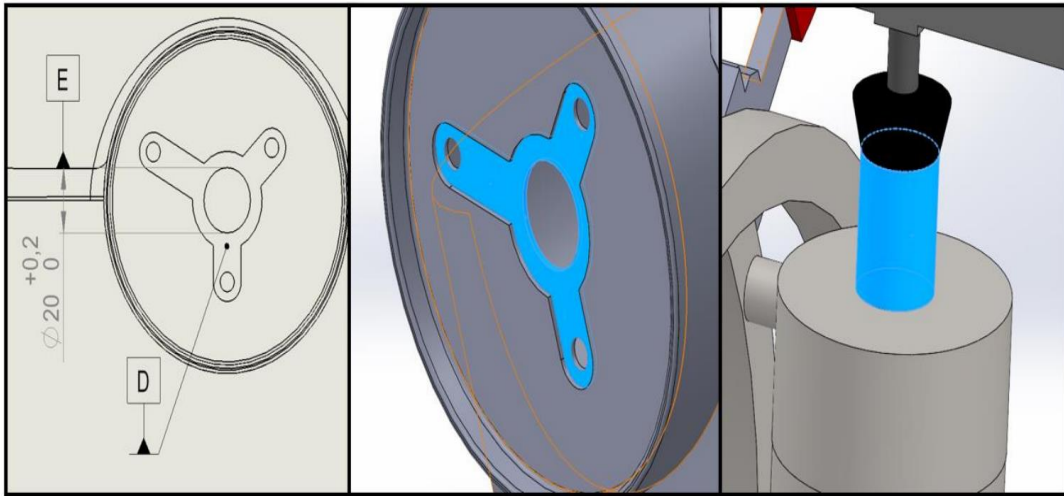


KUVA 13. Vaihe 3

PROVENTIA

5.5.2022 22

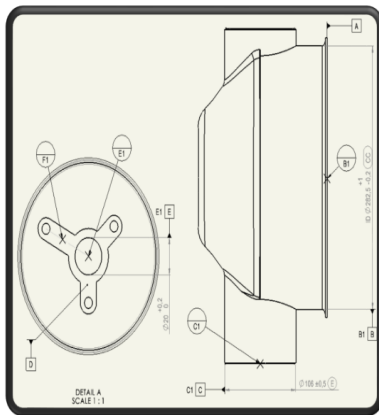
- 4. D-datum (taso) ja 5. E-datum (reikä). Nämä paikoittavat mikserin ruiskun laipan.



KUVA 14. Vaihe 4 ja 5

Laadunvarmistus

- 3D-mittauksessa paikoitus tapahtuu piirustuksessa esitettyllä tavalla. Mittauksessa käytetään myös rajoitettuja peruselementtejä eli pisteitä ja viivaa paikoituksessa.



KUVA 15. Mikserin peruselementit

- Eli paikoitus tapahtuu piirustukseen merkatussa järjestyksessä: A→B→C→D→E→F. ABC paikoittaa rungon ja DEF paikoittaa ruiskun laipan.
- B1, C1 ja E1 ovat kuvitteellisia pisteitä ja F1 on kuvitteellinen viiva (laskennalliset elementit) ja nämä esiintyvät periaatteessa vain piirustuksessa ja mittauksessa. Eli eivät vaikuta paikoitustapahtumaan jigissä.



Mikserin paikoitus mittauksessa

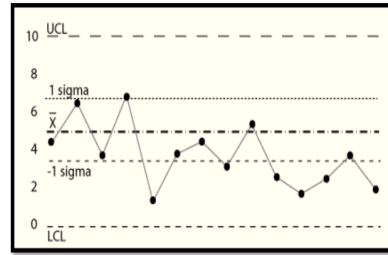
- Mikserissä on kaksi erilaista paikoitusta prealignmentin lisäksi: koko mikserille elementtien mukaan (Alignment by Geometric Elements) ja erikseen ruiskun laipalle paikoitus plane-line-point-periaatteella käyttäen ruiskun laippaan sijoitettuja elementtejä.
- ABC-paikoituksessa käytetään piirustukseen merkittyjä elementtejä: Taso A, piste B1 ja piste C1.
- DEF-paikoituksessa puolestaan tasoa D, pistettä E1 ja viivaa F1. ABC: Asennusmitat, tärkeitä asiakkaalle. DEF: Mikserin ominaisuudet, eivät vaikuta mitenkään asennettavuuteen.

SPC – Tilastollinen prosessinohjaus

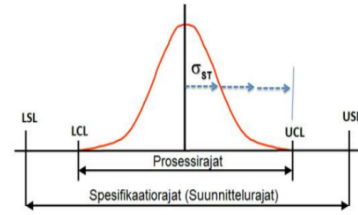
- Tilastollista prosessinohjausta käytetään laadunvarmistuksessa. SPC:n perusajatus on se, että seurataan systemaattisesti prosessin kehittymistä ja pyritään vähentämään sen vaihtelua.
 - Käytetään valvontakortteja, joiden avulla voidaan seurata sitä, onko prosessi hallinnassa. Näitä seuraamalla muutokset voidaan havaita nopeasti ja luotettavasti ja saadaan heti korjaustoimenpiteet alulle.
 - Tärkeänä elementtinä on myös prosessin kyvykkyysanalyysi. Siinä selvitetään Cp-, Pp-, Cpk-, ja Ppk-arvot.
 - Cp-luku:** Maksimisuorituskyky eli prosessin hajonta verrattuna toleranssialueeseen ilman, että otetaan keskiarvon sijaintia huomioon.
 - Cpk-luku:** Suorituskyky eli otetaan mukaan myös keskiarvon sijainti toleranssialueeseen nähden.
- Kertoo prosessin tämänhetkisen kyvykkyuden. (10.)

$$Cpk = \min \left\{ \frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}, \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma} \right\}$$

KUVA 16. Cpk-luvun laskukaava (16)



KUVA 17. Esimerkki valvontakortista (17)



$$C_p = \frac{\text{Spesifikaatoraja(t)}}{\text{Lyhyen ajan prosessiraja(t)}} = \frac{USL - LSL}{6\sigma_{ST}}$$

KUVA 18. Prosessin kyvykkyys ja Cp-luvun laskukaava (18)



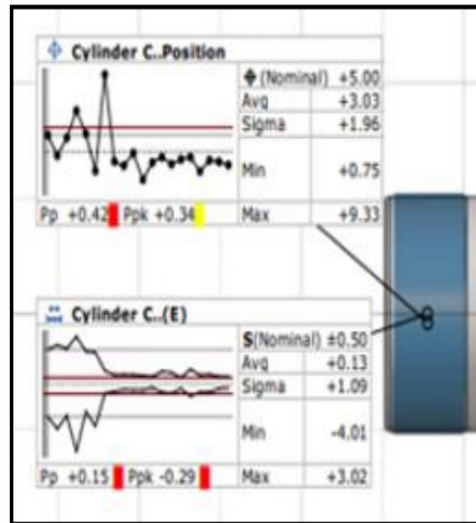
SPC-mittausraportti

- Tässä mittaraportissa on tehty kontrollikortit mikserin mittapisteille.
- SPC-mittaraportin sivulla on määritetty mittapisteille **Pp-luku** eli maksimitoimintakyky, kertoo prosessin kyvykkyuden vaatimuksiin nähden teoreettisesti. Myös **Ppk-luku** eli toimintakyky on määritetty. Tämä kertoo prosessin todellisen toimintakyvyn.

$$Ppk = \min \left[\frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}, \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma} \right]$$

$$Pp = \frac{(USL - LSL)}{6\sigma}$$

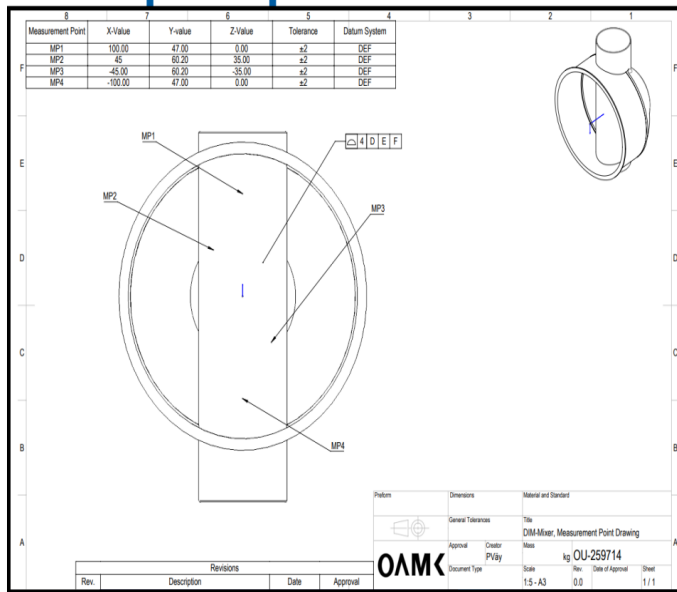
KUVA 19. Ppk:n ja Pp:n laskukaavat (19)



KUVA 20. SPC-mittausraportti



Mittapistepiirustus mikserille



- Erillinen mittapistepiirustus voisi tulla kyseeseen, kun halutaan tietää jonkin tietyn pisteen sijainnin poikkeama valmistetussa kappaleessa.
- Mittapisteeet ovat mikserin sisällä olevassa putkessa (XYZ-koordinaatit). Proventian yhteistyöyhteyksissä hyödynnetään mittapisteeitä enemmän.

KUVA 21. Mittapistepiirustus mikseristä



5.5.2022 29

Mittapisteeet jigeissä

- Myös jigeihin voi soveltaa aiemmin esitettyä mittapisteeideaa. Mittapisteeitä sijoitellaan tärkeisiin kohtiin, kuten niille pinnoille, jotka ottavat lopulta kiinni työkappaleeseen. Hyviä paikkoja mittapisteeille olisi mm. koneistetun renkaan pinta (paikoittaa B:n) ja putken (C) paikoittavan kupin pohja ja sivu.



5.5.2022 30

Alihankinta

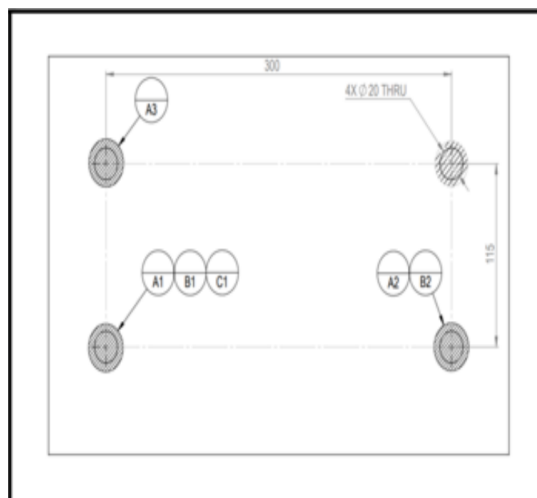
Syväveto-osien paikoitus alihankkijalla

- Proventialle tehtyjä osia ei yleensä pakoteta muotoon vaan niiden täytyy sopia hitsauskokoontaan sellaisenaan.
- Proventialle valmistetut osat ovat muodon vuoksi erittäin haastavia orientaation kannalta → Yritetty hakea suunnitteluvaiheessa sopivia muotoja ja tasopintoja, joilla osien korkeusasemat ja orientaatio otetaan haltuun.
- Vetovaiheessa kappaleeseen tehdään reikä/reikiä. Reiällä haetaan XY-suunta ja korkeussuunta otetaan muodosta. Jos reikää ei voi tehdä, niin sitten tehdään mahdollisimman terävä muoto. Tosin päästöosissa tällaisen tekeminen ei oikein tule kyseeseen.
- Laserrajauksessa käytössä jigit, joissa osa paikoitetaan muodoista ja esim. Destaco-hitsauskiinnittimillä painetaan vetolaipalta paikalleen eli laserrajauksessa paikoitus tapahtuu jätteeltä eli vetolaipalta.
- Näissä kehitteillä konsepti, jossa osa imetään imukupilla paikatuspintoja vasten.

Asiakasrajapinta

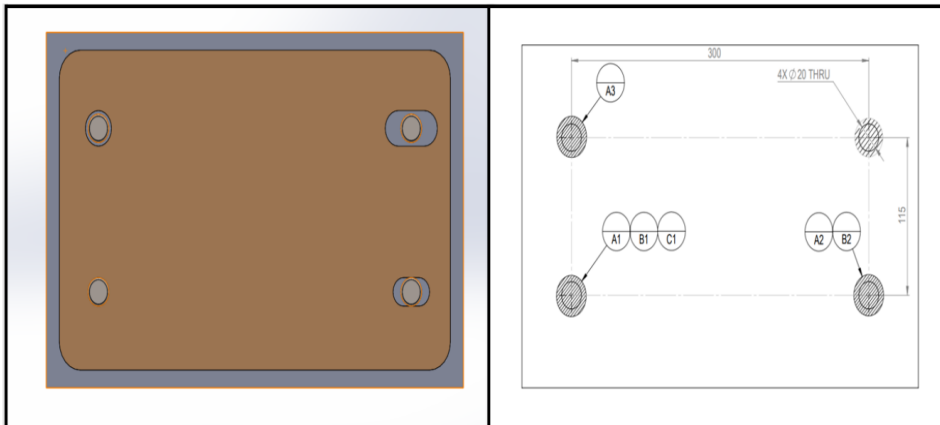
DOC-DPF:n kiinnitys traktoriin

- Käytetään 3-2-1-paikoitusta, näistä piirustuksessa näkyvistä kohdista DOC-DPF kiinnittyy traktoriin. Tässä näkyy hyvin, kuinka tuote on paikoitettu lopullisen asennustilansa mukaan. Toki tuote kiinnittyy neljästä kohdasta, mutta paikoitus hoituu käyttäen kolmea kohtaa.



KUVA 22. DOC-DPF-kokoonpanoa simuloiva piirustus, jossa rajoitetut peruselementit

DOC-DPF:n kiinnitys traktoriin



KUVA 23. Kiinnitys kokoonpanossa

- Vasemmassa kuvassa näkyy käytännön toteutus kiinnityksestä: Nollapisteestä on tehty tiukka ympyränmuotoinen reikä. Toinen piste on slot-reikä, se on tiukka pystysuunnassa, mutta löysä sivusuunnassa. Seuraava piste on löysä ympyränmuotoinen reikä ja viimeinen piste on löysä slot-reikä kumpaankin suuntaan. Nollapisteeseen ei saa tulla virhettä, 2. pisteeseen saa tulla virhettä sivusuunnassa. 3. pisteessä sallitaan hieman enemmän virhettä ja loput virheet saa tulla viimeiseen kiinnityspisteeseen. Virheitä koitetaan siis ajaa mahdollisimman paljon viimeiseen pisteeseen.



DIM:n punainen lanka

- Mittojen hallinta on avain tuottavuuden kasvattamiseen, prosessien optimointiin, läpimenoajan lyhentämiseen ja laadun parantamiseen. Kun paikoitus tulee samalla tavalla aina, niin virhe on aina muualla kuin paikoituksessa.
- DIM:n avainelementtinä on poikkeaman vähentäminen lopputuotteen mittauksissa, mitä lähempänä nimellismittoja ollaan, sitä toiminnallisempi kappale on. Ja mitä kauemmaksi CAD-mallin mitoista mennään, sitä huonompi toiminnallisuus on, ja tietyn rajan ylittyessä kappale muuttuu käyttökelvottomaksi.
- Suuret poikkeamat aiheuttavat lisäkustannuksia – joko menetetyn myynnin tai asiakasreklamaatioiden muodossa.

- Ydinasiat:
 - ❖ Paikoitus yksiselitteisesti, aina samalla tavalla eli peruselementtijärjestelmän tai 3-2-1-peruselementtijärjestelmän mukaan, kappaleen muodosta riippuen. Elementit sijoitellaan järkevästi niin, että kaikki vapausasteet saadaan lukittua.
 - ❖ Tarvitaan kolme peruselementtiä, jos halutaan lukita kappale paikoilleen kokonaan. Tai sitten kuusi kiinnitintappia eli rajoitettua peruselementtiä, joiden avulla kappale paikoittuu jigiin (3-2-1). Mahdollista tehdä myös kolmella pisteellä.
 - ❖ Kappaleissa elementtien mukaan paikoitus niin, että paikoitus vastaisi mahdollisimman hyvin asennustilaansa kokoonpanossa.
 - ❖ Mittapisteen kappaleissa ja jigeissä kriittisissä kohdissa.

Lähteet

- 1. Eskelinen, Jari 2021. Quality/Training Materials/3D-mittaustekniikka-koulutus: DIM ja mittaaminen. Ponsse Oyj. Hakupäivä 15.11.2021.
- 2. Rapinoja, Jukka-Pekka 2020. Quality/Training Materials/ISO-GPS-koulutus: Geometrinen tuotemäärittely ISO GPS. METSTA ry. Hakupäivä 15.11.2021.
- 3. Rapinoja, J-P., Henell, A., Hinkkanen, M., Kellokoski, M., Kähäri, M., Laaksonen, T., Nieminen, J., Pulkkinen, A., Simons, J. & Uski, P. 2021. Opastusta mallipohjaisen tuotemäärittelyn (MBD) käyttöönottoon. Helsinki: METSTA ry. Hakupäivä 10.1.2022. <https://metsta.fi/wp-content/uploads/2021/12/MBD-opas.pdf>.
- 4. Wu, Oboe 2016. Top 5 Reasons to Use MBD. Engineers Rule. Hakupäivä 10.12.2021. <https://www.engineersrule.com/5-reasons-use-mbd/>.
- 5. Smlease Design. Tolerance Stackup Analysis: Worst Case and RSS. Hakupäivä 11.1.2022. <https://www.smlease.com/entries/tolerance/tolerance-stackup-analysis/>.
- 6. Drake, Paul Jr. 1999. Traditional Approaches to Analyzing Mechanical Tolerance Stacks. Teoksessa Drake, Paul Jr. (toim.) Dimensioning and Tolerancing Handbook. USA, New York: McGraw-Hill. S.9-1- 9-39. Hakupäivä 5.5.2022.
- 7. Mitutoyo Scandinavia AB Finnish Branch. Metrologinen hakuteos. Hakupäivä: 20.4.2022. https://www.mitutoyo.fi/application/files/9915/5888/6472/Metrologist_Reference_Book_FI_WEB.pdf.
- 8. Kivioja, Seppo 2011. Toleranssit ja pinnankarheus. Espoo. Hakupäivä 20.4.2022. <https://docplayer.fi/3003431-Toleranssit-ja-pinnankarheus-seppo-kivioja.html>.



18.5.2022 39

- 9. Henzold, Georg 2021. Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection. Third Edition. Hakupäivä 20.4.2022. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/datum-target>.
- 10. EasyGDT.com 2017. Datums. Hakupäivä: 26.11.2021. <https://easygdt.com/datums.html>.
- 11. Lehtimäki, Aarre 2017. Suomalaista koneenpiirtämistä 1916–2016. Omakustannuspainos. Tampere: Crano Oy. Hakupäivä 20.4.2022. <https://docplayer.fi/70985492-Suomalaista-koneenpiirtamista.html>.
- 12. Mechanical Engineering Basics 2018. 3-2-1 Principle (Arresting Degrees of Freedom). Hakupäivä 27.12.2021. <https://basicstomechanicalengineering.blogspot.com/2018/09/3-2-1-principle-arresting-degrees-of.html>.
- 13. Keyence Corporation 2022. Common Datums and Datum Systems. Hakupäivä 11.11.2021. <https://www.keyence.com/ss/products/measure-sys/gd-and-datum/common.jsp>.
- 14. Faro 2021. GD&T in automotive assembly: using datum to locate surfaces. Hakupäivä 11.11.2021. <https://www.faro.com/en/Resource-Library/Article/gd-t-in-automotive-assembly-use-of-datum-targets-for-precision-location-of-large-surfaces>.
- 15. Momin, A.Y. 2019. Datum Precedence (Priority Sequence). Accurate Sales and Services Pvt. Hakupäivä 20.4.2022. <https://accuratesales.co.in/datum-precedence-priority-sequence/>.



18.5.2022 40

- 16. Six Sigma Material 2022. Cpk. Hakupäivä 7.1.2022. <https://www.six-sigma-material.com/Cpk.html>.
- 17. Tuurala, T. 2010. Prosessi, prosessiorganisaatio ja prosessin ohjaus. Laatuakatemia. Hakupäivä 7.1.2022. <http://www.kotiposti.net/tuurala/prosessit.htm>.
- 18. Karjalainen, Eero 2017. Prosessin ja työkoneen säätäminen ja asettaminen – Osa III. Quality Knowhow Karjalainen Oy. Hakupäivä 7.1.2022. <http://www.qk-karjalainen.fi/fi/artikkeilit/prosessi-osa3/>.
- 19. The Manufacturing Academy 2022. What's the Difference Between Cpk and Ppk? Hakupäivä 7.1.2022. <https://themanufacturingacademy.com/whats-the-difference-between-ckp-and-ppk/>.



Kiitoksia mielenkiinnostanne.