

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Lentokonetekniikka

Tutkintotyö

Veli-Matti Tourunen

KOMPOSIITTIOSIEN VALMISTUSTYÖVÄLINEIDEN MITTAUKSEN TUTKIMINEN

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2008

DI Simo Marjamäki
Patria Aerostructures Oy, valvojana DI Lauri Halme

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Lentokonetekniikka

Tourunen, Veli-Matti

Tutkintotyö

Työn ohjaaja

Työn teettäjä

Tammikuu 2008

Hakusanat

Komposiittiosien valmistustyövälineiden mittauksen tutkiminen
46 sivua + 11 liitesivua

DI Simo Marjamäki

Patria Aerostructures Oy, valvojana DI Lauri Halme

koordinaattimittaus, komposiittivalmistusmuotti, laserseurain

TIIVISTELMÄ

Komposiittisia lentokoneen osia valmistetaan pääasiassa metallisten työvälineiden avulla. Työvälineet mitataan ja tositetaan ennen niiden käyttöönottoa. Tässä tutkintotyössä tutkittiin Patria Aerostructures Oy:ssä käytössä olevia koordinaattimittauslaitteita sekä niiden käyttötapoja. Laitteita on kolme kappaletta, mekaaninen Leitz, mekaaninen Faro Arm sekä laserseurain Leica Tracker. Työssä keskityttiin pääasiassa Faro Arm:n ja Leica Trackerin käyttöön. Mittalaitteilla mitataan pääasiassa lentokoneteollisuuden komposiittiosien valmistusmuotteja, valmiita osia ja koneistuskiinnittimiä sekä jonkin verran myös metalliosia. Mittauksen tutkimista varten suoritettiin koemittauksia molemmilla laitteilla yhteensä neljä kappaletta. Koemittauksissa käytettiin komposiittisen siipikaaren metallista valmistusmuottia. Koemittauksen tarkoituksena oli selvittää ja kirjata erilaiset vaihtoehdot komposiittiosien ja niiden valmistusmuottien mittaamiseen. Koemittauksen tulokset kirjattiin ja niitä verrattiin toisiinsa. Yleisimmin käytetty tapa on mitata tuote ja siirtää mittaustulokset tietokoneeseen, jossa on Catia V5 -ohjelma. Catia V5:ssä tuloksena saatuja pisteitä voidaan verrata tuotteen 3D-malliin. Mittausmenetelmien kartoittaminen onnistui hyvin, ja nykyiset mahdollisuudet selvitettiin. Joitakin parannuksia löydettiin helpottamaan mittaustulosten käsittelyä ja uusia ideoita ehdotettiin tulevaisuuden kehitystyöhön.

TAMPERE POLYTECHNIC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCE

Mechanical and Production Engineering

Aeronautical Engineering

Tourunen, Veli-Matti

Engineering Thesis

Thesis Supervisor

Commissioning Company

January 2008

Keywords

Research of Measuring Composite Part Manufacturing Tools

46 pages, 11 appendices

Simo Marjamäki (MSc)

Patria Aerostructures Oy. Supervisor: Lauri Halme (MSc)

coordinate measuring, composite mould, laser tracker

ABSTRACT

Composite aircraft parts are mainly manufactured using metallic moulding tools. These tools have to be measured and verified before being used for production. This thesis was produced for Patria Aerostructures to introduce and clarify the methods used for taking and analysing the measurements. Patria Aerostructures has three different coordinate measuring machines: mechanical Leitz, mechanical Faro Arm, and laser tracker Leica Tracker. In this thesis Faro and Leica were used to complete four different test measurements. The results of the test measurements were recorded. In these measurements a steel mould of a composite wing rib was used. The main task was to analyse different measuring methods and improve the processing of the measured data. Each machine has two main methods to measure a part and process the data. The most commonly used method is to measure a part and transfer the data to a computer with Catia V5 software. In Catia V5 the data can be compared to the 3D-model of the measured part. The alternate way is to transfer the 3D-model to the measuring machine and compare the data during the measurement. The problems in measuring and differences between data processing methods were analysed and recorded. Some improvements were found to speed up the data processing and some new ideas were proposed for the future development of measuring.

ALKUSANAT

Olen tehnyt tämän tutkintotyön harjoitteluni ohella Patria Aerostructures Oy:ssä Tampereella. Tutkintotyöhön liittyviä käytännön asioita olen tehnyt Hallin tuotantolaitoksella. Harjoitteluajanani Patrialla olen osallistunut muun muassa EU-rahoitteiseen ALCAS-projektiin suunnittelijana. ALCAS (Advanced Low Cost Aircraft Structure) on useiden alihankkijoiden ja Airbusin yhteinen tuotekehitysprojekti, johon Patria suunnittelee ja valmistaa kaksi matkustajakoneen siipikaarta sekä niiden väliin tulevan moottorinkiinnityspalkin. Näiden kaarten valmistukseen käytettävät muotit mitataan Patrian mittalaitteilla ennen käyttöönottoa valmistuksessa. Työni alkuperäinen tarkoitus oli tutkia Patrian mittalaitteita ja valmistella ALCAS-muottien mittaus mahdollisimman helpoksi ja nopeaksi. Työn edetessä ALCAS-projekti jäi hieman sivummalle sen aikataulumuutoksista johtuen, ja aloin tutkia mittalaitteiden käyttöä yleisemmin. Saatuja tuloksia voitaneen hyödyntää yhtäläillä ALCAS-projektin mittauksissa kuin muissa jatkossa tehtävissä mittauksissakin. Kiitokseni työn onnistumisesta haluan esittää mittalaitteiden kanssa päivittäin työskenteleville Raimo Lehdolle ja Ismo Mörölle, työni valvojalle Lauri Halmeelle, työvälinesuunnittelija Pasi Valarannalle sekä Juha Halmeelle.

Tampereella tammikuussa 2008

Veli-Matti Tourunen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT.....	4
1 JOHDANTO.....	6
2 KOMPOSIITTIVALMISTUS JA MUOTTIEN VALMISTUS	7
2.1 Ilmailuteollisuuden komposiittivalmistustekniikat	7
2.1.1 Prepreg.....	7
2.1.2 RTM	8
2.1.3 Muut komposiittivalmistustekniikat.....	9
2.2 Muottien valmistus	12
3 PATRIALLA KÄYTÖSSÄ OLEVAT MITTALAITTEET	14
3.1 Faro Platinum Arm	15
3.2 Leica Tracker -laserseurain	17
3.3 Leitz-mittauskone	20
3.4 Mittalaitteiden tarkkuudet	22
3.5 Koordinaattimittauksen mittaustekniikkaa.....	22
3.5.1 Virhelähteet	23
3.5.2 Virhetarkastelu käytännön mittauksissa.....	24
4 KOEMITTAUSTEN SUORITUS.....	25
4.1 Tango-muotti	25
4.2 Mittaus Farolla.....	27
4.3 Mittaus Leicalla	29
4.4 Mittaustuloksen vertailu mittalaitteen tietokoneella.....	29
4.5 Mittauksissa esiintyneet ongelmat.....	31
4.6 Referenssipisteet.....	32
5 MITTALAITTEILTA SAATUJEN TULOSTEN KÄSITTELY.....	33
5.1 Tulosten käsittely siirtämällä mittausdata Catiiaan	33
5.1.1 Faro.....	33
5.1.2 Leica	34
5.2 Pistejoukon vertailu muottimalliin Catiassa.....	35
5.2.1 Pistejoukon kohdistus.....	35
5.2.2 Tuloksen tarkastelu.....	36
5.3 Tulosten käsittely siirtämällä malli mittalaitteen tietokoneelle.....	36
6 KOEMITTAUSTEN TULOKSET.....	37
6.1 Faron mittaustulokset	38
6.1.1 Tulosten vertailu Catiassa.....	38
6.1.2 Tulosten vertailu mittalaitteen tietokoneella	38
6.2 Leican mittaustulokset.....	39
6.3 Tulosten yhteenveto.....	40
7 TUTKIMUSTULOKSET.....	41
7.1 Toimintatapojen kartoitus.....	41
7.2 Mittausten ongelmat	42
7.3 Spline-tulos.....	43
7.4 Mittauspisteet	43
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	44
LÄHTEET	46
LIITTEET	

1 JOHDANTO

”Patria on kansainvälisesti toimiva puolustus- ja ilmailuteollisuuskonserni, joka toimittaa omaan erityisosaamiseensa ja kumppanuuksiin perustuvia, kilpailukykyisiä ratkaisuja asiakkailleen. Patrian omistavat Suomen valtio (73,2 %) ja European Aeronautic Defence and Space Company EADS N.V. (26,8 %).” /6/

”Aerostructures-liiketoiminta suunnittelee ja valmistaa vaativia, komposiittisia lentokone- ja avaruusrakenteita ja on aktiivisesti mukana uusien komposiittiteknologioiden kehittämisohjelmissa. Liiketoiminta toimittaa lentokonerakenteita Airbus A320- ja A380-matkustajakoneisiin, A400M-sotilaskuljetuskoneeseen sekä NH90-kuljetushelikopteriin.” /6/

Hallin tuotantolaitoksella käytetään komposiittiosien valmistukseen pääasiassa metallisia työvälineitä. Tässä työssä työvälineistä käytetään myös nimityksiä työkalu ja muotti. Työvälineet tilataan alihankkijoilta, jotka valmistavat ne Patrian tekemien 3D-mallien perusteella, ja ne mitataan ennen käyttöönottoa tehtaalla. Mittaamisella varmistetaan, että työväline on halutunlainen, eli sen tarkkuus riittää tuotannon tarpeisiin.

Patrialla on kolme mittalaitetta, joilla mitataan komposiitti- ja metalliosia ja niiden valmistustyövälineitä sekä koneistuskiinnittimiä. Käytössä olevia mittalaitteita ovat uudempaa kalustoa edustavat Faro Arm -mekaaninen koordinaattimittalaite ja Leica Tracker -laserseurain sekä vanhempi Leitz-koordinaattimittalaite.

Tutkin työssäni komposiittiosien valmistukseen käytettävien työvälineiden mittaamista. Keskityn lähinnä Faro Arm:lla ja Leica Trackerilla tehtyihin mittauksiin. Vertailen laitteiden ominaisuuksia ja tutkin, miten mittaustuloksia voidaan käsitellä ja hyödyntää eri laitteilla. Molemmille mittalaitteille on omat toimintatapansa, mutta lopulta mittaustulosten pitäisi ilmaista mittaajalle tai tulosten käsitteijälle samanlaisia tietoja.

Työn tavoitteena on tutkia mittalaitteiden käyttöä ja mittaustulosten käsittelyä sekä kirjata tulosten käsittelyn käytettävissä olevat vaihtoehdot.

2 KOMPOSIITTIVALMISTUS JA MUOTTIEN VALMISTUS

2.1 Ilmailuteollisuuden komposiittivalmistustekniikat

Komposiiteilla tarkoitetaan yleisesti kahden tai useamman aineen yhdistelmää, jossa aineet eivät ole lienneet toisiinsa. Materiaalit sitoutuvat toisiinsa muodostaen yhdistelmänä lujemman rakenteen. Teräsbetoni on hyvä esimerkki komposiitin periaatteesta. Muovikomposiitit ja kehittyneet komposiitit käsitetään kuitenkin tämän työn puitteissa varsinaisiksi komposiiteiksi. Muovikomposiitit eli lujitemuovit ovat yhdistelmäateriaaleja, jotka koostuvat yleensä kuitumaisesta lujitteesta ja kuidut toisiinsa sitovasta matriisiaineesta. Lujitemuoveissa käytetään useimmiten lujitekuituna lasikuitua ja kuituja sitovana matriisiaineena nimen mukaisesti muovihartsia. Edistyneet komposiitit ovat nopeasti yleistymässä muun muassa lentokoneteollisuudessa. Ne ovat pääasiassa hiilikuitulujitteista ja epoksihartsista valmistettuja lujia ja kevyitä rakenteita. /2/

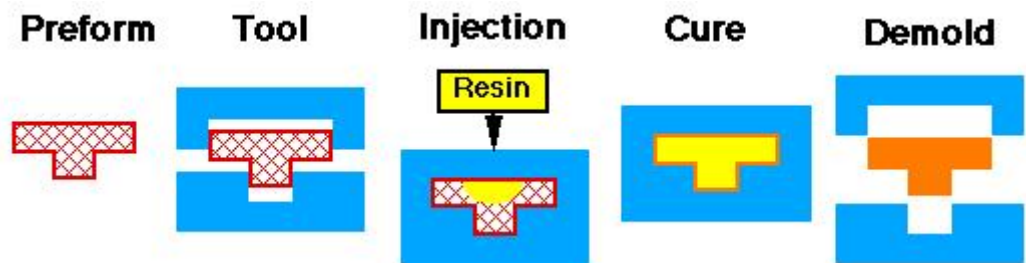
2.1.1 Prepreg

Prepreg-tekniikka on lentokoneteollisuuden käytetyin valmistusmenetelmä. Prepreg on puolivalmiste, jossa kertamuovihartsia on sidottu hiilikuituun. Puolivalmistekerrokset ladotaan yksipuoliseen muottiin, joka peitetään alipainesäkillä. Lämpötilaa nostettaessa hartsi muuttuu nestemäiseksi ja kastelee kuidut. Lämpötilan edelleen noustessa hartsi kovettuu ja muodostaa kuitujen kanssa kiinteän yhdisteen. Prepreg-materiaalien kovetukseen käytetään autoklaavia, jossa paine nostetaan 6-7 bariin ja lämpötila noin 180 °C:een. Ilmailuteollisuudessa prepregillä valmistetaan yleisimmin pintapaneeleita ja muita laakeita rakenteita.

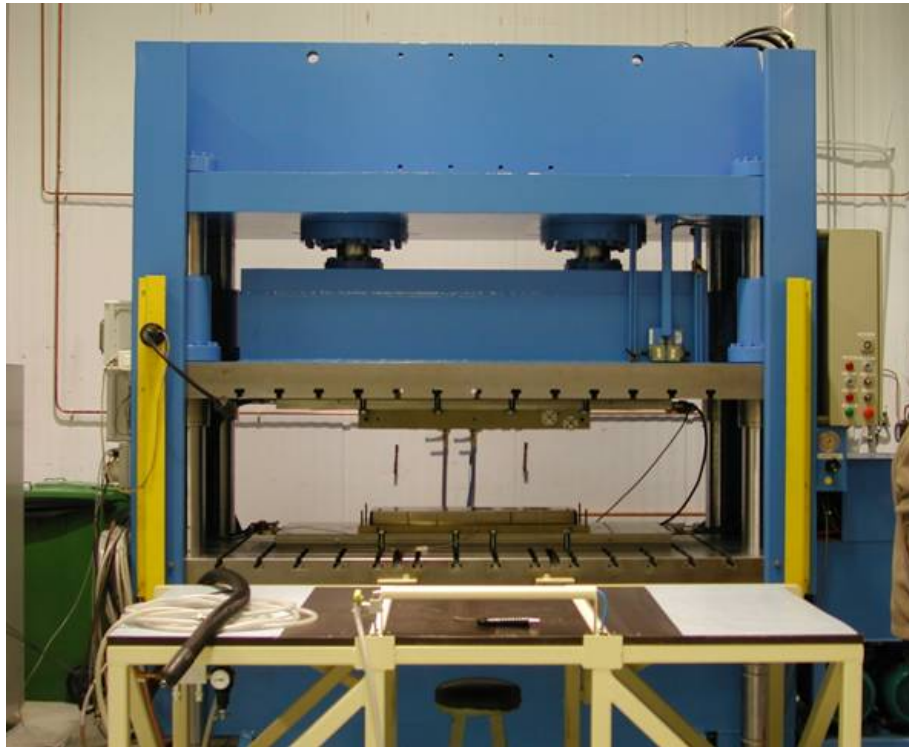
Prepreg-valmistuksen etuja ovat laminaateilla saavutettava korkea kuitupitoisuus (yli 60 % tilavuudesta), hyvä lujuus/paino-suhde, tasalaatuisuus sekä yksipuolisella muotilla saavutettava kustannussäästö. Haittoja ovat kalliit materiaalit, korkea materiaalihukka sekä autoklaavin korkeat käyttökustannukset.

2.1.2 RTM

RTM on nopeasti yleistynyt komposiittivalmistustekniikka lentokoneteollisuudessa. Resin Transfer Moulding (RTM) eli paineinjektio perustuu nestemäisen hartsin infusoimiseen kuiviin lujitteisiin paine-eron avulla. Valmistuksessa käytetään kaksipuolisia suljettuja muotteja. Ennen hartsin lisäystä lujitteet muokataan muottiin sopivaksi (Preform) (kuva 1). Muokkaus voidaan tehdä usealla eri tavalla, mutta yleisimmin käytetään ns. pressformingia eli puristusmuovausta, jossa lujitteet muovataan varsinaisissa muoteissa lämmittämällä ja puristamalla. Tämän jälkeen muotit suljetaan puristimella (Tool) (kuva 1; 2). Muottiin johdetaan paineen avulla nestemäistä hartsia, joka kastelee lujitekuidut (Injection) (kuva 1). Muotin lämpötilaa nostetaan, jolloin hartsi kovettuu (Cure) (kuva 1). Muotin ja osan jäähtyttyä muotti avataan ja valmistettu osa irrotetaan (Demold) (kuva 1). Yleisesti valmistetaan osia, joilla on monimutkainen geometria ja joihin kohdistuu korkea kuormitus. RTM-tekniikalla valmistetun laminaatin paksuustoleranssi on 0,05–0,25 mm:n luokkaa. /2/



Kuva 1 RTM-valmistuksen vaiheet /2/



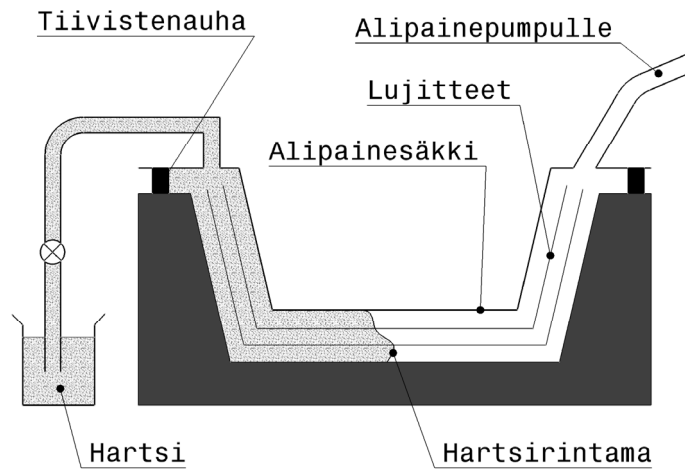
Kuva 2 Patrian RTM-puristin, jossa muotit kiinnitettynä paikoilleen /2/

2.1.3 Muut komposiittivalmistustekniikat

Komposiittivalmistustekniikoita on useita ja niissä käytettäviä materiaaleja ja näiden yhdistelmiä on lähes rajaton määrä. Tässä työssä ei ole tarpeellista käsitellä jokaista valmistusmenetelmää yksityiskohtaisesti, vaan esitellä yleisimmin käytössä olevat menetelmät ja ne, joita hyödynnetään ilmailuteollisuudessa.

VRI

Vacuum Resin Infusion (VRI) tarkoittaa alipaineinjektiota, jossa käytetään yksi-puolista muottia. Lujitteet asetellaan käsin muotin päälle ja muotti suljetaan alipainesäkillä. Alipainesäkkiin liitetään hartsinsyöttölinja ja alipainelinja. Alipaineen avulla hartsi imetään muotin sisään, jolloin se kastelee kuitupakan (kuva 3). Hartsin liikkumista voidaan tehostaa ylipaineella hartsinlinjan puolella. Alipaineinjektiossa kovetus voidaan tehdä huoneenlämmössä, uunissa tai autoklaavissa. Säkkimuovin sijaan voidaan käyttää puolikovaa muottia, joka parantaa kappaleen toisen muottipinnan laatua. Alipaineinjektion käyttöä tutkitaan ja kehitetään koko ajan ja sen uskotaan osittain korvaavan märkälaminointia. /2; 8/



Kuva 3 Alipaineinjektio /8/

RFI

Resin Film Infusion (RFI) eli hartsikalvoinjektio on valmistusmenetelmä, joka muistuttaa alipaineinjektioita. Hartsikalvoinjektiossa lujitteet ladotaan yksipuoliseen muottiin ja lujitteiden väliin kiinteässä muodossa olevat hartsikalvot. Muotti suljetaan alipainesäkillä ja kovetetaan uunissa tai autoklaavissa kuten prepreg-osat. Hartsikalvoinjektioilla voidaan valmistaa myös kerroslevyjä laittamalla kuitujen väliin ydinainetta, jolla voidaan keventää ja jäykistää kappaletta. Ydinaineet ovat yleisimmin solumuoveja. Parempaa mittatarkkuutta haluttaessa voidaan käyttää myös kaksipuolista muottia. Hartsikalvoinjektioita käytetään jonkin verran ilmailuteollisuudessa, mutta sen käyttö on edullista vain laakeille ja yksinkertaisille kappaleille. /2; 8/

Märkälaminointi

Märkälaminointi on perinteinen komposiittivalmistustekniikka, jossa kuidut ja sideaineet levitetään muottiin käsin. Lujitteet kostutetaan levittämällä juoksevaa hartsia siveltimellä tai telalla. Ilma poistetaan hartseista ja kuitujen välistä telaamalla, yleensä jokainen kerros yksitellen. Laminoitu tuote voidaan kovettaa vapaasti muotissa huoneenlämmössä tai tehostamassa kovettumista alipainesäkillä. Käyttämällä alipainesäkkiä laminaatin kuitupitoisuus saadaan paremmaksi ja huokoisuutta vähennettyä verrattuna vapaaseen kovettamiseen. Märkälaminoinnissa kustannukset ovat melko alhaiset, mutta työn määrä on suuri. Valmiissa tuotteessa on vain

yksi sileä pinta ja kappaleen laatuun vaikuttaa merkittävästi työntekijän ammattitaito. Märkälaminointi on yleisin laminaattien korjausmenetelmä. Ilmailuteollisuudessa märkälaminointia käytetään vain erikoistapauksissa. /2; 8/

Kelaus

Kuitukelaus on avomuottimenetelmä, jolla valmistetaan sylinterimäisiä ja kartiomaisia kuorirakenteita. Kuitukelauksessa kuidut johdetaan hartsialtaan kautta pyörivälle muotille. Kun riittävä ainevahvuus on saavutettu, annetaan kappaleen kovettua huoneenlämmössä tai se siirretään kovetusuniin. Kertamuovipohjainen kappale voidaan valmistaa myös puolivalmisteesta eli prepregistä, jolloin lopputulos on parempi ja prosessi siistimpi kuin märkälauksessa. Kelausta käytetään ilmailussa putkirakenteiden ja pienkoneiden runkojen valmistamiseen. /2; 8/

Pultruusio

Pultruusio eli suulakeveto on profiilien ja putkien jatkuvatoiminen valmistusmenetelmä. Pultruusiossa vedetään lujitekuituja lämmitettävän suulakkeen läpi. Ennen suulaketta kuidut kulkevat juoksevan hartsin läpi. Suulakkeella kovetetaan tuote ja kontrolloidaan sen hartsipitoisuutta. Suulake toimii muottina ja antaa kappaleelle sen lopullisen muodon. Muotin loppuosassa suoritetaan tarvittaessa jäähdytys, jotta tuote kovettuu ja se kestää vetolaitteiston voiman. Prosessi voidaan automatisoida ja tuotantonopeus voi olla parhaimmillaan useita metrejä minuutissa. Yleisimmin nopeus on kuitenkin 0,5 – 2 m/min. /2; 8/

ATL ja FP

Automated Tape Laying (ATL) eli automaattinen teipinlevitys ja Fibre Placement (FP) eli automaattinen kuitujen laminointi ovat melko yleisiä ilmailuteollisuuden valmistusmenetelmiä. Molemmissa materiaalina käytetään puolivalmisteita eli prepregejä. Laminointi tapahtuu automaattisesti ohjelmoitavalla koneella. Laminoinnin jälkeiset työvaiheet vastaavat normaalia prepreg-valmistusta. /2; 8/

2.2 Muottien valmistus

Komposiittiosien valmistuksessa käytetään paljon erilaisia työvälineitä. Tässä työssä käsitellään ensisijaisesti laminointi- sekä koneistustyövälineitä. Komposiittiosien muottien suunnitteluun vaikuttavia suunnitteluparametreja ovat muun muassa kustannukset, mittatarkkuus, lämpölaajeneminen, lämmönjohtavuus, kovetuslämpötila, sarjasuus, muottipaine sekä muotin paino ja jäykkyys. Työvälineiden valmistus on tehtävä tarkasti, koska se vaikuttaa suoraan valmistettavien osien laatuun. Työvälineen valmistustoleranssien olisi hyvä olla korkeintaan kolmasosa valmistettavan tuotteen toleranssista. Aina tähän tavoitteeseen ei päästä pienten valmistustoleranssien vuoksi. Jokainen työväline tulee tosittaa, eli mitata, tarkastaa ja dokumentoida ennen käyttöönottoa ja käytön aikana määräjain. /9/

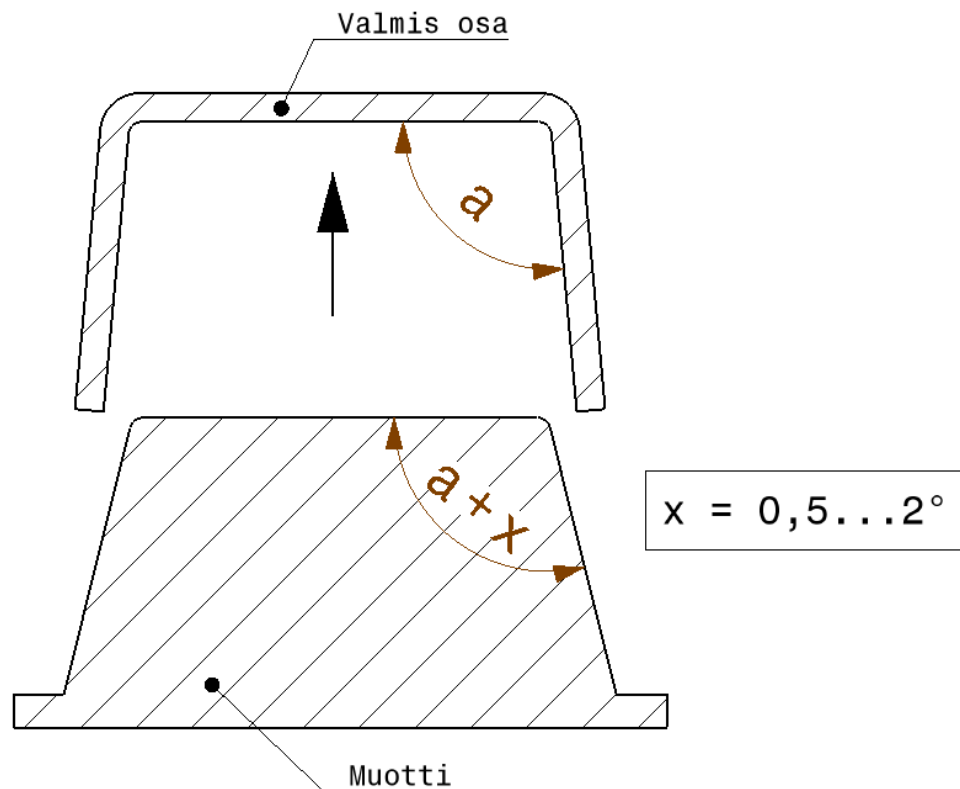
Muottien kustannukset ovat suuri osa valmistuksen kustannuksia, koska niiden koneistaminen on erittäin kallista ja valmistuserät ovat usein pieniä. Laminointimuotti antaa valmiille kappaleelle suoraan pinnalaadun ja muodon. Muotin on oltava tiivis erityisesti prepreg-valmistuksessa, jossa muotti suljetaan alipainesäkillä. Jäykkyys on olennainen osa muottia, koska jos muotti taipuu, valmistettavan kappale tai sen osa ei pysy muototoleranssin sisällä. Tasaista lämmönjohtavuutta tarvitaan, koska muotin ja kappaleen pitää lämmitä tasaisesti autoklaavissa. Epätasainen lämpeneminen aiheuttaa muotin vääntymisen lisäksi hartsin kovettumisen erilailla eri kohdissa tehden kappaleesta epätasalaatuisen. Korkean lämpötilan valmistustekniikoilla lämpölaajeneminen pitäisi olla muotilla ja valmistettavalla kappaleella mahdollisimman lähellä toisiaan, jotta lopputuloksena saadaan mahdollisimman pienet mitamuutokset valmiiseen kappaleeseen. /2; 8/

Materiaalivaihtoehtoja muottien valmistukseen on useita mutta prepreg- ja RTM-valmistukseen tarvittavat muotit valmistetaan yleisesti metallista. Myös komposiittista valmistettuja muotteja käytetään jonkin verran. Hiilikuituvahvisteisten kertamuovimuottien käytössä etuina ovat lähes sama lämpölaajenemiskerroin kuin valmistettavalla osalla sekä muottien keveys ja nopea lämpeneminen. Muita muottimateriaaleja ovat useat pinnoitetut metallit, eri tavoilla valmistetut kertamuovit ja keraamit.

Teräkset ja alumiinit ovat yleisimmät muottimateriaalit korkean lämpötilan valmistustekniikoissa. Suurilla muottipaineilla ja sarjoilla tapahtuvassa valmistuksessa alumiinin pinnan pehmeys rajoittaa sen käyttöä. Alumiinia käytetään edullisen hintansa vuoksi usein pienten sarjojen prototyypimuoteissa. Alumiinin lämpölaajenemiskerroin on korkea, tyypistä riippuen $24\text{--}25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. /2/

Suurilla muottipaineilla ja suurilla valmistussarjoilla teräs on toimivin materiaali. Teräsmuotin kestävyys on erittäin hyvä ja huollon tarve pieni. Myös mittatarkkuus on hyvä. Teräksen lämpölaajenemiskerroin on kohtalainen, $12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Suuren tiheyden johdosta muotin massa nousee helposti epäkäytännöllisen suureksi. Suuri massa aiheuttaa myös pitkän lämmitysajan, jolloin autoklaavikustannukset nousevat korkeiksi. Teräsmuottien työstö on hidasta ja kallista, joten muottien toimitusajat ja kustannukset kasvavat helposti huomattavan suuriksi. /2/

Komposiittiosan suunnitteluvaiheessa siitä tehdään 3D-malli, joka vastaa haluttua lopullista tuotetta. 3D-mallille tehdään spring-back-analyysi eli arvioidaan, kuinka paljon osan muoto muuttuu kovetuksen aikana lämpötilanvaihteluiden vuoksi. Spring-back eli takaisinjousto aiheutuu hartsin kutistumisesta kovetuksen eli kuumennuksen ja jäähtymisen aikana. Esimerkiksi C-mallisen siipikaaren laipat taipuvat sisäänpäin $0,5 \dots 2$ astetta. Taipumiskulman selvittämiseksi on kehitetty laskentamenetelmiä, joissa analysoidaan kappaleen käyttäytymistä kovetuksen ja jäähtymisen aikana. Spring-back-analyysin jälkeen kappaleelle tehdään muottimalli, joka on myös 3D-malli. Muottimallissa otetaan huomioon kovetuksessa tapahtuva muodonmuutos. Näin ollen muottimalli ja osan malli eivät ole identtiset (kuva 4). Spring-backin suuruus vaihtelee valmistettavan osan ominaisuuksien mukaan. Näitä ominaisuuksia ovat muun muassa ainevahvuus, valmistustapa ja kappaleen muoto. Muottimalli lähetetään alihankkijalle, joka koneistaa muotin mallin mukaan. Koneistus tehdään normaalissa CNC-koneistuskeskuksessa. Koneistettujen RTM-muottien muototoleranssina on käytetty $\pm 0,1 \text{ mm}$. Prepreg-muottien muototoleranssi on tyypillisesti ollut $\pm 0,25 \text{ mm}$ /9/. Valmiiden prepreg-osien muototoleranssin yleisvaatimuksena on käytetty $\pm 1 \text{ mm}$:ä /9/.



Kuva 4 Spring-backin huomioiminen muotin suunnittelussa

3 PATRIALLA KÄYTÖSSÄ OLEVAT MITTALAITTEET

Patrialla on kolme mittalaitetta, joilla mitataan tuotteiden valmistukseen käytettäviä työkaluja sekä valmiita tuotteita. Mittalaitteet ovat koordinaattimittalaitteita, jotka poikkeavat perinteisistä mittausvälineistä kolmiulotteisen mittausalueensa vuoksi. Mittalaitteita ovat Faro Platinum Arm, Leica laser tracker sekä Leitz-mittauskone. Tässä työssä käytetään laitteista nimityksiä Faro, Leica sekä Leitz.

Koordinaattimittalaitteiden mittaustapahtuma on kaksijakoinen eli se sisältää mitaustiedon keräämisen ja käsittelyn. Laitteilla mitataan kappaleen geometria yksittäisten mittauspisteiden perusteella. Koordinaattimittalaitteiden mittaustulos ilmoitetaan pisteinä kolmiulotteisessa koordinaatistossa. /7/ Koordinaatisto luodaan mitattavassa kappaleessa olevien kohdistusreikien avulla. Mittaustuloksia verrataan kappaleen valmistuksessa käytettyyn kolmiulotteiseen CAD-malliin.

Mittalaitteiden tietokoneille malleja siirrettäessä on tiedostomuotona IGES. IGES on neutraali tiedostomuoto, jolla voidaan siirtää tietoa helposti eri CAD-ohjelmien välillä. IGES (Initial Graphics Exchange Specification) sisältää ainoastaan pisteitä, viivoja sekä pintoja. IGES:iin ei voi sisällyttää ns. solidimuotoja. Faron mittaustulosten siirrossa Catiaan käytetään myös IGES-muotoa.

3.1 Faro Platinum Arm

Faro Platinum Arm 3D-mittalaite on kiinteään alustaan kiinnitettävä ”käsivarsi”, jossa on kuusi akselia, kolme taittoa ja kolme kiertoa (kuva 5). Mittalaite voidaan asettaa siirrettävälle jalustalle tai kiinteälle pöydälle. Kiinnitys tapahtuu magneetin avulla.



Kuva 5 Faro Platinum Arm -mittalaite



Kuva 6 Faron mittapää, jossa 3 mm:n pallo

Mittapäänä on pallo, joita on saatavilla erikokoisia. Patrialla on käytössä halkaisijaltaan 3 mm:n ja 6 mm:n pallot (kuva 6). Mittalaitteen osana on tietokone, jolla laitteen toimintoja ohjataan ja tuloksia käsitellään. Mittaaminen tapahtuu liikkuttamalla mittapäätä käsin haluttuun kohteeseen ja painamalla nappia mittalaitteen varressa, jolloin pallon keskipisteen koordinaatit tallentuvat tietokoneelle. Mittalaitteen jokaisessa akselissa on liikeanturi, joka mittaa nivelen liikkeitä. Näistä liiketiedoista tietokone laskee mittapään liikkeitä ja ilmoittaa sen koordinaatit.

Ennen mittauksen aloittamista on tietokoneelta valittava oikea mittaustapa. Mittaustapoja on useita ja valinta tehdään halutun mittaustuloksen mukaan. Käytetyimmät mittaustavat ovat olleet reikien koon ja keskipisteen mittaaminen, kappaleen ulkomittojen mittaaminen sekä pintojen skannaaminen. Esimerkiksi reikää mitattaessa mitataan ensin muutama piste reiän sisäpinnoilta ja yksi piste reiän sisäpuolelta koskettamatta reunoja. Seuraavaksi mitataan muutama piste pinnalta jolle keskipiste halutaan. Mittapääksi valitaan yleensä 6 mm:n pallo, mutta reikiä mitattaessa usein joudutaan valitsemaan 3 mm:n pallo, jotta se mahtuu reiän sisälle. Suurempi pallo ei ole yhtä herkkä pinnankarheudesta aiheutuville virheille kuin pieni.

Nurkkapisteiden mittauksessa mittauspisteet sijoitetaan nurkkaa ympäröiville tasoisille. Kappaleiden nurkkapisteiden paikat voidaan mitata tarkasti vaikka nurkka

olisikin pyöristetty tai terävin kärki muuten kulunut. Farolla voidaan myös skanna-
ta pintoja ottamalla useita pisteitä pinnalta. Pinnan skannaustulokseksi voidaan va-
lita pelkkien pisteiden lisäksi myös jatkuva viiva, joka kulkee mittauspisteiden
kautta. Mittaustulokset tallennetaan IGES-muotoon, jota voidaan käsitellä Catialla.

Faron mittatarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa:

- yksittäiselle pisteelle $\pm 0,061\text{mm}$
- lineaariselle mittaukselle $\pm 0,086\text{mm}$. /4/

Käytännön mittauksissa tarkkuus on mittaajien kokemuksen mukaan kuitenkin
 $\pm 0,1\text{ mm:n}$ luokkaa /3/.

Faron mittausetäisyys on rajallinen nivelöidyn varren pituuden vuoksi, mutta siir-
tämällä laitetta ja ottamalla kiinteä siirtopiste voidaan mittausta jatkaa varren ulot-
tuvuuden loppuessa. Kappaleen muoto ei rajoita mittausta juurikaan, koska Faron
varsi taipuu pieniinkin koloihin.

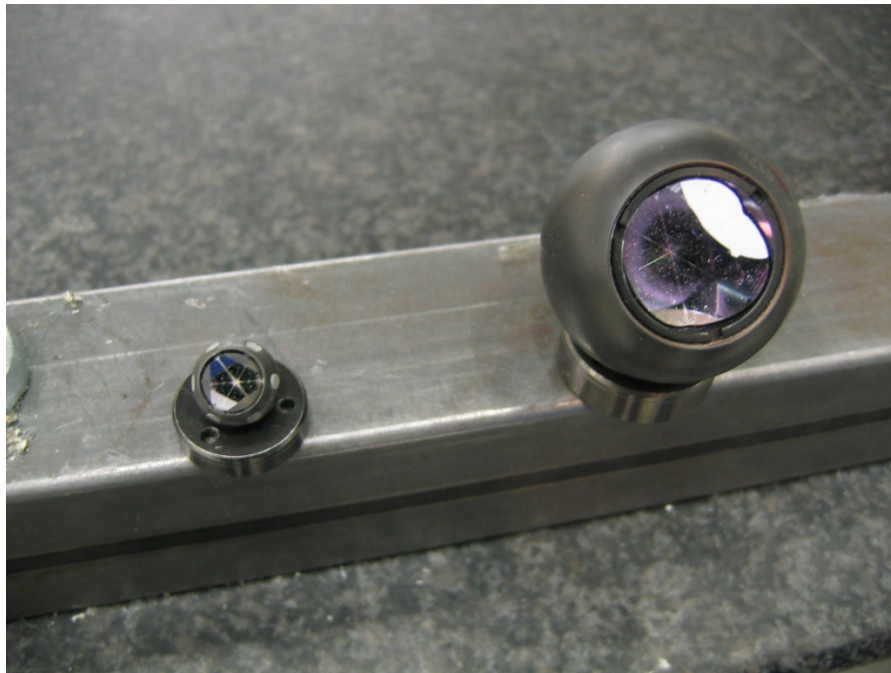
3.2 Leica Tracker -laserseurain

Leican valmistama laser tracker on laserlähettimellä ja vastaanottimella varustettu
lattialla seisova mittalaite ja siihen liittyvä mittapää (kuva 7). Mittalaitteessa on
pyörät, joten sitä on melko helppo liikutella. Mittapää on irtonainen pallo, jonka si-
sällä on kolme peiliä. Peilit muodostavat avonaisen prisman, joka heijastaa mitta-
laitteesta tulevan lasersäteen suoraan takaisin mittalaitteen vastaanottimeen. Mitta-
laitteen laserlähetin/vastaanotin kääntyy $\pm 235^\circ$ horisontaalisesti ja $\pm 45^\circ$ vaaka-
akselinsa ympäri /5/. Lasersäde seuraa palloa niin kauan, kun säteen tiellä ei ole es-
teitä.



Kuva 7 Leica laser tracker -mittalaite

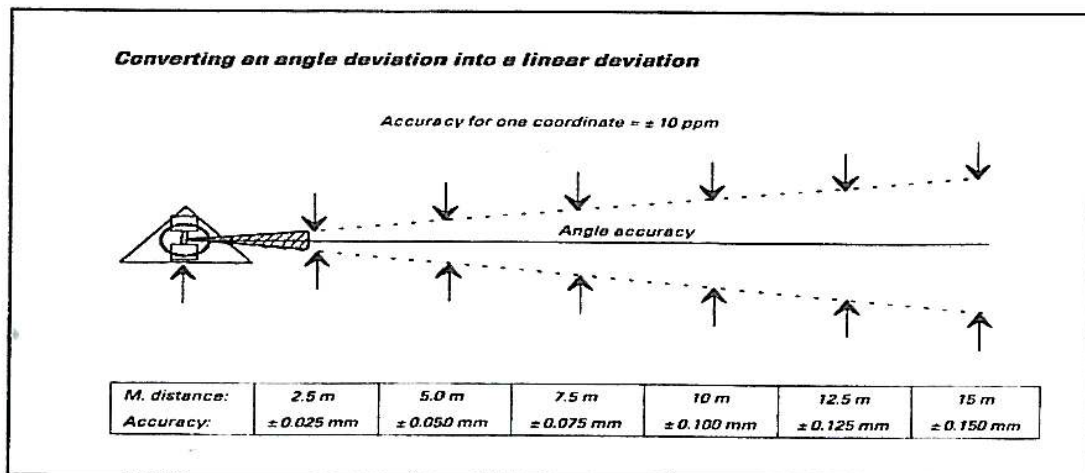
Mittalaite laskee etäisyyden palloon sekä pallon sijainnin koordinaatit. Palloa liikuttellaan käsin mitattavan kappaleen pinnalla niin, että lasersäde pääsee koko ajan vapaasti kulkemaan pallon ja mittalaitteen välillä. Mittalaitteella saadaan mittauspisteitä talteen yksitellen ohjaamalla tietokonetta kaukosäätimen avulla. Pintoja skannattaessa voidaan tietokone asettaa ottamaan mittauspisteitä tasaisin välein. Silloin palloa liikutellaan mitattavaa pintaa pitkin. Palloja on olemassa erikokoisia. Patrialla käytössä olevat mittapääpallot ovat halkaisijoiltaan 1,5” ja ½” eli 38,1 mm ja 12,7 mm (kuva 8).



Kuva 8 Leican mittapääpallot halkaisijoiltaan 1/2" ja 1,5"

Olosuhteiden vaikutus ja valmistajan ilmoittama tarkkuus

Leican mittaustulokseen vaikuttaa ilmavirtaus. Jos ilma liikkuu voimakkaasti laserlähettimen ja mittapään välillä on saatu tulos epäluotettava. Laite varoittaa automaattisesti liian kovasta ilmavirtauksesta, jolloin mittaus kyseisessä kohdassa on uusittava. Näin ollen mittauspaikassa ei saa olla voimakasta ilmanvaihtoa. Leicaan voidaan etukäteen asettaa mittauspaikan lämpötila. Tätä ominaisuutta tarvittaneen, jos mittauspaikan lämpötila poikkeaa huomattavasti normaalista + 20 °C:sta. Patrialla mittalaite on pääsääntöisesti käytössä vain lämpimissä sisätiloissa, joten edellä mainittua ominaisuutta ei yleensä tarvitse käyttää. /3/ Leican tarkkuus valmistajan mukaan heikkenee lineaarisesti etäisyyden kasvaessa eli on suoraan verrannollinen mittausetäisyyteen: 2,5 m -> ± 0,025 mm, 5 m -> ± 0,05 mm, 7,5 m -> ± 0,075 mm ja niin edelleen (kuva 9). /5/



Kuva 9 Leican tarkkuus /5/

Leican mittausetäisyys on enimmillään noin 30 m, mutta mittausepävarmuus kasvaa liikaa pidemmillä etäisyyksillä, joten mittaukset tulisi tehdä mahdollisimman lähellä mittalaitetta.

Leicalla ei voi mitata pieniä koloja, eikä mitään, mihin ei ole suoraa esteetöntä yhteyttä laserlähettimeltä, mutta lisäpeilin avulla voidaan mitata pienten esteiden taakse, kuten uloimman nurkan koordinaattien määrittämisessä.

3.3 Leitz-mittauskone

Leitz-mittauskone on koordinaattimittalaite, jossa on hieman vanhanaikainen ohjelmisto ja ohjausjärjestelmä (kuva 10). Sitä käytetään enää vain tarkimpien mittausten suorittamiseen. Mittauskoneen tulos voidaan ilmoittaa joko kuvana tai numeerisena tietona ilmoittamalla mittauspisteiden koordinaatit. Toistuvia mittauksia varten voidaan mittauskone ohjelmoida, jolloin mittaus voidaan suorittaa automaattisesti. /7/



Kuva 10 Leitz-mittauskone on sijoitettu huoneeseen, jossa on vakio-olosuhteet.

Joidenkin mitattavien kappaleiden toleranssit ovat niin pienet, että joudutaan vielä käyttämään Leitz-mittauskoneita muiden laitteiden mittatarkkuuden ollessa liian huono. Mittausepävarmuuden ja toleranssin suhde tulisi olla vähintään 1/3 eli mittalaitteesta johtuva mittausepävarmuus olisi kolmasosa vaadittavasta toleranssista. Leitzin tarkkuus on valmistajan mukaan yhden akselin suuntaisessa mittauksessa $\pm (1,5 + L / 300) \mu\text{m}$ ja tilavuuden eli useamman akselin suuntaisessa mittauksessa $\pm (2,2 + L / 250) \mu\text{m}$. Edellä mainituissa arvoissa L on mittauspituus millimetreinä. /7/ Käytännön mittauksissa epävarmuudet ovat mittaajien kokemuksen perusteella noin kaksinkertaiset valmistajan ilmoittamiin verrattuna. Esimerkiksi yksittäisten reikien mittauksessa päästään parempaan tarkkuuteen, jos verrataan samalla kertaa mittaustulosta kalibroituun mittarenkaaseen, jolloin nähdään koneen senhetkinen virhe, joka voidaan ottaa tuloksessa huomioon. /3/

Leitz mittauskoneella mitataan nykyään enimmäkseen metalliosia ja työvälineitä. Mittauskoneen mittausalueen koko on 1800 x 1000 x 600 mm /7/. Tämä rajoittaa mitattavien kappaleiden kokoa. Toinen rajoittava tekijä on mittalaitteen pöydän kantavuus. Suurin pöydälle sallittu massa on 1000 kg /7/. Muissa Patrian mittalaitteissa mitattava kappale voidaan sijoittaa tarvittaessa lattialle, mutta Leitzissä mit-

taus on aina tehtävä laitteen kivipöydällä. Mittalaitteen valinta tehdään usein sen perusteella, mikä laite on saatavilla. Suurimmat tuotteet mitataan Leicalla, jonka mittausulottuvuudet ovat erittäin laajat. Eli jotkin suurikokoiset parempaa tarkkuutta vaativat kappaleet joudutaan kappaleen ulkomittojen tai massan vuoksi ja tarkkuudesta tinkien mittaamaan Leicalla.

Mittauskone edustaa jo hieman vanhentunutta tekniikkaa, ja suurin osa mittauksista suoritetaan uudemmalla käyttäjäystävällisemmällä kalustolla, joten tässä työssä Leitz-mittauskoneen käsittely jätetään vähemmälle.

3.4 Mittalaitteiden tarkkuudet

Jokaisella mittalaitteella on valmistajan ilmoittamat tarkkuudet, mutta käytännön mittauksissa niihin tarkkuuksiin ei yleensä päästä (taulukko 1). Käytännön mittauksissa laitteen valmistajan ilmoittama tarkkuus saavutetaan vain, jos mittausolosuhteet ovat ihanteelliset. Näin ei kuitenkaan aina ole. Mittausepävarmuus kasvaa yleensä hieman olosuhteiden ja mittaustapahtuman virheistä johtuen. Faron ja Leican mittaustarkkuuteen mitattavan tuotteen koko ei juuri vaikuta, mutta Leitzissä epävarmuus kasvaa kappaleen mittojen myötä. Taulukossa 1 on Leitzin mittatarkkuudet ilmoitettu noin 1000 mm pituisen mittauksen arvoina.

Taulukko 1 Mittalaitteiden tarkkuudet millimetreinä /3; 4; 5; 7/

	Faro	Leica	Leitz
Valmistajan ilmoittama tarkkuus	$\pm 0,086$	$\pm 0,05$ (5 m)	$\pm 0,006$
Mittauksissa yleisesti saavutettu tarkkuus	$\pm 0,1$	$\pm 0,05$ (5 m)	$\pm 0,012$

3.5 Koordinaattimittauksen mittaustekniikkaa

Tärkein asia muottien mittaamisessa on varmistaa, että muottia pystytään käyttämään valmistuksessa. Muotista tarvitaan pääasiassa vain tieto, että valmistettavasta osasta saadaan halutunlainen. Muottien mittausta tehdään sen vuoksi, että tarkaste-

taan muotin käyttökelpoisuus. Ei ole tarkoitus kaikin keinoin etsiä pienimpiäkin virheitä vaan varmistaa, että oleelliset mitat täyttyvät halutuilla toleransseilla.

3.5.1 Virhelähteet

Koordinaattimittauksessa virhelähteitä ovat muun muassa /1/

- mittaaja
- lämpötilaerot ja lämpölaajeneminen
- ilmavirtaus
- kappaleen kiinnityksestä aiheutuvat muodonmuutokset ja liikkuminen
- kappaleen pinta, karheus, pehmeys ja lika
- mittapään lika tai kuluneisuus
- laitteen muodonmuutokset
- laitteen kalibrointi
- koneen ohjelmisto.

Lämpötilaerot ja lämpölaajeneminen vaikuttavat merkittävästi erityisesti suurten metallikappaleiden mittaustulokseen. Kappaleen koneistus ja mittaus tulisi tapahtua samassa lämpötilassa, joka yleensä onkin normaali huoneenlämpö.

Mittauksen aikana kappale ei saa liikkua, joten kiinnitys on tehtävä huolellisesti. Pitkien, ohuiden ja laakeiden tai muuten taipuisien kappaleiden mittauksessa on huolehdittava riittävästä tuennasta ja siitä, että mittalaitteella koskettamalla kappaletta ei muuteta sen muotoa.

Pinnankarheus, likaisuus ja kappaleen pehmeys vaikuttavat tulokseen jonkin verran samoin kuin mittapään likaisuus tai kuluneisuus.

Farossa mittalaitteen varsien muodonmuutokset voivat aiheuttaa virhettä, toisin kuin Leicassa, jossa mittapään ja laitteen välillä ei ole mekaanista yhteyttä. Leicassa sitä vastoin ilmavirtaus mittapään ja laitteen välillä aiheuttaa jonkin verran virhettä. Mittalaitteen tietokone näyttää suuremmat ilmavirtauksen vaikutukset ja kertoo milloin tarkkuus heikkenee liikaa. /3/

3.5.2 Virhetarkastelu käytännön mittauksissa

Mittausta suunniteltaessa mittalaitteen valinnassa mittaustekniikan kannalta ensimmäinen asia on mittaasepävarmuuden ja mittaustoleranssien suhde. Periaatteena on, että mittaasepävarmuus olisi korkeintaan kolmasosa mittaustoleranssista /9/. Tähän suhteeseen ei aina päästä johtuen mitattavan tuotteen erityisen pienistä toleransseista. Niissä tapauksissa on pohdittava asiaa myös siltä kannalta, onko tarpeellista käyttää niin pieniä toleransseja, jos millään mittalaitteilla ei päästä riittäviin tarkkuuksiin. Yleisesti toleranssit määrittyvät toiminnallisista vaatimuksista, kuten osien vaihtokelpoisuudesta, kokoonpanosta ja asennusjännityksistä. Jos vaaditaan erittäin pieniä toleransseja, joihin ei käytössä olevien mittalaitteiden tarkkuudet riitä, tulisi mittaukset suorittaa tarkemmalla kalustolla muualla tai hankkia sellainen. Tarkemman laitteiston hankinta ei kuitenkaan ole järkevä vaihtoehto, koska tällaiset tapaukset ovat jokseenkin harvinaisia.

Patrialla tehtävissä mittauksissa otetaan virhetarkastelu huomioon jo toleranssien määrittelyvaiheessa. Valmistetun tuotteen toleranssi jaetaan yleisesti kolmeen osaan. Ensimmäinen osa on työvälinettä eli tässä tapauksessa muottia varten. Toinen osa jätetään tuotteen valmistukselle. Jäljelle jäävä kolmasosa sisältää muut virhelähteet, joihin muun muassa mittalaitteiden virhe kuuluu. /9/

Faro ja Leica pystyvät mittaamaan pisteen noin 1000 kertaa sekunnissa. Yksittäisiä pisteitä mitattaessa ne mittaavat jokaisen pisteen yli 100 kertaa, joten laitteesta johtuvan satunnaisen virheen mahdollisuus on melko pieni. Satunnainen virhe voi aiheutua mittaustapahtumasta. Molemmissa mittalaitteissa voi ilmetä systemaattista virhettä, mutta sen tutkiminen voi olla vaikeaa, koska varsinaista vertailutietoa ei ole. Tulosten vertailua voidaan tehdä, mutta hyväksyttävää vertailukohtaa ei ole, koska ainoat mittaustulokset ovat Farolla ja Leicalla mitattuja. Vertailumittauksia voitaisiin tehdä myös Leitzillä, joka on muita tarkempi, mutta tässä tapauksessa se ei ole tarkoituksenmukaista. Absoluuttista mittaustulosta ei ole olemassa, ja jos molempien mittalaitteiden tuloksia verrataan 3D-malliin, on virheen arvioinnissa oltava kriittinen, koska koneistuksen toleranssi on myös otettava huomioon. Tässä korostuukin mittalaitteiden kalibrointi ja huolto määrättyin väliajoin.

4 KOEMITTAUSTEN SUORITUS

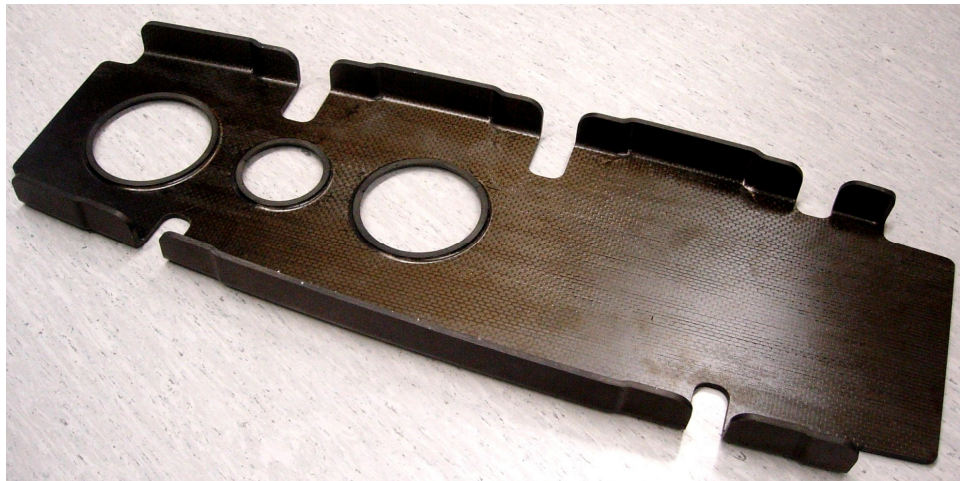
4.1 Tango-muotti

Koemittauksiin valittiin Hallin tuotantolaitoksen varastosta löytyvä RTM-muotti. Muottia on käytetty ALCAS:ia edeltäneessä TANGO-tuotekehitysprojektissa. TANGO-projektin siipikaaren numero 14 lopullinen versio valmistettiin kyseisellä muotilla (kuva 11; 12). Kaaren valmistukseen on käytetty sekä uros-, että naaras-muottia, mutta mittauksiin valittiin pelkkä urosmuotti ja sen 3D-malli (kuva 13), koska sen todettiin antavan riittävästi tietoa koemittauksissa.

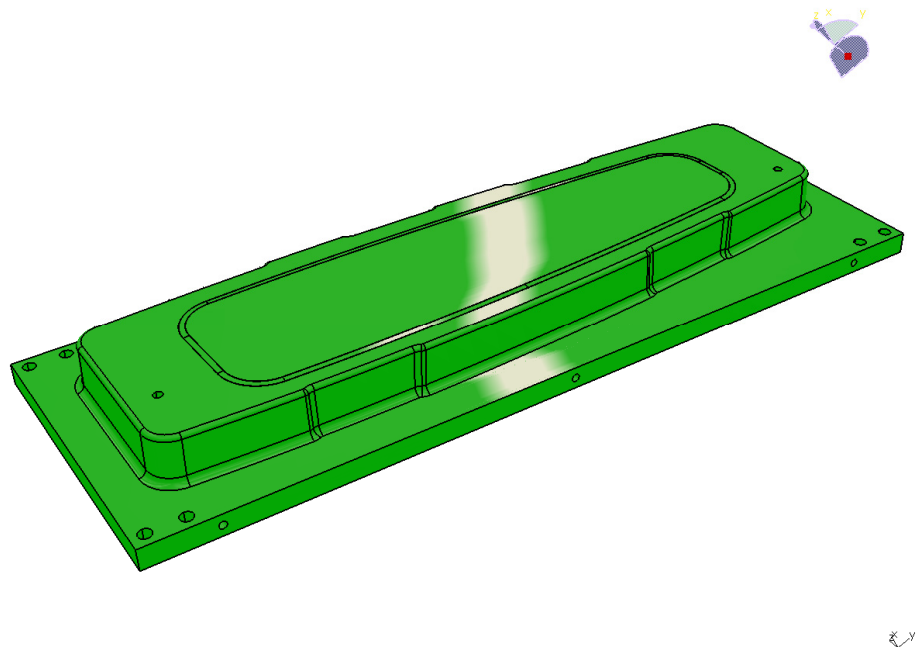


Kuva 11 TANGO-projektin siipikaaren numero 14 urosmuotti

Muotti on koneistettu teräsaihiosta ja siinä on tasainen reunapinta, jossa on kahdeksan muotin kiinnitysreikää. Rei'istä uloimmaisista käytettiin mittauksen kohdistuspisteinä. Muotin uuman pinnalla on kaksi tappia, joilla luodaan referenssipisteet valmistettavaan osaan. Nurkissa olevilla ohjaustapeilla kohdistetaan uros- ja naarasmuotit toisiinsa.

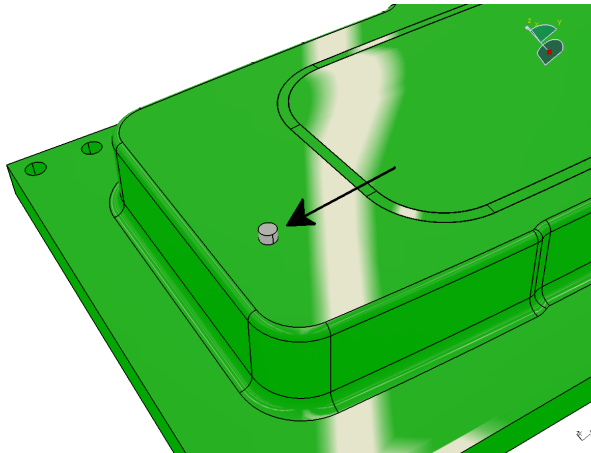


Kuva 12 TANGO-projektin siipikaari numero 14



Kuva 13 TANGO-projektin siipikaaren numero 14 urosmuottimalli muottipinnan puolelta

Mittauksia suoritettiin neljä kappaletta, kolme Farolla ja yksi Leicalla. Mitattiin siipikaaren uumaa ja laippoja vastaavat pinnat sekä kohdistuspisteet tasopinnalta. Joissakin mittauksissa otettiin mukaan myös muotin kohdistustappien paikat uuman pinnalta (kuva 14).



Kuva 14 Muotin referenssipiste

4.2 Mittaus Farolla

Muottipintojen mittauksessa käytettiin skannausta. Skannaus tapahtuu siten, että mittapäätä kuljetetaan käsin mitattavaa pintaa pitkin ja mittalaite mittaa pisteitä tasaisin välein (kuva 15). Mittauspisteiden etäisyyden toisistaan voidaan valita vapaasti. Tätä työtä varten tehdyissä koemittauksissa pisteiden etäisyydeksi oli ennen mittausta valittu 2 mm. Mittauspisteiden todellinen etäisyys toisistaan vaihteli 2 mm:stä noin 15 mm:iin. Yleisin etäisyys oli kuitenkin hieman yli 2 mm. Etäisyyden vaihtelu johtuu mittapään liikuttelunopeudesta, eli mittalaite ei pysty mittaamaan samaa pistettä tarpeeksi useaan kertaan, jos mittapää liikkuu liian nopeasti.

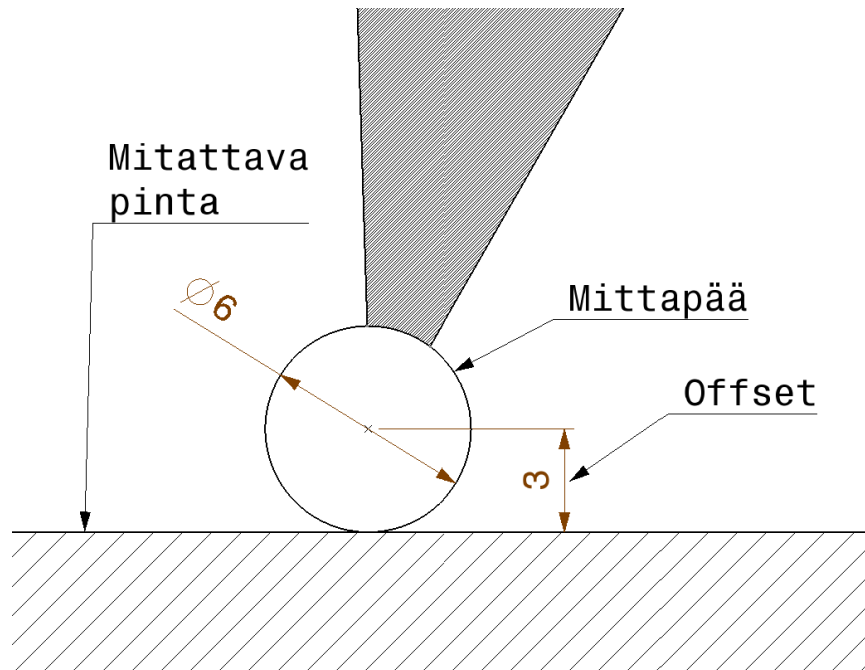


Kuva 15 Muottipinnan skannausta Farolla

Ensimmäisessä mittauksessa tuloksen muodoksi valittiin spline-viiva, joka on peräkkäisten mittauspisteiden kautta kulkeva jouheva viiva. Viivoja saatiin yhteensä seitsemän kappaletta. Muottipintojen lisäksi mitattiin muotin nurkissa ja uuman pinnalla olevien kiinnitysreikien sekä muottien kohdistustappien paikat, joista tulokseksi saatiin kuusi ympyrää. Mittaustulos tallennettiin IGES-muotoon, joka voidaan avata ja käsitellä Catialla.

Toisessa mittauksessa tuloksen muodoksi valittiin pistejoukko. Mittaus suoritettiin samalla tavalla kuin spline-viivaa tuloksena käytettäessä eli skannattiin pintoja ja mitattiin kohdistuspisteiden paikat. Tässä tapauksessa kaikki pisteet olivat tuloksena saadussa tiedostossa yksittäisinä elementteinä. Pisteitä tuli yhteensä noin 5000 kappaletta ja lisäksi kuusi ympyrää. Tuloksena saatua tiedostoa avatessa esiintyi pieni ongelma pistejoukon mittasuhteiden kanssa, mutta ongelma korjattiin tuloksia käsitellessä. Ongelmasta ja sen korjaamisesta kerrotaan enemmän myöhemmissä luvuissa.

Mittaustuloksissa tulee mukaan offset eli poikkeama, joka on 1,5 mm tai 3 mm riippuen mittapään koosta (kuva 16). Poikkeama voidaan ottaa huomioon jo mittausvaiheessa, mutta silloin virheen suunnan arvioinnissa saattaa esiintyä ongelmia.



Kuva 16 Mittapääpallon halkaisijan vaikutus mittaustulokseen

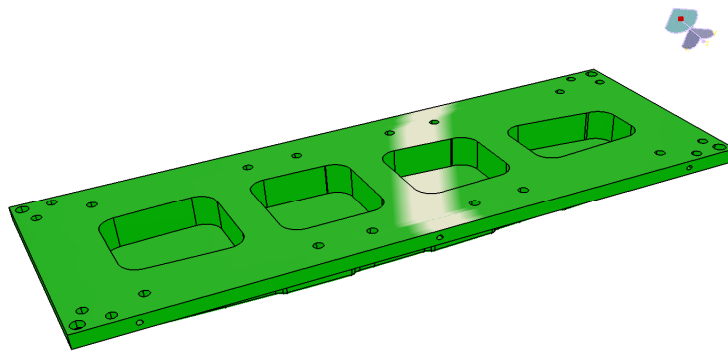
4.3 Mittaus Leicalla

Siipikaaren numero 14 urosmuotti mitattiin Leica Trackerilla samaan tapaan kuin Farollakin. Muotin pintoja skannattiin liikuttelemalla mittapalloa muotin pintaa pitkin. Mittaustulos saatiin MS Excel -tiedostona. Tiedostossa on aluksi neljän kohdistuspisteen koordinaatit ja sen jälkeen noin 5000 pisteen koordinaatit. Koordinaatit on ilmoitettu X-, Y- ja Z-suunnasta millimetreinä kolmen desimaalin tarkkuudella. Myös Leican mittauksessa tulokseen tulee mukaan offset, joka on puolet mittapallon halkaisijasta eli 6,35 mm tai 19,05 mm (kuva 16). Koemittauksessa pallon halkaisija oli 1/2" eli offset oli 6,35 mm.

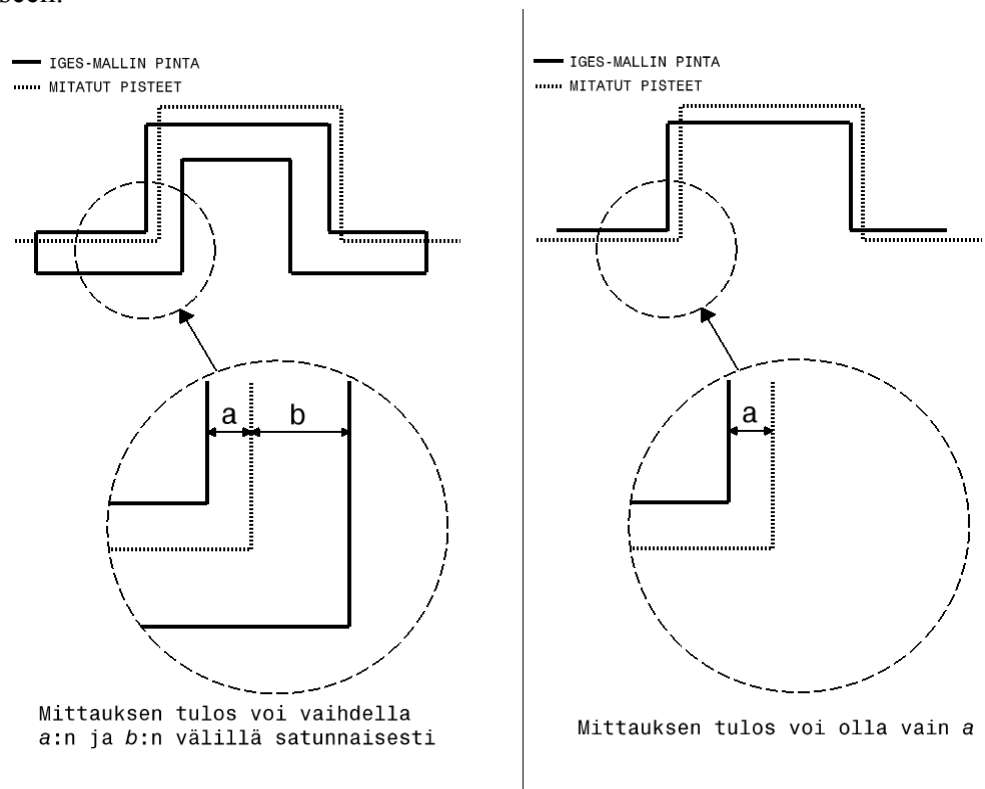
4.4 Mittaustuloksen vertailu mittalaitteen tietokoneella

Farolla ja Leicalla voidaan tehdä vertailua mittaustulosten ja mallin välillä suoraan mittalaitteen tietokoneella. Mitattavasta kappaleesta on ensin tehtävä IGES-pintamalli ja siirrettävä se mittalaitteen tietokoneelle. Mittalaite vertailee mittaustu-

losta suoraan IGES-malliin ja antaa tuloksen heti. Faron mittaustulos saadaan taulukossa, joka voidaan tallentaa tai tulostaa ja Leicasta tulos saadaan ulos tulosteena, jossa värit kertovat mittauspisteiden etäisyyden mitattavasta pinnasta. Leican tulosteeseen on valittavissa erilaisia esitystapoja. IGES:n olisi oltava mahdollisimman yksinkertainen. Jos mallissa on muita kuin mitattava pinta, voi mittaus olla virheelinen (kuva 17). Jos mittauspisteen lähellä on kaksi pintaa, ei mittalaite osaa valita niistä oikeaa, vaan mittaustulos voi vaihdella a:n ja b:n välillä (kuva 18).



Kuva 17 Muotin pohjassa olevat kevennyskolot voivat aiheuttaa virhettä mittaukseen.

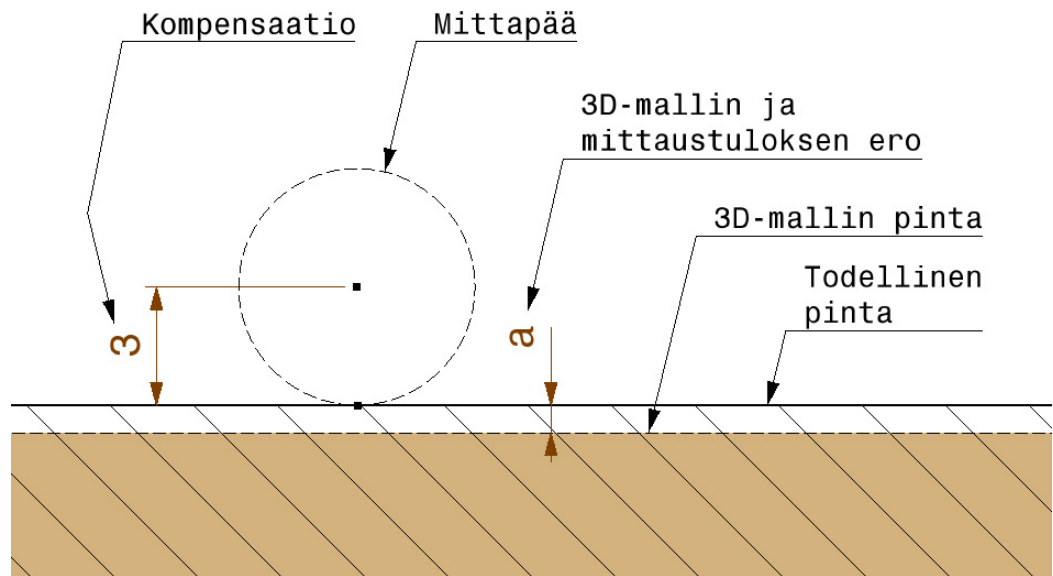


Kuva 18 Periaatteellinen leikkauskuva mahdollisesta virheestä mittalaitteiden tietokoneilla tapahtuvassa vertailussa

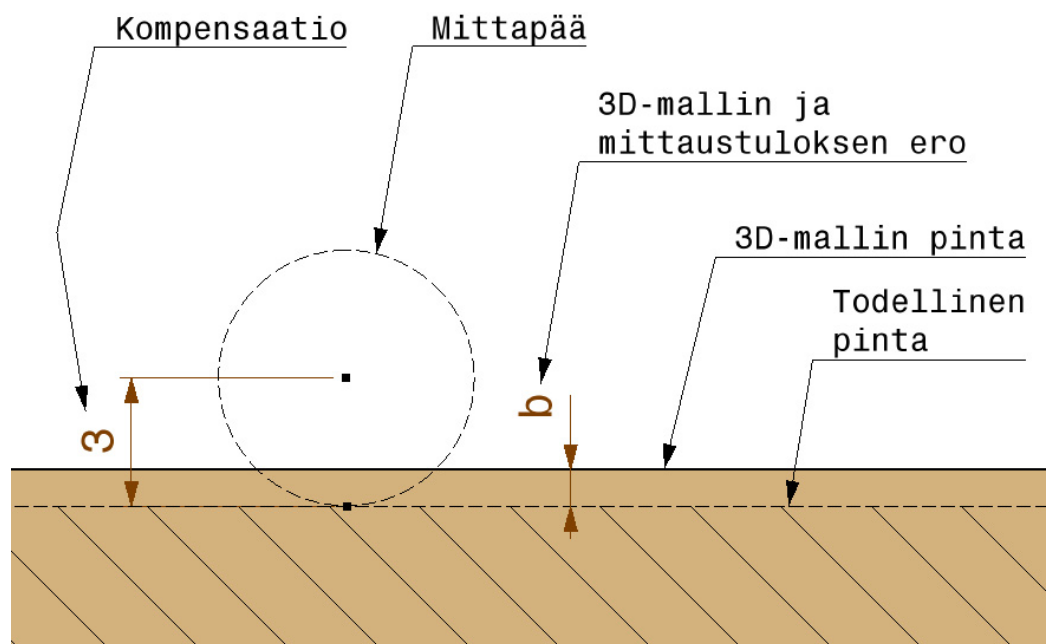
4.5 Mittauksissa esiintyneet ongelmat

Faron mittaustuloksessa esiintyy ongelma, jota ei ole voitu estää, mutta se voidaan helposti korjata. Mittaustuloksena saatava pistejoukko muuttuu Catiiaan siirrettäessä 25,4-kertaiseksi eli mitä ilmeisimmin millimetrit muuttuvat tuumiksi. Ongelma esiintyy täysin satunnaisesti, eli ilmeisesti kyseessä on ohjelmiston virhe. Ei ole varmuutta, onko virhe Faron ohjelmistossa vai Catiassa. Faron valmistaja on kommentoinut, että vika ei voi olla Farossa vaan sen täytyy olla Catiassa. Patrian henkilöstön mielipide on, että vika on todennäköisemmin Farossa kuin Catiassa. Tämän ongelman tarkempaan selvittämiseen ei riittänyt aikaa tässä tutkintotyössä. Muutuneet mittaustulokset voidaan muokata käyttökelpoisiksi Catiassa, joten ongelma ei ole suuri. Tätä ongelmaa on korjattu skaalaamalla tulos mallin kanssa samankokoiseksi eli $1/25,4$ -kertaiseksi. /3; 9/

Pienempi ongelma esiintyy käytettäessä mittauspisteen kompensatiota. Faro pysyy ottamaan huomioon mittapään offsetin, eli se ilmoittaa mittauspisteen suoraan oikealla pinnalla. Joskus mittaustuloksesta on vaikea arvioida muutoksen suuntaa. Otettaessa mittaustulos ilman kompensatiota on suunta helpommin havaittavissa. Odotettu arvo on esimerkiksi 3 mm:n offsetilla 3 mm ja jos mitattava piste on odotetun pisteen yläpuolella, on tulos $3 \text{ mm} + a$ (kuva 19). Jos piste on alapuolella, mittaustulos on $3 \text{ mm} - b$ (kuva 20). Toisin sanoen, mittaustuloksesta vähennettäessä mittapääpallon säde, saadaan negatiivinen tai positiivinen tulos. Negatiivinen tulos tarkoittaa, että piste on odotetun pinnan alapuolella. Tuloksen ollessa positiivinen on piste odotetun yläpuolella. Jos käytetään kompensatiota, on muutoksen suunta vaikea havaita vertailukohtana olevan pinnan ja tuloksena saadun pisteen välillä, varsinkin jos muutos on verrattain pieni. Ongelman välttämiseksi olisi parempi ilmoittaa mittaustulos ilman kompensatiota ja laskea mittaustulos ja muutoksen suunta jälkeenpäin.



Kuva 19 Kompensaation vaikutus *a*



Kuva 20 Kompensaation vaikutus *b*

4.6 Referenssipisteet

Referenssipisteet ovat muottimalliin ja muottiin sijoitettavia kiinteitä pisteitä, joita käytetään vertailukohtana muotin mittaustuloksen ja muotin 3D-mallin vertailussa. Referenssipisteillä mittaustulos ja 3D-malli kohdistetaan. Referenssipiste on yleensä muottiin tehty standardikokoinen reikä, johon mittalaitteen holkki sopii (liite 1).

Pisteitä on 3-4, ja ne voivat olla joko muotissa tai valmiin kappaleen koneistuskiinnittimessä.

Referenssipisteet tulisi sijoittaa epäsymmetrisesti muottiin tai kappaleeseen. Jos mitattava kappale on symmetrinen ja myös referenssipisteet on sijoitettu symmetrisesti, saattaa mittaustuloksena saatava pistepilvi kääntyä väärinpäin ja antaa väärän tuloksen pisteiden vertailusta. /9/

Referenssipisteiden paikassa ei yleensä ole merkittävää heittoa, mutta joskus niiden paikoitus saattaa poiketa jonkin verran suunnitellusta. Usein pisteen paikassa tapahtuva virhe on porauksen syvyydessä. Vaihteluita esiintyy usein levystä taivutetuissa muoteissa, jossa porauksen jälkeinen taivutuksen muuttuminen aiheuttaa virheen. Se saattaa joskus aiheuttaa ongelmia mittaustulosten vertailussa Catia-malliin. Näin ollen mittaustuloksena saatava pistepilvi sijoittuu eri kohtaan kuin Catia-mallin pinnat, eikä toleransseissa pysytä. Muotin pinta saattaa olla toleranssien sisällä, mutta se sijoittuu vertailussa väärään kohtaan. Tätä virhettä voidaan tutkia Catiassa ja tarvittaessa hieman muuttaa referenssipisteiden paikkaa jälkikäteen, jolloin muottia ja mallia voidaan verrata paremmin toisiinsa. Tämä korjaus on tehtävä erityisen varovasti, ettei virheellistä työvälinettä oteta käyttöön valmistuksessa. Korjauksen tekemistä on käsitelty tarkemmin seuraavassa luvussa. /9/

5 MITTALAITTEILTA SAATUJEN TULOSTEN KÄSITTELY

5.1 Tulosten käsittely siirtämällä mittausdata Catiaan

5.1.1 Faro

Faron mittaustulos tallennetaan IGES-muotoon, jota voidaan käsitellä helposti Catiassa. Ensimmäisestä mittauksesta saatu IGES-tiedosto sisälsi seitsemän spline-viivaa ja kuusi ympyrää. Spline-viivat koostuivat noin 5000 pisteestä, joiden kautta viivat kulkivat. Viivoilla ei ole varsinaista käyttötarkoitusta, mutta siinä olevien pisteiden etäisyyttä muottimallin pinnasta voidaan mitata Catian mittaustyökalulla. Spline-tuloksen käsittely on nopeampaa, ja koska elementtejä on vain muutama

verrattuna pistejoukon tuhansiin pisteisiin, joiden käsittely vaatii paljon enemmän koneen kapasiteettia. Tiedosto, jossa on vain muutama spline-viiva, on paljon selkeämpi ja nopeampi liikutella Catiassa. Splinessa olevien pisteiden etäisyyksiä mallin pinnasta voidaan mitata yhtä hyvin kuin pistejoukon pisteitäkin

5.1.2 Leica

Vaihtoehto yksi

Patrian tietokoneista, joihin on asennettu Catia, löytyy pisteiden siirtoon tarkoitettu tiedosto. Tiedosto on Excel-tiedosto, jonka osoite on:

`C:/opt/catia/v5r14/intel_a/code/command/GSD_PointSplineLoftFromExcel.xls`.

Tämä tiedosto sisältää makron, jolla siirto voidaan tehdä. Ennen siirtoa on Catiaan avattava uusi Part tai haluttu malli, johon pisteitä verrataan. Pisteet kopioidaan Excel-tiedostoon. Sen jälkeen ajetaan makro. Valitaan Tools -> Macro -> Macros ja vaihtoehtoista Main ja Run. Tämän jälkeen valitaan numero yksi, joka valitsee pelkät pisteet. Tiedostojen siirto voi kestää useita minuutteja. Seuraavaksi on tehtävä koordinaatistojen luonti ja siirrettävä malli ja mittaustulokset kohdakkain. Pisteiden kohdistus on kuvattu kappaleessa 5.2.1.

Vaihtoehto kaksi

Tuloksena saadusta Excel-tiedostosta kopioidaan mittauspisteiden koordinaatit ja liitetään ne esimerkiksi tyhjään Notepad-tekstitiedostoon. Valitaan Catiaan Reverse Engineering -lisenssi RE2, jolla voidaan tuoda pistepilviä Catia-malleihin. Valitaan Start -> Shape -> Digitalized Shape Editor. Sen jälkeen valitaan työkalu Import Cloud ja työkaluun edellä tehty tekstitiedosto. Seuraavaksi Catia muuttaa tekstitiedostossa olevat koordinaatit pistepilveksi.

Pistepilvi tulee Catiaan yhtenä joukkona, jota on hankala käsitellä. Tähän ongelmaan löytyy ratkaisu, joka on Split-työkalu. Sillä voidaan jakaa pilvi halutunlaisiksi pienemmiksi pilviksi. Pienemmät pilvet voidaan ottaa tietyn muottipinnan kohdalta ja irrottaa pinalappu Extract-työkalulla. Pinalappua ja sitä vastaavaa pistepilveä voidaan verrata toisiinsa RE2-lisenssistä löytyvällä Distance Analysis -työkalulla. Distance Analysis näyttää pisteiden ja pinnan minimi- ja maksimietäisyydet.

syydet. Analyysistä saadaan tarvittaessa jonkinlainen graafinen värillinen kuva etäisyyksien vaihteluista. Tapa on melko hankala ja vie paljon aikaa. Jos tähän menettelytapaan löytyisi jokin tapa päästä valitsemaan suurempia pinta-alueita kerralla, saattaisi tulosten esittäminen olla selkeämpää.

5.2 Pistejoukon vertailu muottimalliin Catiassa

5.2.1 Pistejoukon kohdistus

Erittäin tärkeä asia mittaustuloksia käsiteltäessä on pistejoukon oikea paikka. Mittaustuloksessa ja 3D-mallissa on referenssireikien paikat, joiden pitäisi olla täysin samassa kohdassa. Reikien paikassa on aina jonkin verran virhettä, mutta joskus niiden paikassa esiintyy selvästi havaittavaa poikkeamaa. Mittaustulokset kohdistetaan referenssireikien avulla ja ne ovat oikeastaan ainoa keino paikoittaa mittaustulos 3D-malliin. Varsinaiset mittaustulokset ovat täysin riippuvaisia referenssipisteistä. Jos referenssipisteen paikka poikkeaa mittatuloksen referenssipisteiden paikasta olennaisesti, menee koko mittaustulos väärään kohtaan 3D-mallissa ja tulokset vääristyvät. Näin ollen mittaustuloksen perusteella mitattu työväline on käyttökelvoton. Nykyisen käytännön mukaan tulosjoukon paikkaa voidaan hieman siirtää, jos näyttää siltä, että referenssireiät eivät ole täysin kohdallaan. Siirto voidaan tehdä, jos kaikki referenssireiät ovat siirtyneet. Jos vain yksi reikä on pois paikaltaan, ei korjausta voida suorittaa. Tulosjoukon siirrossa on oltava erittäin varovainen ja kriittinen, ettei korjata käyttökelvottoman työvälineen mittaustulosta siten, että työväline olisi käyttökelpoinen. /9/

Referenssireikien paikkaa ja pistejoukkoa voidaan kohdistaa Catiassa seuraavalla tavalla. Kopioidaan 3D-mallin tiedostoon mittaustulokset ja luodaan uusi Geometrical Set. Luodaan pisteet kolmeen referenssipisteeseen (liite 2). Tämän jälkeen luodaan uudet pisteet samoihin kohtiin ja asetetaan koordinaatit nollassa (liite 3). Pisteisiin, joissa on nollakoordinaatit, luodaan koordinaatisto (liite 4). Mittaustulokseen luodaan myös koordinaatisto vastaaviin pisteisiin ja kohdistetaan malli ja mittaustulos Axis To Axis -työkalulla (liite 5; 6; 7). Seuraavaksi mitataan mittaustuloksen pisteiden etäisyyksiä 3D-mallin pinnasta (liite 8). Jos mittaustulos on selkeästi siirtynyt pois oikeasta kohdasta, voidaan nollakoordinaattipisteiden paikkaa

muuttaa ja näin asettaa mittaustulos oikeaan kohtaan. Jos mittaustulosjoukkoa joudutaan kohdistamaan siirtämällä koordinaatistoa, on jokaisen siirron jälkeen tehtävä riittävä määrä mittatarkastuksia. /9/

5.2.2 Tuloksen tarkastelu

Kun mittaustulos on kopioitu mitatun tuotteen 3D-malliin ja kohdistettu referenssipisteiden avulla, sille tehdään varsinainen mittaustuloksen tarkastelu. Tarkastelua on nykyisen tavan mukaan tehty valitsemalla riittävän monia pisteitä, joiden etäisyyttä mitattavasta pinnasta on mitattu Catian mittaustyökalulla. Pisteiden valinta on tehty sattumanvaraisesti, mutta kuitenkin järkevästi ottaen huomioon pintojen vaihtelukohdat. Eli sileiltä pinnoilta on valittu hieman vähemmän pisteitä kuin esimerkiksi kohdista, joissa kappaleen paksuus vaihtelee tai joissa on kulmien pyöristyssäteitä. Mittaustulos näkyy Catiassa pisteen etäisyyden pinnasta ja mittapäällön säteen summana, johtuen mittalaitteen lisäämästä pallon offsetista. Tuloksen poikkeama ja sen suunta halutusta pinnasta on helppo havaita vähentämällä offset Catian mittaustuloksesta.

5.3 Tulosten käsittely siirtämällä malli mittalaitteen tietokoneelle

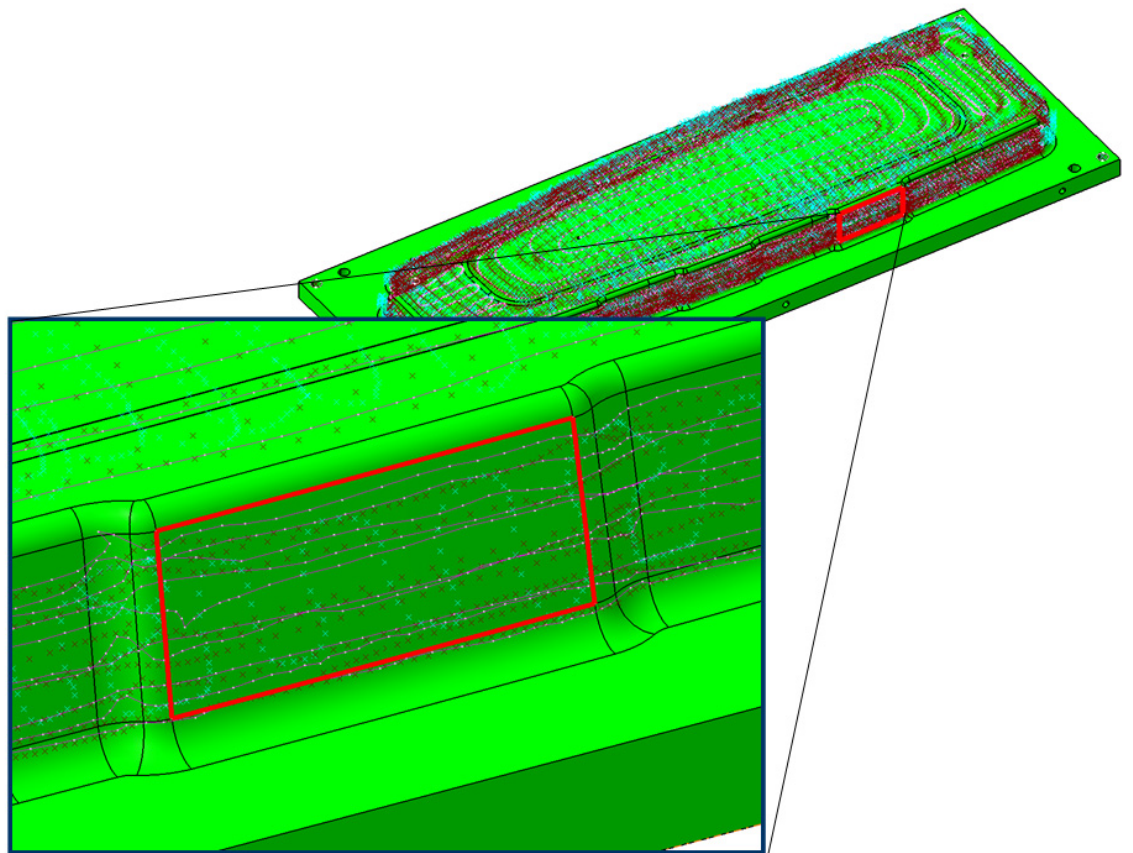
Faron Catia-malli voidaan siirtää IGES-muodossa. Faron ohjelma muuntaa IGES-mallin FCM-tiedostoksi. FCM on Faron oma CAD-tiedostomuoto, jota se käyttää mittauksissa. Nykyisellään Faron siirrettävissä tiedostoissa on ollut joskus ongelmia pintamallin pintojen vääristymisen vuoksi. Pintojen määrä vaikuttaa mallin käyttäytymiseen olennaisesti. Mitä useammasta osasta mitattavan mallin pinta on muodostunut, sitä todennäköisempää on, että tulos vääristyy. Koemittauksissa käytetystä siipikaaren muottimallista siirrettiin muottipinta, joka oli Catiassa yksi monimuotoinen pinta. Faro muuttaa pinnan pieniksi lapuiksi, joista osa oli hävinnyt tiedostotyyppiä muuttaessa tai tiedostonsiirrossa. Faron ohjelmistoon on näillä näkymin tulossa kääntäjä, jolla voidaan muuttaa Catian solidimalleja (esimerkiksi CATPart) Faron FCM-tiedostoksi.

Leican tietokoneelle voidaan siirtää myös IGES-malli, joka sisältää vain pintoja. Mallin monimutkaisuuden suhteen Leicaan pätee sama sääntö kuin Faron. Eli mi-

tä vähemmän pintoja mallissa on, sitä helpompi on mittaustuloksia käsitellä. Työn koemittauksissa oli tarkoitus verrata mitattuja pisteitä IGES-malliin Leican tietokoneella, mutta mallin siirto ei onnistunut, vaan tietokone kaatui aina kun tiedostoa yritettiin avata. Tämä osoitti, kuinka epävarma kyseinen mittaustapa toimintansa puolesta on.

6 KOEMITTAUSTEN TULOKSET

Koemittauksia tehtiin Hallissa yhteensä neljä kappaletta, kolme Farolla ja yksi Leicalla. Laitteiden mittaustuloksia verrattiin toisiinsa valitsemalla muotin laipalta noin 100 x 60 mm suuruinen alue, jolta kirjattiin kaikki tulokset (kuva 21). Tuloksista selvitettiin suurimmat ja pienimmät arvot sekä keskiarvot. Tulosten vertailu oli melko vaikeaa, koska jokaisessa mittauksessa pisteet olivat eri kohdissa ja niiden määrässä oli huomattavan suuria eroja. Koemittausten tuloksista nähdään suurpiirteisesti mittalaitteiden eroja, mutta tarkempaa vertailua ei kannata tehdä todellisen vertailukohdan puuttuessa sekä erojen mahtuessa laitteiden virhemarginaaliin. Koemittausten tulosten käsittelyssä olisi voinut tehdä pientä korjausta referenssipisteiden paikassa, mutta tulosten vertailun kannalta oli parempi käsitellä tuloksia sellaisinaan. Mitattava tuote oli joka mittauksessa sama, joten referenssipisteet eivät muuttuneet. Catia ilmoittaa oletusarvoisesti mittaustulokset 0,001 mm:n tarkkuudella ja mittaustulokset kirjattiin ilman pyöristystä, vaikka laitteiden tarkkuuden kannalta epätarkempi esitystapakin riittäisi.



Kuva 21 Mittaustulosten vertailu tehtiin käyttäen rajatun alueen pisteitä.

6.1 Faron mittaustulokset

6.1.1 Tulosten vertailu Catiassa

Farolla tehtiin kaksi mittausta, joita analysoitiin Catiassa. Tuloksista toinen tallennettiin pistejoukkona ja toinen spline-viivoina. Molemmat mittaukset tehtiin mitta-pääpallolla, jonka halkaisija oli 3 mm. Farosta saatu pistejoukko oli skaalautunut 25,4-kertaiseksi alkuperäiseen nähden, joten se oli skaalattava Catiassa takaisin alkuperäisen kokoiseksi. Spline-muodossa tallennetussa tuloksessa skaalausongelmaa ei ilmennyt. Mittauspisteitä oli pistejoukossa noin 180 ja spline-tuloksessa noin 160 kappaletta (liite 9).

6.1.2 Tulosten vertailu mittalaitteen tietokoneella

Farolla suoritettiin mittaus, jossa verrattiin mitattuja pisteitä suoraan 3D-mallin pintaan mittalaitteen tietokoneella. Mittalaitteelle syötettiin IGES-tiedosto, jonka

laite muunsi FCM-tiedostoksi. 3D-malli oli pintamalli, jossa oli vain muottipinta ja siinä olevat reiät. Vertailua varten laitteelle ilmoitettiin, mitä reikiä käytetään koordinaatiston luomisessa. Rei'iksi valittiin neljä nurkkapistettä. Tämän jälkeen mitattiin kyseisten reikien keskipisteet muottipinnan tasossa. Faro ilmoitti jokaiselle pisteelle poikkeaman mallin vastaavasta pisteestä. Koordinaatiston luomiseen on kaksi vaihtoehtoa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa luodaan koordinaatisto siten, että yksi piste on origo ja toinen piste sen kautta kulkevalla akselilla. Loput pisteet poikkeavat jonkin verran koordinaatiston akseleilta. Toinen vaihtoehto on muodostaa koordinaatisto kaikkien pisteiden kautta. Näin toimittaessa Faro näyttää jokaiselle pisteelle eron mallin pisteistä. Toisin sanoen laite sijoittaa koordinaatiston kulkemaan mahdollisimman läheltä jokaista pistettä.

Ensimmäisessä mittauksessa mallin pinta muuttui alkuperäisen peilikuvaksi. Tämä johtui siitä, että suorakulmion muotoisen muotin nurkkapistheet olivat niin symmetrisesti asetettu, että mittalaite ei erota nurkkia toisistaan, vaan valitsee pinnan suunnan sattumanvaraisesti. Mittaustapahtumassa virhe huomattiin vasta mittauspisteiden vertailua aloitettaessa. Silloin pisteet eivät osuneet halutun pinnan lähelle. Virhe korjattiin mittaamalla kohdistuspisteet uudelleen ja tarkkailemalla pisteiden oikeaa järjestystä sekä muotin asentoa niihin nähden.

Mittalaitteella tehtävä vertailu tehtiin mittaamalla yksittäisiä pisteitä rajatulta pinnalta. Koemittauksessa mitattiin noin 30 pistettä tulosten käsittelyä varten rajatulta alueelta (liite 10). Tästä tuloksesta on mittapallon halkaisija kompensoitu pois jo mittaussvaiheessa. Rajatulta pinnalta mitattujen pisteiden suurimmaksi ja pienimmäksi arvoksi saatiin 0,139 mm ja 0,054 mm. Mitattujen tulosten keskiarvo oli 0,100 mm.

6.2 Leican mittaustulokset

Leicalla tehtiin yksi mittausta, jonka tuloksia käsiteltiin Catiassa. Mittalaitteen tietokoneella tehtävä vertailu ei onnistunut, koska mitattavan muotin 3D-malli ei avautunut Leican tietokoneella. Catiassa tehdyn vertailun tulokseksi rajatulta pinnalta saatiin tässäkin mittauksessa suurin ja pienin arvo, sekä keskiarvo. Pisteitä oli yh-

teensä noin 90 kappaletta. Kaikki arvot olivat odotetun pinnan alapuolella, joten tulokset olivat arvoltaan negatiivisia. Suurin arvo oli - 0,093 mm, pienin - 0,207 mm ja keskiarvo - 0,144 mm.

6.3 Tulosten yhteenveto

Kaikista neljästä mittauksesta saadut tulokset kirjattiin ylös. Tuloksena saatiin jokaisesta mittauksesta joukko pisteitä saman rajatun pinnan alueelta (liite 9). Pisteistä etsittiin suurin ja pienin arvo sekä keskiarvo. Tulokset on esitetty mitatun pisteen ja 3D-mallin pintojen erona millimetreinä taulukossa 2. Faro Oma -sarakeessa on tulos mittauksesta, jossa vertailu tehtiin Faron tietokoneella. Faro Spline, Faro Piste, sekä Leica Piste -tulosten vertailu tehtiin Catiassa. Tuloksista huomataan, että Farolla mitatut tulokset ovat melko lähellä toisiaan, mutta poikkeavat selvästi Leican tuloksista. Tulosten poikkeaman syytä arvioitaessa on otettava huomioon mahdolliset koneistusvirheet ja mitattujen pisteiden paikat rajatulla pinnalla. Kaikki pisteet on otettu samalta rajatulta alueelta, mutta eri mittausten pisteet ovat kaikki eri kohdissa. Myös alueen reunoilla olevat pyöristyssäteet saattavat aiheuttaa poikkeamaa, jos jotkin mittauspisteet osuvat hieman niiden päälle.

Tuloksia käsiteltäessä pisteiden valinta on pyritty tekemään siten, että reuna-alueet on jätetty huomiotta. Koska kaikki pisteet ovat eri kohdissa, aiheuttavat paikalliset koneistusvirheet ja koneistuksen toleranssit myös poikkeamaa. Referenssipisteinä käytettyjen reikien laatu ja paikoitus ovat kriittisiä tulosten kannalta. Referenssireikien sisäpinnalla mahdollisesti olevat virheet ja reikien paikan virhe siirtävät koko mittaustulosta. Tuloksista voidaan havaita, että referenssipisteiden valmistuksessa ja käytössä on oltava erityisen huolellinen, sillä ne ovat ainoa yhteys mittaustuloksen ja tuotteen 3D-mallin välillä.

Taulukko 2 Koemittausten tulosten yhteenveto

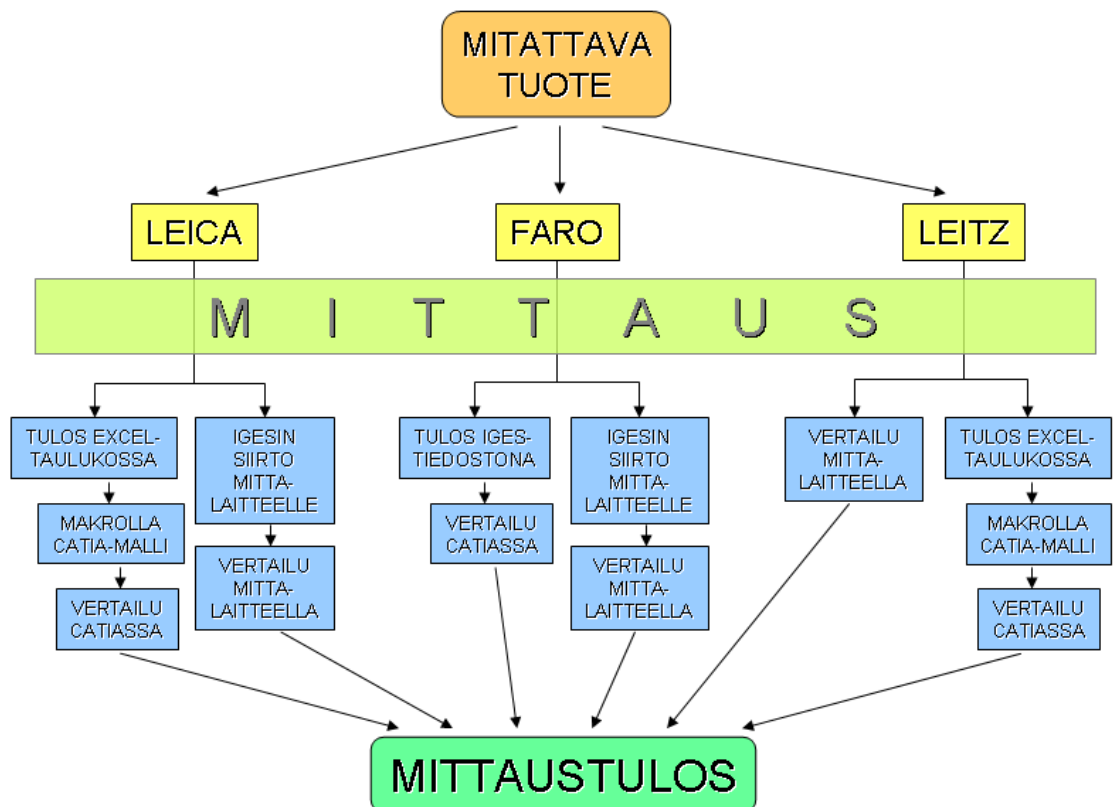
	Faro Oma	Faro Spline	Faro Piste	Leica Piste
Minimi	0,054	0,117	0,066	-0,207
Maksimi	0,139	0,194	0,119	-0,093
Keskiarvo	0,100	0,161	0,156	-0,144

7 TUTKIMUSTULOKSET

7.1 Toimintatapojen kartoitus

Patrialla käytössä olevien mittalaitteiden käytön eri vaihtoehdot saatiin kartoitettua hyvin. Jokaiselle mittalaitteelle on kaksi periaatteeltaan toisistaan poikkeavaa tulosten käsittelyvaihtoehtoa (kuva 22). Yleisemmin käytetty ja mielestäni tehokkaampi tapa on siirtää mittaustuloksena saatu pistejoukko Catia V5-ohjelmaan ja vertailla mittaustuloksia 3D-malliin. Toinen vaihtoehto on mittalaitteen tietokoneella 3D-malliin vertailu. Tässä vaihtoehdossa on usein ilmennyt ongelmia mallin siirron ja käsittelyn kanssa, joten sen käyttö on ollutkin vähäisempää.

VAIHTOEHDOT MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELYYN



Kuva 22 Vaihtoehdot mittaustulosten käsittelyyn

Mittalaitteiden käyttäjät ovat saaneet aikanaan koulutusta mittalaitteiden käyttöön ja opiskelleet lisää käyttämällä laitteita. Mittaajat osaavat käyttää mittalaitteiden

keskeisimpiä toimintoja, eikä ole tarkoituksenmukaista tai taloudellisesti kannattavaa alkaa opiskella laitteiden kaikkia pienimpiä yksityiskohtia. Joidenkin ominaisuuksien tarkempi hallinta saattaisi kuitenkin helpottaa mittausta.

7.2 Mittausten ongelmat

Työn kuluessa ja erilaisia koemittauksia tehtäessä havaittiin erilaisia ongelmia, joita voidaan kuitenkin välttää kun tiedetään niiden olemassaolo ja tyyppi. Ongelmat eivät ole usein kovin vakavia mittaustulosten kannalta, mutta voivat aiheuttaa päänvaivaa jos asiasta ei ole tietoinen. Työtä tehdessä havaittiin kolme erilaista ongelmaa, jotka johtuvat mittauslaitteiden ohjelmistoista.

Ensimmäinen ongelma esiintyi Faron mittaustuloksen skaalauksessa. Kun mittaustulos siirrettiin Catiaan, oli se skaalautunut 25,4-kertaiseksi. Tämä ongelma on esiintynyt usein aikaisemminkin ja se ilmenee täysin satunnaisesti. Skaalausvirheen syytä on vaikea määrittää, mutta sen vaikutus on helppo korjata Catiassa skaalamalla tulosjoukko 1/25,4-kertaiseksi, jolloin tulos vastaa mitattavan kappaleen koosta.

Toinen ongelma oli Faron tietokoneelle siirrettäessä pintojen vääristyminen tai katoaminen. Vääristyneen tai puuttuvan pinnan korjaamiseen ei ole nykyisillä ohjelmistoilla löydetty ratkaisua. Faron tietokoneelle siirrettäessä IGES-mallin pinta muuntuu useiksi pieniksi pintalapuiksi, joista osa katoaa tai muuttuu virheellisiksi. Kyseinen ongelma esiintyi Farolla tehdyssä koemittauksessa. Koemittauksessa pintojen puuttuminen ei merkittävästi haitannut, mutta valmistukseen käytettävän muotin tai osan mittaamisessa pintojen puute tai virheellisyys estää mittavertailun Faron tietokoneella. Jatkossa tämänkaltaisten ongelmien välttäminen on mahdollista, jos hankitaan Faroon ohjelmisto, jolla voidaan Catian 3D-malleja muuntaa suoraan Faron käyttämiksi FCM-tiedostoiksi. Samankaltainen ongelma ilmeni Leican mittauksissa siirrettäessä IGES-mallia mittalaitteen tietokoneelle. Tiedostoa avattaessa ohjelma kaatui ja vaati uudelleen toimiakseen tietokoneen uudelleenkäynnistämisen. Kyseinen tiedosto ei avautunut useista avausyrityksistä huolimatta. Osasyynä tähän ongelmaan lienee Leican ohjelmisto, joka toimii vain Windows

2000 -käyttöjärjestelmän kanssa /3/. Vanhahko ohjelma ei aina ole yhteensopiva uusimpien Catia-ohjelman versioiden kanssa. IGES:n siirto Leican tietokoneelle olisi saattanut onnistua, jos malli olisi tehty vanhemmalla Catia V4 -ohjelmalla.

Kolmas havaittu ongelma oli pieni, ja se on helppo välttää mittaustavan valinnalla. Mittalaitteilla voidaan valita mittapääpallon säteen huomioon ottava kompensatio, jolloin mittaustulos näyttää suoraan mittauspisteen etäisyyden 3D-mallin pinnasta. Ongelmana kompensation käytössä on mitattavan kappaleen ja 3D-mallin eron suunta. Ratkaisu tähän ongelmaan on yksinkertainen: ei käytetä kompensatiota vaan vähennetään Catian mittaustuloksesta mittapääpallon säde. Näin ollen mittauspiste on pinnan alapuolella erotuksen ollessa negatiivinen ja päinvastoin.

7.3 Spline-tulos

Selkeä löytynyt helpotus mittaustulosten käsittelyyn oli Faron mittaustuloksen esittäminen spline-viivan muodossa silloin, kun tehdään mittaustulosten vertailua Catiassa. Spline-viivan käytöstä on hyötyä siten, että Catiassa sen käsittely on nopeampaa ja helpompaa sekä vaatii huomattavasti vähemmän koneen resursseja. Viivassa on sama määrä pisteitä kuin pistejoukossa, mutta Catia-mallin elementtien määrä on huomattavasti pienempi. Pistejoukossa on yleensä tuhansia pisteitä, mutta spline-viivoja on yhdessä mittaustuloksessa vain muutamia. Spline-viivan pisteitä pystytään vertaamaan mallin pintaan täysin samalla tavalla kuin pelkän pistejoukon pisteitäkin.

7.4 Mittauspisteet

Catiassa tapahtuva mittavertailu on mielestäni joiltain kohdin epämääräinen, koska pintojen vertailussa otetaan vain satunnaisia pisteitä pinnalta. Tällä menettelyllä kaikkia virheitä ei voida löytää. Mittalaitteella mitataan tuhansia pisteitä, mutta niistä verrataan korkeintaan muutamia satoja, joten pistettä mitataan liikaa tai niitä käytetään mallin vertailuun liian vähän. Mittauspisteiden vertailun pitäisi olla tarkempaa, eli mitatuista pisteistä useampia pitäisi käyttää hyödyksi. Toisaalta pinnassa olevat muotovirheet on helppo havaita silmämääräisesti, koska työvälineiden

pinnat ovat yleensä jouhevia ja sileitä. Näin ollen jokaisen pisteen tutkiminen ei ole tarpeellista. Mittausta tehtäessä ja mittaustuloksen käsittelyssä tulisi kiinnittää huomiota erityisesti kohtiin, joiden mitat ovat toiminnan ja asennuksen kannalta oleellisia ja joissa kappaleen muoto muuttuu. Kulmien pyöristyskohdat ja kappaleiden paksuusvaihtelukohdat ovat hyviä esimerkkejä tarkkailtavista muutoskohdista. Joissakin koneistuskiinnittimissä kappaleen muottipintaa vastaava pinta muodostuu pienistä pintalapuista, jolloin pinnan silmämääräinen tutkiminen on vaikeampaa, mutta niissä tapauksissa pinnan muoto ei enää vaikuta oleellisesti kappaleen pintaan, koska pinta on jo valmistettu toisella työvälineellä. Mittauspisteiden määrä ei vaikuta itse mittaustapahtuman nopeuteen, mutta suhteuttamalla sitä mitattavien pintojen kokoon voidaan hieman nopeuttaa tulosten käsittelyä Catiassa.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutkia mittalaitteiden käyttötapoja ja vertailla niitä toisiinsa sekä kehittää nykyisiä toimintatapoja tehokkaammiksi. Toimintatapojen ja mittaustulosten käsittelyn tutkiminen ja kartoittaminen onnistui hyvin. Uusien toimintatapojen löytäminen ja nykyisten kehittäminen osoittautui melko vaikeaksi. Tämä johtui siitä, että mittalaitteet ovat olleet käytössä jo jonkin aikaa ja niiden käyttöön on muodostunut rutiineja, jotka ovat osoittautuneet pääperiaatteiltaan toimiviksi. Toinen tärkeä syy on tuotannon kiireistä johtuva ajan puute. Jotta kehitystyötä voitaisiin tehdä tuloksellisesti, tarvittaisiin mittalaitteiden tutkimus- ja kehityskäyttöön reilusti enemmän aikaa nykyiseen verrattuna. Kehitystyön onnistumisen edellytyksenä olisi mittalaitteiden päivittäinen käyttö tai mittaamisen seuraaminen paikan päällä pidemmän aikaa. Kehitystä tehtäessä pitäisi päästä suorittamaan koemittauksia erilaisilla tuotteilla useaan kertaan, mutta nykyisillä aikatauluilla tämä ei ole mitenkään mahdollista eikä tarkoituksenmukaista.

Mittaustulosten käsittelyn ja mitattujen tuotteiden hyväksymiseen vaikuttavat erittäin olennaisesti kohdistus- eli referenssipisteiden paikat ja laatu. Tason, jolla reikä sijaitsee, ja reiän sisäpinnan tulisi olla mahdollisimman tarkasti koneistettuja. Mikäli referenssireikien kohdistuksessa tai niiden mittauksessa tapahtuu suurta virhet-

tä, on koko muu mittaus lähes käyttökelvoton. Pientä korjausta voidaan tehdä siirtämällä koko tulosjoukkoa, mutta kyseisessä tavassa on suuri riski hyväksyä käyttökelvoton tuote tuotannon käyttöön. Mittalaitteiden epävarmuus kertautuu helposti tulosten vertailussa, jos referenssipisteiden valmistuksessa tai mittauksessa on vähänkin epävarmuutta. Referenssipisteiden käytön sijaan voitaisiin harkita jonkinlaista mittaustuloksen kokonaisvaltaista kohdistamista tuotteen 3D-malliin, jolloin mittaustuloksen kohdistus ja paikkansapitävyys eivät olisi vain muutaman reiän tai pisteen varassa. Kokonaisvaltaisemman kohdistusmenetelmän kehittämiseen ja tutkimiseen ei tämän tutkintotyön laajuus riittänyt ja se jää tulevaisuuden kehityskohdeksi.

Mittalaitteilla tapahtuvan tulosjoukon vertailu tuotteen 3D-malliin on kokemusten mukaan epävarmaa ohjelmistojen toimivuuden kannalta. Parannusehdotuksena on, että laitteiden ohjelmistoja päivitetäisiin ja näin voitaisiin tehdä joidenkin tuotteiden mittavertailua suoraan mittalaitteilla. Joissakin tapauksissa tällainen vertailu voisi toimia paremmin verrattuna tietojen vertailuun Catiassa. Tällöin saataisiin jo mittaustilanteessa tuloksia esiin ja mittaajallakin olisi heti käsitys mitatun tuotteen laadusta.

Työtä tehdessä selvisi itselleni erittäin hyvin Patrian mittalaitteiden käyttötavat sekä laitteiden käytössä ilmenevät ongelmat. Niiden olemassaolo ja laatu on ollut tiedossa mittaajilla ja tulosten käsittelijöillä, mutta mittaukseen tarkemmin perehtymättömille henkilöille saattaa aiheutua hankaluuksia. Toivonkin tästä tutkimuksesta olevan hyötyä jatkossa mittalaitteiden kanssa tekemisissä olevien henkilöiden työssä.

LÄHTEET

- 1 Andersson, Paul H – Tikka, Heikki, Mittaus- ja laatutekniikat. WSOY. 1997.
- 2 Halme, Lauri, Valmistustekniikkaluentojen aineisto. [luentokalvot].
- 3 Lehto, Raimo, mittausteknikko – Mörö, Ismo, mittausteknikko. Keskustelut 2007. Patria Aerostructures Oy. Halli.
- 4 Mittalaitteen käyttöohjekirja, Faro Platinum Arm.
- 5 Mittalaitteen käyttöohjekirja, Leica Tracker.
- 6 Patria Oyj. [www-sivu]. [viitattu 11.10.2007] Saatavissa: http://www.patria.fi/index2_fin.htm.
- 7 Prusila, Kimmo, Koordinaatti-mittauskoneen hankinta. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 1985.
- 8 Saarela, Olli – Airasmaa, Ilkka – Kokko, Juha – Skrifvars, Mikael – Komppa, Veikko, Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys. Helsinki 2003.
- 9 Valaranta, Pasi, työvälinesuunnittelija. Keskustelut 2007. Patria Aerostructures Oy. Halli.

LIITTEET

- 1 Referenssipisteiden huomioiminen suunnittelussa
- 2 Pisteiden luonti 3D-malliin
- 3 Nollakoordinaattipisteiden luonti 3D-malliin
- 4 Koordinaatiston luonti nollapisteisiin
- 5 Mitatut pisteet ja 3D-malli eri koordinaatistoissa
- 6 Pistejoukon kohdistus 3D-malliin koordinaatiston avulla
- 7 Pistejoukko ja 3D-malli kohdistettuna
- 8 Pisteiden etäisyyden mittaaminen 3D-mallin pinnasta
- 9 Koemittausten tulostaulukko
- 10 Faron mittaustulos vertailtuna mittalaitteen koneella

Isoranta 07.12.2005

Työvälineiden mittauksen huomioiminen suunnittelussa.

Yleistä

Työvälineet, jotka tullaan mittaamaan Laser Trackerillä tarvitsevat selkeät elementit, joista mittauskoordinaatisto voidaan luotettavasti muodostaa.

Koordinaatiston luonnin kannalta olisi hyvä, että työvälineessä on vähintään 3 mieluiten 4 reikää mahdollisimman etäällä toisistaan, jolloin mittausalue olisi näiden sisässä. Reiät tulee sijoittaa siten, että vähintään 3 reikää on samanaikaisesti Trackerin "näkökentässä". Reikien sijoittamiselle ei ole muita vaatimuksia.

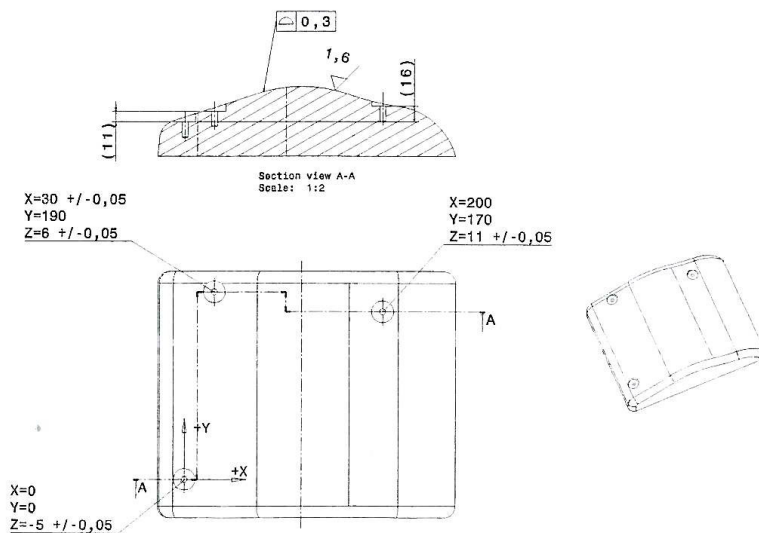
Koordinaatiston luontiin käytettävät reiät on "toleroitava", koska koordinaattireikien poikkeama nimellimitasta aiheuttaa samansuuruisen virheen mittatuloksiin. Toleranssien suuruus on oltava suhteessa mittavan kappaleen toleransseihin (Harkittava tapauskohtaisesti). Katso esim.1

Toivomukset koordinaattireikien mitoille työkalussa:

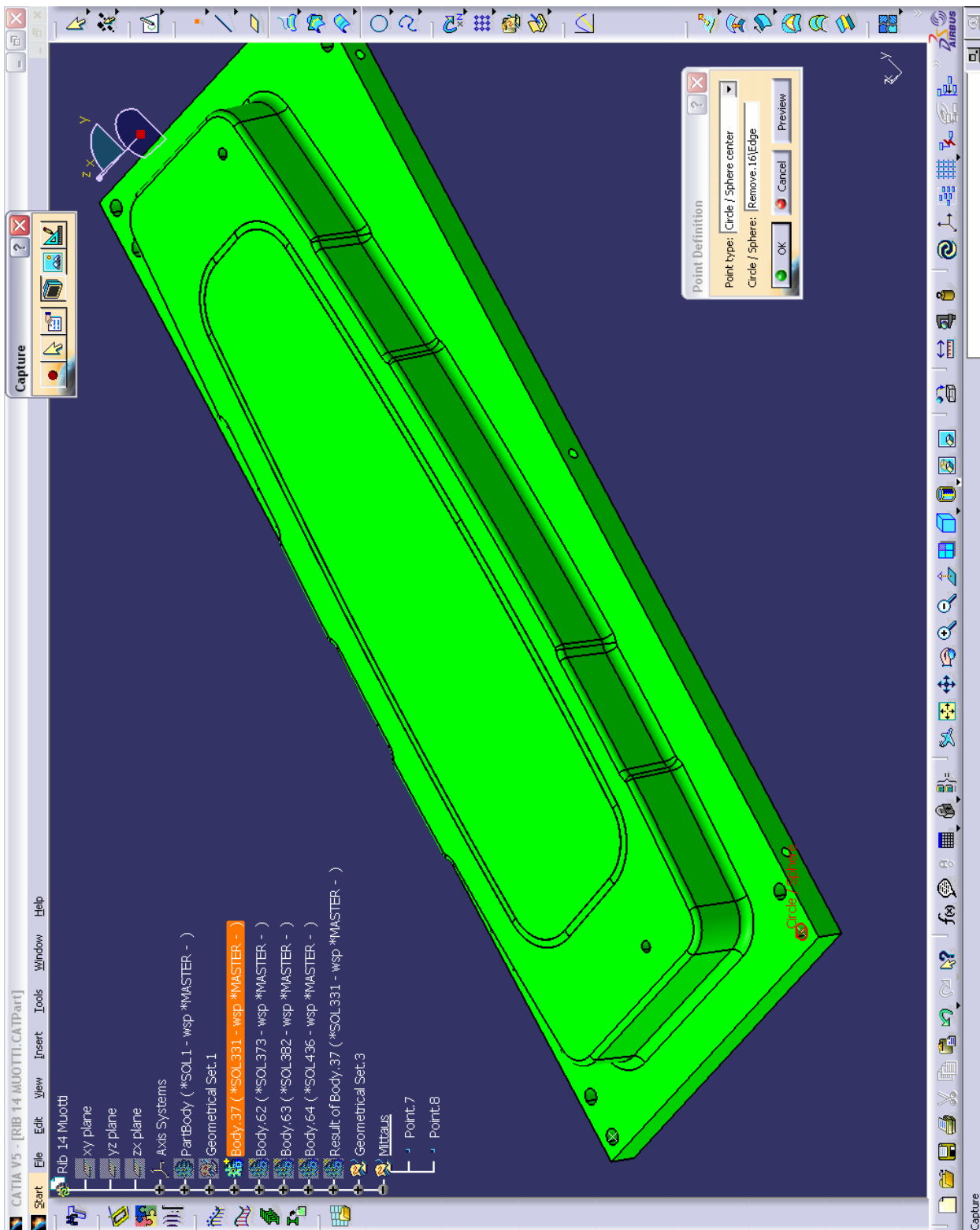
Halkaisija	Syvyys	Target Offset (Pallo 1/2")	Huom.
4H7 / F7	12	10/30	F7 on Poraholkin Din172 ja Din179 reiän toleranssi
6H7 / F7	12	10	
8H7 / F7	12	10	
10H7 / F7	12	10/30	
14H7 / F7	12	10/30	
6,35H7 / F7	12	12,7	

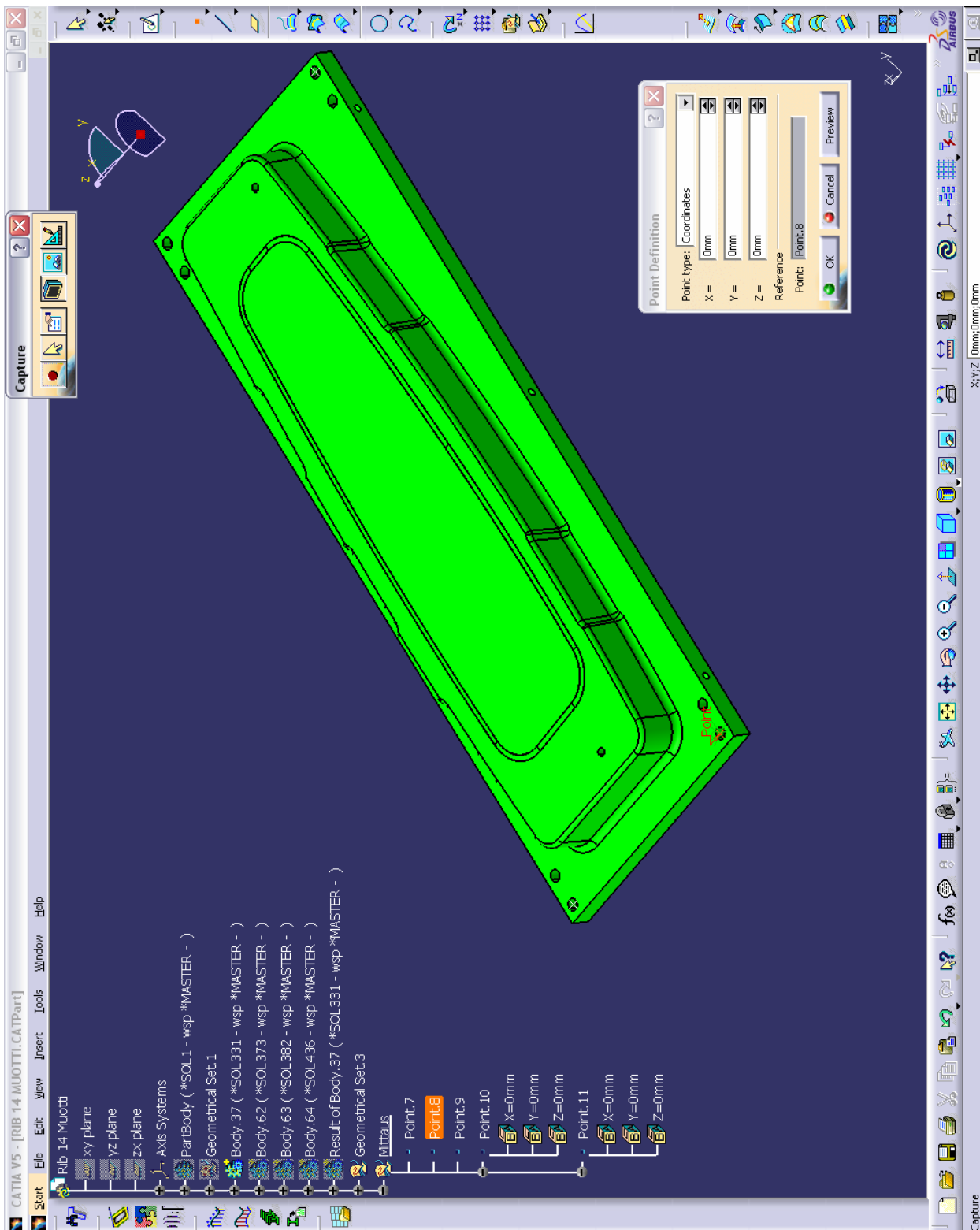
Valitsemalla koordinaattireikien halkaisijat ylläpuolella olevasta taulukosta, vältetään tekemästä uusia välikappaleita, jotka vaikuttavat mittaustarkkuuteen ja kustannuksiin.

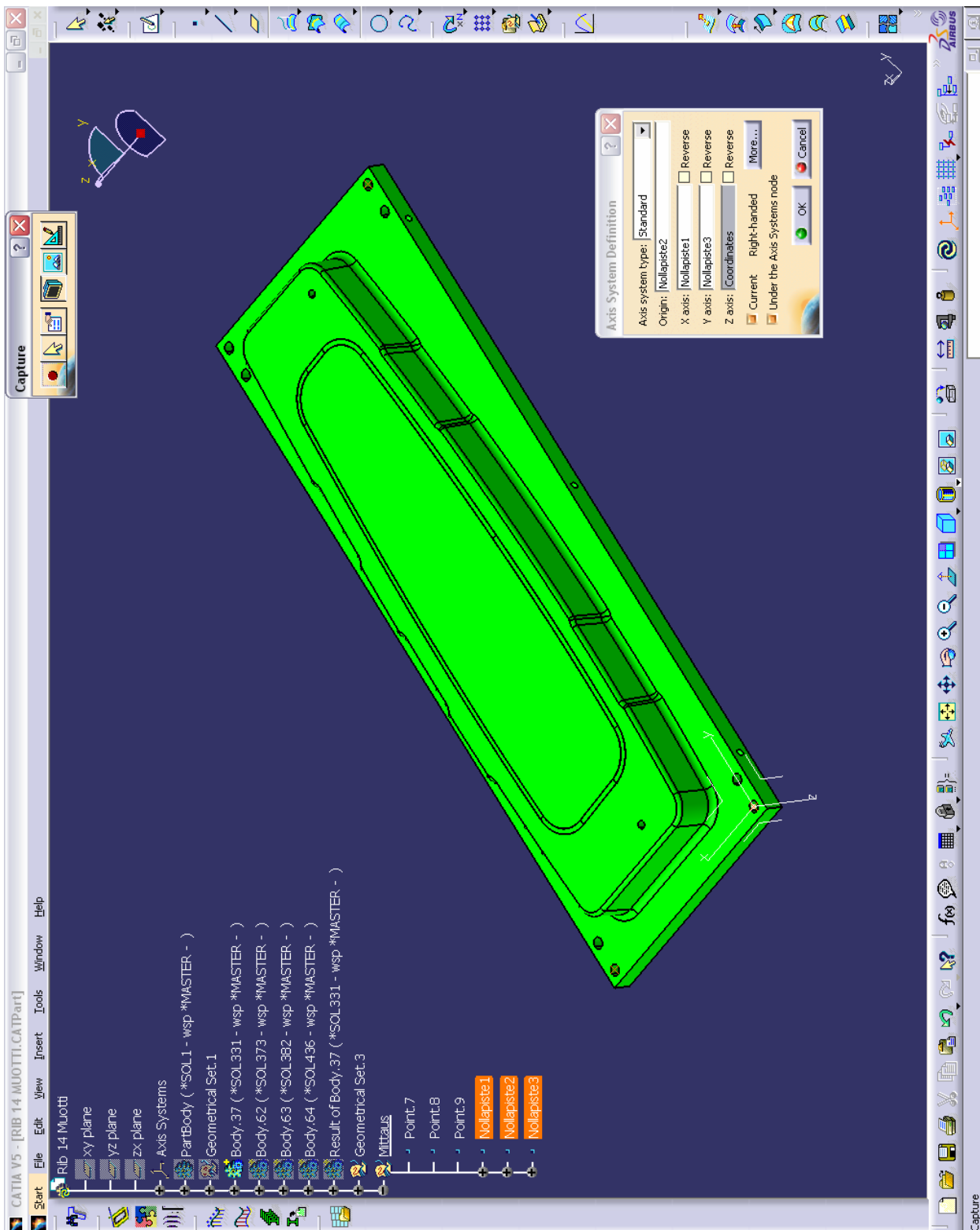
Esim.1

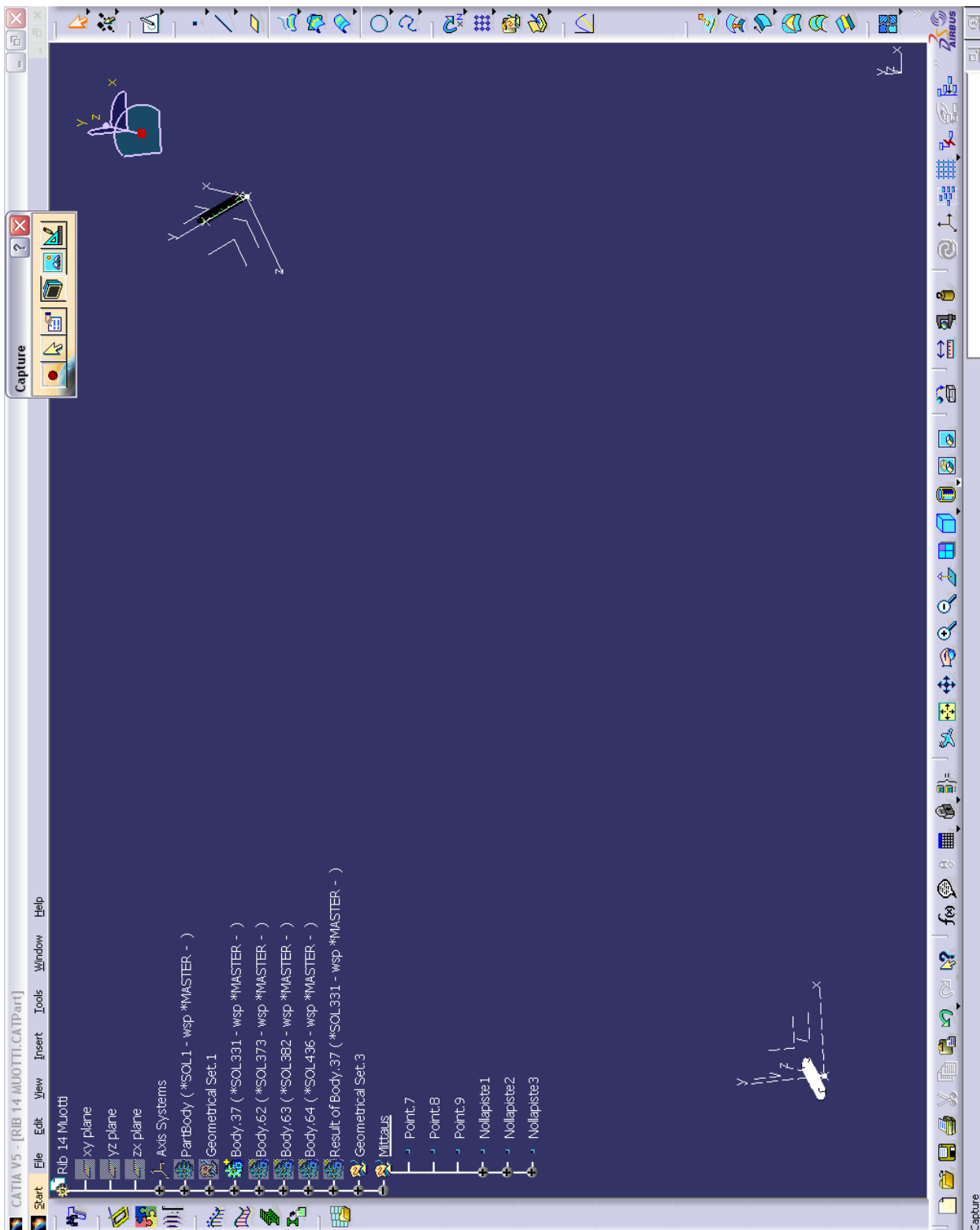


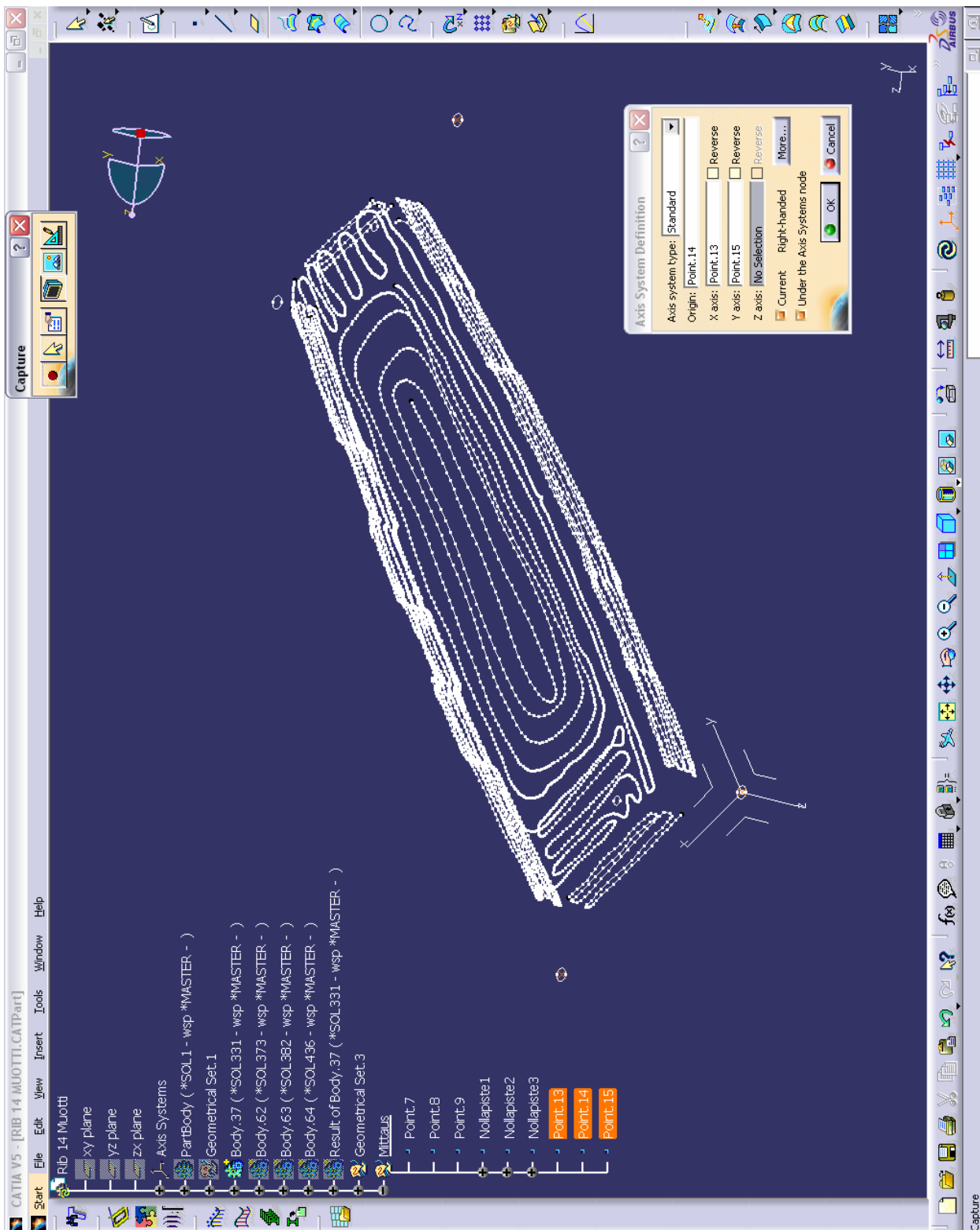
Esimerkissä 1 olevat 3 tasouputusta ei tarvitse olla samansuuntaisia, niiden suunta ja paikka on oltava valittujen toleranssien rajoissa.

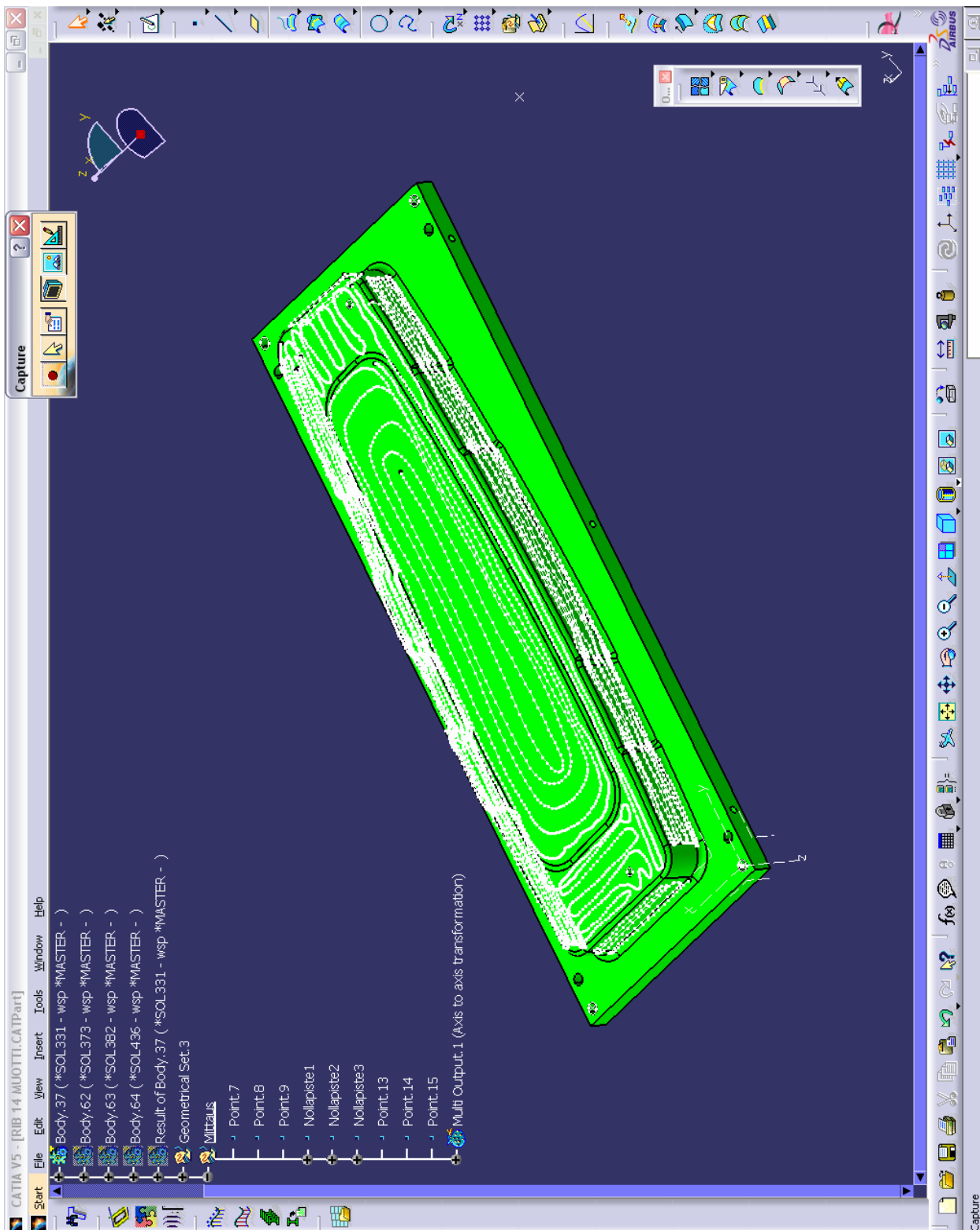


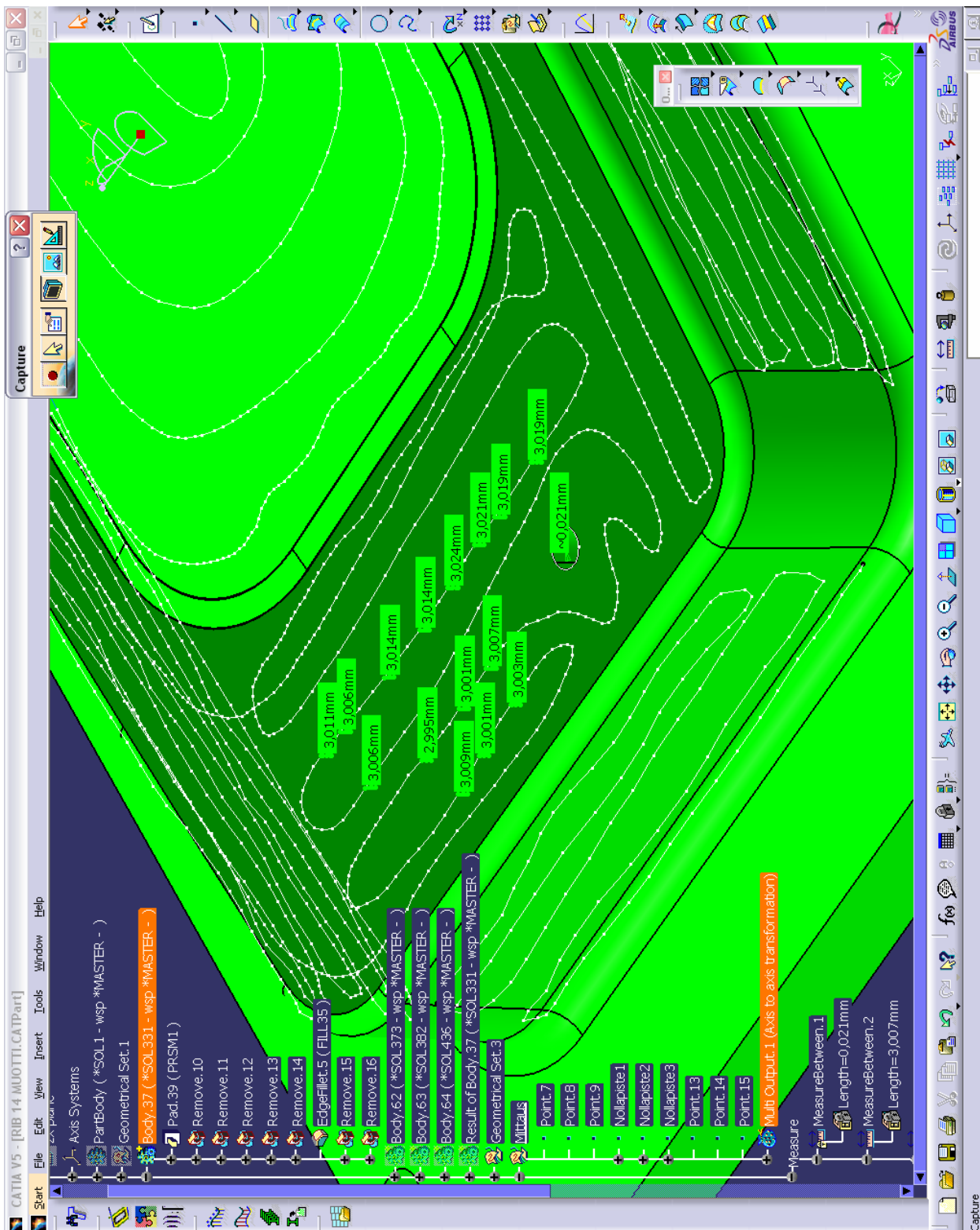












	Faro Oma	Faro Spline	Faro Piste	Leica Piste
	0,054	0,117	0,066	-0,207
	0,056	0,120	0,071	-0,204
	0,062	0,122	0,075	-0,196
	0,065	0,129	0,075	-0,193
	0,067	0,131	0,079	-0,186
	0,084	0,131	0,079	-0,186
	0,086	0,131	0,080	-0,184
	0,088	0,131	0,082	-0,184
	0,089	0,132	0,083	-0,183
	0,092	0,133	0,083	-0,180
	0,095	0,133	0,083	-0,179
	0,095	0,133	0,083	-0,177
	0,101	0,134	0,084	-0,176
	0,101	0,135	0,086	-0,176
	0,102	0,135	0,086	-0,173
	0,102	0,135	0,086	-0,172
	0,102	0,135	0,087	-0,171
	0,104	0,135	0,088	-0,168
	0,113	0,137	0,088	-0,163
	0,117	0,137	0,089	-0,163
	0,121	0,138	0,089	-0,162
	0,122	0,138	0,089	-0,161
	0,124	0,139	0,090	-0,160
	0,127	0,139	0,090	-0,160
	0,128	0,139	0,090	-0,160
	0,131	0,140	0,091	-0,160
	0,133	0,140	0,091	-0,157
	0,139	0,141	0,091	-0,157
KA	0,100	0,142	0,091	-0,155
MAX	0,139	0,142	0,091	-0,152
MIN	0,054	0,142	0,093	-0,152
		0,142	0,093	-0,151
		0,144	0,093	-0,148
		0,145	0,096	-0,147
		0,146	0,097	-0,146
		0,147	0,097	-0,146
		0,152	0,101	-0,145
		0,153	0,102	-0,145
		0,154	0,103	-0,145
		0,154	0,103	-0,144
		0,154	0,103	-0,143
		0,154	0,104	-0,142
		0,154	0,104	-0,142
		0,154	0,104	-0,142
		0,155	0,104	-0,142
		0,155	0,105	-0,142
		0,156	0,106	-0,140
		0,156	0,107	-0,137
		0,156	0,107	-0,137
		0,156	0,107	-0,137
		0,156	0,107	-0,136
		0,157	0,107	-0,136
		0,157	0,108	-0,132
		0,157	0,108	-0,130
		0,157	0,108	-0,130
		0,157	0,109	-0,129
		0,158	0,110	-0,129
		0,158	0,110	-0,127
		0,159	0,111	-0,127
		0,159	0,111	-0,126
		0,160	0,111	-0,126
		0,160	0,111	-0,125
		0,161	0,111	-0,125
		0,161	0,111	-0,124
		0,161	0,111	-0,123
		0,161	0,112	-0,123
		0,161	0,112	-0,122
		0,161	0,113	-0,122
		0,161	0,113	-0,121
		0,162	0,114	-0,119
		0,162	0,114	-0,118
		0,162	0,114	-0,117
		0,162	0,114	-0,116
		0,162	0,114	-0,114
		0,163	0,115	-0,113
		0,163	0,115	-0,113
		0,163	0,115	-0,112
		0,164	0,115	-0,110
		0,164	0,115	-0,110
		0,164	0,116	-0,107
		0,165	0,116	-0,101
		0,165	0,116	-0,101
		0,165	0,117	-0,097
		0,165	0,117	-0,094
		0,165	0,117	-0,093
		0,166	0,117	KA -0,144
		0,166	0,118	MAX -0,093
		0,166	0,120	MIN -0,207
		0,166	0,121	
		0,167	0,122	

Faro Oma	Faro Spline	Faro Piste	Leica Piste
	0,167	0,122	
	0,167	0,122	
	0,167	0,123	
	0,168	0,124	
	0,168	0,124	
	0,168	0,124	
	0,168	0,124	
	0,169	0,124	
	0,169	0,125	
	0,169	0,126	
	0,169	0,126	
	0,169	0,126	
	0,170	0,127	
	0,170	0,129	
	0,170	0,130	
	0,170	0,130	
	0,170	0,130	
	0,170	0,130	
	0,171	0,130	
	0,171	0,131	
	0,171	0,131	
	0,171	0,131	
	0,172	0,131	
	0,172	0,132	
	0,172	0,132	
	0,172	0,132	
	0,172	0,132	
	0,172	0,132	
	0,172	0,132	
	0,173	0,133	
	0,173	0,133	
	0,173	0,133	
	0,173	0,133	
	0,174	0,133	
	0,174	0,134	
	0,175	0,134	
	0,175	0,135	
	0,175	0,135	
	0,176	0,136	
	0,176	0,136	
	0,176	0,136	
	0,177	0,136	
	0,177	0,136	
	0,177	0,137	
	0,177	0,137	
	0,177	0,137	
	0,177	0,137	
	0,178	0,137	
	0,178	0,138	
	0,178	0,139	
	0,179	0,139	
	0,179	0,139	
	0,179	0,139	
	0,180	0,139	
	0,180	0,140	
	0,181	0,140	
	0,181	0,140	
	0,182	0,141	
	0,182	0,141	
	0,183	0,141	
	0,183	0,141	
	0,184	0,141	
	0,184	0,141	
	0,185	0,141	
	0,187	0,141	
	0,190	0,141	
	0,194	0,142	
	0,194	0,142	
	0,194	0,142	
	KA	0,161	0,142
	MAX	0,194	0,142
	MIN	0,117	0,143
			0,143
			0,143
			0,144
			0,145
			0,145
			0,145
			0,145
			0,146
			0,146
			0,147
			0,147
			0,147
			0,147
			0,147
			0,148
			0,149
			0,149
			0,151
			0,152
			0,152
			0,152
			0,156
		KA	0,119
		MAX	0,156
		MIN	0,066

